

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

Université Mohamed Khider – Biskra

Faculté des Sciences et de la technologie

Département : de génie civil et hydraulique

Réf :.....



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

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

**Option : Modélisation des matériaux et structures**

**ETUDE ET MODELISATION DU COMPORTEMENT  
DYNAMIQUE DES STRUCTURES EQUIPEES DE  
DISSIPATEURS D'ENERGIE**

Présenté par :

**RAIS Souâd**

**Soutenu publiquement le 19 janvier 2012**

**Devant le jury composé de :**

**Président : Mr MELLAS Mekki Prof Université de Biskra.**

**Directeur de mémoire : Mr OUNIS Abdelhafid MC Université de Biskra.**

**Examineur : Mr CHEBILI Rachid Prof Université de Biskra.**

**Examineur : Mr MEZGHICHE Bouzidi MC Université de Biskra.**

**Examineur : Mr HAMADI Djamel MC Université de Biskra.**

## *Dédicace*

*A mes enfants*

*A mes parents*

*A mon mari*

*A mes frères*

*A mes sœurs*

*Qui m'ont tous soutenue*

## ***REMERCIEMENTS***

*Tout d'abord, je remercie Allah, le tout grand puissant de m'avoir donné la force, le courage, la patience 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 manifesté durant son encadrement tout le long de la réalisation de ce mémoire.*

*Je tiens aussi à remercier vivement et sincèrement mon enseignant **Dr. MEFTAH Fekri** qui m'a beaucoup aidée et qui nous a appris que le chemin de la rigueur finit par donner ses fruits.*

*Je tiens aussi à remercier vivement mes collègues **KAAB Mohamed Zohaïr** et **ATHAMNIA Brahim** pour toutes leurs orientations et leur patience afin de réaliser ce travail.*

*Je tiens à remercier Monsieur **Dr MELLAS Mekki**, mon enseignant et président de jury, qui m'a fait le grand honneur de présider ce jury.*

*Je tiens à remercier aussi Messieurs **Dr. MEZGHICHE Bouzidi**, **Dr. CHEBILI Rachid** et **Dr. HAMADI Djamel**, qui m'ont fait l'honneur d'examiner mon travail.*

*Je saisis aussi l'occasion pour rendre hommage à tous mes enseignants auprès desquels j'ai reçu ma formation.*

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

## ملخص

إن فلسفة التصميمات المضادة للزلازل مبنية على مبدأ توفير المقاومة الضرورية للمبنى من أجل أن يتصدى للقوى الجانبية الناتجة عن الزلازل، مع الحرص على ألا يتجاوز الضرر المستوى المسموح به. هذه الفكرة حديثة و كذلك فكرة تزويد المباني بمعدات كمبددات الطاقة و العوازل الزلزالية.

الهدف من هذا البحث هو دراسة تأثير أجهزة تبديد الطاقة مثل ADAS (التخميد و الصلادة المضافين) على السلوك الديناميكي للمباني تحت الخصائص الزلزالية على أساس معايير معينة مثل الطاقة الداخلة إلى المبنى، و الطاقة المبددة واستجابة الهياكل مقيمة عن طريق التشوه الحركي و قوى القص في القاعدة

**الكلمات المفتاحية:** المنشآت المضادة للزلازل، مبددات الطاقة، ديناميكية، تمثيل غير خطي.

## Résumé

La philosophie de la conception parasismique commune a été basée sur l'idée de fournir, à la structure, la résistance nécessaire pour supporter les forces latérales induites par les séismes, ceci sans dépasser les dommages de niveau acceptable. Cette idée demeure d'actualité avec l'incorporation de nouveaux concepts tels que les dissipateurs d'énergie et l'isolation à la base.

L'objectif de cette recherche est d'étudier l'influence des dispositifs de dissipation d'énergie de type ADAS (Added Damping and Stiffness) sur le comportement dynamique des édifices sous sollicitations sismiques présentant des caractéristiques dynamiques différentes en s'appuyant sur certains critères tels l'énergie d'entrée dans le système, l'énergie dissipée et la réponse des structures évaluée au moyen des déplacements et cisaillement à la base.

**Mots-clés:** construction parasismique, dissipateur d'énergie, dynamique, modélisation non linéaire.

## Abstract

The philosophy of the common seismic design was based on the idea to provide the structure, the necessary strength to withstand the lateral forces induced by earthquakes, this without exceeding the acceptable level of damage. This idea is still valid with the incorporation of new concepts such as energy dissipation and the base isolation.

The objective of this research is to study the influence of energy dissipation devices like ADAS (Added Damping and Stiffness) on the dynamic behavior of buildings under seismic loads with different dynamical characteristic based on certain criteria such as energy input into the system, the energy dissipated and the response of structures evaluated by means of displacement and base shear.

**Key-words:** seismic design, energy dissipation devices, dynamic, non-linear models.

# Table des matières

Remerciements .....	I
Résumé .....	II
Table des matières .....	III
Liste des symboles et des notations.....	V
Liste des figures .....	VII
Liste des tableaux .....	X
<b>Introduction générale</b> .....	01
<b>Chapitre I : Dispositifs de réduction de la réponse sismique</b>	
I.1. Introduction .....	07
I.2. Dispositifs de contrôle passif .....	08
I.2.1. Dissipateurs d'énergie .....	09
a) Dissipateurs d'énergie métalliques (hystérétiques) .....	10
a-1) Les dispositifs considérés dans cette étude .....	13
A) Dispositif ADAS .....	13
B) Dispositif TADAS .....	16
b) Amortisseurs à friction .....	17
c) Amortisseurs viscoélastiques .....	19
d) Amortisseurs à fluide visqueux .....	21
I.2.2. Isolateurs à la base .....	22
I.2.3. Oscillateurs de résonance .....	24
I.2.4. Contrôle passif avec systèmes inertiels couplés .....	26
a) amortisseurs à masse accordée TMD .....	27
b) amortisseurs à liquide accordée TLD .....	28
I.2.5. Câbles de précontrainte .....	28
I.3. Dispositifs de contrôle actif .....	28
I.3.1. Masse active .....	29
<b>Chapitre II : Zonage sismique et effet de site</b>	
II.1. Introduction .....	32
II.2. Les ondes sismiques .....	33
II.3. La sismicité en Algérie .....	36
II.4. Le zonage sismique .....	37
II.4.1. Classification des zones sismiques .....	38
II.4.2. Caractéristiques de la sismicité algérienne .....	39
II.4.3. Aléa sismique régional .....	40
II.5. Le microzonage sismique .....	40
II.6. Effet de site .....	41
II.7. Spectre de réponse .....	44
II.7.1. Détermination des spectres de réponse .....	47
II.7.2. Utilisation des spectres de réponse .....	48
II.7.2.1. Utilisation d'un spectre de déplacement .....	49
II.7.2.2. Utilisation d'un spectre d'accélération .....	49
II.8. Types de spectre .....	51

II.9. Facteurs qui influent sur les spectres de réponse .....	53
II.10. Spectre de calcul .....	55
<b>Chapitre III : Modèle mathématique des systèmes avec dissipateur d'énergie</b>	
III.1. Introduction .....	57
III.2. Modèle élastique .....	57
III.2.1. Dissipateur d'énergie type ADAS .....	62
III.2.2. Dissipateur d'énergie type TADAS .....	64
III.3. Modélisation par analyse non linéaire .....	66
III.3.1. Rigidité effective du dissipateur .....	66
III.3.2. Méthodes de modélisation .....	67
III.3.2.1. Méthode de la diagonale équivalente .....	67
III.3.2.2. Méthode de l'élément axial équivalent .....	68
III.3.2.3. Méthodes rigoureuses .....	68
III.4. Modèles hystérétiques .....	69
- Le modèle bilinéaire .....	69
- Modèle de Takeda .....	71
III.5. Approche générale parasismique (Bilan énergétique) .....	73
III.6. Types d'analyses .....	74
III.7. Hypothèses d'analyse .....	75
<b>Chapitre IV : Influence des dissipateurs sur les structures de période courte</b>	
IV.1. Introduction .....	78
IV.2. Description de la structure .....	78
IV.3. Description du système de dissipation d'énergie .....	80
IV.4. Accélérogrammes d'analyse .....	80
IV.5. Coefficients sismiques .....	82
IV. 6. Comparaison des résultats .....	84
IV.6.1. Energies .....	84
IV.6.2. Comportement hystérétique des dispositifs ADAS .....	101
IV.6.3. Effort tranchant à la base .....	112
IV.6.4. Déplacements .....	121
IV.7. Interprétation des résultats .....	125
<b>Chapitre V : Influence des dissipateurs sur les structures de période longue</b>	
V.1. Introduction .....	128
V.2. Description de la structure .....	128
V.3. Description du système de dissipation d'énergie .....	131
V.4. Accélérogrammes d'analyse .....	131
V.5. Coefficients sismiques .....	131
V. 6. Comparaison des résultats .....	134
V.6.1. Energies .....	134
V.6.2. Comportement hystérétique des dispositifs ADAS .....	140
V.6.3. Effort tranchant à la base .....	153
V.6.4. Déplacements .....	157
V.7. Interprétation des résultats .....	160
<b>Conclusion générale</b> .....	162
<b>Références bibliographiques</b> .....	165

## *Listes des symboles et des notations*

ADAS: Added Damping and Stiffness

TADAS: Triangular- Added Damping and Stiffness

$E_I$  : Énergie sismique (Joule)

$E_S$  : Énergie de déformation élastique (Joule)

$E_K$  : Énergie cinétique, de mouvement (Joule)

$E_D$  : Énergie d'amortissement associée à l'amortissement modal de la structure (Joule)

$E_H$  : Énergie de ductilité (déformation inélastique) (Joule)

V : L'effort tranchant (KN)

$K_{\text{eff}}$  : La rigidité effective du dissipateur (KN.m)

$K_1$  : La rigidité élastique du dissipateur (KN.m)

$K_2$  : La rigidité post-élastique du dissipateur (KN.m)

$F_y$  : La limite d'élasticité du dissipateur (KN)

$C_s$  : Le coefficient de la réponse sismique

PGA : Accélération maximale du sol

D(t) : Déplacement du sol (m)

$\mu$  : Le rapport de ductilité

$F_y$  : La force nominale de plastification [KN]

$F_u$  : la force ultime de cisaillement [KN]

$\Delta_y$  : Le déplacement critique du système [m]

$\Delta_u$  : Le déplacement ultime du système [m]

m : masse de la structure (kg)

K : Raideur du système [N/m]

C : amortissement de la structure

E : Module d'élasticité dynamique [N/m<sup>2</sup>]

$F_1$  : Force de rappel élastique [N]

$F_2$  : Force de freinage [N]

G : Module de cisaillement dynamique [N/m<sup>2</sup>]

$S_d$  : déplacement spectrale (m)

$S_v$  : Vitesse spectrale (m/s)

$S_a$  : Accélération spectrale (m/s<sup>2</sup>)

T : période (s)

$V_P$  : Vitesse de propagation des ondes P (m/s)

$V_S$  : Vitesse des ondes S (m/s)

a(t) : Accélération de la masse par rapport au sol (m/s<sup>2</sup>)

f : Fréquence (hertz)

g : L'accélération de la gravité (m/s<sup>2</sup>)

$\zeta$  : coefficient d'amortissement

$\rho$  : densité du milieu [Ns<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>]

$\nu$  : coefficient de poisson

$\lambda$  : constante de lamé

$\gamma(t)$  : accélération du sol (m/s<sup>2</sup>)

$\Gamma(t)$  : force d'inertie [N]

$\omega$  : pulsation du système (radian/second)

$\omega_D$  : pseudo-pulsation (radian/second)

## *Liste des figures*

Figure 1.1: amortisseurs métalliques .....	12
Figure 1.2: amortisseur métallique de type ADAS .....	14
Figure 1.3: déformation du dispositif ADAS et sa boucle d'hystérésis .....	15
Figure 1.4: le dispositif TADAS et sa boucle d'hystérésis .....	17
Figure 1.5: Détails d'un système de calage en acier .....	17
Figure 1.6 : L'utilisation de la dissipation par friction chez Sumitomo .....	18
Figure 1.7: Différentes positions du dissipateur par friction .....	18
Figure 1.8 : amortisseur à friction .....	19
Figure 1.9: Amortisseur viscoélastique .....	20
Figure 1.10: Amortisseur à fluide visqueux .....	21
Figure 1.11: Différentes positions typiques des isolateurs à la base .....	23
Figure 1.12: Comportement d'une structure à base fixe et à base isolée .....	23
Figure 1.13 : Isolateurs de base .....	24
Figure 1.14: Exemples des différents types de TMD.....	27
Figure 1.15: Exemples des différents types de TLD .....	28
Figure 1.16: diagramme de contrôle actif .....	29
Figure 1.17: Schéma de comparaison entre (AMD) et (TMD) .....	30
Figure 2.1 : détail d'un séisme .....	33
Figure 2.2 : les ondes de volume .....	35
Figure 2.3 : les ondes de surface .....	36
Figure 2.4 : carte du zonage sismique algérien .....	38
Figure 2.5 : spectre de réponse en accélération .....	50
Figure 2.6 : forme simplifiée du spectre de réponse .....	51
Figure 2.7: spectre élastique .....	52
Figure 2.8 : Spectre de dimensionnement .....	53
Figure 2.9 : Influence de l'amortissement sur la réponse de la structure.....	54
Figure 2.10 : Influence de la période sur la réponse de la structure .....	55
Figure 2.11 : spectres de calcul .....	56
Figure 3.1 : Emplacement des dissipateurs d'énergie .....	59
Figure 3.2 : dissipateur métallique .....	60
Figure 3.3: Le comportement d'un dissipateur de type ADAS pendant un séisme .....	62
Figure 3.4 : Système ADAS ; géométrie et comportement .....	63
Figure 3.5 : Le comportement d'un dissipateur du type TADAS pendant un séisme .....	65
Figure 3.6 : Système TADAS ; géométrie et comportement .....	65
Figure 3.7 : Courbe effort-déformation d'un système avec comportement bilinéaire ....	67
Figure 3.8 : Modèle bilinéaire .....	70
Figure 3.9 : Modèle de Takeda .....	71
Figure 3.10 : Comportement cyclique du modèle de Takeda .....	72
Figure 4.1 : la structure étudiée :( vues en élévation, en plan, en 3D) .....	80
Figure 4.2 : Accélérogramme de la composante d'El Centro .....	81
Figure 4.3 : Accélérogramme de la composante de Yermo .....	81
Figures 4.4 à 4.9: Diagrammes des énergies absorbées par la structure sous El Centro	



et Landers pour des rigidités des dissipateurs (25%, 50% puis 75%) pour les différents coefficients sismiques .....	84 à 97
Figures 4.10 à 4.15 : Comparaison entre les deux paliers de niveau des diagrammes efforts-déformations d'un dissipateur ADAS, sous El Centro et Landers pour des rigidités des dissipateurs (25%, 50% puis 75%) pour les différents coefficients sismiques .....	102 à 112
Figures 4.16 à 4.21: variation des efforts tranchants dans la direction X sous El Centro et Landers pour des rigidités des dissipateurs (25%, 50% puis 75%) : Linéaire / 0.025C <sub>s</sub> , Linéaire / 0.050C <sub>s</sub> , Linéaire / 0.100C <sub>s</sub> , Linéaire / 0.150C <sub>s</sub> , e) Linéaire / 0.200C <sub>s</sub> .....	113 à 118
Figures 4.22 et 4.23: Comparaison des résultats des efforts tranchants pour les différents coefficients sismiques sous El Centro et Landers pour les différentes rigidités des dissipateurs .....	119 à 120
Figures 4.24 et 4.25 : variation des efforts tranchants dans la direction X sous El Centro et Landers pour une rigidité $K_{ADAS} = 75%$ : Linéaire / 0.025C <sub>s</sub> , Linéaire / 0.050C <sub>s</sub> , Linéaire / 0.100C <sub>s</sub> , Linéaire / 0.150C <sub>s</sub> , Linéaire / 0.200C <sub>s</sub> .....	122 à 123
Figures 4.26 et 4.27: Comparaison des résultats des déplacements pour les différents coefficients sismiques sous El Centro et Landers pour les différentes rigidités des dissipateurs .....	124 à 125
Figure 5.1 : la structure étudiée: (vues en élévation, en plan, en 3D) .....	130
Figures 5.2 et 5.3: Diagrammes des énergies absorbées par la structure sous El Centro et Landers pour une rigidité des dissipateurs $K_{ADAS} = 75%$ pour les différents coefficients sismiques .....	136 à 138
Figures 5.4 et 5.5: Comparaison entre les trois diagrammes efforts-déformations des trois dissipateurs ADAS installés dans la première, la deuxième et la troisième travée du premier et du cinquième niveau sous El Centro pour une rigidité $K_{ADAS} = 75%$ et pour le coefficient sismique 0,025C <sub>s</sub> .....	140 à 141
Figures 5.6 à 5.17 : Comparaison entre les cinq paliers de niveau des diagrammes efforts-déformations des dissipateurs ADAS, sous El Centro et Landers pour une rigidité $K_{ADAS} = 75%$ et pour les différents coefficients sismiques .....	142 à 153
Figures 5.18 et 5.19: variation des efforts tranchants dans la direction X sous El Centro et Landers pour une rigidité $K_{ADAS} = 75%$ : Linéaire / 0.025C <sub>s</sub> , Linéaire / 0.050C <sub>s</sub> , Linéaire / 0.100C <sub>s</sub> , Linéaire / 0.150C <sub>s</sub> , Linéaire / 0.200C <sub>s</sub> .....	154 à 155
Figure 5.20: Comparaison des résultats des efforts tranchants pour les différents coefficients sismiques et sous les deux excitations sismiques.....	156
Figures 5.21 et 5.22: variation des déplacements dans la direction X sous El Centro et Landers pour une rigidité $K_{ADAS} = 75%$ : Linéaire / 0.025C <sub>s</sub> , Linéaire / 0.050C <sub>s</sub> , Linéaire / 0.100C <sub>s</sub> , Linéaire / 0.150C <sub>s</sub> ,	

Linéaire / $0.200C_s$ .....	157 à 158
Figure 5.23: Comparaison des résultats des déplacements pour les différents coefficients sismiques et sous les deux excitations sismiques.....	159

## *Liste des tableaux*

Tableau 1.1 : Système de contrôle de la réponse sismique .....	08
Tableau 2-1 : Périodes caractéristiques des sites .....	43
Tableau 3-1: Propriétés géométriques, ADAS de cuivre [DE La Llera et al 2004] .....	63
Tableau 4-1: résultats du calcul statique .....	82
Tableau 4-2 : Les paramètres des deux dissipateurs .....	83
Tableaux 4-3 à 4-8: Comparaison des résultats des énergies pour les différents coefficients sismiques sous El Centro et Landers pour des rigidités des dissipateurs (25%, 50% puis 75%) .....	98 à100
Tableaux 4-9 et 4-10: Comparaison des résultats des efforts tranchants pour les différents coefficients sismiques sous El Centro et Landers pour des rigidités des dissipateurs .....	119 à120
Tableaux 4-11 et 4-12: Comparaison des résultats des déplacements pour les différents coefficients sismiques sous El Centro et Landers pour des rigidités des dissipateurs .....	123 à124
Tableau 5-1: résultats du calcul statique et valeurs des efforts tranchants .....	132
Tableau 5-2 : Les paramètres des dix dissipateurs .....	133
Tableaux 5-3 et 5-4: Comparaison des résultats des énergies pour les différents coefficients sismiques sous El Centro et Landers pour une rigidité des dissipateurs $K_{ADAS} = 75\%$ .....	138 à 139
Tableaux 5-5 et 5-6: Comparaison des résultats des efforts tranchants pour les différents coefficients sismiques et sous les deux excitations sismiques .....	156
Tableau 5-6: Comparaison des résultats des déplacements pour les différents coefficients sismiques et sous les deux excitations sismiques .....	159

**INTRODUCTION**  
**GENERALE**

## **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

Le séisme est la catastrophe naturelle la plus meurtrière et la plus destructrice. La prévention reste le moyen le plus efficace pour en atténuer les effets. Depuis une quinzaine d'années, les recherches effectuées dans le domaine du risque sismique ont fait des progrès significatifs.

Les séismes sont inévitables, mais la destruction des constructions n'est pas inévitable. Or plus de 90 % des pertes en vies humaines sont dues à l'effondrement de bâtiments

Lors d'un séisme, c'est d'abord l'écroulement des bâtiments qui fait le plus de victimes. Comprendre le comportement des ouvrages pendant un séisme, c'est apprendre à construire des édifices qui ne s'effondrent pas.

De nombreuses méthodes ont été proposées pour atteindre une performance optimale des structures qui sont soumises à une excitation sismique. L'approche classique exige que les structures puissent résister passivement aux séismes grâce à une combinaison de force, de la déformabilité et de l'absorption d'énergie. Le niveau d'amortissement de ces structures est généralement très faible et donc la quantité d'énergie dissipée au cours du comportement élastique est très faible. Au cours de forts séismes, ces structures se déforment bien au-delà de la limite élastique et demeurent intactes en raison de leur capacité à se déformer inélastiquement. Cette approche est connue sous le nom de construction résistant aux séismes ; elle est basée sur l'établissement de structures rigides de capacité de déformation suffisante pour passer à la gamme inélastique (structures ductiles). Les ingénieurs ont atteint cet objectif en combinant des systèmes structurels tels que les murs de contreventement, les portiques rigides et entretoisée en acier pour qu'ils soient capables de résister à des charges latérales dues à une excitation sismique. On considère les structures symétriques qu'on favorise par rapport aux structures irrégulières, puisque celles-ci présentent des problèmes d'excentricité. Le choix des matériaux à utiliser est également important car il existe des matériaux plus ductiles (comme l'acier) que d'autres. Le sol de fondation est également un facteur important super influant sur les caractéristiques dynamiques de la structure.

Les bâtiments japonais traditionnels, notamment les fameuses pagodes bouddhiques, respectaient déjà les principales règles de construction parasismique. Frêles mais résistantes, ces constructions utilisaient des structures en bois encastrées, qui offraient un équilibre parfait entre légèreté et solidité.

## Construire pour limiter les dégâts

La réduction de l'effet des mouvements du sol sur le bâtiment peut être obtenue de plusieurs manières :

- rendre le bâtiment assez « souple » pour que l'énergie des mouvements du sol ne le brise pas sous sa propre inertie ;
- monter le bâtiment sur des amortisseurs qui vont absorber une partie de l'énergie du mouvement du sol.
- Une troisième technique est aussi employée depuis peu : il s'agit de mettre en place un contrepoids au sommet du bâtiment, qui va se déplacer en réponse aux mouvements du sol de sorte que le centre d'inertie du couple (bâtiment, contrepoids) ne bouge pas lorsque le sol tremble.

## Bilan énergétique

Une approche alternative à l'atténuation des effets dangereux des séismes commence avec l'examen de la répartition de l'énergie dans une structure. Lors d'un événement sismique, une quantité finie de l'énergie est entrée dans une structure. Cet apport d'énergie est transformé en deux catégories d'énergie ; cinétique et potentielle qui doivent être soit absorbées ou dissipées (la chaleur). Cependant, il y a toujours un certain niveau d'amortissement inhérent qui retire l'énergie du système et réduit donc l'amplitude de la vibration jusqu'à ce que le mouvement cesse. La performance structurelle peut être améliorée si une partie de l'apport d'énergie peut être absorbée, et non par la structure elle-même, mais par un certain type de complément "dispositif".

Pour que le système structurel supporte l'excitation sismique l'énergie d'entrée  $E_I$  doit être absorbée par la somme des énergies cinétique, élastique d'amortissement et inélastique. Ou, autrement dit la capacité de la structure doit être supérieure à la demande sismique. En supposant que l'énergie sismique  $E_I$  a une valeur constante, Il est nécessaire, pour l'élaboration de constructions parasismiques optimale de dissiper une part de l'énergie totale introduite dans le système.

L'équation du bilan énergétique d'un système structurel soumis à une excitation sismique est donc la suivante:[1]

$$E_I = E_S + E_K + E_D + E_H \quad (1)$$

$E_I$  = énergie sismique

$E_S$  = énergie de déformation élastique

$E_K$  = énergie cinétique, de mouvement

$E_D$  = énergie d'amortissement associée à l'amortissement modal de la structure

$E_H$  = énergie de ductilité (déformation inélastique)

Au regard du bilan énergétique, le concepteur a plusieurs possibilités pour diminuer l'impact d'un séisme :

- **Minimiser l'énergie sismique transmise à la structure en**
  - Diminuant **la masse** (Construction légère, utilisation de matériaux ayant un bon rapport poids / résistance et composants non structuraux légers)
  
  - Diminuant **l'accélération** (modifier les raideurs donc la période et ainsi diminuer l'accélération (réponse de la structure). Concevoir une structure dont les périodes propres de vibrations sont très différentes de la période dominante du sol en cas de séisme (s'éloigner du risque de résonance) :
    - structures rigides (à murs porteurs en béton armé) sur terrains meubles
    - structures souples (poteaux, poutres) sur sols rocheux
    - utilisation d'appuis parasismiques (appuis très souples))
  
  - Evitant des distributions de masses ou de raideurs défavorables :
    - dissymétrie
    - masse en hauteur
    - irrégularités
  
- **Augmenter le stockage d'énergie mécanique** (potentielle et cinétique) c'est à dire augmenter la résistance mécanique dans le domaine élastique
  
- **Augmenter la dissipation d'énergie** c'est à dire augmenter l'amortissement externe (ajout de dispositifs d'amortissement) ou interne (plastification des matériaux)

Le concepteur doit donc jouer sur la résistance et la ductilité de son ouvrage et c'est ce qu'on fait traditionnellement dans l'analyse sismique des structures, qui est basée sur la 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 afin d'éviter les catastrophes, tout en permettant un certain degré de dommages à la structure, mais en évitant l'effondrement et la ruine. Ou bien il sera obligé d'intégrer 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.

L'objectif principal de ce mémoire est d'étudier l'influence des dispositifs de dissipation d'énergie de type hystérétique sur le comportement des bâtiments, en analysant comment les paramètres importants de limite d'élasticité des dissipateurs ainsi que le pourcentage de rigidité latérale agissent en rapport avec la rigidité latérale du bâtiment.

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

L'introduction mentionne l'influence de ces appareils sur l'analyse sismique des bâtiments et les considérations qui sont généralement prises en compte dans les codes de conception parasismique des structures. On définit les objectifs et la portée de cette recherche.

Le premier chapitre présente une revue de la littérature sur les différents mécanismes de dissipation d'énergie qui existent. Nous présentons brièvement la description et le fonctionnement de chacun de ces mécanismes. Nous étudions de manière particulière les dispositifs appelés "ADAS" (de l'anglais *Added Damping and Stiffness*, qui peut être traduit comme « Amortissement et Raideur Additionnels »).

Le deuxième chapitre donne une idée sur l'importance du type de sol sur le comportement sismique des bâtiments. Il mentionne comment les codes tiennent compte du terrain et discute des spectres de réponses qui représentent un outil important dans la conception parasismique.

Le troisième chapitre examine les différentes formes d'analyse des bâtiments avec dissipateurs, ainsi que les considérations et les limites de chacune de ces formes d'analyse. L'accent est mis sur l'analyse non linéaire, qui est utilisée dans cette recherche, en accordant une importance particulière sur le bilan énergétique du problème.



Le quatrième chapitre représente le premier cas d'étude qui est un bâtiment de quatre niveaux. Nous décrivons la construction, la géométrie et les propriétés dynamiques du bâtiment et présentons l'analyse de trois cas différents de rigidité latérale des dispositifs de dissipation d'énergie. L'analyse dynamique est réalisée en considérant deux enregistrements sismiques.

Le cinquième chapitre permet d'effectuer le second cas d'étude, qui est un bâtiment de vingt niveaux. Pour cette structure, on étudie un seul cas de rigidité latérale pour les dissipateurs d'énergie et on accorde une attention spéciale à trouver l'évolution de l'énergie des dissipateurs d'énergie lorsque ce bâtiment est soumis aux enregistrements considérés.

**Chapitre I :**  
**DISPOSITIFS DE REDUCTION**  
**DE LA REPONSE**  
**SISMIQUE**

## Chapitre I

### DISPOSITIFS DE REDUCTION DE LA REPONSE SISMIQUE

#### I.1. Introduction

Dans la phase de conception des ouvrages, lorsque le chargement sismique est prépondérant, il est avantageux de chercher à réduire les sollicitations (quand cela est techniquement possible et autorisé) avant même de dimensionner les éléments de structure.

La construction parasismique a pour principal objectif de prévenir l'effondrement des bâtiments. Le génie parasismique reste à ce jour le seul espoir de limiter le nombre et l'ampleur des dégâts causés par les séismes dans les zones urbaines. Il consiste à concevoir des immeubles et des maisons capables de se déformer, voire de s'endommager, sans s'effondrer, notamment en y intégrant un ou plusieurs dispositifs destinés à limiter la réponse du bâtiment à l'oscillation du sol.

Les méthodes innovantes de contrôle sont devenues, dans les dernières années, d'actualité importante. Elles permettent de projeter des structures pour résister, sans dégâts appréciables, à des actions dynamiques. Parallèlement on exige, pendant la construction, de protéger les structures par des systèmes de protection efficaces et en même temps fiables, en réduisant la réponse dynamique, à savoir réduire le déplacement, la vitesse et l'accélération qu'elles pourraient subir. [1 ; 2]

Parmi ces méthodes innovantes de contrôle, on peut distinguer quatre approches différentes:

- Système de contrôle passif
- Système de contrôle actif
- Système de contrôle semi-actif
- Système de contrôle hybride

On peut les schématiser dans le tableau suivant:

Système de contrôle de la réponse sismique			
Système de contrôle passif	Système de contrôle actif	Système de contrôle semi-actif	Système de contrôle hybride
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Isolateurs à La base</li> <li>- Dissipateurs d'énergie</li> <li>- Oscillateurs de résonance (TMD et TLD)</li> <li>- Câble de précontrainte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Masse active</li> <li>- Tendeurs actifs</li> <li>- Dispositifs de frottement actifs</li> <li>- Contreventements actifs</li> <li>- Oscillateurs actifs AMD</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dissipateurs à orifice variable</li> <li>- Dissipateurs à friction variable</li> <li>- Dissipateurs à fluides contrôlables</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Isolation active</li> <li>- Oscillateur hybride HMD</li> </ul>

Tableau 1.1 : Système de contrôle de la réponse sismique

## I.2. Dispositifs de contrôle passif

Le séisme génère des mouvements du sol qui imposent des forces d'inertie latérales sur les bâtiments ou les structures. Ces derniers vont répondre de façon dynamique (vibrer). L'amplitude de la vibration de la construction (ou structure) dépend essentiellement de quatre paramètres :

1. les caractéristiques du mouvement du sol dans le bâtiment (ou structure) site ;
2. la masse de la construction (ou structure) ;
3. la rigidité de la construction (ou structure) ;
4. l'amortissement de l'immeuble (ou structure).

Les systèmes passifs permettent de réduire considérablement la réponse du bâtiment aux sollicitations extérieures grâce à leurs propriétés dynamiques intrinsèques. Ces systèmes peuvent dissiper l'énergie de façon directe par friction par exemple ou de façon indirecte en contrebalançant les vibrations.

Les techniques passives d'amortissement des vibrations structurales utilisent l'intégration ou l'ajout de matériaux ou systèmes, possédant des propriétés d'amortissement, couplés à la structure de telle façon que les vibrations de la structure soient amorties passivement, c'est à dire, sans aucune intervention extérieure supplémentaire et sans apport d'énergie de

l'extérieur. Ces systèmes sont conçus pour dissiper une grande partie de l'énergie indésirable induite par le séisme. Le contrôle passif consiste à superposer à la structure un dispositif qui modifie la rigidité ou l'amortissement du système structural. [3]

Principalement, il existe deux catégories de systèmes passifs :

- Dissipateurs d'énergie
- Isolateurs à la base

Dernièrement, deux autres catégories sont apparues :

- Oscillateurs de résonance
- Câble de précontrainte

### **I.2.1. Dissipateurs d'énergie**

Les structures traditionnelles sont conçues en supposant qu'ils possèdent un amortissement critique de 1% à 5% comme un amortissement inhérent dans le domaine élastique. Pour les structures qui comprennent des amortisseurs visqueux ou des dispositifs métalliques, la valeur d'amortissement critique est portée entre 15% et 25% en fonction des caractéristiques spécifiques du dispositif. De cette façon, l'apport d'énergie sismique est largement dissipé par les déformations inélastiques concentrées dans les dispositifs ce qui permet la réduction des dommages à d'autres éléments critiques de l'immeuble. [4]

L'objectif de ces systèmes est d'absorber une partie de l'énergie ou de la dévier ainsi que de fournir un amortissement supplémentaire afin de réduire de manière significative et structurelle la réponse aux mouvements sismiques.

L'utilisation de dissipateurs d'énergie externes à la structure qui sont en général situés entre la superstructure et les fondations, bien qu'ils forment une partie du système structural, ils sont utilisés comme un lien et ils permettent de restaurer facilement la structure en cas de dommage sévère.

Ces dernières années, des efforts sérieux ont amélioré le concept des systèmes de dissipation d'énergie, et plusieurs appareils ont été installés dans des structures partout dans le monde.

Une très large gamme de dispositifs passifs de dissipation d'énergie existe ou a été proposée. Selon leur comportement, ils peuvent être classés comme suit :

- Les dispositifs hystérétiques métalliques qui sont basés sur la plastification de l'acier. Ces dispositifs dépendent essentiellement des déplacements (par exemple l'ADAS (Added

Damping And Stiffness) dispositif de (Aiken et Kelly, 1992) et l'élément du genou (Aristazabal-Ochoa, 1986; Williams et al. 2002). Bien entendu, ces éléments sont élastiques jusqu'à leur plastification et ils affichent généralement une boucle d'hystérésis typique de l'acier souvent avec écrouissage important.

- Les systèmes de friction qui sont basés sur le frottement entre les surfaces tels que le registre bien connu Pall (Pall et Marsh, 1982), qui comprend une série de plaques serrées en surface avec du matériel de garniture de frein. Ils sont généralement pris pour être rigides sur leur bordereau de chargement, puis de glisser à charge constante. Les résultats d'expériences sur un dispositif similaire réalisé par Wu et al (2003) ont également montré que, en raison de non-linéarités géométriques dans les dispositifs, les forces de renfort peuvent augmenter de façon significative après glissement.

- Les amortisseurs viscoélastiques qui peuvent être viscoélastiques solides ou viscoélastiques fluides et leur comportement dépend du déplacement et de la vitesse (par exemple, Xu et Zhang, 2001), dans lequel des matériaux comme l'acrylique copolymère sont collés entre deux plaques d'acier. Ces matériaux n'ont pas de niveau d'activation et d'exposition des boucles d'hystérésis elliptiques.

- Les amortisseurs à fluide visqueux qui ont un comportement qui dépend principalement de la vitesse. Ils comprennent généralement une raideur non-linéaire et un amortissement. [5]

#### **a) Dissipateurs d'énergie métalliques (hystérétiques)**

Les amortisseurs hystérétiques utilisent les propriétés hystérétiques des métaux dans leur aire de répartition de la déformation inélastique comme mécanisme de dissipation d'énergie. En vertu de séismes modérés, un amortisseur hystérétique agit comme un élément rigide qui permet de résister à la déformation de structure, alors que dans de violents séismes il agit comme un absorbeur d'énergie. Lorsque les amortisseurs hystérétiques sont incorporés à des endroits stratégiques dans la construction, ils augmentent la résistance de la structure aux séismes. Certains sont conçus pour se déformer en flexion, certains en torsion et certaines en cisaillement. [6]

Ils représentent l'un des mécanismes les plus efficaces disponibles pour la dissipation de l'énergie entrée dans une structure pendant un séisme. En structures métalliques traditionnelles, la conception parasismique dépend de la ductilité des pièces de charpente pour absorber l'énergie sismique.

L'idée d'utiliser des dissipateurs d'énergie métalliques dans la conception parasismique remonte à près de trois décennies. Les premières implémentations des systèmes structurels avec des amortisseurs métalliques sont survenues en Nouvelle-Zélande et au Japon.

Cette idée a commencé par le travail conceptuel et expérimental de Kelly et al (1972) [7] et Skinner et al (1975) [8]. Plusieurs dispositifs d'amortisseurs hystérétiques métalliques considérés par ces chercheurs ont inclus la poutre de torsion, la poutre de flexion, la bande-U comme illustré dans la figure 1.1. Ce sont des pièces réalisées en matériaux très ductiles tels que l'acier doux, le plomb, les alliages malléables,... etc. La dissipation d'énergie est obtenue à travers les déformations plastiques auxquelles ils sont soumis lors des déplacements relatifs de la superstructure et des fondations. La déformation inélastique des métaux peut être efficace à dissiper l'énergie présente dans les vibrations d'une structure pendant un séisme.

Les amortisseurs métalliques sont des dispositifs qui sont conçus pour fournir la dissipation d'énergie à un système de construction, les amortisseurs en métal donnant augmentation de la rigidité initiale d'un cadre de contreventement. Lorsque soumis à une charge à un niveau inférieur à la capacité élastique du dispositif, la rigidité structurelle initiale est constante. Après avoir atteint la capacité élastique du dispositif, la charge dans le dispositif reste constante à travers la déformation inélastique supplémentaire.

Ces systèmes de dissipation d'énergie profitent du comportement hystérétique des métaux lorsqu'ils sont déformés dans leur domaine post-élastique. Ils utilisent les propriétés d'élasticité et de rigidité des métaux. Différents types de dispositifs qui utilisent la flexion, le cisaillement, ou des modes de déformation en extension dans le domaine plastique ont été développés. Les caractéristiques particulièrement souhaitables de ces systèmes sont leur comportement stable, la fiabilité à long terme, et la bonne résistance à des facteurs de la température et environnementaux.

La capacité de l'acier doux pour soutenir de nombreux cycles de comportement stable a conduit à l'élaboration d'une grande variété de périphériques qui utilisent ce comportement à dissiper l'énergie sismique. Nombreux appareils utilisent des plaques d'acier doux avec des formes triangulaires ou sablier de sorte que la plastification est presque uniformément répartie dans tout le matériau. Le résultat est un dispositif qui est en mesure de soutenir les déformations inélastiques répétées.

Ces dissipateurs peuvent être utilisés sous de très nombreuses formes : [9]

- a) Added Damping and Stiffness (ADAS) dampers
- b) Triangular- Added Damping and Stiffness (TADAS) dampers
- c) Lead Joint dampers
- d) Lead-extrusion devices (LED)
- e) Bell-shaped steel dampers
- f) Honeycomb Dampers System (HDS)
- g) les alliages à mémoire de forme (AMF), y compris le nitinol (nickel-titane) comme un dispositif de tension et la Cu - Zn-Al (cuivre-zinc-aluminium) comme un périphérique de torsion.

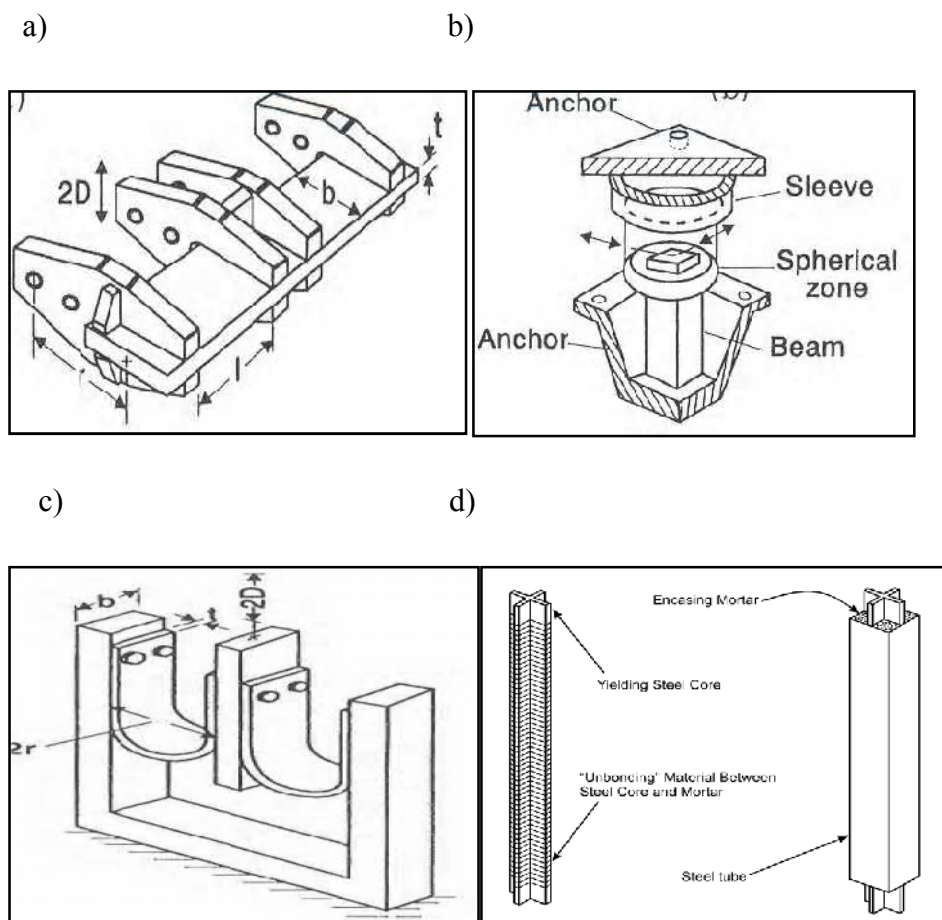


Figure 1.1: amortisseurs métalliques - a) poutre de torsion, b) poutre de flexion, c) bande en U, d) unbonded braces

Les amortisseurs métalliques ont certains avantages: ils ne nécessitent pas une technologie complexe pour les fabriquer, ils peuvent facilement être intégrés dans les structures, et ils montrent un comportement stable sous l'effet du séisme ainsi que les facteurs de l'environnement (température, humidité, ...) n'affectent pas leur performance.



Ces amortisseurs peuvent augmenter l'amortissement et la rigidité des structures et leur capacité de dissipation d'énergie. Ajouter des amortisseurs métalliques aux structures peut concentrer la dissipation d'énergie dans les amortisseurs. Après le séisme, ces amortisseurs peuvent facilement être remplacés pour le renforcement de la structure pour les futurs séismes.

### **a-1) Les dispositifs considérés dans cette étude**

#### **A) Dispositif ADAS**

Les éléments ADAS (Added damping and stiffness) sont des dispositifs mécaniques destinés à être installés dans les bâtiments neufs ou existants. Ce sont des mécanismes efficaces pour la dissipation d'un apport d'énergie à une structure sous l'effet d'un séisme, du vent ou d'autres forces qui induisent des oscillations de vibration. Le dispositif conventionnel ADAS est destiné d'être utilisé pour les structures ayant un cisaillement élevé, des modules de compression et une tension de transmission de force d'un point à un autre point. En outre, le processus de conception d'ingénierie intègre le dispositif ADAS pour optimiser les performances de la réponse sismique des structures et plus précisément, la valeur ajoutée de l'amortissement et la rigidité des éléments. Ces dispositifs sont placés à des endroits stratégiques dans les bâtiments ou les structures de manière à atteindre deux objectifs:

- Créer une déformation et une rigidité contrôlées des structures pour accroître la capacité d'énergie cyclique non dommageable dans les structures,
- Augmenter l'amortissement dans les structures en réduisant et / ou en minimisant la demande d'énergie du séisme sur les structures cycliques.

Les éléments ADAS sont une évolution d'un usage antérieur de X-plaques. Les principales caractéristiques qui influent sur le comportement d'un appareil ADAS sont : sa rigidité élastique, la limite d'élasticité, et son déplacement. Les dispositifs ADAS sont habituellement montés dans un cadre d'un système de contreventement, qui doit être sensiblement plus rigide que la structure environnante. L'introduction d'un tel système de contreventement lourd dans une structure peut être prohibitive. [10]

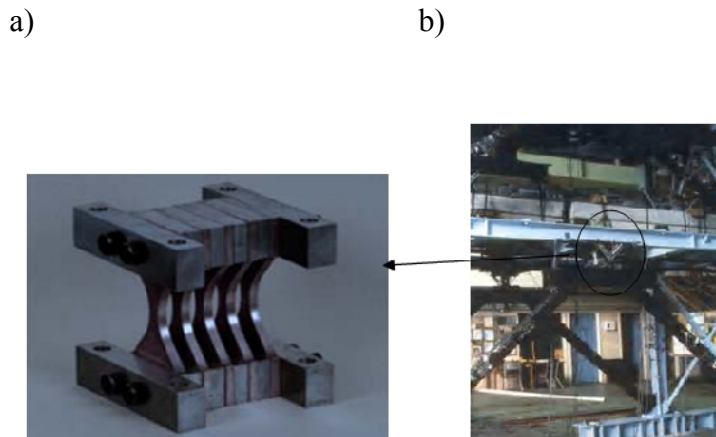


Figure 1.2: amortisseur métallique de type ADAS (plaques en forme de X), b) son emplacement dans un bâtiment [11]

Un tel dispositif utilise des plaques d'acier en forme de « X ». Le nombre de plaques parallèles est variable (deux à quatre, six, ou sept plaques) permettant un réglage évier pour les besoins de la structure à laquelle elles sont incorporées.

L'appareil se compose essentiellement de deux éléments principaux des séries géométriques comme suit:

- un élément rigide composé de matériaux structurels classiques ayant un fort cisaillement, une compression, et des modules de tension (par exemple acier ou béton) pour le transfert des forces d'un point à l'autre dans la structure,
- un élément souple composé de polymères ou de matériaux en caoutchouc viscoélastique ayant une compression plus faible, une tension et des modules de cisaillement de la composante raide et aussi à hautes caractéristiques de dissipation d'énergie.

Chaque plaque du dispositif est empêchée de tourner sur les deux extrémités supérieure et inférieure, de sorte qu'un déplacement relatif entre elles dans la direction perpendiculaire au plan de la plaque produit une distribution linéaire des moments de flexion, et une courbure doublement symétrique. L'avantage particulier d'un X-plaque est de permettre la distribution uniforme des déformations plastiques sur toute la hauteur de l'appareil. La largeur de l'évier est fournie avec la distribution linéaire des moments de flexion, ce qui conduit à une généralisation d'une laminasson de courte période de déplacement [Cahis, 2000].

Certaines caractéristiques particulièrement souhaitables de ces dispositifs sont leur comportement hystérétique stable, la propriété de fatigue oligocyclique, à long terme et l'insensibilité de fiabilité, par rapport à la température de l'environnement.

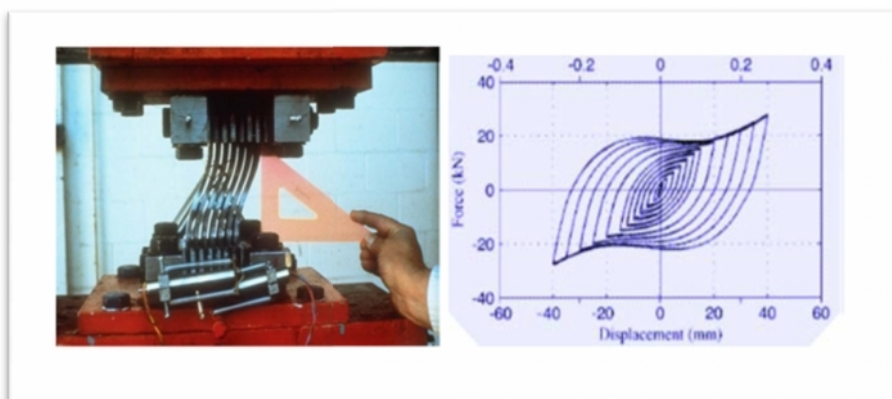


Figure 1.3: déformation du dispositif ADAS et sa boucle d'hystérésis [12]

L'élément ADAS vise précisément à améliorer la performance de la réponse sismique des bâtiments et des structures, en facilitant ainsi l'optimisation de la conception de ces bâtiments et structures. L'appareil peut généralement être décrit comme un lien modérément raide et de dissipation d'énergie entre des ensembles de paires de points d'un bâtiment ou une structure.

La plaque en forme de "X" de l'ADAS peut être modélisée comme un dispositif évidemment double, et quand il est soumis à une force perpendiculaire à son plan (stress induit par la dérivée de chaque étage), il se déforme à la fois à double courbure.

Des tests d'une structure à 3 étages en acier modelé par Whittaker (1989) sur une table vibrante ont démontré que les éléments ADAS améliorent le comportement du contreventement résistant à laquelle ils ont été installés par :

- a) augmenter sa rigidité,
- b) augmenter sa force,
- c) augmenter sa capacité à dissiper l'énergie.

Xia et Hanson (1994) ont étudié l'utilisation du dispositif ADAS dans des cadres rigides en acier. Plusieurs caractéristiques des structures des bâtiments et leur influence sur la suite du séisme ont été étudiées. Il a été conclu que l'ajout de dispositifs ADAS pourrait augmenter considérablement la capacité de dissipation de l'énergie d'une structure, tout en isolant la demande de dissipation loin du cadre de connexions poutre-colonne.

Phocas et Pocanschi (2003) ont présenté une étude d'une variante du dispositif ADAS à être utilisés dans un cadre en acier dans le cadre d'un design original ou une option de modernisation. [13]

### **B) Dispositif TADAS**

Les dissipateurs d'énergie avec des plaques triangulaires ont été élaborés et utilisés dans les applications d'isolation à la base (Boardman et al. 1983). La notion de plaque triangulaire a été étendue d'amortisseurs de construction sous la forme d'ADAS triangulaire, ou T-ADAS (Tsai et Hong, 1992).

Un dispositif TADAS est généralement ajouté à un cadre par le biais de contreventement de type K et est placé à la connexion de la poutre et le contreventement. Lorsque l'appareil est soumis à une force latérale perpendiculaire aux plaques triangulaires en acier, le moment induit est linéaire et il varie avec la hauteur de la plaque d'acier. Depuis le moment induit est proportionnel à la résistance. Cette caractéristique augmente la capacité de dissipation de l'énergie de l'appareil. Apparemment, l'installation de dispositifs TADAS augmente la rigidité inter-étage. Toutefois, les effets de l'amortissement en hystérèse sont significatifs que si les plaques d'acier subissent une déformation plastique. Étant donné que dans une épreuve de vibration forcée, la force appliquée n'est pas assez grande pour provoquer une plastification totale dans les plaques d'acier, une augmentation équivalente des ratios d'amortissement d'un petit montant.

Le dispositif T-ADAS incorpore un certain nombre de caractéristiques souhaitables; aucune contrainte de rotation n'est nécessaire dans le haut du corset assemblage de connexion, et il n'y a pas de risque d'instabilité de la plaque en raison de la charge axiale excessive sur les appareils.

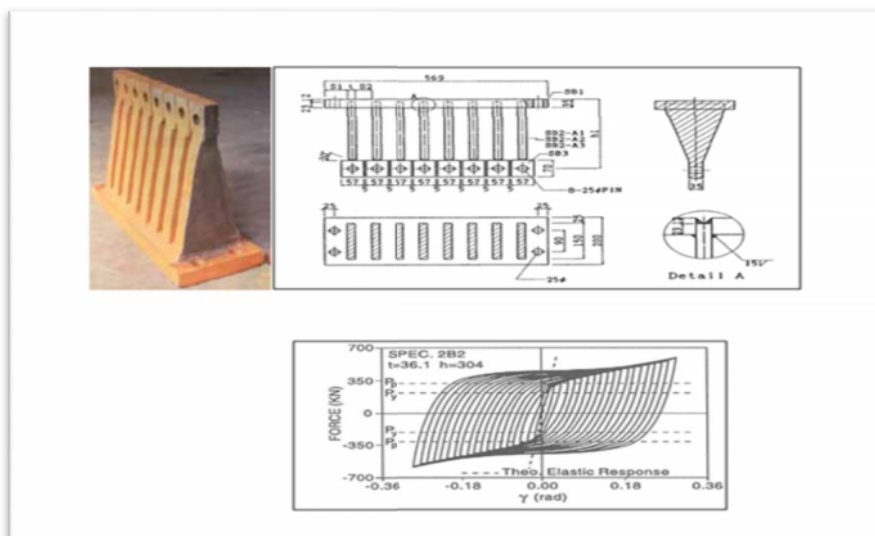


Figure 1.4: le dispositif TADAS et sa boucle d'hystérésis

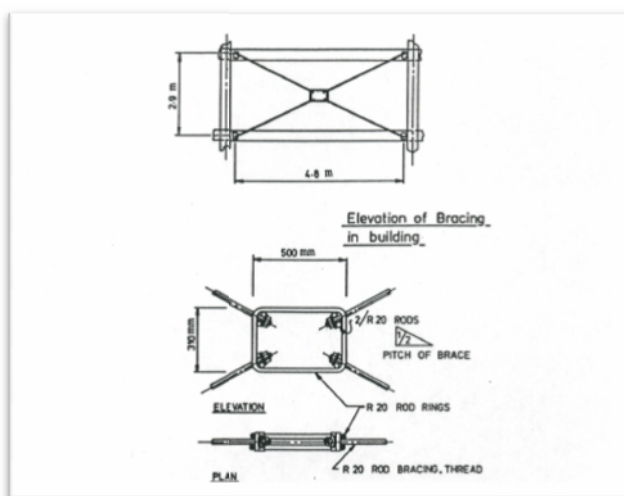


Figure 1.5: Détails d'un système de calage en acier [14]

### b) Amortisseurs à friction

Le frottement est un mécanisme efficace, fiable, économique, et largement appliqué, le principe de ces amortisseurs repose sur le phénomène de dissipation de l'énergie par friction qui apparaît sur les boucles d'hystérésis du diagramme efforts-déformations, qui peuvent être rectangulaires. Pour réaliser ce mécanisme de frottement, l'amortisseur comprend une série de plaques fixées les unes aux autres par des boulons en acier à haute résistance et spécialement traitées pour produire un degré de friction maximal.

Au début des années 80, Pall et Marsh ont commencé le développement des amortisseurs de friction passifs pour améliorer la réaction sismique des structures sur la base du modèle des

freins à friction. Depuis ces années, des progrès considérables ont été accomplis dans les dispositifs de frottement, et leur comportement a été étudié analytiquement et expérimentalement.

Les dissipateurs par friction utilisent les frottements créés par le glissement entre deux surfaces pour dissiper l'énergie des vibrations sismiques.

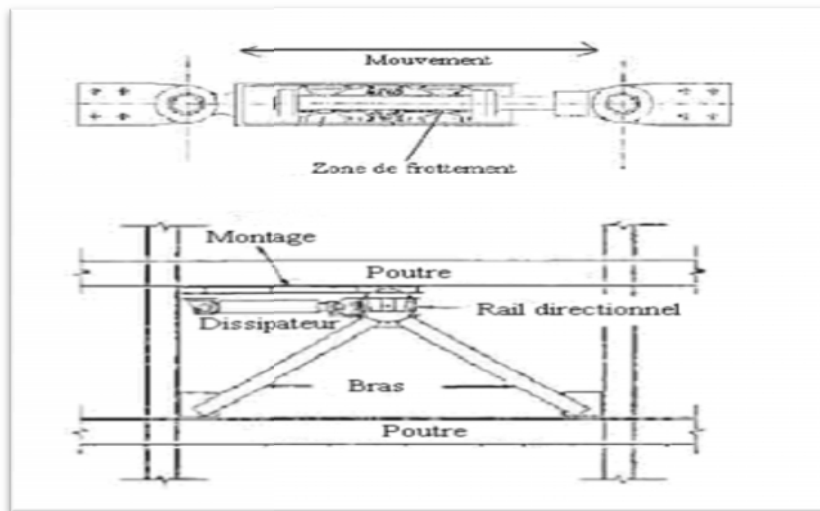


Figure 1. 6: L'utilisation de la dissipation par friction chez Sumitomo

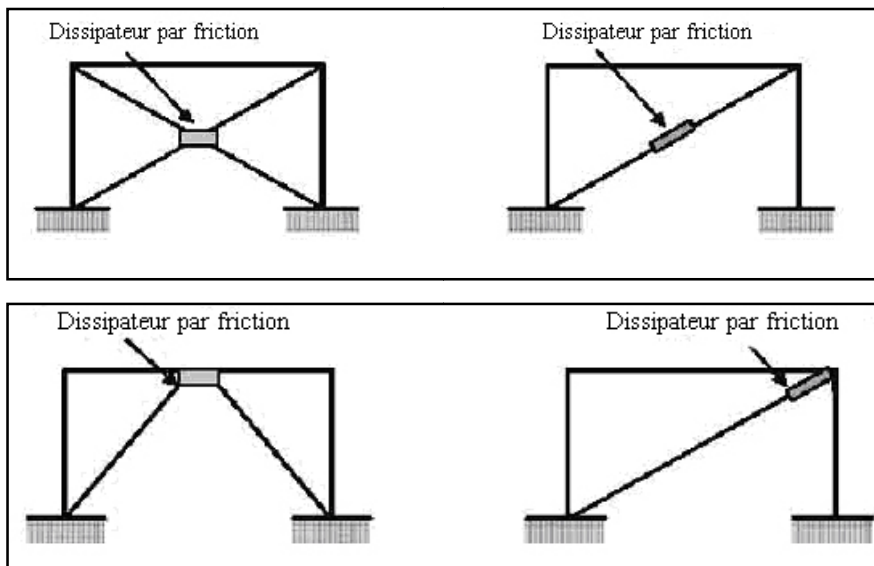


Figure 1.7: Différentes positions du dissipateur par friction [15]

Il y a deux familles de systèmes à friction :

- Les systèmes rigides composés de charnières plastiques (remplaçables après séisme);
- Les structures croisées dont les parties glissent l'une sur l'autre à des contraintes prédéterminées.

Les systèmes de dissipation par friction montrent de bonnes performances pour la protection contre les vibrations sismiques de forte intensité et ont l'avantage d'être économiques.

Les dispositifs à friction peuvent dissiper l'énergie sous forme de chaleur, causée par le glissement de plaques d'acier les unes contre les autres. Ils présentent généralement un comportement plastique rigide et leur force d'intervention peut être modélisée. Il existe plusieurs formes de dispositifs à friction : [14 ; 16]

- a) Pall Dampers
- b) Sumitomo Friction Dampers
- c) Energy Dissipating Restraint (EDR)
- d) Wall Friction Dampers

Les avantages d'utilisation des dispositifs à friction sont :

- a) Ces dispositifs ont une grande résistance à la fatigue.
- b) Leur comportement n'est pas significativement affecté par l'amplitude de charge, la fréquence, le nombre de cycles de charge appliquée ou variations de la température.
- c) Pas de problèmes de fuites de fluide.



Figure 1.8 : amortisseur à friction

### c) Amortisseurs viscoélastiques

Les amortisseurs viscoélastiques (VE) sont utilisés comme dispositifs de dissipation d'énergie dans des structures où l'amortisseur subit des déformations de cisaillement. Un amortisseur de cisaillement typique VE est constitué de plaques en acier recouvert par des couches

viscoélastiques. Lorsqu'ils sont installés dans une structure, la déformation de cisaillement et, par conséquent la dissipation d'énergie ont lieu lorsque se produisent des mouvements relatifs entre la plaque centrale et les brides en acier extra-atmosphérique.

Le mécanisme d'amortissement viscoélastique est basé sur la force de retour créée par la déformation d'un polymère ou d'un composé caoutchouteux. Le matériau, situé entre deux plaques métalliques, se plie en dissipant l'énergie et répond par une force en retour. Ce système est efficace à hautes et basses fréquences et s'avère très adapté pour protéger le bâtiment de vents violents et des séismes d'intensité moyenne. [15 ; 17]

Les amortisseurs VE sont construits avec des polymères acryliques en sandwich entre et lié à des plaques d'acier, et placés dans des cadres contreventés. Ces dispositifs ont été initialement conçus pour le contrôle de faible amplitude, les vibrations du vent à haute fréquence. La pertinence de ces dispositifs de contrôle des vibrations induites par le séisme a donc été étudiée dans des essais de composants et essais sur table vibrante (Constantinou et al. 1992).

L'application des amortisseurs viscoélastiques à des structures de génie civil a commencé en 1969 lorsque 10.000 d'entre eux ont été installés dans chacune des tours jumelles du World Trade Center à New York afin de réduire les oscillations dues aux charges du vent.

En outre, plusieurs études ont été menées pour déterminer les méthodes d'analyse les plus efficaces et précis pour les dispositifs VE dans les structures.

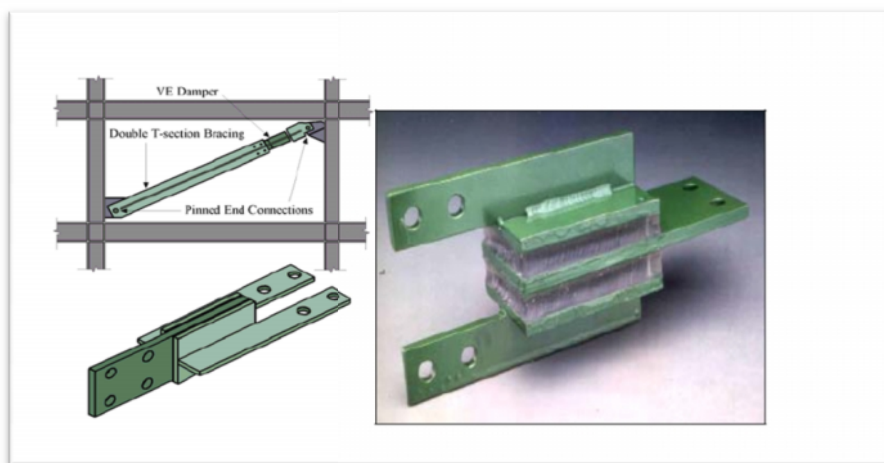


Figure 1.9: Amortisseur viscoélastique

La réponse des amortisseurs viscoélastiques dépend de la température de leur environnement et des vibrations qui leur sont appliquées.



Les avantages des amortisseurs viscoélastiques sont les suivants :

- Grande fiabilité
- Peut être en mesure d'utiliser une analyse linéaire
- Le coût peut être plus bas

#### **d) Amortisseurs à fluide visqueux**

Les amortisseurs à fluide visqueux sont des cylindres remplis de liquide avec deux chambres séparées par un piston se déplaçant avec des orifices de direction, et une chambre de l'accumulateur. Comme la tête se déplace longitudinalement à l'intérieur de l'arbre, visqueux, les flux de fluide d'une chambre à l'autre. La force de l'amortisseur est le résultat de la différence de pression entre les chambres, qui est fonction des orifices dans la tête de piston et la vitesse de la tête de piston (Constantinou et Symans, 1992). [18 ; 3]

Un amortisseur visqueux liquide est généralement constitué d'un piston dans le boîtier amortisseur remplis avec un composé de silicone ou de type similaire d'huile, et le piston peut contenir un certain nombre de petits orifices par lesquels le fluide peut passer d'un côté du piston à l'autre. L'amortisseur ainsi dissipe l'énergie si le mouvement d'un piston dans un fluide très visqueux en utilisant le concept de l'écoulement d'un liquide à travers un orifice.

Les systèmes d'amortissement visqueux peuvent dissiper l'énergie des vibrations en appliquant une résistance à la structure grâce à l'action d'un piston forcée par un fluide.

Ce type d'amortisseurs utilise une huile mécanique de haute qualité dont la viscosité ne varie pas en fonction de sa température. Ce fluide en cas de mouvement imposé, passe d'une chambre à l'autre de l'amortisseur au travers d'un dispositif qui gère l'ouverture d'un passage calibré suivant les critères de pression et donc de vitesse. A vitesse lente, la pression interne reste quasi nulle tandis qu'en cas de mouvement rapide, la pression interne augmente jusqu'à atteindre la pression d'ouverture du passage.

L'amortissement peut aussi être produit par des murs composés de matériaux visqueux qui présentent une résistance aux mouvements horizontaux. Ces systèmes ont le double avantage de réduire considérablement les contraintes de cisaillement sur la structure et la déformation du bâtiment.

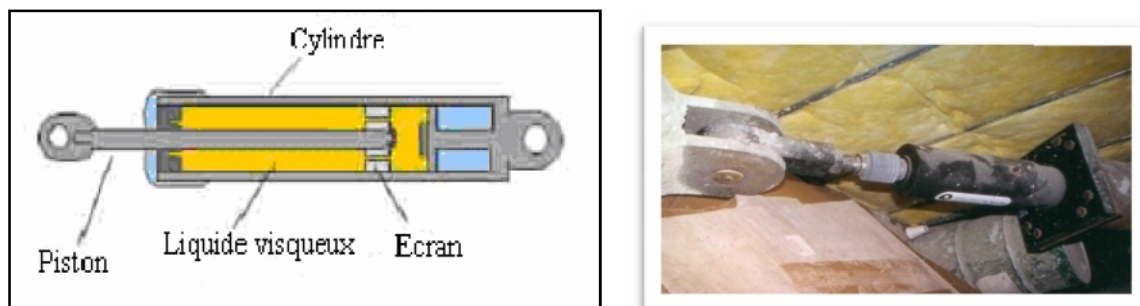


Figure 1.10: Amortisseur à fluide visqueux [15]

### I.2.2. Isolateurs à la base

L'objectif de ces systèmes est de séparer la structure du sol et de découpler le mouvement du sol de celui de la structure dans le but de réduire les forces transmises à cette dernière par un allongement de la période de l'immeuble et en ajoutant une certaine quantité d'amortissement. Ces dispositifs possèdent une grande rigidité verticale et une grande flexibilité dans le plan horizontal. Cette grande flexibilité permet de transmettre les vibrations du sol à la superstructure en atténuant la fréquence et l'amplitude, soulageant le bâtiment de contraintes trop violentes. Ces systèmes sont simples de fabrication et grâce à leur efficacité, ils sont devenus des systèmes populaires et très utilisés.

Conceptuellement, l'isolation réduit la réponse de la superstructure par un «découplage» de l'édifice de la terre. Les systèmes d'isolation typiques ont comme but de réduire les forces transmises à la superstructure par un allongement de la période de l'immeuble et en ajoutant une certaine quantité de l'amortissement. Ajouté l'amortissement est une propriété intrinsèque de la plupart des isolateurs.

Le principe de l'isolation sismique n'est pas nouveau : les premières expériences remontant au début du 20<sup>e</sup> siècle. Actuellement des milliers de bâtiments et de ponts à travers le monde sont munis de systèmes d'isolation sismique. Ces systèmes consistent à mettre, entre les fondations et la superstructure, des dispositifs qui ont une déformabilité horizontale très importante et une rigidité verticale très élevée. L'isolateur capte les déformations (inélastiques) et filtre les accélérations (hautes fréquences) de sorte que la superstructure isolée se déplace essentiellement selon un mode rigide subissant de faibles accélérations et presque pas de déformations. Par conséquent, les forces d'inertie transmises aux éléments de fondations sont limitées et demeurent en deçà de la capacité élastique de tels éléments. Ce comportement se traduit par la limitation des dommages subis par la superstructure et les

éléments de fondation et par la préservation de la fonctionnalité de la structure après le séisme. [19]

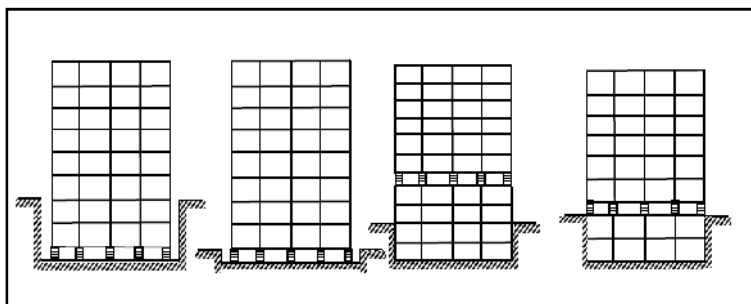


Figure 1.11: Différentes positions typiques des isolateurs à la base. [20]

L'isolation à la base repose sur le principe que si la période de vibration est augmentée suffisamment pour s'éloigner de la période d'excitation prédominante du séisme, les accélérations transmises à la structure (et par conséquent les forces d'inertie) sont considérablement réduites. En revanche, l'augmentation de la période engendre des déplacements plus importants concentrés au niveau de l'isolateur. Dès lors l'incorporation d'un dispositif de dissipation d'énergie à l'isolateur est requise afin de contrôler les déplacements et de réaliser un compromis satisfaisant entre la réduction de la force et l'accroissement du déplacement.

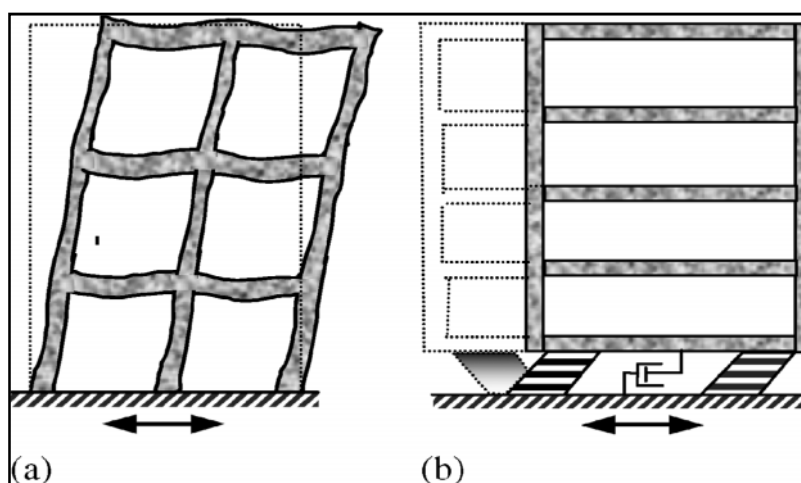


Figure 1.12: Comportement d'une structure ; a) à base fixe, b) à base isolée [20]

On peut grossièrement classer les systèmes d'isolation sismiques en trois catégories :

- a) Les systèmes à base d'élastomère : L'isolation sismique des structures avec des appuis à élastomère est caractérisée par l'abaissement de la fréquence fondamentale. Il en

résulte une diminution des efforts induits par le séisme mais au prix d'un déplacement important des appuis. Pour diminuer les déplacements on ajoute des dispositifs qui dissipent de l'énergie. Cette dissipation peut être effectuée avec de l'amortissement visqueux ou par l'hystérésis de la loi de comportement force-déplacement de l'appui parasismique (appuis à élastomère avec noyau de plomb, barres en acier plastifiant, appuis à élastomère à fort amortissement, appuis de frottement en téflon).

- b) Les systèmes à base de glissement : L'interface de glissement permet de dissiper l'énergie sismique par friction. A titre d'exemple, le système de pendule à friction est un système qui utilise une interface de glissement sous forme de cuvette, portion d'une sphère, qui confère à la structure un mouvement global similaire à un pendule. Le rayon de courbure et le coefficient de frottement de l'interface sont les caractéristiques clé qui contrôlent la période d'isolation et la quantité d'énergie dissipée du système.
- c) Les systèmes à base de caoutchouc : Le rôle de ces dispositifs est de prévenir la superstructure du bâtiment d'absorber l'énergie provenant du séisme. La superstructure entière doit être appuyée sur des isolateurs.

Certains isolateurs sont également conçus pour ajouter des amortissements importants à la structure. Au niveau des dispositifs d'isolation, la superstructure se comporte très bien comme un corps rigide

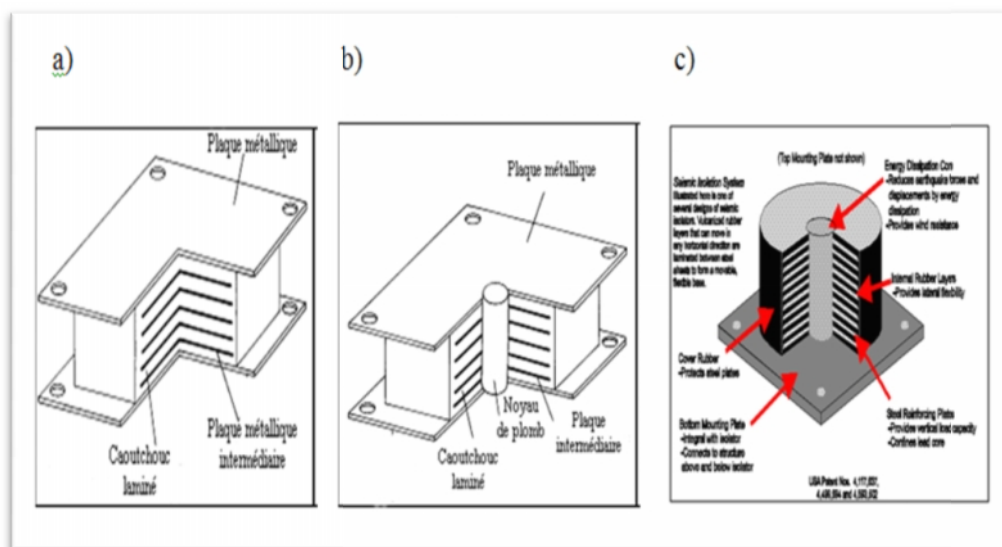


Figure 1.13 : Isolateurs de base : a) isolateur en élastomère, b) isolateur en caoutchouc / plomb) carré, c) isolateur en caoutchouc/plomb) circulaire,

### I.2.3. Oscillateurs de résonance

Les bâtiments sont considérés comme des oscillateurs multiples : plusieurs masses reliées entre elles et au sol par des ressorts et des amortisseurs, modélisés par des barres ou par éléments finis. Les bâtiments de grande hauteur sont conçus pour ne pas rentrer en résonance, ce qui provoquerait une amplification des amplitudes de balancement.

Un oscillateur de résonance est composé d'une ou plusieurs masses additionnelles, généralement placées sur le dernier niveau de la structure ou à proximité, avec certaines propriétés dynamiques, qui vise à réduire la réponse de la structure sous charges dynamiques. La fréquence de ce système est choisie de manière à ressembler à l'un des modes naturels des systèmes. On suppose que cet appareil doit réagir et être efficace pour les petites excitations.

Le principe de fonctionnement d'un système d'oscillateur est basé sur le fait que sa fréquence correspond à l'une des fréquences naturelles de la structure, il s'oppose toujours au mouvement de la structure et permet donc de diminuer les vibrations de la structure. Il est admis qu'un tel système peut être efficace dans la réduction de la réponse des structures soumises à des excitations de type harmonique et aussi à lutter contre les forces de vent. Malheureusement, son extrapolation à l'effet produit par les charges sismique est complexe.

L'inclusion d'une ou plusieurs masses additionnelles, avec des propriétés dynamiques connues dans un bâtiment, peut réduire considérablement sa réponse sismique.

Den Hartog a été l'un des premiers chercheurs intéressés par les systèmes avec oscillateurs de résonance et a montré qu'à l'aide de certains paramètres dynamiques du système couplé structure-oscillateur, il est possible d'obtenir des réductions importantes de la réponse.

Dans un système à deux degrés de liberté, si la période de la charge coïncide avec la période de vibration du deuxième niveau, le mouvement du premier niveau est égal à zéro et le second est soumis à une force d'intensité égale à la force d'excitation et de sens contraire.

Dans la République d'Arménie, des chercheurs comme Korencv, Khachian Reznikov ont étudié analytiquement et expérimentalement des bâtiments de différents degrés de liberté, avec un étage supplémentaire, soumis à des événements sismiques avec différentes caractéristiques dynamiques, où les résultats ont donnés des réductions de la réponse égales à la moitié obtenue sans ce système (Jara, M. 1994).

Paniagua, est un des chercheurs qui ont étudié des modèles mathématiques d'un système à deux degrés de liberté, tel qu'un réservoir d'eau avec une masse supplémentaire. La plus grande réduction de la réponse a été trouvée pour les excitations correspondant à des enregistrements dans la zone molle de la vallée de Mexico.

En règle générale, la masse et l'amortissement de l'étage supplémentaire diffèrent considérablement du reste de la structure. Cela rend l'analyse plus laborieuse en raison de l'absence de modes de vibration classique.

Ces dispositifs semblent être un moyen efficace pour ajouter de l'amortissement à une structure et donc de contrôler sa réponse dynamique. Comparé à d'autres systèmes de contrôle des vibrations, on constate deux avantages: d'une part son impact sur la conception de la structure est minime, car une structure dans laquelle ces moyens sont utilisés ne nécessite pas de procédure de conception spéciale et d'autre part ils sont faciles à concevoir et à construire, et ne nécessitent pas de techniques spéciales.

En prime, ce système a la particularité de ne pas être dépendant de sources extérieures pour son fonctionnement. Il n'interfère pas avec la trajectoire des charges sur la structure, et peut également répondre à de faibles niveaux d'excitation ; ses propriétés peuvent être ajustées in-situ, comme il peut être considéré comme des systèmes de renforcement où une seule unité peut être efficace pour réduire les vibrations induites par les effets de séisme. L'inconvénient est qu'il peut présenter une grande masse qui nécessite généralement un grand espace pour l'installation et son efficacité dépend du bon calibrage.

Ces dispositifs ne sont efficaces que pour le contrôle de la réponse de l'un des modes de la structure. Plusieurs masses sont nécessaires pour contrôler la réponse de plusieurs modes et leur efficacité est limitée par l'ampleur de la masse maximale qui peut être placée sur la structure.

#### **I.2.4. Contrôle passif avec systèmes inertiels couplés**

Un contrôle passif avec des systèmes inertiels couplés consiste en une masse solide ou liquide située à l'un des étages les plus élevés du bâtiment qu'il équipe et liée à celui-ci via un ressort et un mécanisme d'amortissement (visqueux ou viscoélastique). L'inertie créée par le mouvement de cette masse couplée avec l'inertie de la structure ou bâtiment pour réduire les vibrations induites par le séisme. Le mouvement de la masse s'effectue dans le sens opposé à

celui de l'immeuble et avec la même fréquence. Ainsi, situé au plus haut de la construction, le mouvement pendulaire amortit la déformation et limite les dommages sur la structure.

On distingue deux types de contrôle passif avec systèmes inertiels couplés le premier est l'amortisseur de masse accordé TMD (Tuned Mass Damper) et le deuxième l'amortisseur de liquide accordé TLD (Tuned Liquid Damper). [21]

#### a) amortisseurs à masse accordée TMD

Un amortisseur inertiel à masse (TMD, Tuned Mass Damper) consiste en une masse située à l'un des étages les plus élevés du bâtiment qu'il équipe et liée à celui-ci via un ressort et un mécanisme d'amortissement (visqueux ou viscoélastique). L'inertie créée par le mouvement de cette masse va se transmettre au bâtiment et réduire les vibrations induites par le séisme. Le mouvement de la masse s'effectue dans le sens opposé à celui de l'immeuble et avec la même fréquence. Ainsi, situé au plus haut de la construction, le mouvement pendulaire amortit la déformation et limite les dommages sur la structure. L'efficacité du système dépend de la valeur de la masse ajoutée (entre 1/300 et 1/100 de la masse du bâtiment, la réduction des oscillations est de 1/3), de la possibilité de déplacement du solide, du type de ressort employé et de la configuration du mécanisme amortisseur qui soutient la masse. Cependant, les contraintes d'espace empêchent l'emploi d'un TMD traditionnel qui nécessite souvent le sacrifice d'un étage entier. Ainsi, de nombreuses alternatives ont été mises en place pour employer les TMD : des systèmes à plusieurs pendules répartis sur plusieurs étages, à pendules inversés.

Les configurations à plusieurs TMD associés en parallèle offrent de meilleurs résultats à masses égales que les TMD simples. La configuration en parallèle combine plusieurs pendules avec des fréquences propres différentes et qui se situent autour de la fréquence de contrôle.

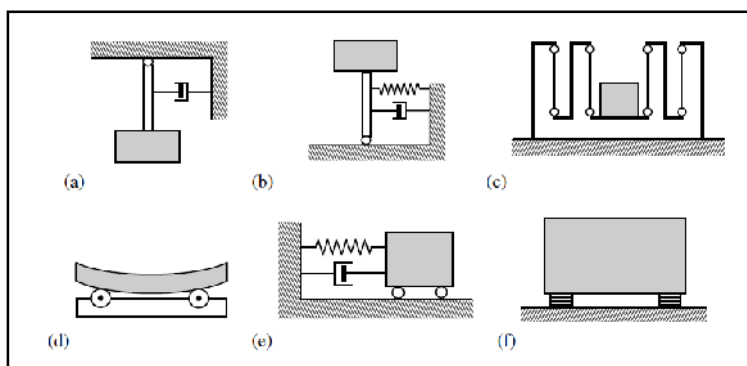


Figure 1.14: Exemples des différents types de TMD. [20]

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

### b) amortisseurs à liquide accordée TLD

Ici, le mouvement d'un liquide atténue les oscillations du bâtiment. Comme le mouvement pendulaire créé par le mouvement d'un solide, les déformations sont atténuées par un mouvement opposé de même période. Le système peut réduire la réponse de la structure de 1/2 à 1/3 suivant la masse de liquide employée. L'un des facteurs de succès de ce type de système est qu'il n'y a pas besoin d'un ajout considérable de masse à la construction, les réservoirs d'eau, souvent situés sur le toit, pouvant servir de source.

Les TLD exploitent l'inertie créée par le mouvement du liquide et ses impacts sur son contenant. Sous certaines configurations, les TLD utilisent la viscosité du liquide et les effets de vagues pour atténuer les vibrations (cas des amortisseurs à faible volume). Dans ce dernier cas, l'utilisation de la masse de liquide employée n'est pas optimisée et crée une contrainte économique supplémentaire.

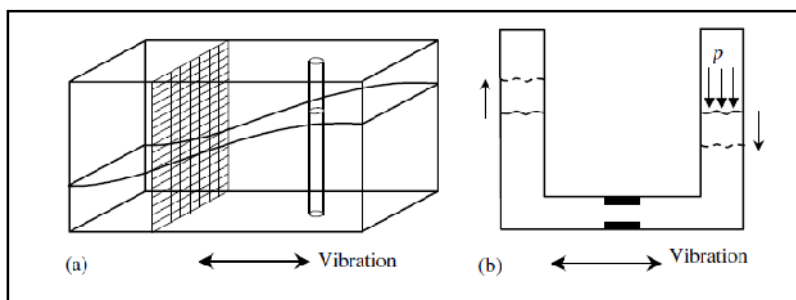


Figure 1.15: Exemples des différents types de TLD. [20]

a) amortisseur trempé avec des mailles et des tiges, b) amortisseur de colonne avec orifice.

### I.2.5. Câbles de précontrainte

Ils sont utilisés pour rigidifier la structure, ce qui augmente la charge axiale dans les colonnes, conduisant à une réduction de la torsion aux extrémités. Ces systèmes sont conçus pour isoler la fondation de la superstructure. En les plaçant, on allonge considérablement la période fondamentale de vibration de la structure.

### I.3. Dispositifs de contrôle actif

Ces systèmes fournissent une protection sismique en imposant des forces qui contrebalancent les forces induites du séisme sur une structure. Ces systèmes sont actifs parce qu'ils exigent



une source d'énergie externe et des actionneurs répartis sur l'ensemble du bâtiment contrôlés par ordinateur pour fonctionner. Les systèmes actifs sont plus complexes que des systèmes passifs car ils reposent sur des commandes d'ordinateur, des détecteurs de mouvement, des mécanismes de rétroaction, et les parties mobiles ont besoin d'un entretien spécial. En outre, ces systèmes ont besoin d'une source d'alimentation d'urgence afin d'assurer qu'ils seront utilisables au cours d'un séisme majeur et toutes répliques immédiates

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 des structures telles que des buildings, des ponts, des plates-formes offshore, des tours de contrôle, ou des grues. Les sollicitations peuvent provenir du vent, du trafic, des séismes ou des vagues.

Les systèmes actifs fournissent une réponse adaptée à chaque contrainte appliquée. Ils sont développés pour permettre d'adapter leur comportement en fonction des changements de leur environnement. Des systèmes de capteurs hydrauliques ou électromécaniques mesurent les vibrations du bâtiment ou/et les excitations appliquées au bâtiment. Les informations sont ensuite interprétées par des algorithmes de contrôle qui déterminent la réponse la plus adaptée à appliquer avec le système de retour.

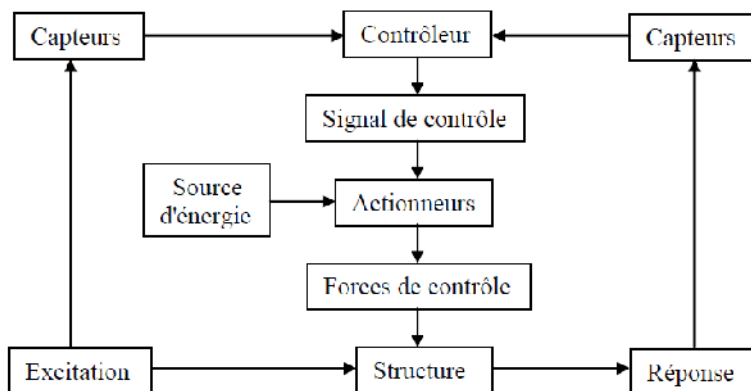


Figure 1.16: diagramme de contrôle actif. [22]

### 1.3.1. Masse active

Dans les systèmes « Active Mass Damper »(AMD), la force de contrôle est générée intégralement par un actionneur (hydraulique ou électrique) reliant la masse mobile au reste de la structure. Un amortisseur de masse active (AMD) est l'une des catégories des amortisseurs les plus efficaces. Il est utile pour diverses applications, car il n'a pas besoin d'un

point fixe. Le système se compose d'une masse auxiliaire installé dans un bâtiment et d'un actionneur qui exploite la masse et produit une force de contrôle. [23]

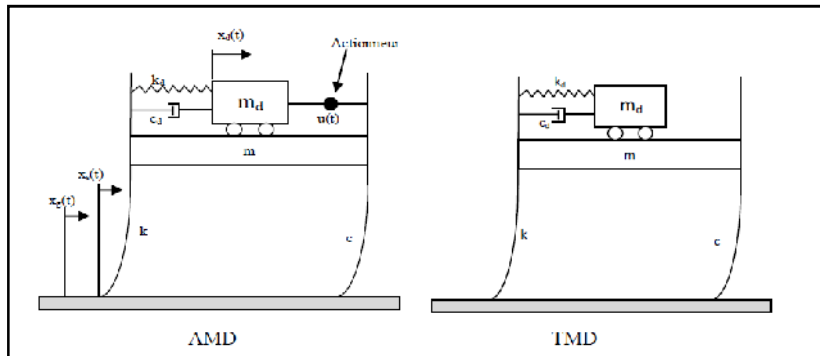


Figure 1.17: Schéma de comparaison entre l'amortisseur de masse actif (AMD) et l'amortisseur de masse accordée (TMD)

**Chapitre II :**  
**ZONAGE SISMIQUE**  
**ET EFFET**  
**DE SITE**

## Chapitre II

### ZONAGE SISMIQUE ET EFFET DE SITE

#### II.1. Introduction

Les séismes sont l'une des manifestations de la tectonique des plaques. L'activité sismique est concentrée le long des failles, en général à proximité des frontières entre ces plaques. Lorsque les frottements au niveau d'une de ces failles sont importants, le mouvement entre les deux plaques est bloqué. De l'énergie est alors stockée le long de la faille. La libération brutale de cette énergie permet de rattraper le retard du mouvement des plaques. Le déplacement instantané qui en résulte est la cause des séismes. Après la secousse principale, il y a des répliques, parfois meurtrières, qui correspondent à des petits réajustements des blocs au voisinage de la faille.

Le séisme est caractérisé par :

- **Son foyer** : c'est la région de la faille où se produit la rupture et d'où partent les ondes sismiques.
- **Son épicentre** : point situé à la surface terrestre, à la verticale du foyer, là où l'intensité est la plus importante.
- **Sa magnitude** : elle traduit l'énergie libérée par le séisme. Elle est généralement mesurée par l'échelle ouverte de Richter.
- **Son intensité** : elle mesure les effets et dommages du séisme en un lieu donné. Ce n'est pas une mesure objective, mais une appréciation de la manière dont le séisme se traduit en surface. On utilise habituellement l'échelle MSK, qui comporte douze degrés.
- **La fréquence et la durée des vibrations** : ces deux paramètres ont une incidence fondamentale sur les effets en surface.
- **La faille provoquée** : elle peut se propager en surface.

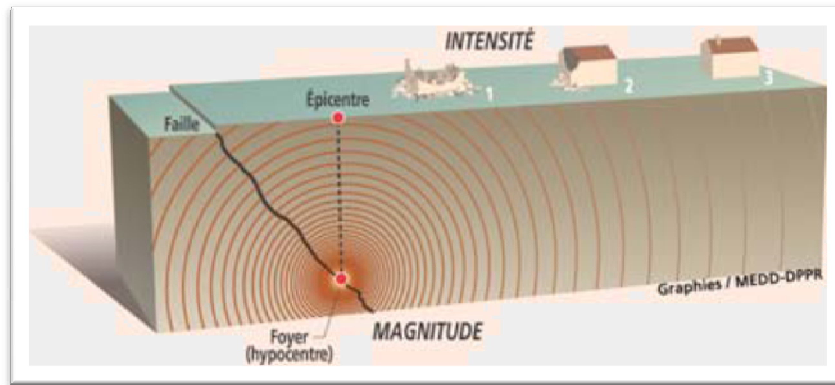


Figure 2.1 : détail d'un séisme. [24]

On peut aussi définir un séisme comme étant une vibration du sol transmise aux bâtiments, causée par une fracture brutale des roches en profondeur créant des failles dans le sol et parfois en surface. Un séisme dure quelques secondes tant que l'énergie potentielle de déformation n'est pas épuisée.

## II.2. Les ondes sismiques

Les ondes sismiques sont des ondes élastiques qui peuvent traverser un milieu sans le modifier. L'impulsion de départ va "entamer" les particules élémentaires présentes dans le milieu, qui vont "pousser" d'autres particules avant de reprendre leur place, se propageant suivant une réaction en chaîne.

Un tracé de séisme s'appelle un "sismogramme".

Les vibrations lors d'un séisme se propagent dans toutes les directions. On distingue deux types d'ondes, les ondes de volume qui traversent la Terre et les ondes de surface qui se propagent à sa surface. Sur les enregistrements des sismographes, elles se succèdent ou se superposent. Leur vitesse de propagation et leur amplitude sont modifiées par les structures géologiques qu'elles traversent, c'est pourquoi, les signaux enregistrés sont la combinaison d'effets liés à la source, aux milieux traversés et aux instruments de mesure.

a) les ondes de **volume** qui prennent naissance au niveau du foyer. Elles se propagent à l'intérieur du globe. Leur vitesse de propagation dépend du matériau traversé et, d'une manière générale, cette dernière augmente avec la profondeur car le matériau traversé devient plus dense.

On distingue :

- les ondes P ou ondes primaires appelées aussi ondes de compression ou ondes longitudinales. Le déplacement du sol qui accompagne leur passage se fait par des dilatations et des compressions successives. Ces déplacements du sol sont parallèles à la direction de propagation de l'onde. Les plus rapides peuvent atteindre une vitesse de 14km/s dans les milieux solides mais en moyenne elles atteignent une vitesse de l'ordre de 6km/s. En fait, cette augmentation de vitesse s'explique par l'accroissement de densité des roches traversées. Au contraire, la vitesse diminue quand les ondes atteignent un milieu liquide ou de densité plus faible. Ce sont les plus rapides (6 km/s près de la surface) et donc les premières à être enregistrées sur les sismogrammes. Elles sont responsables du grondement sourd que l'on peut entendre au début d'un tremblement de terre. Elles induisent un mouvement vertical dans les constructions.

Si l'on assimile le sol à un solide homogène et isotrope (par exemple un substratum rocheux), par la théorie de l'élasticité on peut calculer la vitesse de propagation de ces ondes à partir des caractéristiques du sol.

Notons par :

$\rho$  : densité du milieu [ $\text{Ns}^2 / \text{m}^4$ ] ;

$E$  : Module d'élasticité dynamique [ $\text{N} / \text{m}^2$ ] ;

$G$  : Module de cisaillement dynamique [ $\text{N} / \text{m}^2$ ] ;

$\nu$  : coefficient de poisson ;

$\lambda$  : constantes de lamé.

La vitesse de propagation des ondes P est donnée par la formule suivante :

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)(1+\nu)}} \quad (2.1)$$

- les ondes S ou ondes secondaires appelées aussi ondes de cisaillement ou ondes transversales, perpendiculaires à la direction de propagation. Ces ondes sont moins rapides que les précédentes (1,7 fois moins rapides). De même que pour les ondes P, la vitesse des ondes S augmente en rencontrant une densité plus élevée, et diminue quand la densité devient moins dense. Contrairement aux ondes P, les ondes S ne traversent pas les milieux liquides ( $G = 0$  dans les liquides); elles sont alors réfléchies vers la surface, elles sont en particulier

arrêtées par le noyau externe de la Terre. Leur vitesse est de 4,06 km/s. Elles apparaissent en second sur les sismogrammes et elles introduisent un mouvement horizontal dans les ouvrages.

La vitesse de propagation des ondes S est donnée par la formule suivante :

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (2.2)$$

La différence des temps d'arrivée des ondes P et S suffit, connaissant leur vitesse, à donner une indication sur l'éloignement du séisme. On peut ainsi localiser son épicentre à l'aide de trois sismogrammes.

Les ondes de volume se propagent comme toutes les ondes, et en particulier comme les rayons lumineux : elles peuvent être réfléchies ou réfractées, c'est-à-dire déviées à chaque changement de milieu, au passage manteau-noyau par exemple. Elles peuvent ainsi suivre des trajets très complexes à l'intérieur de la Terre. Leur temps de parcours dépend de ce trajet, elles n'arrivent pas toutes en même temps au même endroit.

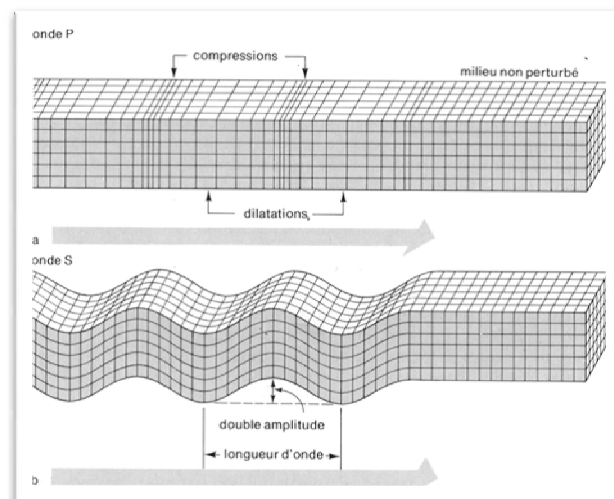


Figure 2.2 : les ondes de volume

- b) les ondes de **surfaces** issues des ondes de volume arrivant à la surface terrestre. Ce sont des ondes guidées par la surface de la Terre. Leur effet est comparable aux rides formées à la surface d'un lac. Elles sont moins rapides que les ondes de volume mais leur amplitude est généralement plus forte. Elles se propagent sur une faible épaisseur :

On peut distinguer :

- L'onde de Love : c'est un anglais Augustus Edward Hough Love qui a découvert son existence en 1911. Son déplacement est comparable à celui des ondes S sans le mouvement vertical. Les ondes de Love provoquent un ébranlement horizontal qui est la cause de nombreux dégâts aux fondations d'un édifice qui n'est pas une construction parasismique. Les ondes de Love se propagent à environ 4 km/s.
- L'onde de Rayleigh : elle a été découverte par John William Strutt Rayleigh en 1885. Son déplacement est complexe, assez semblable à celui d'une poussière portée par une vague, constituant un mouvement à la fois horizontal et vertical.

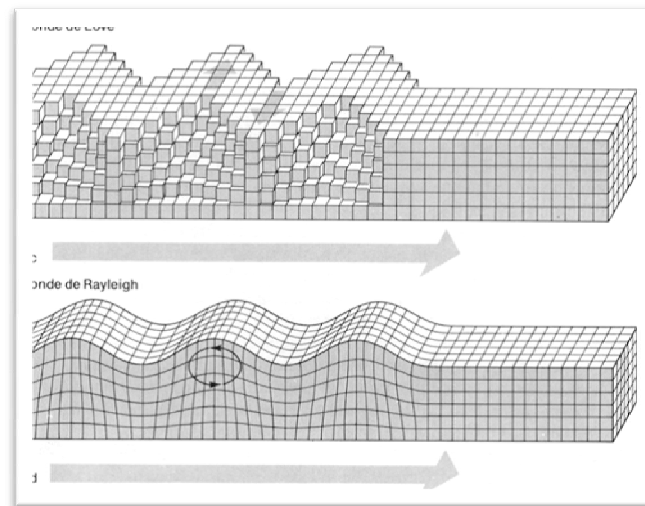


Figure 2.3 : les ondes de surface [25]

L'hypothèse faite en conception parasismique est de considérer uniquement les ondes de volume et de considérer leur propagation verticale ce qui est justifiée dans les stratigraphies horizontales.

### II.3. La sismicité en Algérie

Historiquement, l'Algérie est connue pour être une zone sismique très active. Les investigations de paléo sismicité effectuées après le séisme d'El Asnam ont permis de révéler l'existence de traces d'anciens séismes qui auraient affecté cette région.

Ces travaux ont montré l'existence de plusieurs séismes importants avec rupture en surface ( $M_s > 6,5$ ) ayant affecté la région depuis au moins 600 ans environ. Ces données de paléo sismicité permettant également d'estimer la récurrence des événements sismiques qui auraient marqué cette région.



L'activité sismique en Algérie du Nord connue remonte (d'après le CRAAG) au 02 Janvier 1365, date à laquelle s'est produit le séisme à Alger. Depuis, de nombreux séismes se sont produits, parmi eux certains violents et meurtriers. Parmi ces séismes nous pouvons citer ceux qui ont touché Alger en 1716, Oran en 1790 et Gouraya en 1891.

Dans une période plus récente, on peut citer les séismes d'Orleansville (le 09 septembre 1954), d'El Asnam (le 10 octobre 1980) de Constantine (le 27 octobre 1985), de Tipaza (le 29 octobre 1989), de Mascara (le 17 aout 1994)), d'Alger (le 04 septembre 1996), de Ain Temouchent (le 22 décembre 1999, de Beni Ouartilane (le 10 novembre 2000) et de Boumerdès-Alger (le 21 mai 2003).[26]

#### **II.4. Le zonage sismique**

Le zonage sismique s'applique à l'échelle régionale, et désigne le procédé consistant à subdiviser une région en secteurs caractérisés par des comportements similaires en égard au paramètre déterminant de l'intensité sismique. Actuellement, chaque région est subdivisée en un nombre de zones d'aléa sismique distinctes. Chacune de ces zones est caractérisée par une certaine valeur d'accélération horizontale effective  $a_g$ .

Le zonage repose sur la définition d'un nombre limité de classes de sismicité, auxquelles on fait correspondre différentes valeurs nominales des actions sismiques.

Le zonage sismique du territoire Algérien élaboré par le CRAAG, montre que la bande tellienne notamment dans sa frange littorale est soumise au degré d'aléa sismique le plus élevé.

Il s'agit là de tendances lourdes, qui sans une politique volontariste d'aménagement du territoire ne peuvent que s'aggraver et aboutir aux ruptures indésirables, qu'implique ce scénario de l'inacceptable. Des politiques vigoureuses devraient donc être entreprises sans délai, pour espérer pouvoir réduire le phénomène de concentration des populations et des activités sur un territoire relativement vulnérable, et réguler la configuration générale au risque sismique du pays durant les vingt prochaines années.

L'objectif prioritaire visé est le désengorgement de la bande littorale, pas seulement pour une meilleure maîtrise et organisation de l'urbanisation et la valorisation des régions Hauts - Plateaux et Sud mais aussi pour mieux protéger les populations et le potentiel économique des aléas sismiques.

La carte obtenue n'est pas une carte du «risque encouru», mais une carte représentative de la façon dont la puissance publique prend en compte l'aléa sismique pour prescrire des règles en matière de construction.

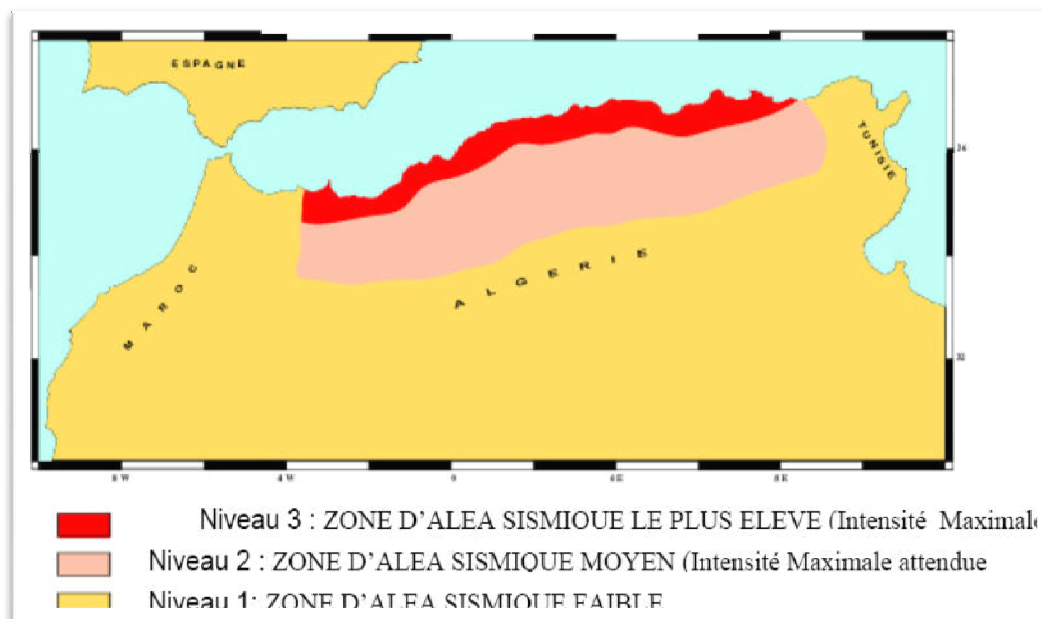


Figure 2.4 : carte du zonage sismique algérien.

Les premières exigences, lors de la conception d'un ouvrage, sont données par les normes de construction dans le cas de situations non sismiques. A celles-ci viennent s'ajouter des normes ayant directement trait à la construction d'ouvrage en zones sismiques. Depuis le séisme d'El Asnam de 1980, de nombreux travaux de recherche ont été menés dans le but d'atténuer les effets des séismes sur les constructions, notamment les travaux du Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique d'Alger (CGS) (Rapport-AFPS, 03). Les anciennes normes parasismiques algériennes sont connues sous le nom RPA88, elles préconisent deux méthodes pour le calcul dynamique des structures : la méthode statique équivalente et la méthode dynamique approchée (RPA, 88). Depuis 1999, des nouvelles règles parasismiques ont été établies sur le modèle Américain, elles sont connues sous le nom RPA99. Elles préconisent une méthode dynamique spectrale (RPA, 99). Selon les règles RPA99, les sites sont classés en quatre catégories en fonction des propriétés des sols qui les constituent. Chaque catégorie de site est caractérisée par deux périodes propres de vibration  $T_1$  et  $T_2$ . A chaque type de site est associé un spectre de réponse élastique calculé en fonction des caractéristiques du site considéré et de celles de la structure étudiée. [27]

#### II.4.1. Classification des zones sismiques

Le territoire national est divisé en quatre zones de sismicité croissante, soit :

Zone O : sismicité négligeable

Zone I : sismicité faible

Zone II : sismicité moyenne

Zone III : sismicité élevée

La figure (2.4) représente la carte des zones sismiques de l'Algérie et le zonage global des différentes wilayas.

Le territoire étudié est illustré sur cette carte. La faible disponibilité de données géotechniques dans certains secteurs a limité l'envergure de la couverture cartographique. [28]

#### **II.4.2. Caractéristiques de la sismicité algérienne**

Les caractéristiques de la sismicité algérienne sur la base des informations fournies par la sismicité historique, par les études de sismotectonique, de sismologie, de paléo sismologie, d'aléa sismique, le CRAAG possède aujourd'hui des indications importantes sur l'activité sismique en Algérie du Nord.

Cette activité se concentre essentiellement dans la région Nord du pays, quoique de façon très épisodique, quelques micro secousses sont enregistrées dans la partie saharienne. Dans la région Nord, la région tellienne est la plus active.

Le zonage effectué indique que les régions d'El Asnam, Oran et Alger sont les régions les plus menacées puisque dans ces zones, les séismes les plus importants se sont produits. Cette sismicité est liée aux mouvements tectoniques complexes de convergence de la plaque africaine au Sud et de la plaque eurasiennne au Nord.

La région de l'Est algérois, reconnue sismotectoniquement active depuis 1995 (travaux de Boudiaf, 1996 et 1998) a été sérieusement affectée le 21 mai 2003 par un tremblement de terre de Magnitude  $M_I = 6,8$  causant d'importants dégâts humains et matériels. Les autres régions du pays sont caractérisées par une sismicité diffuse localisée dans les zones de nappes telliennes dans les régions des Babors, du Hodna et du Constantinois.

Une importante activité sismique se trouve localisée dans les zones côtières et en mer Méditerranée. Dans cette région de la Méditerranée occidentale concernée par le contact entre les plaques africaine et eurasiennne : la tectonique de compression qui en découle génère de nombreuses failles actives dont le rejet provoque les séismes.

Le séisme du 21 mai 2003 qui a frappé la région de Boumerdès et d'Alger a marqué un grand tournant dans l'histoire de la sismicité en Algérie. Par sa force, sa magnitude (6,8 sur l'échelle ouverte de Richter), les pertes humaines qu'il a engendrées et les dégâts considérables qu'il a occasionnés, ce séisme sera ainsi devenu « le plus meurtrier qu'ait connu la région algéroise, notamment depuis plusieurs siècles (1716), et le second événement majeur ayant affecté l'Algérie du Nord après celui d'El Asnam du 10 octobre 1980.

### II.4.3. Aléa sismique régional

L'aléa sismique peut être défini comme étant la probabilité qu'un événement sismique d'une certaine intensité survienne au cours d'un intervalle de temps donné. Il est calculé à partir de la répartition statistique de l'ensemble des tremblements de terre historiques répertoriés.

### II.5. Le microzonage sismique

Le microzonage sismique vise à améliorer les estimations de l'aléa sismique par l'intégration d'éléments d'information détaillés sur la réaction d'un site de tremblement de terre à l'échelle d'une ville ou d'une région. Il s'agit d'un volet important de l'élaboration d'un modèle de prévision plus réaliste des mouvements du sol destiné aux analyses de l'aléa sismique, car l'intensité des secousses sismiques est fortement déterminée par les caractéristiques du site. Les effets de site sont paramétrés en fonction des propriétés géophysiques et géotechniques du sol. Citons à titre d'exemple le paramètre  $V_s-30$  (vitesse moyenne des ondes de cisaillement jusqu'à une profondeur de 30 m), actuellement utilisé dans nombre de codes du bâtiment comme indice servant à mesurer les effets d'amplification du site. Ce paramètre fournit une mesure quantitative permettant de tenir compte uniquement de certains aspects du comportement des sols sismiques, alors que d'autres facteurs comme la profondeur du sol et les périodes fondamentales sont aussi très importantes. Il est possible d'améliorer les prévisions du mouvement du sol soit par des corrections « génériques » utilisant les facteurs d'amplification du site, ou par des analyses géotechniques approfondies des effets de site locaux. [29]

Plusieurs approches sont disponibles et le choix ultime dépendra de la finalité du processus d'évaluation, dans lequel le microzonage s'inscrit, et des données et ressources disponibles.

Les problématiques de liquéfaction et de stabilité des pentes seront évaluées séparément. Le microzonage sismique se fait à l'échelle locale et s'appuie sur les données du zonage sismique régional algérien.

La procédure de microzonage développée visait également des objectifs fonctionnels de rapidité et de simplicité de mise en œuvre ainsi que d'optimisation de l'information géologique et géotechnique déjà acquise.

Les paramètres de base du microzonage sont l'épaisseur et les caractéristiques lithologiques et mécaniques des dépôts de sols rencontrés ainsi que les caractéristiques du socle rocheux. Les principales étapes de la démarche de microzonage sont:

- (i) la délimitation du domaine à l'étude,
- (ii) la modélisation et la caractérisation de site permettant de représenter la topographie du roc et de produire des images 2D ou même 3D de modèles géotechniques, et
- (iii) l'analyse des effets de site reliés au phénomène d'amplification et permettant de produire des cartes de susceptibilité aux aléas sismiques.

Le microzonage sismique, appliqué à l'échelle locale, peut fournir la bande de fréquences, l'amplitude et la variabilité de l'amplification supposée. Il peut ainsi permettre de déterminer un spectre de réponse associé à un site spécifique. Dans certains cas, l'aléa préconisé par la norme peut être réduit, alors que dans d'autres cas il doit être accru.

Le concept du microzonage sismique contribue donc à mettre en évidence certains sites dangereux, où des effets de site importants sont susceptibles de survenir.

## **II.6. Effet de site**

Construire parasismique, c'est d'abord choisir un site dont les propriétés géologiques limitent les risques d'effondrement. Il faut éviter les terrains en pente, exposés aux éboulements et glissements de terrain, les limites entre sols durs et sols mous et les sols qui peuvent se liquéfier et entraîner un enfoncement des fondations sous l'effet du séisme.

Lors d'un séisme, le glissement sur la faille génère des ondes sismiques qui vont se propager dans la Terre depuis le foyer du séisme jusqu'à la surface. Au cours de ce trajet, elles traversent des milieux géologiques aux propriétés mécaniques variées (densité, vitesse de propagation des ondes sismiques,...), ce qui va perturber leur propagation et accroître la complexité du signal sismique. En particulier, les couches les plus superficielles sont en général plus meubles (la vitesse des ondes y est plus faible), ce qui modifie notablement leurs caractéristiques et leur comportement mécanique. L'effet de site est le terme utilisé pour décrire la modification de la secousse sismique induite par la géologie locale.

Les effets de site se traduisent fréquemment par une augmentation de l'amplitude des enregistrements de la secousse sismique et de sa durée. Ce phénomène peut être illustré en comparant les secousses sismiques enregistrées sur un sol dur (rocher) et sur un sol mou (alluvions) à proximité.[30]

Le terme « site », que l'on caractérise en première approximation par la seule donnée d'un type de sol (rocher, sol ferme, sol mou, etc.), dépend de l'ensemble des paramètres géotechniques (épaisseur, pendage et caractéristiques mécaniques des couches de terrain) à l'échelle de la fondation de l'ouvrage ou à celle de la structure géologique (bassin sédimentaire) ; ces paramètres peuvent être évalués et pris en compte dans des cas simples (stratigraphie horizontale) mais échappent aux possibilités pratiques de collecte des données dans les études d'aléa à l'échelle régionale et même dans les études de sites particuliers, lorsque la réponse sismique de ceux-ci est fortement influencée par la topographie.

Comme l'indique le terme même de "tremblement de terre", l'essentiel des effets des séismes provient des vibrations associées aux ondes émises par le glissement soudain des deux lèvres de la faille. Ces vibrations peuvent être caractérisées par leur fréquence (pouvant aller de 0.01 à 50 Hz), et leur amplitude ; les ondes qui les propagent sont celles caractérisées par leur type (par exemple compression ou cisaillement), et leur vitesse de propagation. Cette dernière, relativement stable en profondeur dans la croûte terrestre, devient très fortement variable à proximité immédiate de la surface, car elle est en relation directe avec la compacité des sols et roches : ainsi, la vitesse des ondes de cisaillement varie de 3 km/s dans du granite sain, à parfois moins de 500 m/s dans le même granite mais cette fois fortement altéré, et de près de 1000 m/s dans des sédiments très compactés, à moins de 50 m/s dans des vases et tourbes. Dès lors, la propagation de ces ondes est très fortement affectée par ces hétérogénéités de surface, et il en va de même pour la répartition spatiale de l'amplitude des vibrations sismiques associées. Cette variabilité spatiale liée à la géologie de surface est classiquement appelée "effets de site".

Les effets de site se catégorisent en fonction des conséquences potentielles qu'auront les vibrations sismiques sur le roc ou les dépôts de sols locaux. En pratique, pour simplifier, on regroupe les effets de site en «*déplacements permanents*» et «*déplacements transitoires*». Les «*déplacements permanents*» des sols regroupent les cas de rupture de sol par liquéfaction ou glissements de terrain de même que les problèmes de tassements et de fissurations. Les «*déplacements transitoires*» concernent les modifications des signaux sismiques (positives, comme l'amplification, ou négatives) et sont généralement reliées aux contrastes d'impédance. Ces évaluations d'effets de site sont complexes et l'effort s'est porté, dans un premier temps, vers l'aléa «*déplacements transitoires*», caractérisé ultimement par la détermination des facteurs d'amplification.

Lorsque les propriétés du sol sont particulièrement défavorables (milieu sableux et saturé en eau), le sol peut perdre sa cohésion (phénomène de liquéfaction). Les bâtiments construits au-dessus de ce sol ne sont plus soutenus et peuvent basculer.

Dans des milieux géologiques à géométrie complexe (vallée glaciaire), les ondes sismiques se réverbèrent sur les interfaces géologiques du fait de l'existence d'un fort contraste entre les propriétés mécaniques des couches situées au centre de la vallée (remplissage sédimentaire) et la roche encaissante. Les ondes sismiques sont piégées : la durée et l'amplitude de la secousse sont fortement accrues. Les dégâts provoqués par les tremblements de terre sont fréquemment la conséquence d'effets de site locaux (concentration des dommages dans les vallées).

La nature du site est importante : la présence de sédiments lâches peut amplifier localement les ondes sismiques.

Selon le RPA99, les sites sont classés en quatre catégories en fonction des propriétés mécaniques des sols qui les constituent (RPA, 99). Les différentes catégories des sites sont les suivantes :

- S1 : site rocheux, caractérisé par une vitesse d'onde de cisaillement  $v_s$  800m/s.
- S2 : site ferme, caractérisé par une vitesse d'onde de cisaillement  $v_s$  400m/s à partir de 10m de profondeur.
- S3 : site meuble, caractérisé par une vitesse d'onde de cisaillement  $v_s$  200m/s à partir de 10m de profondeur.
- S4 : site très meuble, caractérisé par une vitesse d'onde de cisaillement  $v_s$  200m/s dans les 20 premiers mètres.

Les périodes caractéristiques  $T1$  et  $T2$  de chaque catégorie de site sont données dans le tableau suivant :

Sites	S1	S2	S3	S4
$T1$ (sec)	0.15	0.15	0.15	0.15
$T2$ (sec)	0.30	0.40	0.50	0.70

Tableau 2-1 : Périodes caractéristiques des sites

## II.7. Spectre de réponse

Le spectre de réponse des structures est un outil pour estimer la réponse d'un bâtiment au séisme. Le spectre de réponse est une « courbe » en pseudo accélération en fonction de la fréquence ; sur laquelle on lit les valeurs maximales de l'amplification du mouvement du sol. Il caractérise le type de sol et il est évalué pour le pic du mouvement sismique.

Sous l'action sismique, la structure effectue une série d'oscillations forcées suivant des lois complexes puis des oscillations libres qui s'amortissent plus ou moins rapidement. Les constructions sont repérées sur le spectre de réponse par leur période propre et leur amortissement relatif.

Du point de vue du calcul, les valeurs sont données pour un niveau (cas de l'oscillateur simple) et sont extrapolées pour l'oscillateur multiple et par conséquent l'étude d'une structure peut se ramener à celle de l'oscillateur simple parce que le calcul sur une structure à « n » degrés de liberté se ramène à l'étude de « n » oscillateurs simples chacun caractérisé par une période propre et un coefficient d'amortissement. On effectue alors le cumulé des réponses pour obtenir la réponse de la structure.

Les spectres de réponse tirent leur origine et leur intérêt de l'assimilation, en première approximation, du comportement sismique d'un bâtiment à la réponse d'un oscillateur simple à un degré de liberté. La représentation en spectre de réponse vise à donner accès directement aux mouvements subis par le centre de gravité de la structure. La représentation graphique d'un spectre de réponse est construite point par point en faisant varier la fréquence d'un oscillateur à un degré de liberté et en reportant cette fréquence en abscisse et le maximum temporel de la réponse à une sollicitation sismique en ordonnée. On obtient ainsi un spectre de réponse pour un amortissement fixé.

Les spectres de réponse élastiques sont très utilisés en ingénierie parasismique car, en première approximation, les structures simples peuvent être assimilées à un oscillateur à un degré de liberté dont la fréquence propre et l'amortissement sont à peu près connus. Les mouvements au centre de gravité peuvent alors être raisonnablement estimés dès lors que l'on suppose que la structure se comporte de manière élastique linéaire.

Sous l'action sismique, le sol est soumis à un déplacement variable. On s'intéresse au déplacement du centre d'inertie de la masse. On a alors un seul degré de liberté, à savoir le déplacement relatif de cette masse par rapport au sol et on a alors deux forces extérieures:



La réponse sismique d'une structure est exprimée par la prise en compte de l'équilibre dynamique des forces s'exerçant sur la structure pendant la durée du séisme, et déterminée lorsque la masse  $m$ , qui occupe la position déformée définie par  $d(t)$ , est soumise aux forces horizontales suivantes :

- Une force de rappel élastique exercée par le support de raideur  $k$ , qui est proportionnelle au déplacement relatif  $d(t)$  :

$$F_1 = -k d(t) \quad (2.3)$$

- Une force de freinage proportionnelle à l'amortissement  $c$  et à la vitesse relative  $v(t)$  ; autrement dit:

$$F_2 = -c v(t) \quad (2.4)$$

- Une force d'inertie développée par la masse  $m$  dans le sens contraire à l'accélération  $\Gamma(t)$  de l'action sismique ; les forces d'inertie caractérisant la résistance qu'opposent les masses à leur mise en mouvement ou à leur freinage, elles sont donc opposées aux forces élastiques :

$$F = -m \Gamma(t) = -m [\gamma(t) + a(t)] \quad (2.5)$$

Avec :

$\gamma(t)$  : accélération du sol ;

$a(t)$  : accélération de la masse  $m$  par rapport au sol.

Les déplacements de la masse  $m$  sont mesurés soit dans un repère relatif lié au point A [déplacement  $d(t)$ ], soit dans un repère absolu [déplacement  $D(t)$ ]. Les déplacements sont liés par la formule :

$$\Delta(t) = D(t) + d(t) \quad (2.6)$$

En écrivant l'équilibre des forces, on obtient :

$$F_1 + F_2 = -F(t) \quad (2.7)$$

On en déduit l'équation du mouvement :

$$m \Gamma(t) + c v(t) + k d(t) = 0 \quad (2.8)$$

Soit, compte tenu de la formule (2.5) :

$$m [\ddot{\gamma}(t) + a(t)] + c \dot{v}(t) + k d(t) = 0 \quad (2.9)$$

Soit encore :

$$m a(t) + c \dot{v}(t) + k d(t) = -m \ddot{\gamma}(t) \quad (2.10)$$

On constate qu'on se ramène à l'étude d'un oscillateur simple.

Avec les notations suivantes et en tenant compte de la définition de l'amortissement  $\zeta$ , l'équation (2.10) peut s'écrire sous la forme :

$$a(t) + 2\omega \zeta \dot{v}(t) + \omega^2 d(t) = -\ddot{\gamma}(t) \quad (2.11)$$

Avec :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

$$f = \frac{1}{T}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

Avec :

$k$  : raideur du système ;

$\omega$  : pulsation du système non amorti (en radian / second) ;

$T$  : période (en seconde) ; le mouvement étant périodique, la durée d'un cycle est appelée période du mouvement ;

$f$  : fréquence (en hertz) ;

On obtient ainsi à des spectres qui ne sont plus déduits mathématiquement d'un accélérogramme précis mais sont devenus des entités autonomes, artificiellement façonnées en fonction de divers impératifs de protection parasismique.

La solution est donnée par l'intégrale de Duhamel. On obtient le déplacement relatif :

$$d(t) = \frac{1}{\omega_D} \int_0^t \gamma(\tau) e^{-\zeta\omega(t-\tau)} \sin \omega_D(t-\tau) d\tau \quad (2.12)$$

Avec:

$\omega_D = \omega(1 - \zeta^2)$  : pseudo-pulsation des oscillations libres amorties ;

$\tau$  : variable d'intégration.

On constate que la valeur du déplacement ne dépend que de la pulsation  $\omega$ , du coefficient d'amortissement  $\zeta$  et de l'accélération  $\gamma$  du sol.

A partir de la formule (2.10) on obtient facilement la vitesse relative et l'accélération absolue.

Les structures ayant toujours des amortissements très faibles, on peut considérer que  $\omega_D = \omega$ , ce qui correspond à un oscillateur très peu amorti ; en négligeant les termes secondaires, les composantes du mouvement sismique deviennent :

- Le déplacement relatif :

$$d(t) = -\frac{1}{\omega} \int_0^t \gamma(\tau) e^{-\zeta\omega(t-\tau)} \sin \omega(t-\tau) d\tau \quad (2.13)$$

- La vitesse relative:

$$v(t) = -\int_0^t \gamma(\tau) e^{-\zeta\omega(t-\tau)} \cos \omega(t-\tau) d\tau \quad (2.14)$$

- La pseudo-accélération:

$$a(t) = +\omega \int_0^t \gamma(\tau) e^{-\zeta\omega(t-\tau)} \sin \omega(t-\tau) d\tau = -\omega^2 d(t) \quad (2.15)$$

Lorsque le déplacement relatif  $d$  de la masse a été calculé, on peut en déduire la force de rappel et donc calculer les efforts dans la structure :

$$F_1 = -kd \quad (2.16)$$

### II.7.1. Détermination des spectres de réponse

Les équations (2.13) à (2.15) permettent, à partir de l'enregistrement (accélérogramme) d'un séisme, de calculer systématiquement pour tous les oscillateurs simples possibles (c'est-à-dire pour toute la gamme de périodes et d'amortissements possibles) les valeurs de la réponse

maximale en termes de déplacements  $[d(t)]_{\max}$  et de tracer les graphiques correspondants, dits spectres de réponses des déplacements.

De même, on peut tracer les réponses maximales en termes de vitesse  $[v(t)]_{\max}$  et d'accélération  $[a(t)]_{\max}$  car les valeurs maximales de  $|d(t)|$ ,  $|v(t)|$  et  $|a(t)|$  sont celles qui intéressent prioritairement le concepteur de l'ouvrage. [31]

Le déplacement  $d(t)$  de la masse étant calculé pour chaque oscillateur, on peut déduire :

- Le spectre de réponse de déplacement, d'après l'équation (2.17) avec  $[a(t)]_{\max} / \omega = S_v$ :

$$S_d = [d(t)]_{\max} = S_v / \omega = D_{\max} \quad (2.17)$$

- Le spectre de réponse de vitesse :

$$S_v = [v(t)]_{\max} = \omega S_d \quad (2.18)$$

- Le spectre de réponse de l'accélération: il peut être tracé de la même façon, puisque l'accélération maximale et le déplacement maximal sont liés par la formule :

$$S_a = [a(t)]_{\max} = -\omega^2 d(t) = \omega S_v \quad (2.19)$$

Ou encore :

$$a_{\max} = \omega S_v = \omega^2 D_{\max} \quad (2.20)$$

### II.7.2. Utilisation des spectres de réponse

La pratique actuelle la plus répandue consiste à définir le chargement sismique par un spectre de réponse, c'est-à-dire par une représentation non plus dans le domaine du temps (accélérogramme), mais dans celui des fréquences ou des périodes.

Les mouvements du sol enregistrés lors d'un séisme se mettent principalement sous la forme d'un accélérogramme qui représente la variation de l'accélération dans une direction donnée en fonction du temps ; on peut de même enregistrer la vitesse ou le déplacement.

Il convient de noter qu'en un point du sol donné, les mouvements lors d'un séisme s'effectuent dans toutes les directions à l'horizontale comme à la verticale. C'est-à-dire il est enregistré habituellement pour un même séisme 03 accélérogrammes :

- Un accélérogramme de direction Nord-Ouest ;
- Un accélérogramme de direction Est-Ouest ;
- Un accélérogramme à la direction verticale.

Les spectres caractérisent ainsi les séismes beaucoup plus clairement que les accélérogrammes (signaux temporels) ; connaître l'histoire du mouvement à chaque instant  $t$  est un problème complexe. Extraire seulement les valeurs maximales est à la fois plus simple et plus significatif puisqu'elles conditionnent les sollicitations maximales.

En effet, toute structure est assimilable à un oscillateur multiple, mais son étude se ramène à celle d'un certain nombre d'oscillateurs simples.

L'utilisation d'un spectre s'effectue différemment selon qu'il s'agit d'un spectre de déplacement ou d'un spectre d'accélération.

### II.7.2.1. Utilisation d'un spectre de déplacement

En fonction de la période  $T$  (ou de la fréquence  $f$ ) et du coefficient d'amortissement  $\zeta$  de l'oscillateur, le spectre de déplacement relatif donne la valeur  $U_{\max}$  du déplacement relatif maximale. Ce déplacement imposé au système fournit directement la valeur de la force (voir les équations (2.3) et (2.20)) :

$$F_{\max} = kD_{\max} \quad (2.21)$$

### II.7.2.2. Utilisation d'un spectre d'accélération

En fonction de la période  $T$  (ou de la fréquence  $f$ ) et du coefficient d'amortissement  $\zeta$  de l'oscillateur, le spectre fournit la valeur maximale  $a_{\max}$  de l'accélération. On en déduit la valeur de la force statique appliquée à la masse et équilibrée par le système (voir les équations (2.5) et (2.18)) :

$$F'_{\max} = ma_{\max} \quad (2.22)$$

Le spectre d'accélération est le plus employé, car il fournit immédiatement la force d'inertie maximale agissant sur la masse en mouvement, ce maximum s'identifiant à celui de la force élastique développée dans le système. Si les ordonnées du spectre sont exprimées en prenant comme unité l'accélération due à la pesanteur ( $g$ ), elles fournissent le coefficient sismique propre à l'oscillateur (l'ouvrage), c'est-à-dire le coefficient qui, appliqué au poids de la masse

(mg), fournit la valeur de la force élastique produisant les mêmes sollicitations que la réponse dynamique.

Les valeurs des forces  $F_{\max}$  et  $F'_{\max}$  sont identiques et les deux méthodes conduisent au même résultat puisque par construction (voir équation (2.22)) les spectres de réponse sont liés par la relation suivante :

$$a_{\max} = \omega^2 D_{\max} \quad (2.23)$$

Par ailleurs, on peut remarquer que la définition de l'action sismique par un spectre de réponse est une méthode particulièrement adaptée pour :

- Synthétiser par une enveloppe couvrant tout le domaine des fréquences les effets de plusieurs accélérogrammes aux contenus très différents ;
- Prendre en compte la nature du terrain situé sous la construction ;
- Tenir compte de l'intensité probable du séisme, du niveau de protection recherché et ceci en fonction de l'importance du bâtiment étudié, ce qui revient à « caler » le spectre au niveau de l'action sismique.
- On abouti ainsi à des spectres qui ne sont plus déduits mathématiquement d'un accélérogramme précis mais sont devenus des entités autonomes, artificiellement façonnées en fonction de divers impératifs de protection parasismique.

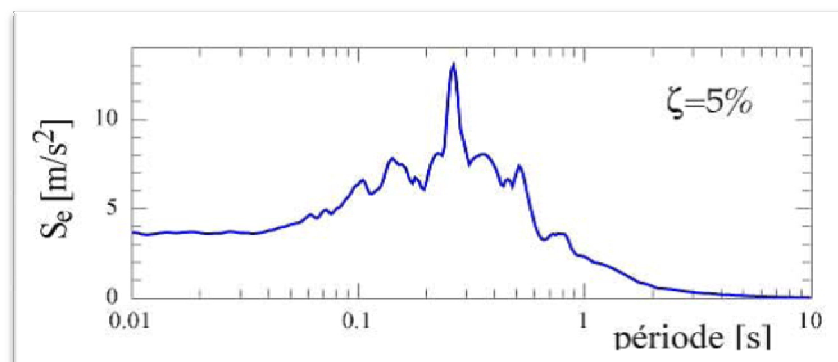


Figure 2.5 : spectre de réponse en accélération

Pour des objectifs de simplification, une hypothèse qui consiste à remplacer le spectre de réponse réel par un autre normalisé et simplifié a été prise en considération.

La figure suivante montre la forme simplifiée d'un spectre de réponse ainsi que ses différentes parties ;

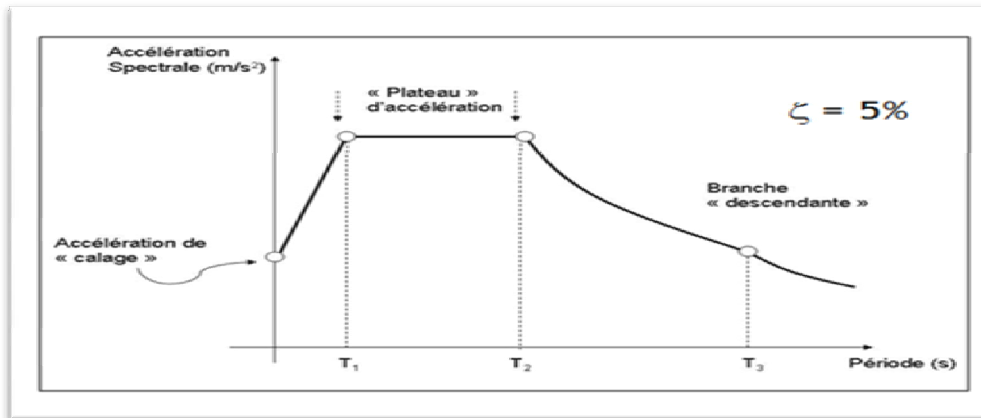


Figure 2.6 : forme simplifiée du spectre de réponse (approche réglementaire) [32]

## II.8. Types de spectre

En général il s'agit de réponse en accélération, mais il existe des spectres en déplacement et en vitesse.

On définit alors les spectres de réponse du déplacement, de vitesse et de l'accélération respectivement par  $S_d = |d(t)|_{\max}$  ;  $S_v = |v(t)|_{\max} = \omega S_d$  ;  $S_a = |a(t)|_{\max} = \omega S_v$

Ce sont des graphes représentant le maximum de déplacement, de vitesse ou d'accélération en fonction de la période. Du fait de leurs formes très irrégulières on procède à un lissage des spectres en ramenant les diverses régions à des segments de droites.

On prend en compte plusieurs spectres pour le calcul d'une structure en un site donné.

Ces spectres sont issus d'accélérogrammes enregistrés dans des sites semblables au site donné et on en tire un spectre de calcul, enveloppe de cet ensemble de spectres.

On normalise les spectres par une affinité pour pouvoir les comparer (même accélération maximale du sol).

On distingue:

### a) Spectre de réponse spécifique d'un site

Il s'agit d'un spectre élastique ou élasto-plastique correspondant aux séismes pouvant se produire sur un site particulier. Il tient compte des effets de site et du contexte sismotectonique local. (Ne pas confondre avec le spectre d'un séisme particulier)

### b) Spectres de réponse élastique réglementaires

On utilise ce type de spectres pour les constructions qui doivent rester dans le domaine élastique (pas de déformation plastique admise).

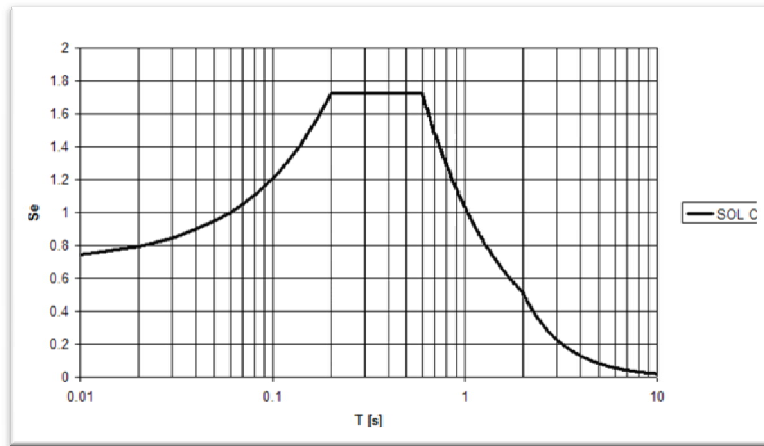


Figure 2.7: spectre élastique

### c) Spectres de dimensionnement réglementaires

On utilise ce type de spectre (élasto-plastique) pour le calcul des structures pour lesquelles on admet des incursions dans le domaine plastique. Par rapport aux spectres élastiques on néglige le gain sur les périodes courtes et on aggrave la réponse sur les périodes longues. Pour la conception, le spectre élastique est plus utile. Il a pour but d'intégrer le coefficient de comportement et ainsi de traduire la réponse de la structure dans le domaine post élastique. Il se déduit du spectre de réponse et correspond à un amortissement de 5%. Il n'a pas de signification réelle en ce sens qu'il ne représente pas de séismes réels mais est une base de calcul intégrant les différents paramètres de la structure.

Les spectres sont obtenus par le calcul de la réponse maximale d'un ensemble d'oscillateurs simples amortis (masse + ressort + amortisseur visqueux) excités à leur base par un accélérogramme.

Le spectre d'un séisme particulier sur un site donné ne caractérise pas de façon satisfaisante la réponse des constructions à un séisme futur dont les caractéristiques peuvent être très différentes (source différente).

Pour un site et un séisme donnés on note sur l'accélérogramme le pic du mouvement sismique. C'est sur ce pic que le spectre de réponse sera « calé ». Cette valeur sera considérée



comme la valeur « $T=0$  », c'est à dire l'accélération du sol ou celle d'une structure qui bouge avec le sol sans réponse (absence totale de déformation)

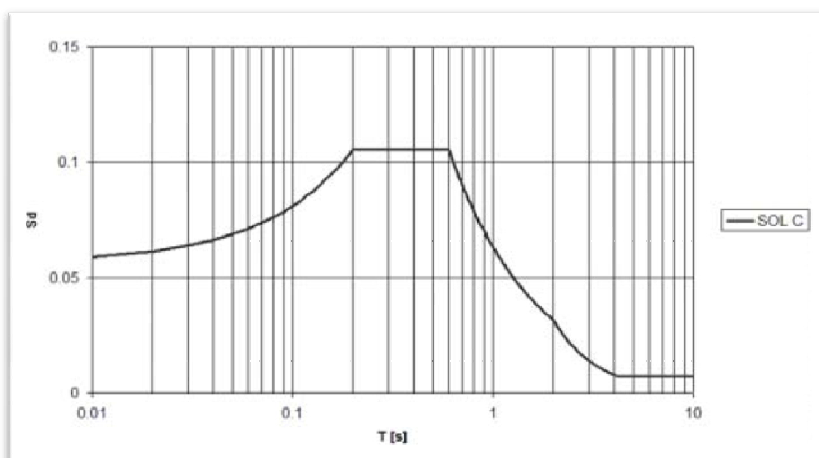


Figure 2.8 : Spectre de dimensionnement

## II.9. Facteurs qui influent sur les spectres de réponse

La réponse d'un ouvrage sous l'effet d'un séisme donné est fonction de sa masse, de sa rigidité et de sa capacité à amortir le mouvement.

Les caractéristiques du spectre varient avec:

- L'amortissement des constructions : Le problème posé par les déplacements horizontaux peut être résolu par l'augmentation de l'amortissement.

Pour un oscillateur simple à une période donnée, cette réponse, est réduite par rapport à celle d'un oscillateur ayant la même période et un taux d'amortissement réduit.

Les spectres de réponse sont généralement donnés pour un amortissement de 5%. On augmente l'amortissement si l'ouvrage comporte beaucoup de cloisons et il diffère avec les différents types de structure.

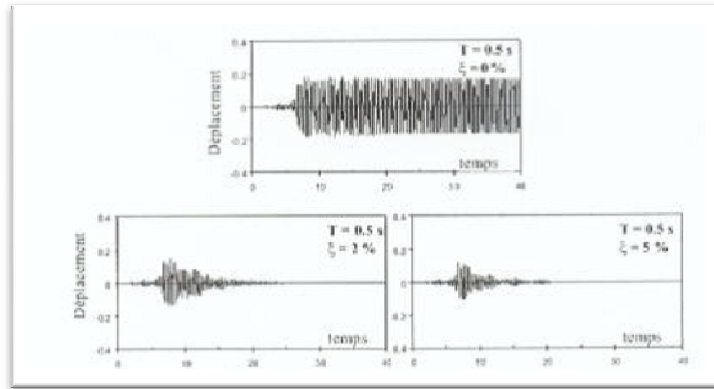


Figure 2.9 : Influence de l'amortissement sur la réponse de la structure.

- La nature du sol : l'intensité avec laquelle un séisme est ressenti en un lieu donné dépend dans une large mesure de la nature des terrains traversés par l'onde sismique et des conditions locales (topographie du terrain, présence de cavité,...).

Pour une même secousse sismique les spectres seront donc différents selon qu'ils correspondent à un affleurement rocheux ou à un dépôt sédimentaire.

Il est en effet souvent constaté que les ouvrages édifiés sur un sol meuble subissent des dommages plus importants que ceux situés sur un sol rocheux. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que les couches de sols meubles se comportent comme un oscillateur qui amplifie l'excitation appliquée à la base par le rocher.

En conséquence, lorsqu'il s'agit de choisir un spectre pour un site donné, il est très important de connaître la nature du sol de fondation, puisque les sols durs transmettent de préférence les hautes fréquences et les sols mous les basses fréquences.

- la période : Il est constaté que la diminution de l'effort sismique peut être obtenue par l'adaptation d'un système plus souple ( $k$  plus faible) et plus léger ( $M$  plus petit).

L'augmentation de la période s'obtient en diminuant le nombre d'appuis fixes ou en introduisant des appareils d'appui souples.

L'augmentation en période pourrait induire des efforts plus défavorables pour un certain nombre de sites où la période dominante du spectre est relativement élevée (site avec des sols de couverture de forte épaisseur et de qualité médiocre).

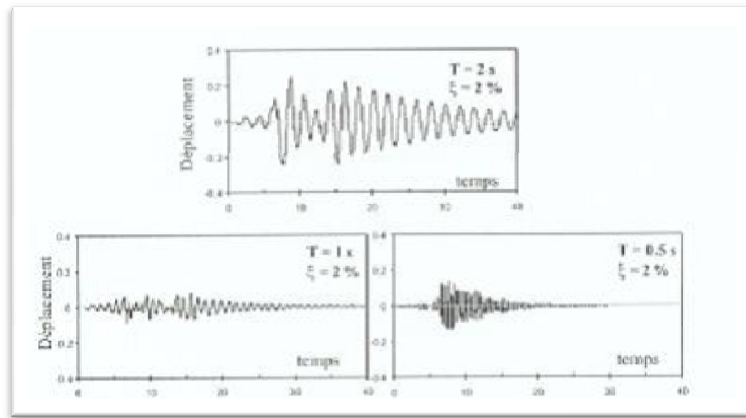


Figure 2.10 : Influence de la période sur la réponse de la structure.

- La distance épacentrale : plus on s'éloigne de l'épicentre du séisme, moins est l'intensité du mouvement sismique.

## II.10. Spectre de calcul

Lorsqu'il s'agit de déterminer le spectre de réponse à prendre en compte pour le calcul des ouvrages en un site donné, il est bien entendu exclu d'utiliser un seul accélérogramme, même si par chance il a été enregistré au voisinage du site. Il convient donc de déterminer un spectre de calcul (de projet) qui sera l'enveloppe d'un ensemble de spectres correspondant à des accélérogrammes convenablement enregistrés dans des sites comparables au site étudié.

L'idéal serait de pouvoir choisir dans un catalogue de séismes enregistrés ceux qui correspondent aux conditions du site étudié (même mécanisme au foyer probable, même magnitude, même profondeur et même distance focale, même nature du terrain, etc..).

Les accélérogrammes utilisés résultent de séismes d'importances différentes et les spectres de réponse que l'on déduit ne sont pas directement comparables. On normalise les spectres par une affinité pour pouvoir les comparer (même accélération maximale du sol).

Le spectre de calcul est obtenu en faisant l'enveloppe des divers spectres normalisé ; il doit ensuite être calé en lui faisant subir une affinité pour tenir compte :

- de l'intensité probable du séisme ;
- de l'importance pour la collectivité du bâtiment étudié.

La figure (2.11) représente l'allure que peuvent avoir de tels spectres de calcul.

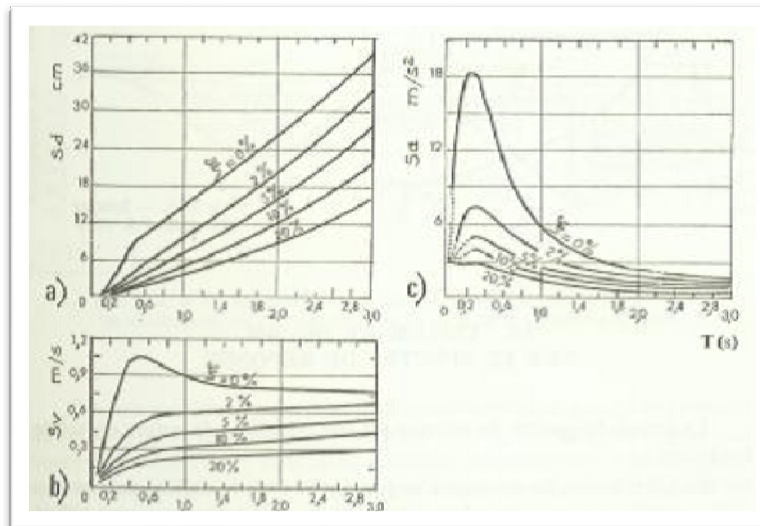


Figure 2.11 : spectres de calcul

Les spectres normalisés constituent seulement un moyen de couvrir de façon rationnelle l'ensemble des éventualités défavorables dans lesquelles peut se trouver placée une structure.

De ce traitement des accélérographes découle un intérêt pratique évident, muni du spectre de réponse, on peut déterminer, immédiatement et par simple lecture graphique, le déplacement et l'accélération maximaux d'un système quelconque ; il suffit de connaître le coefficient d'amortissement  $\zeta$  et la période propre  $T$ .

**Chapitre III :**

**MODELE MATHEMATIQUE**

**DES SYSTEMES AVEC**

**DISSIPATEURS**

**D'ENERGIE**

## Chapitre III

### MODELE MATHEMATIQUE DES SYSTEMES AVEC

### DISSIPATEUR D'ENERGIE

#### III.1. Introduction

Le calcul dynamique des structures nécessite une représentation adéquate des structures réelles par un modèle mathématique convenable.

Le modèle mathématique devrait tenir compte à la fois le plan de la structure, la distribution des dispositifs de dissipation d'énergie et leur emplacement afin de permettre l'évaluation explicite des chemins de calcul et de conception dans les éléments d'actions entourant la dissipation d'énergie.

#### III.2. Modèle élastique

L'un des grands challenges auxquels est confronté l'ingénieur de structure dans l'étude et l'analyse des dispositifs de dissipation d'énergie réside dans le développement d'un modèle représentatif de la structure de manière qu'il soit efficace dans l'analyse et la conception, à savoir l'élaboration de ce modèle afin d'obtenir le maximum d'avantages.

L'étude des bâtiments avec dissipateurs d'énergie est généralement réalisée par des programmes d'analyse élastique linéaire, étant donné la difficulté d'une analyse tridimensionnelle non linéaire avec rigueur, cependant, il est possible d'effectuer des analyses tridimensionnelles non linéaires, avec des logiciels de simulation tels qu'ETABS ou SAP2000, qui offrent la possibilité de modéliser des éléments qui travaillent élastiquement et d'autres qui travaillent dans l'intervalle inélastique.

En général, les dissipateurs d'énergie de type hystérétique sont placés dans des éléments de contreventement croisés ou en chevrons, comme le montre la figure 3.1. En utilisant ces dispositifs, il est impératif d'établir des méthodes pratiques d'analyse et de dimensionnement au moyen de programme de simulation classique d'analyse structurelle.

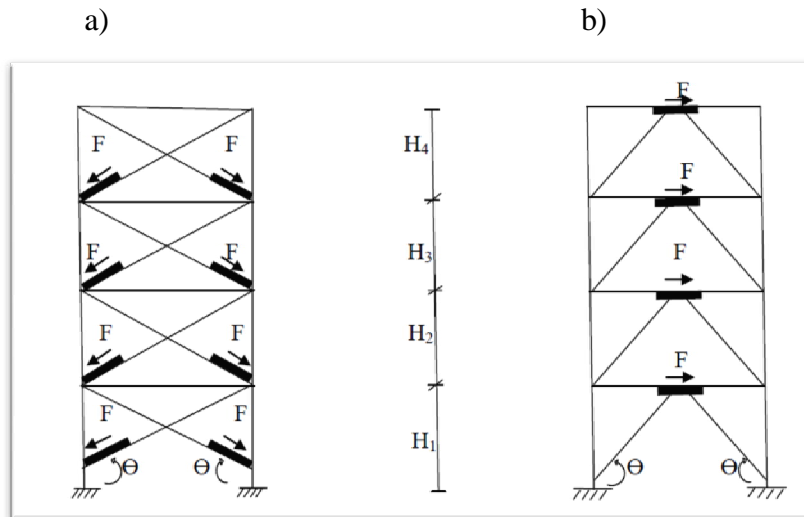


Figure 3.1 : Emplacement des dissipateurs d'énergie ;  
 a) Contreventements croisés, b) contreventement en chevron

Les dissipateurs d'énergie sont généralement montés sur des contreventements en acier ; un procédé facile de les modéliser dans un intervalle de comportement élastique consiste à modéliser le système "contreventement-dissipateur" comme éléments en diagonales équivalentes, dont la rigidité axiale est fonction de la géométrie du système, des rigidités relatives des dissipateurs et des contreventements utilisés, selon l'hypothèse que le système de dissipation "contreventement-dissipateur" fonctionne essentiellement comme un ensemble de ressorts en série travaillant dans le domaine élastique.

Un élément ADAS ou TADAS est défini comme étant l'ensemble du dispositif ADAS ou TADAS et des deux contreventements qui prennent en charge le dispositif. La rigidité horizontale de l'élément ADAS ou TADAS,  $K_a$  est fonction de la rigidité latérale des diagonales de contreventements,  $K_{diag}$  et la rigidité du dissipateur  $K_{dis}$ .

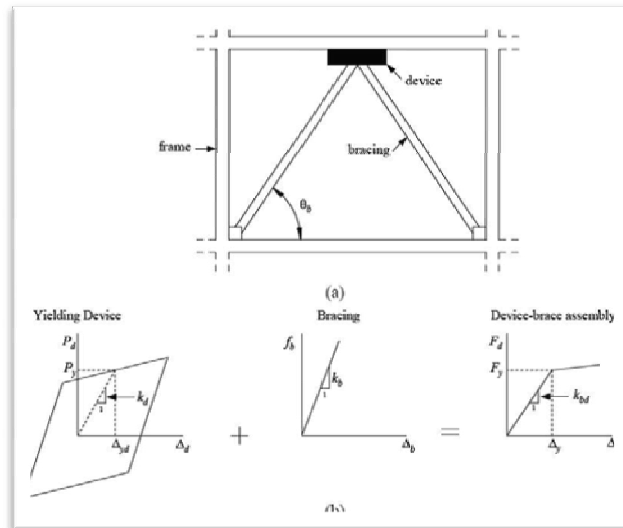


Figure 3.2 : dissipateur métallique; (a) configuration typique, (b) les paramètres du dispositif métallique, du contreventement et de l'élément (l'ensemble) [35]

Dans le cas de dissipateurs placés en diagonales croisées et travaillant axialement (figure 3-1-a), la rigidité équivalente du système de dissipation  $K_a$  par rapport à son axe longitudinal principal, est définie par l'expression:

$$\frac{1}{K_a} = \frac{1}{K_{dis}} + \frac{1}{K_{diag}} \quad (3-1)$$

Ou autrement ;

$$K_a = \frac{K_{diag} \cdot K_{dis}}{K_{diag} + K_{dis}} \quad (3-2)$$

Où  $K_{dis}$  est la rigidité élastique du dissipateur et  $K_{diag}$  la rigidité axiale élastique du contreventement.

On peut aussi écrire :

$$K_a = \frac{K_{dis}}{1 + \left( \frac{1}{B/D} \right)} \quad (3-3)$$



Le paramètre  $B/D$  est défini comme étant le rapport de la rigidité des diagonales à celle du dissipateur ;

$$\frac{B}{D} = \frac{K_{diag}}{K_{dis}} \quad (3-4)$$

Lorsque le dispositif utilisé est de type chevron, les dissipateurs travaillent dans le même sens latéral de la structure, mais dans une direction oblique par rapport à l'axe longitudinal des diagonales de contreventement. Dans ce cas, si le contreventement en chevron est formé de diagonales de même longueur et de même angle d'inclinaison ( $\theta$ ), la rigidité axiale de chaque diagonale équivalente  $K_a$  est donnée par :

$$\frac{1}{K_a} = \frac{1}{K_{diag}} + \frac{2 \cos^2 \theta}{K_{dis}} \quad (3-5)$$

En se basant sur cette formulation de la rigidité axiale équivalente des diagonales, il est possible d'effectuer une analyse qui modélise uniquement le comportement élastique, pour ainsi obtenir une bonne approximation. Néanmoins, il existe actuellement des programmes de simulation tels que ETABS et SAP2000 qui permettent de modéliser explicitement les dissipateurs d'énergie en considérant leur comportement inélastique.

Le coefficient  $SR$  (stiffness ratio) est le rapport de la rigidité horizontale de l'élément dissipateur ADAS à la rigidité du bâtiment d'un étage sans appliquer l'élément ADAS ( $K_s$ ).

$$SR = \frac{K_a}{K_s} \quad (3-6)$$

Le comportement sismique de la structure augmente avec l'augmentation de la valeur de  $SR$ . Mais dans la pratique, avoir un  $SR$  égal à 3 ou 4 est difficile à assurer.  $SR \geq 2$ , les valeurs des éléments sont adaptées pour un fonctionnement efficace.

La relation entre les paramètres de l'élément ADAS est exprimée dans l'équation suivante : [42]

$$F_y = SR \cdot K_s \left[ 1 + \frac{1}{(B/D)} \right] \cdot \Delta_y \quad (3-7)$$

### III.2.1. Dissipateur d'énergie type ADAS

Les systèmes ADAS sont formés de plaques d'acier, de section variable. Ils travaillent fondamentalement au cisaillement, et la plastification est quasi-totale en double courbure pour dissiper l'énergie par hystérésis.

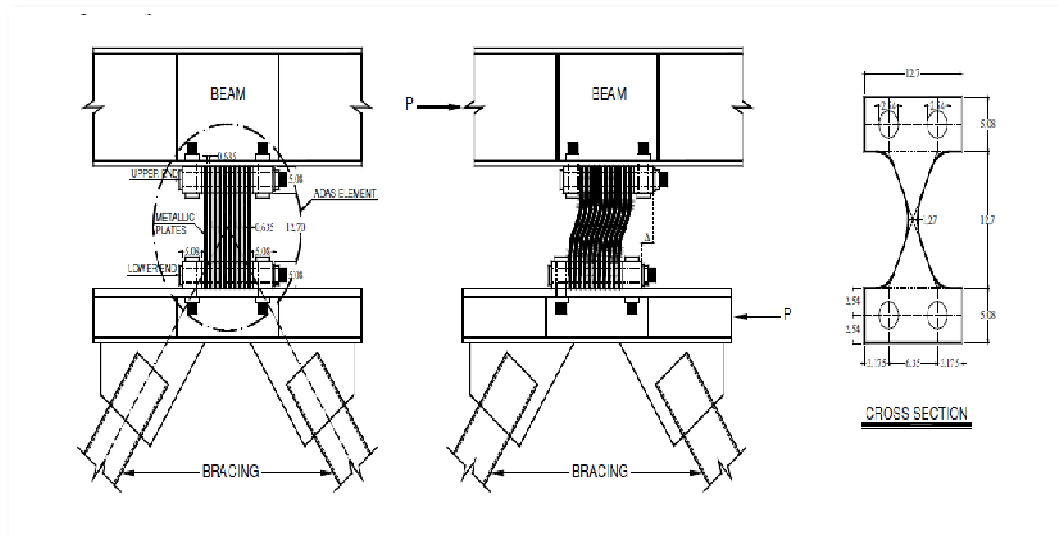


Figure 3.3: Le comportement d'un dissipateur de type ADAS pendant un séisme (toutes les dimensions en centimètres) [36]

La rigidité élastique initiale du dissipateur est donnée par ;

$$K_{ADAS} = n \left( \frac{2Ebt^3}{3h^3} \right) \quad (3-8)$$

La force nominale de plastification est donnée par :

$$F_y = n \left( \frac{\sigma_y bt^2}{2h} \right) \quad (3-9)$$

Où  $n$  est le nombre de plaques qui composent le système ADAS,  $b$  est la largeur des plaques,  $h$  la hauteur des plaques et  $E$  le module d'élasticité de l'acier.

Dispositifs	Base	Hauteur	épaisseur	gorge	Courbures	
	$b$ (mm)	$h$ (mm)	$t$ (mm)	$v$ (mm)	$R1$ (mm)	$R2$ (mm)
ADAS100_13	100	150	13		$\infty$	$\infty$
ADAS75_10	75	150	10	23	37.5	$\infty$
ADAS75_8	75	150	8	20	92.5	9.2
ADAS75_8B	75	150	8	23	37.5	$\infty$
ADAS75_6	75	150	6	14	60.1	16.7

Tableau 3.1: Propriétés géométriques, ADAS de cuivre [DE La Llera et al 2004] [37]

La limite d'élasticité des plaques d'acier utilisées pour l'ADAS est  $\sigma_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$ , pour un acier-E36.

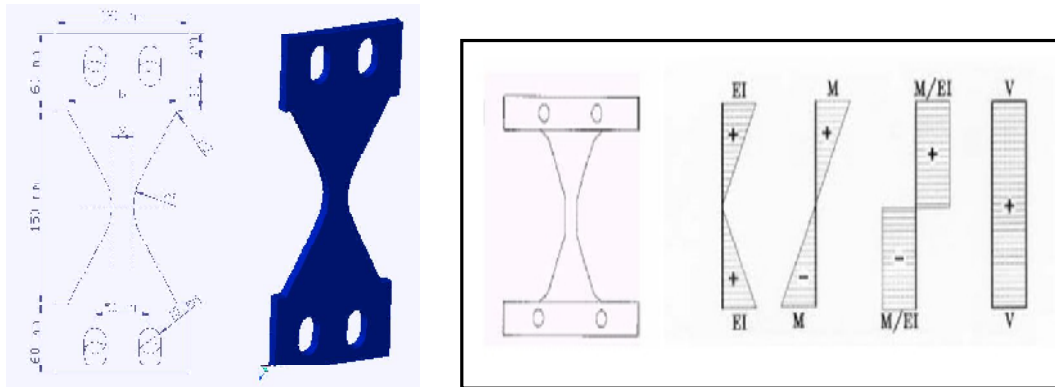


Figure 3.4 : Système ADAS ; géométrie et comportement [38]

Le déplacement critique du système ADAS correspondant est défini par:

$$\Delta_y = \frac{V_{ADAS}}{K_{ADAS}} \quad (3-10)$$

Et par substitution, on aboutit à :

$$\Delta_y = \frac{3\sigma_y h^2}{4Et} \quad (3-11)$$

Dans des études antérieures, il a été montré que les déplacements calculés avec les méthodes d'analyse présentées sont sous-estimés par rapport à ceux obtenus par les tests expérimentaux, puisqu'ils ne font pas état de l'hypothèse de comportement parfait admise dans les méthodes

analytiques ; les plaques qui font partie des dispositifs ADAS ont des glissements et des rotations à leurs extrémités.

Pour atteindre des objectifs de conception et d'analyse non linéaire, on peut considérer, de façon conservatrice, que les dispositifs ADAS ont un comportement élastique parfaitement plastique ( $K_2 = 0$ ), ou au plus admettre que le comportement observé dans les essais expérimentaux représente un comportement bilinéaire, dont la pente post-élastique varie entre 2 et 10 pour cent, mais pour des raisons pratiques, il est raisonnable de considérer que cette pente est d'environ 5 pour cent de la pente élastique, c'est-à-dire,  $K_2 = 0.05K_1$

Les dispositifs ADAS peuvent fournir une dissipation d'énergie fiable, car ils possèdent des boucles d'hystérésis stable à travers la plastification des plaques d'acier. Pour atteindre l'objectif précité, il est impératif de choisir une ductilité raisonnable et acceptable.

Le rapport de ductilité  $\mu$  est défini comme étant :

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (3-12)$$

Des essais expérimentaux ont montré que , l'ADAS est en mesure de développer des demandes de ductilité locale de l'ordre de 10, à savoir,  $\Delta_u = 10\Delta_y$  sans avoir à subir de dégradation de la résistance, tel que cette valeur doit être considérée comme un indicateur du niveau de déformation qui peut être toléré.

### III.2.2. Dissipateurs d'énergie type TADAS

Ces dispositifs, de géométrie triangulaire, sont formés de plaques d'acier et sont, en fait, une variante de l'ADAS, et travaillent également au cisaillement, à l'exception que la déformation plastique se produit en courbure simple, car ils sont articulés au sommet.

Tout comme l'ADAS, Ils sont placés sur contreventements de type chevron, et de cette façon les efforts générés dans les plaques sont de cisaillement, et c'est ainsi que les dispositifs fonctionnent mieux.

La rigidité élastique initiale du système TADAS est donnée par :

$$K_{dis} = K_{TADAS} = n \left( \frac{1}{6} Eb \left( \frac{t}{h} \right)^3 \right) \quad (3-13)$$

Où  $n$  est le nombre de plaques qui composent le système TADAS,  $b$  est la largeur des plaques,  $h$  la hauteur des plaques et  $E$  le module d'élasticité de l'acier. Le cisaillement de rupture du système TADAS est donné par :

$$F_y = n \left( \frac{\sigma_y b t^2}{6h} \right) \quad (3-14)$$

Et le cisaillement ultime du système TADAS est donné par :

$$F_u = n \left( \frac{\sigma_y b t^2}{4h} \right) \quad (3-15)$$

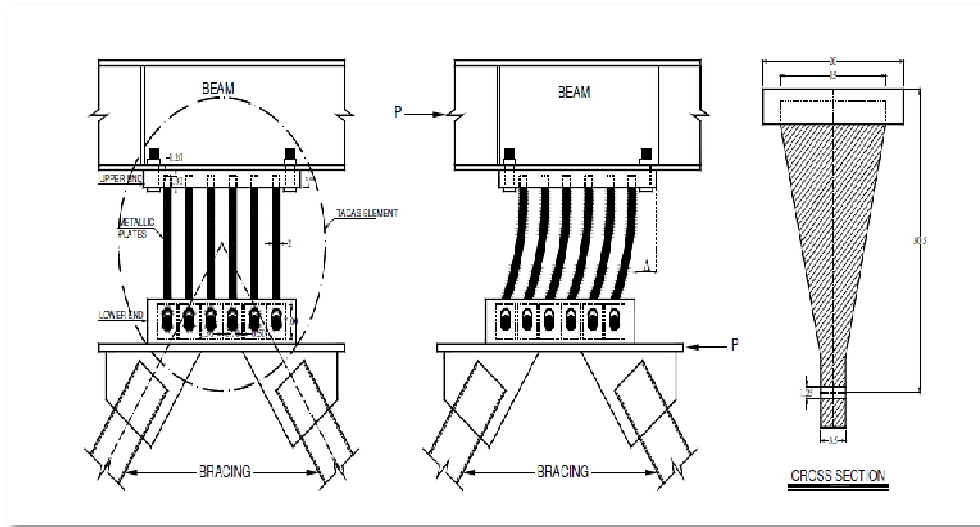


Figure 3.5 : Le comportement d'un dissipateur du type TADAS pendant un séisme (toutes les dimensions en centimètres) [36]

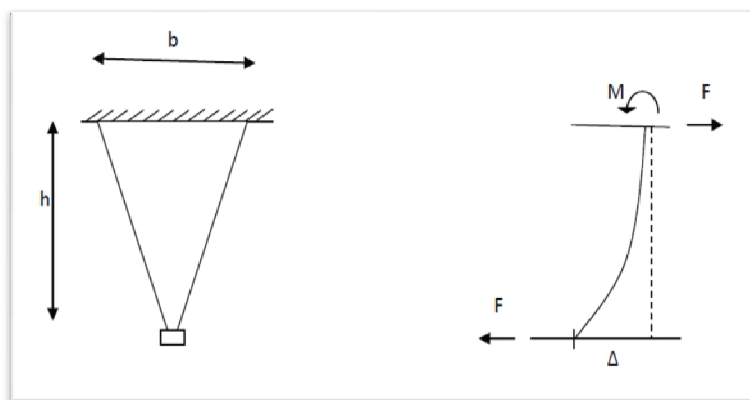


Figure 3.6 : Système TADAS ; géométrie et comportement

Le déplacement critique du système TADAS est défini comme suit [39] :

$$\Delta_y = \frac{\sigma_y h^2}{Et} \quad (3-16)$$

Les essais expérimentaux effectués sur les systèmes TADAS ont montré que leur comportement hystérétique est bilinéaire stable. Pour pouvoir effectuer une analyse non linéaire, il est donc possible de considérer que les systèmes TADAS ont un comportement bilinéaire avec une pente postérieure à la limite entre 3 et 5 % de la pente élastique.

D'après des essais expérimentaux, il a été montré que ces dispositifs sont capables de développer des demandes en ductilité locale de l'ordre de 8 ( $\Delta_u = 8\Delta_y$ ).

### III.3. Modélisation par analyse non linéaire

#### III.3.1. Rigidité effective du dissipateur

Pour une structure avec des dispositifs de dissipation de l'énergie à hystérésis, la relation force-déplacement est non linéaire, telle qu'il est très difficile d'évaluer les coefficients réels d'amortissement et de rigidité.

L'analyse non linéaire des structures avec dissipateurs d'énergie, du point de vue recherche, est très importante, puisqu'elle nous permet d'affiner nos connaissances sur le comportement des structures équipées avec ces dispositifs de dissipation d'énergie, et qui permettrait, ultérieurement, de développer des procédures de dimensionnement et, surtout, établir une réglementation plus rationnelle pour mettre en œuvre cette technologie dans la conception des structures.

Une des techniques d'approximation de l'analyse des structures consiste à remplacer le véritable système non linéaire par un système linéaire équivalent.

La rigidité effective d'un système de dissipation est directement liée à la déformation maximale atteinte, comme le montre la figure 3.7.

Dans la conception des structures avec dissipateurs d'énergie, on doit veiller à ce que les dissipateurs et les éléments de structure peuvent résister aux forces sismiques, si à priori, nous supposons une certaine ductilité  $\mu$  des dissipateurs.

Afin de simuler le comportement sismique des dispositifs ADAS, un comportement bilinéaire entre la force de cisaillement et le déplacement relatif est conclu. Ainsi, la force de cisaillement dans le dispositif ADAS est donnée par :

$$F_u = K_{eff} \cdot \Delta_u \quad (3-17)$$

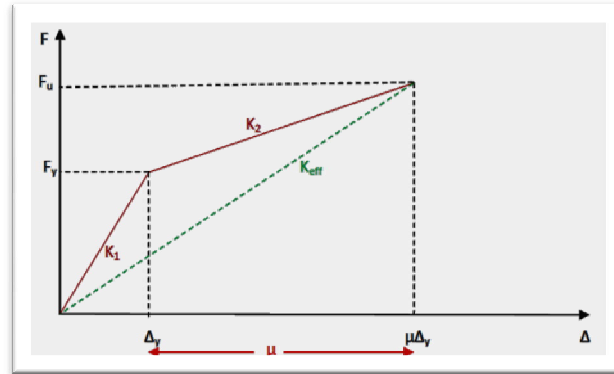


Figure 3.7 : Courbe effort-déformation d'un système avec comportement bilinéaire

Selon la figure précédente, la rigidité effective du dissipateur est calculée comme suit:

$$K_{eff} = \frac{K_1 + K_2(\mu - 1)}{\mu} \quad (3-18)$$

Où  $K_1$  est la rigidité élastique du dissipateur,  $K_2$  la pente post-élastique, et  $\mu$  étant la ductilité du dissipateur. [40]

La modélisation numérique du dispositif de dissipation d'énergie (ADAS et TADAS) est d'une importance capitale lorsque l'on étudie le comportement structural des bâtiments avec de tels composants (ce sont des éléments spéciaux de structure) donc, la définition de leur rigidité et de courbes de charge-déformation en utilisant des modèles d'analyse n'est pas simple.

### III.3.2. Méthodes de modélisation

Il existe trois méthodes de modélisation ;

#### III.3.2.1. Méthode de la diagonale équivalente

Il s'agit d'une procédure très utile dans l'analyse non linéaire. Elle consiste à définir des diagonales non linéaires qui simulent l'ensemble "diagonale-dissipateur", dont la rigidité initiale est calculée en utilisant les équations (3-1) et (3-5), et la capacité de l'élément en

diagonale équivalente est définie en fonction de la capacité de l'élément dissipateur  $F_u$  selon le dispositif utilisé. Les caractéristiques d'hystérésis de la diagonale équivalente sont celles du dissipateur.

Certains auteurs, soutiennent que ce n'est pas la meilleure façon de modéliser le dissipateur ; ses bases n'étant pas très solide parce qu'elle est modélisée comme un ensemble et on ne peut pas évaluer séparément le comportement des dissipateurs et celui des diagonales.

### III.3.2.2. Méthode de l'élément axial équivalent

Cette méthode suggère que les diagonales sont modélisées séparément des éléments de dissipation, qui comprennent l'utilisation des éléments axiaux équivalents, dont les propriétés de rigidité et de résistance correspondent à celles du dissipateur. Cette modélisation n'est pas parfaite, mais elle est plus appropriée que la méthode de la diagonale équivalente non linéaire, surtout dans le cas de l'utilisation des contreventements en chevron.

### III.3.2.3. Méthodes rigoureuses

L'utilisation de ces méthodes permet de contrôler séparément le comportement des diagonales et des dissipateurs d'énergie, ainsi que d'observer le travail qu'ils effectuent tous deux ensemble, ce qui n'est pas possible avec les méthodes décrites ci-dessus.

L'augmentation du nombre de degrés de liberté est en fait minime et, comme mentionné, elle permet d'avoir un modèle qui répond fidèlement aux conditions d'appuis et de connexion, et l'évaluation directe des incertitudes qui en découlent. Les comparaisons faites entre les méthodes rigoureuses et les données expérimentales sur table vibrante permettent de conclure que, pour des raisons pratiques, il est possible d'estimer les déplacements et les efforts au moyen de modèles analytiques rigoureux et étudier ainsi le comportement des dissipateurs. Les recommandations d'utilisation de ces méthodes sont les suivantes:

- a) Le modèle de la diagonale équivalente doit être utilisé uniquement dans l'analyse élastique en phase de pré-dimensionnement.
- b) En effectuant des analyses non linéaires des structures avec dissipateurs d'énergie, il convient de modéliser avec rigueur et de manière indépendante les dissipateurs et les



éléments de contreventement pour pouvoir contrôler séparément le comportement de chacun des deux éléments de l'ensemble même et avoir ainsi une meilleure approximation par rapport à la réalité.

- c) Dans le cas particulier de l'analyse non linéaire des structures avec des dissipateurs de type ADAS, il est recommandé de modéliser le dissipateur comme étant un bilinéaire et non pas un modèle élasto-plastique parfait.

#### III.4. Modèles hystérétiques

Les méthodes classiques d'analyse des structures ne considèrent pas l'existence des variations des propriétés dynamiques des systèmes structuraux, car elles utilisent pour cela des programmes informatiques qui considèrent seulement un comportement linéaire de la structure, de sorte que les modèles mathématiques ainsi élaborés ont des propriétés dynamiques invariables dans le temps.

Toutefois, les essais expérimentaux montrent que les bâtiments présentent des variations des caractéristiques dynamiques durant les sollicitations sismiques de moyenne ou forte intensité.

Un examen des changements permanents dans les caractéristiques d'une structure, peut être une indication qu'il y a une dégradation de la rigidité qui peut s'accumuler dans le système soumis à des sollicitations sismiques. Il existe, actuellement, un certain nombre de recherches visant à établir des modèles mathématiques représentant le comportement non linéaire des structures. Parmi les modèles mathématiques les plus utilisés:

##### Le modèle bilinéaire

Ce modèle, avec l'élasto-plastique sont parmi les modèles les plus simples pour représenter le comportement hystérétique non-linéaire des éléments. Le modèle d'hystérésis bilinéaire (Figure 3.8), est similaire au modèle élasto-plastique, sauf pour le fait qu'une pente positive est attribuée à la rigidité post-élastique pour simuler les caractéristiques d'écrouissage de l'acier. Ce modèle est utilisé pour modéliser les éléments en béton armé.

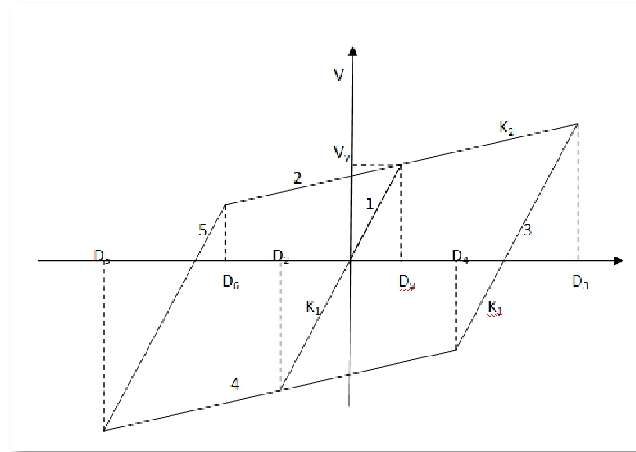


Figure 3.8 : Modèle bilinéaire

Pour des raisons de simplicité, nous représentons chaque cycle par un modèle bilinéaire. Ce modèle est basé sur des lignes droites qui font exactement la même surface que le cycle réel. Il est nécessaire de représenter chaque cycle par un modèle relativement fidèle à la pente de la courbe du cycle réel.

Le comportement hystérétique des modèles mentionnés ci-dessus suit les règles suivantes:

Selon la figure (3.8), qui représente un cycle d'hystérésis du comportement de l'élément où:  $V_y$  est l'effort de cisaillement limite,  $D_y$  la déformation limite;  $K_1$  la pente élastique initiale et  $K_2$  la pente post-élastique.

En considérant  $D_n$  la déformation prévue, le comportement de l'élément peut être résumé par les trois règles suivantes:

Si nous dénommons à  $D_y$ ,  $D_3$  ou  $D_6$  comme  $D_{\max}$  et à  $D_2$ ,  $D_4$  ou  $D_5$  comme  $D_{\min}$  alors :

a) L'élément est dans la branche 1, 3 ou 5 :

- Si  $D_n > D_{\max}$  passer à la branche 2
- Si  $D_n < D_{\min}$  passer à la branche 4

b) L'élément est dans la branche 2 :

- $D_n = D_{\max}$
- $D_{\min} = D_n - 2D_y$

c) L'élément est dans la branche 4 :

Si la décharge se produit, passer à la branche 1, 3 ou 5, selon le cas et déterminer:

- $D_{\max} = D_n + 2D_y$
- $D_{\min} = 2D_y$

### ✚ Modèle de Takeda

En 1970, Takeda a proposé un modèle de comportement hystérétique avec dégradation de la rigidité, et en 1975 Powell a apporté quelques modifications au modèle original. Les extensions apportées au modèle sont illustrées dans les figures 3.9 et 3.10. Elles comprennent:

- Une réduction de la rigidité à la décharge, par une quantité qui dépend de la rotation maximale précédente.
- L'intégration d'une rigidité de recharge variable, qui est plus élevée que celle du modèle original de Takeda et qui dépend aussi de l'histoire des rotations de l'élément d'extrémité.

La rigidité de déchargement,  $K_u$  dépend de la rotation maximale et est contrôlée par le paramètre  $\alpha$  qui sert à localiser le «point de reprise"  $R_{rep}$  comme le montre la Figure 3.9.a. Ce paramètre est toujours positif et prend des valeurs typiques entre 0 et 0,4. Peu importe la valeur de  $\alpha$ , la pente de la décharge sera toujours supérieure à la pente de la recharge dans l'autre sens, sinon des boucles d'hystérésis vont se produire avec une zone négative. La rigidité de rechargement,  $K_l$ , dépend aussi de la rotation maximale et est régie par le paramètre  $\beta$  (Figure 3.9.b). Ce paramètre est toujours positif et prend des valeurs entre 0 et 0,6.

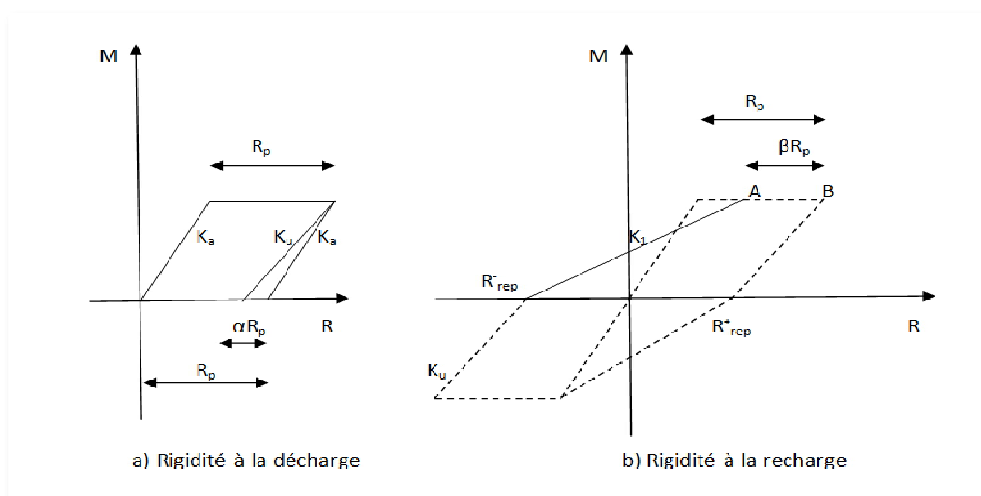


Figure 3.9 : Modèle de Takeda [41]

Les relations pour de petites amplitudes sont supposées semblables au modèle Takeda, mais des règles supplémentaires sont formulées pour calculer la rigidité de recharge.

Selon la figure 3.10, le point de changement du signe de la charge,  $R_{rev}$ , s'inscrit dans le point de reprise positive,  $R_{rep}^+$ , parce que l'excursion inélastique n'atteint pas le sommet précédent,  $\beta^+$ . Dans cette situation, il est peu probable que la pente de recharge négative se dirige vers le point  $A^-$ , qui serait le point de recharge défini en termes du paramètre  $\beta$  et le sommet précédent  $B^-$ . Si nous supposons que la trajectoire de la recharge est au point  $A^-$ , la pente de recharge aura tendance à être trop élevée et peut devenir négative si le point de chute  $R_{rev}$  est sur la gauche  $A^-$ . Pour éviter cela, nous supposons que le chemin de la recharge se dirige vers un point X qui se situe entre les points A et B, dans un endroit qui dépend de l'emplacement de  $R_{rev}$  entre  $R_{rep}^-$  et  $R_{rep}^+$ . La relation spécifique dans ce cas, pour la recharge négative est :

$$\frac{AX}{AB} = \left[ \frac{R_{rep}^+ - R_{rev}}{R_{rep}^+ - R_{rep}^-} \right]^N \quad (3-19)$$

Avec une relation similaire pour la recharge positive. Pour  $N=1$ , X est placé entre A et B dans la même proportion que  $R_{rev}$  est compris entre  $R_{rep}^+$  et  $R_{rep}^-$ . Pour  $N>1$ , X est plus pondéré vers le point A et  $N<1$  à un point B. Si  $\beta$  est égal à zéro, la charge est toujours vers le point B.

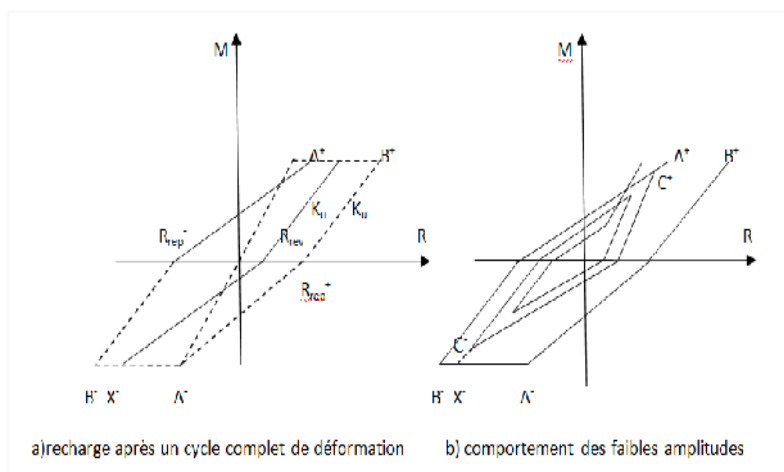


Figure 3.10 : Comportement cyclique du modèle de Takeda

La figure (3.10.b) montre une série de cycles de petites amplitudes. Le comportement est identique au modèle de Takeda, sauf que la rigidité de charge, du point C à la ligne AB, est basée sur la position du point d'inversion des signes, de la charge la plus récente.

Certaines fonctionnalités de ce modèle, en particulier celles associées aux oscillations de faible amplitude sont choisies de manière à éviter des comportements incompatibles. Cela est dû à l'absence de données et d'essais expérimentaux pour appuyer le modèle.

Les modèles mathématiques qui sont généralement utilisées pour représenter les systèmes structurels non linéaires considèrent exclusivement le comportement global du système, sans tenir compte des effets qui peuvent régir la réponse dynamique du système, comme par exemple, l'effet de couplage entre les mouvements de translation et de torsion du système et la participation de certains modes supérieurs.

La tentative d'intégrer les lois de comportement dans les modèles de système à plusieurs degrés de liberté, afin d'examiner les effets mentionnés ci-dessus, est un défi du point de vue mathématique, puisque le nombre de paramètres pour identifier le système augmente de manière significative, Ce qui génère des problèmes de stabilité et de convergence des algorithmes d'estimation.

### III.5. Approche générale parasismique (Bilan énergétique)

La cause principale du séisme est la libération soudaine de l'énergie. Les bâtiments qui reçoivent cette énergie ( $E_i$ ), auront à la dissiper ou la distribuer de quelque façon. généralement, il est connu que l'énergie d'entrée ( $E_i$ ) disparaît dans un bâtiment de quatre manières, à savoir, l'énergie de déformation élastique ( $E_s$ ), l'énergie du mouvement, ou énergie cinétique ( $E_K$ ), de l'énergie d'amortissement ( $E_D$ ), associés à l'amortissement modal de la structure, qui est exprimé comme une fraction du comportement énergétique d'amortissement critique et inélastique ( $E_H$ ), appelé aussi le comportement non linéaire de l'énergie ou la ductilité, le cas où les dispositifs utilisés sont de type ADAS comme élément de réduction de la réponse,  $E_H = E_{ADAS}$ ; Le bilan énergétique devient: [42]

$$E_i = E_s + E_K + E_D + E_H \quad (3-20)$$

Jusqu'à présent, la plupart des règlements stipulent que la plus grande contribution de ces quatre façons de dissiper l'énergie sismique dans un bâtiment est celle dans laquelle les nœuds poteaux-poutres dans des systèmes avec contreventements excentriques, peuvent dissiper par un travail inélastique, c'est à dire, à travers plusieurs cycles hystérétiques de chargement et de déchargement développés par ces nœuds pendant la durée du séisme.

En d'autres termes, l'énergie dissipée par ductilité: ( $E_H$ ) est, selon les codes actuels de conception parasismique, la principale source de dissipation de l'énergie de la structure d'un bâtiment, comme il a été prouvé que les trois autres sources de dissipation  $E_S$ ,  $E_K$  et  $E_D$  représentent généralement une petite partie de la dissipation d'énergie totale, à savoir:

$$E_H > E_S + E_K + E_D \quad (3-21)$$

Actuellement, différentes façons d'interprétation de la réserve inélastique de résistance des systèmes structuraux et d'estimation du comportement inélastiques sont tirées à partir de cette approche réglementaire.

Dans cette recherche, l'outil utilisé pour l'analyse des bâtiments étudiés a été le logiciel de simulation ETABS (Extended Three Dimensional Analysis of Building Systems) dans sa version (9.0). Ce logiciel permet l'analyse des modèles tridimensionnels en considérant simultanément un comportement linéaire pour certains éléments et non-linéaire pour d'autres. Il permet également l'analyse étape par étape, et il a la particularité d'effectuer une analyse qui calcule l'énergie cinétique d'entrée, l'énergie potentielle et l'énergie dissipée par le comportement modal et par hystérésis, selon l'équation d'équilibre dynamique. C'est pourquoi nous avons utilisé ce logiciel pour étudier l'influence de l'ADAS dans les bâtiments considérés.

### III.6. Types d'analyses

Dans le cadre de cette recherche, nous avons effectué une analyse non linéaire pas à pas. Deux accélérogrammes de deux séismes différents sont considérés dans cette étude : El Centro, et Landers. Le premier, El Centro, de sismicité moyenne ( un PGA de 0,436g) et le deuxième, Landers , de faible sismicité (un PGA de 0,151g). Ces deux accélérogrammes nous les avons utilisés pour l'analyse de deux bâtiments ; Le premier, de quatre niveaux, tandis que le deuxième est de vingt niveaux.

Afin de modéliser les structures étudiées dans ce travail, nous avons utilisé le logiciel d'analyse tridimensionnelle ETABS en intégrant dans le modèle tridimensionnel les éléments ADAS. Pour représenter ces éléments, nous avons employé l'élément de liaison (link) en plasticité non linéaire, dont la rigidité élastique est définie par :

$$K_{\text{ADAS}} = K_D = \frac{F_y}{\Delta_y} \quad (3-22)$$

Comme mentionné précédemment, le logiciel ETABS est en mesure d'effectuer une analyse en considérant la non-linéarité des dissipateurs d'énergie tout en tenant compte du comportement linéaire pour le reste des éléments.

### III.7. Hypothèses d'analyse

Les hypothèses d'analyse faites dans le cadre de ce travail sont résumées ci-dessous:

- Analyse tridimensionnelle des structures. C'est une analyse en 3D qui considère l'influence de tous les éléments du bâtiment, et qui peut également tenir compte des phénomènes tels que la torsion, qui, dans certains cas, peut s'avérer importante, surtout lorsque la rigidité n'est pas distribuée d'une manière plus ou moins symétrique.
- Le matériau qui constitue les éléments de la structure est homogène et isotrope, c'est à dire qu'il se comporte avec les mêmes propriétés dans toutes les directions et qu'il est élastique linéaire.
- Le point de jonction entre les éléments est considéré comme étant rigide.
- Il y a un diaphragme rigide à chaque étage. Tous les points d'un étage ont le même déplacement en plan. Cette considération est possible par l'existence d'une dalle suffisamment rigide dans les directions orthogonales à son plan.
- La jonction poteaux-fondation est infiniment rigide, ce qui permet de ne pas tenir compte de l'interaction sol-structure.
- Le séisme est linéairement indépendant dans les deux directions perpendiculaires au plan du bâtiment. Pour chacun des bâtiments, on effectue l'analyse dans le sens de travail des dissipateurs d'énergie.
- Comportement bilinéaire des dissipateurs. Pour analyser le comportement de l'ADAS, il est considéré qu'ils suivent les règles d'un modèle bilinéaire dont la pente post-élastique est de cinq pour cent de la rigidité initiale.

- Les bâtiments ont un amortissement modal d'une valeur de trois pour cent de l'amortissement critique. Il est considéré que cette valeur est représentative des structures qui ont des caractéristiques semblables aux bâtiments analysés.



**Chapitre IV :**

**INFLUENCE DES DISSIPATEURS**

**SUR LES STRUCTURES**

**DE PERIODE**

**COURTE**

## Chapitre IV

### INFLUENCE DES DISSIPATEURS SUR LES STRUCTURES

#### DE PERIODE COURTE

##### IV.1. Introduction

Pour illustrer l'effet du système de dissipation d'énergie sur les réponses des structures, deux études comparatives ont été faites. La première est la comparaison des réponses d'une structure en modifiant le coefficient sismique et pour différents pourcentage de rigidité et la deuxième est l'étude de l'influence de la période de vibration de la structure (période courte et période longue) sur l'efficacité du système de dissipation d'énergie.

##### IV.2. Description de la structure

La première structure utilisée dans l'étude comparative est un bâtiment métallique à quatre niveaux de forme rectangulaire en plan. Les dimensions dans le plan sont : 18 m dans la direction X et 15 m dans la direction Y, ce qui donne une superficie de 270 m<sup>2</sup>. La structure comporte trois travées dans le sens d'analyse avec une longueur de 6 m chacune ainsi que trois travées dans la direction perpendiculaire avec une longueur de 5 m chacune. La hauteur entre les étages est de 3 m.

Pour ce bâtiment, les portiques sont constitués de poutres et de solives IPE 330, de poteaux HE240A. Le contreventement est assuré par des diagonales de type chevron UPN160. On ce qui concerne les planchers, qui reposent sur l'ensemble de poutres et de solives métalliques, on a choisi des planchers mixtes à dalle collaborant. Le plancher terrasse est identique aux planchers courants sauf pour la partie supérieure qui comprend des couches supplémentaires (étanchéité, gravillon,...)

Le plancher est constitué d'une dalle de 16,5 cm d'épaisseur du béton armé reposant sur bac d'acier et posé sur les poutrelles, ce qui peut donner au plancher une rigidité suffisante pour pouvoir appliquer l'hypothèse de diaphragme rigide.

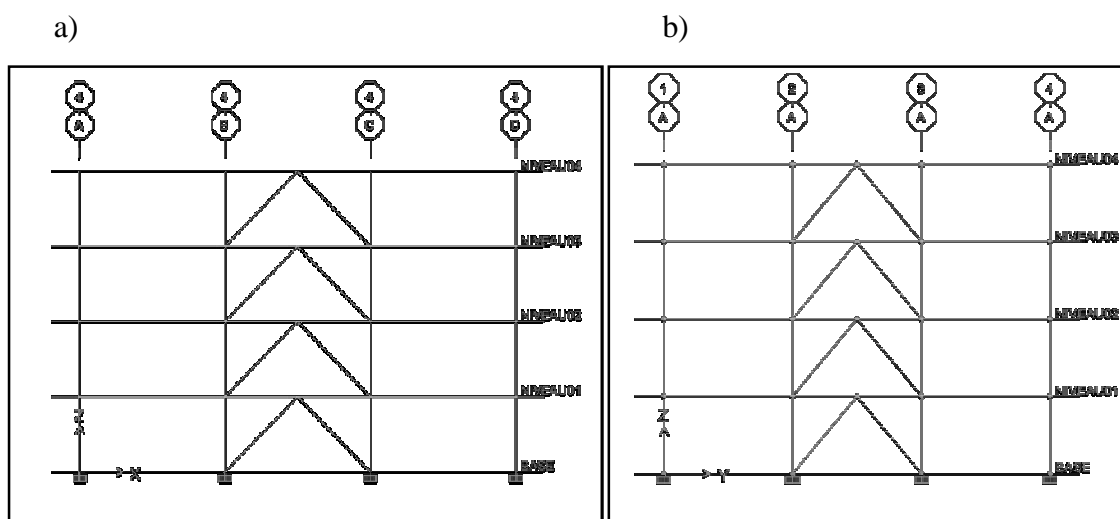
Dans la direction d'analyse, dans ce cas la direction X, les dissipateurs d'énergie sont placés au niveau des portiques de rive ; dans la travée centrale, montés sur des contreventements de type chevron, puisque ce type de contreventement permet une meilleure performance des dissipateurs hystérétiques de type ADAS.

Il est à noter que pour contrôler les variables de l'étude, les dissipateurs sont placés dans un seul sens, d'ailleurs c'est uniquement dans cette direction que sont appliqués les accélérogrammes sismiques ; d'où, dans le sens qui n'est pas celui de l'analyse, là où les accélérogrammes sismiques ne sont pas appliqués, on n'utilise pas de dissipateurs. Toutefois, si l'on considère une analyse tridimensionnelle de la structure, on doit tenir compte, dans l'analyse de la structure, de la participation modale des modes correspondants à la direction perpendiculaire à celle des modes d'analyse et de torsion (participation qui n'est pas prise en considération dans l'analyse plane).

Dans la direction perpendiculaire à la direction de l'analyse, à savoir la direction Y, également en travée centrale des portiques de rive, on place des contreventements sans dissipateurs ; de type chevron aussi ; dans le but de fournir une rigidité latérale au bâtiment dans ce sens.

Pour ce bâtiment, nous allons étudier trois combinaisons différentes de rigidité latérale : la première, lorsque les portiques prennent 75% de rigidité latérale et l'ADAS prend 25%, dans la seconde, les portiques prennent 50% et les dispositifs ADAS les autres 50%, et enfin, une distribution de rigidités tel que les portiques prennent 25% et l'ADAS les 75% restants.

Le cisaillement à la base est divisé par le nombre de dissipateurs qui sont au premier niveau (2) et cette valeur est attribuée aux deux premiers niveaux. L'effort tranchant du troisième niveau est divisé par le nombre de dissipateurs qui sont au troisième niveau (2) et cette valeur est attribuée aux deux niveaux supérieurs.



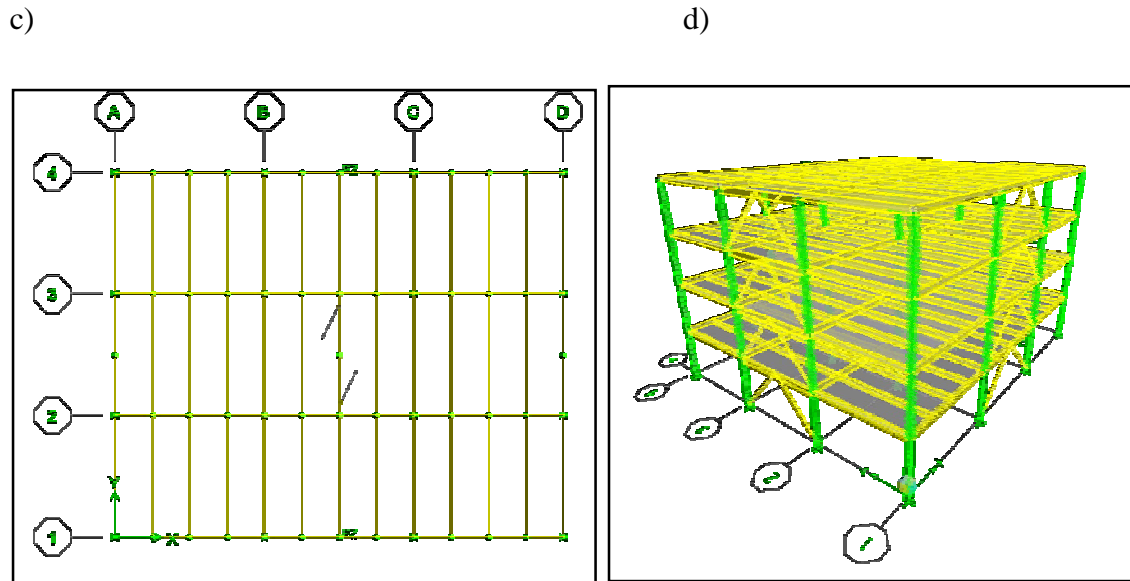


Figure 4.1 : la structure étudiée : a) vue en élévation dans la direction X, b) vue en élévation dans la direction Y, c) vue en plan avec l'emplacement des dissipateurs (PZ), d) vue en 3D

### IV.3. Description du système de dissipation d'énergie

Le dispositif choisi pour cette étude est un ADAS 75\_10, ce qui signifie des plaques métalliques de hauteur  $h = 150\text{mm}$ , de largeur de base  $b = 75\text{mm}$  et d'épaisseur  $t = 10\text{mm}$  (voir tableau 3.1 dans le chapitre 3).

La limite d'élasticité des plaques d'acier utilisées pour l'ADAS est  $\sigma_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$ , pour un acier-E36.

### IV.4. Accélérogrammes d'analyse

Dans l'analyse dynamique des réponses des structures par accélérogramme, pour comparer l'influence des trois pourcentages de la rigidité du dispositif ADAS de la rigidité latérale de la structure sur la réponse dynamique des structures pour différents Coefficients sismiques, et sous différentes excitations sismiques, les enregistrements sismiques considérés sont les suivants :[46]

- La composante d'El CENTRO du séisme d'IMPERIAL VALLEY (1979).
- La composante de YERMO du séisme de LANDERS (1992).

Avec des accélérations maximales du sol (Peak Ground Acceleration) PGA de 0.436 g et 0.151 g, respectivement. Les accélérogrammes de ces excitations sont représentés respectivement sur les figures suivantes :

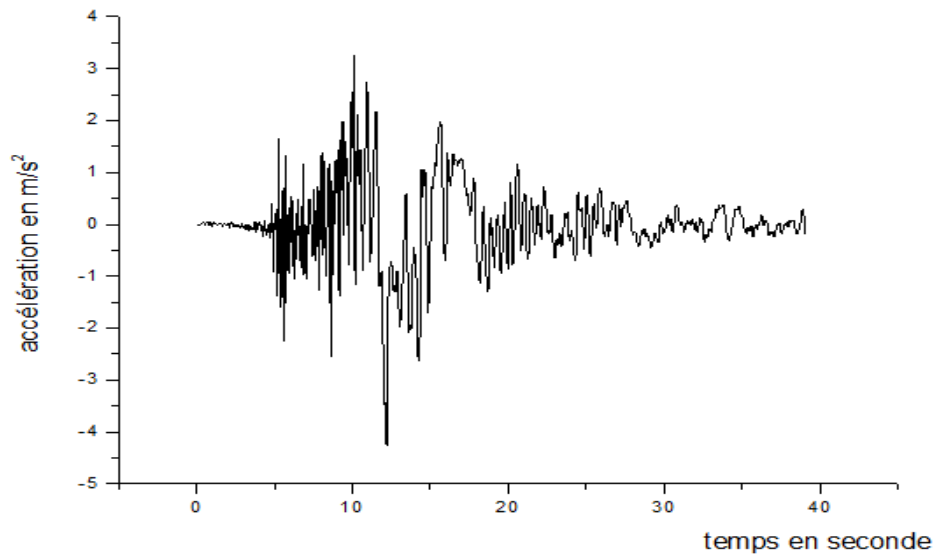


Figure 4.2 : Accélérogramme de la composante d'El Centro du séisme d'Imperial Valley (1979) avec un PGA=0,436g

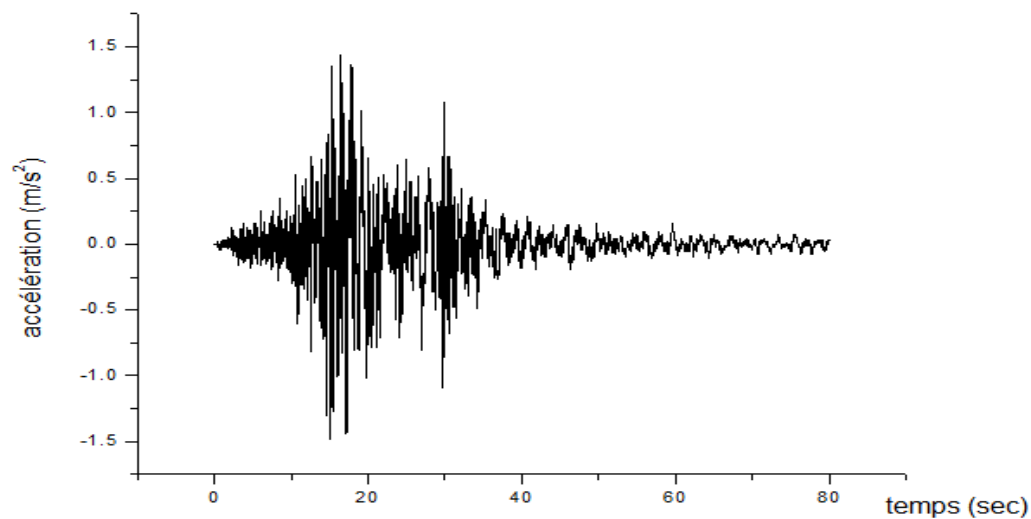


Figure 4.3 : Accélérogramme de la composante de Yermo du séisme de LANDERS (1992) avec un PGA=0,151g

#### IV.5. Coefficients sismiques

Afin de trouver l'effort tranchant statique à la base  $V$ , avec lequel on doit déterminer le pré dimensionnement des dissipateurs d'énergie, on a utilisé le règlement IBC2000 (International Building Code). [47]

$$V = C_s W$$

Avec :

$C_s$  : Le coefficient de la réponse sismique,

$W$  : Le poids de la structure.

$$C_s = \frac{S_{DS}}{R/I}$$

Avec :

$S_{DS}$  : L'accélération spectrale de design (conception) pour la période courte

$R$  : Le facteur de modification de la réponse. Pour notre structure, on prend  $R = 6$  (cas d'une structure métallique avec des contreventements concentriques)

$I$  : Le facteur d'importance d'occupation, on prend  $I = 1$  (cas d'une

On a considéré que notre bâtiment est situé dans une région rocheuse où l'accélération du sol  $S_s = 0,5g$  .

La réponse spectrale d'accélération maximale est donnée par :  $S_{MS} = F_a \cdot S_s$ , où  $F_a$  est le coefficient de site ( $F_a = 1$ ). Donc,  $S_{MS} = 0,5g$

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS}$$

Par substitution, on obtient :  $S_{DS} = 0,333g = PGA$

Alors,  $C_s = 0,0555$

N° d'étage	$h_i$ (m)	$W_i$ (KN)	$W_i \cdot h_i$	$F_x$	$V_x$ (KN)
1	3	1169,59	3508,77	26,3677747	253,200435
2	6	1169,58	7017,48	52,7350986	226,83266
3	9	1169,59	10526,31	79,1033242	174,097562
4	12	1053,41	12640,92	94,9942375	94,9942375
La somme			33693,48	253,200435	

Tableau 4.1: résultats du calcul statique

Avec ;  $h_i$  :Hauteur d'étage (m)

$W_i$  : Poids d'étage du niveau « n » (KN)

$F_x$  : distribution de l'effort tranchant (KN) où 
$$F_x = V \frac{W_x h_x}{\sum_{i=1}^n W_i h_i}$$

$V_x$  : Effort tranchant du niveau « n » (KN) où 
$$V_x = \sum_{i=x}^n F_i$$

Les paramètres des dispositifs		Les pourcentages de rigidité des dissipateurs		
		25%	50%	75%
<b>adas1</b>	$V_{adas}$	31,6500544	63,3001088	94,9501631
	$K_{eff}$	1556,81527	3113,63053	4670,4458
	$K_1$	10736,657	21473,314	32209,971
	$F_y$	21,8276237	43,6552474	65,4828711
<b>adas2</b>	$V_{adas}$	21,7621952	43,5243904	65,2865856
	$K_{eff}$	1070,44738	2140,89476	3211,34214
	$K_1$	7382,39572	14764,7914	22147,1872
	$F_y$	15,0084105	30,016821	45,0252315

Tableau 4-2 : Les paramètres des deux dissipateurs

avec  $V_{adas}$  : L'effort tranchant du 1<sup>er</sup> niveau du palier (KN)

$K_{eff}$  : La rigidité effective du dissipateur (KN.m)

$K_1$  : La rigidité élastique du dissipateur (KN.m)

$F_y$  : La limite d'élasticité du dissipateur (KN)

Cette structure est analysée avec le système de dissipation d'énergie, pour différents coefficients sismiques (pour étudier l'influence de l'effet de site sur la réponse de la structure). On a fait varier le coefficient sismique pour des valeurs de  $0,025C_s$ ,  $0,050C_s$ ,  $0,100C_s$ ,  $0,150C_s$ ,  $0,200C_s$  et  $C_s$

## IV. 6. Comparaison des résultats

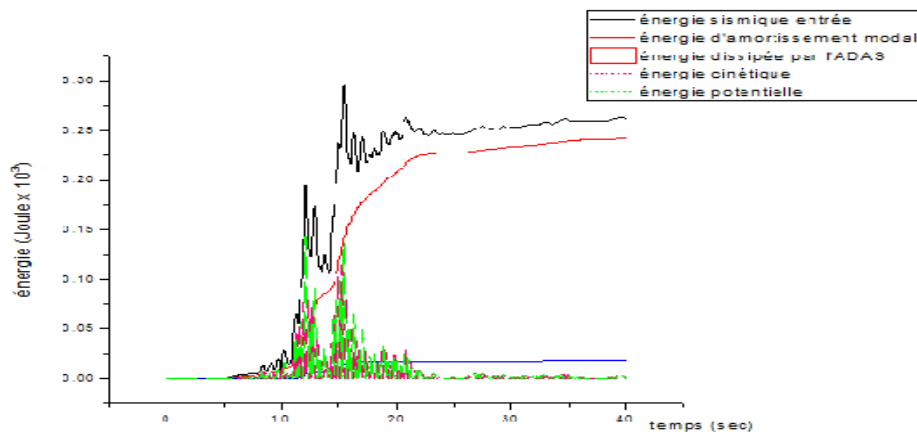
### IV.6.1. Energies

Une partie de l'énergie induite lors du séisme (Input Energy) est absorbée par les déformations plastiques correspondant au comportement hystérésis du système de dissipation d'énergie ADAS (Non-linear Link Energy) et la partie restante connue sous le nom d'énergie transférée, est divisée à son tour ; une partie de cette dernière est dissipé par l'amortissement structural correspondant au comportement visqueux de la structure qui s'appelle l'énergie de l'amortissement modal (Modal Damping Energy) et la partie restante compose l'énergie cinétique (Kinetic Energy) de la masse et l'énergie potentielle (Potential Energy) les déformations élastiques structurales.

$$E_{sismique} = E_{ADAS} + E_{modal} + E_{cinétique} + E_{potentielle}$$

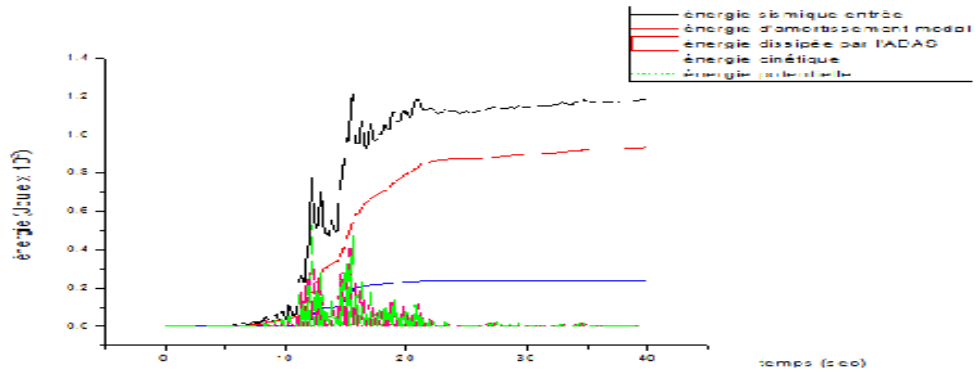
Les résultats des différentes formes de l'énergie sont représentés dans les courbes énergétiques suivantes :[48]

a)

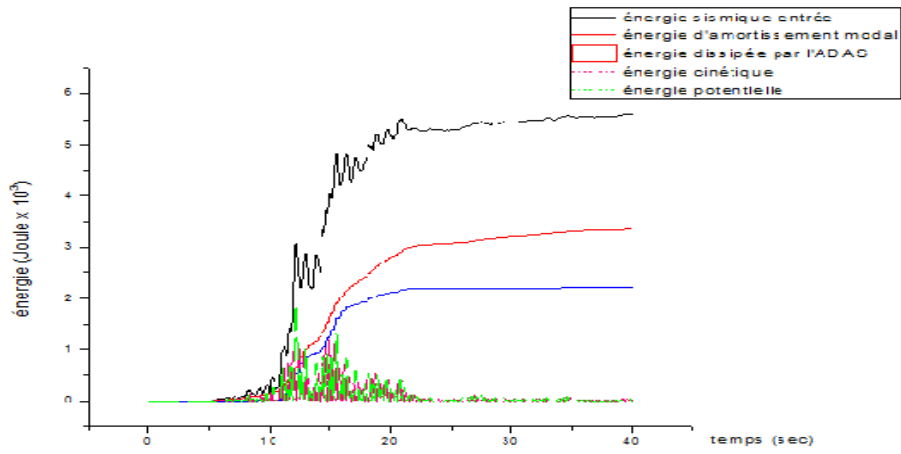




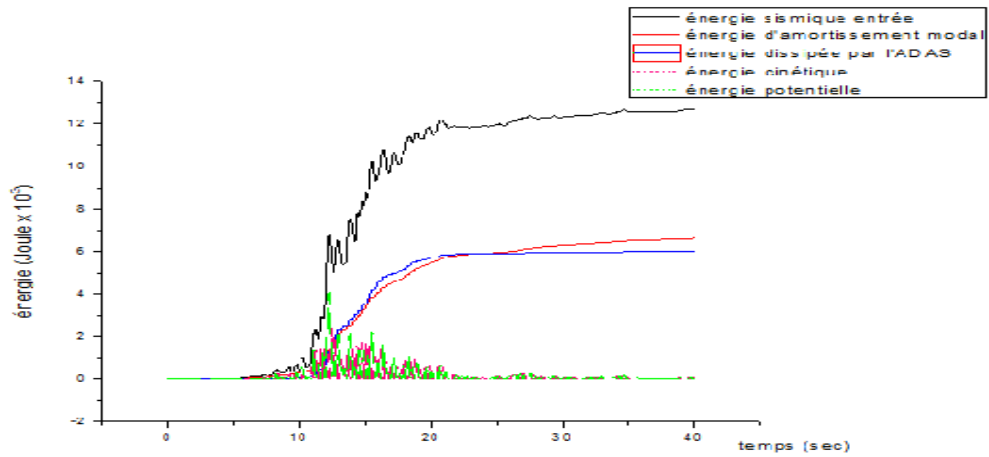
b)



c)



d)



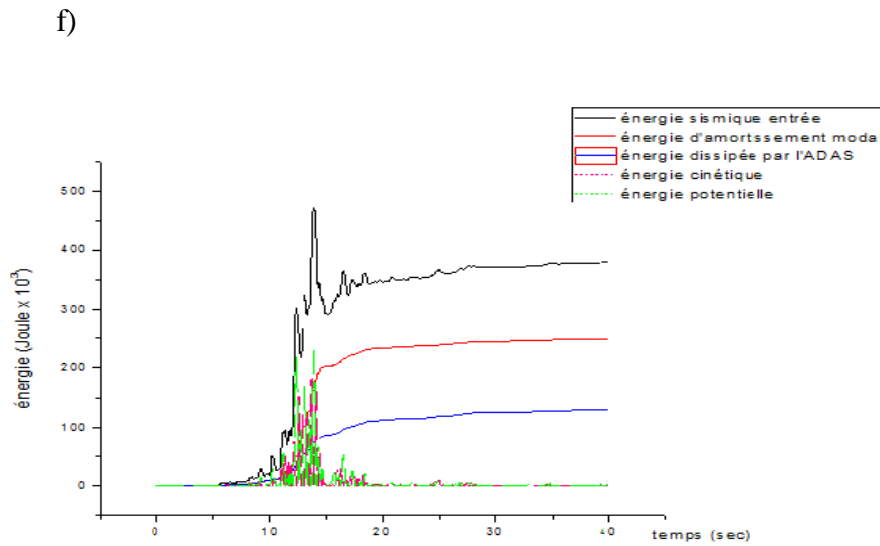
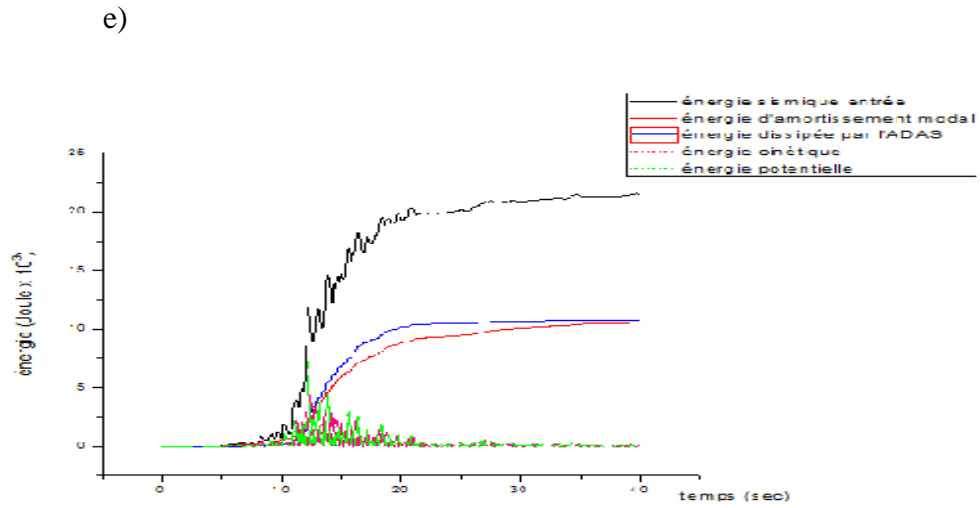
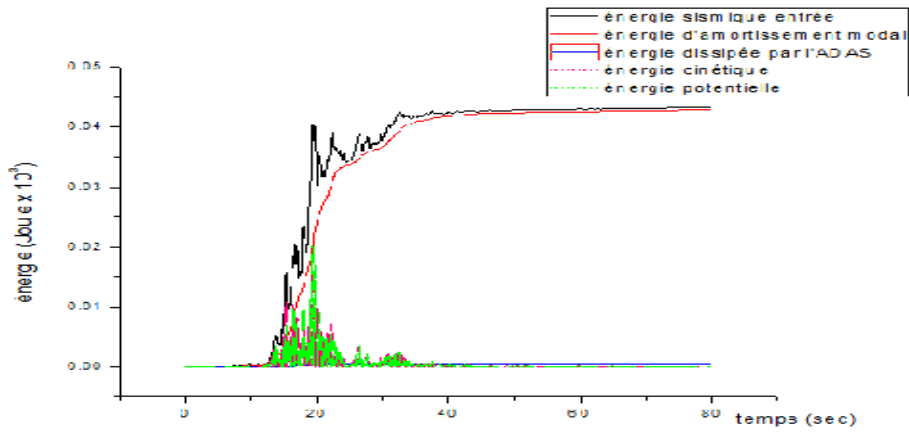


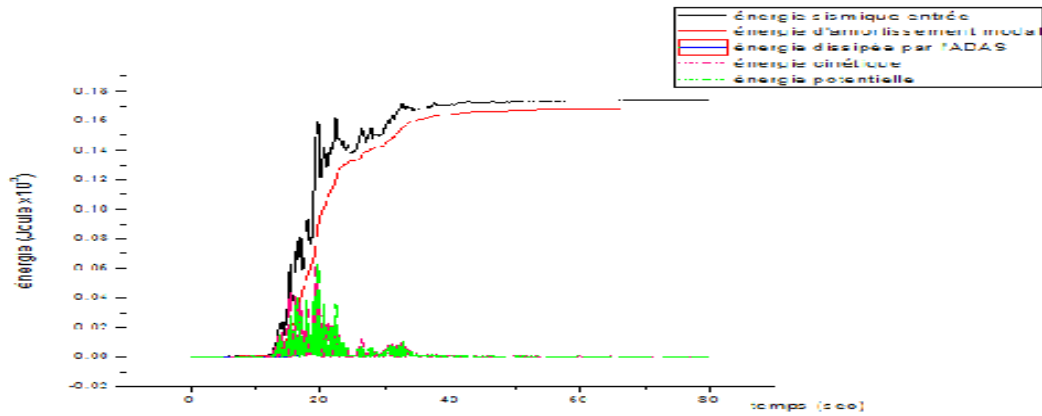
Figure 4.4 : Diagrammes des énergies absorbées par la structure sous l'excitation sismique de la composante d'El Centro du séisme d'Imperial Valley pour une rigidité des dissipateurs

$K_{ADAS} = 25\%$  : a)  $0,025C_s$  \_ b)  $0,05C_s$  \_ c)  $0,100C_s$  \_ d)  $0,150C_s$  \_ e)  $0,200C_s$  \_ f)  $C_s$

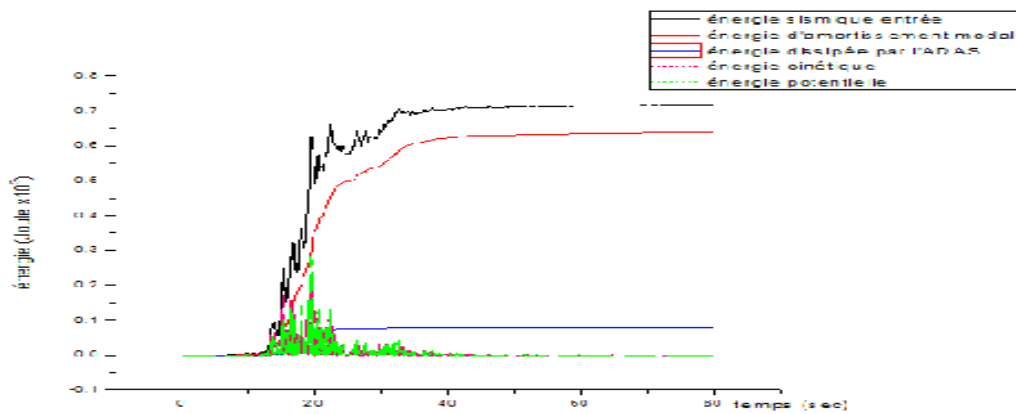
a)



b)



c)



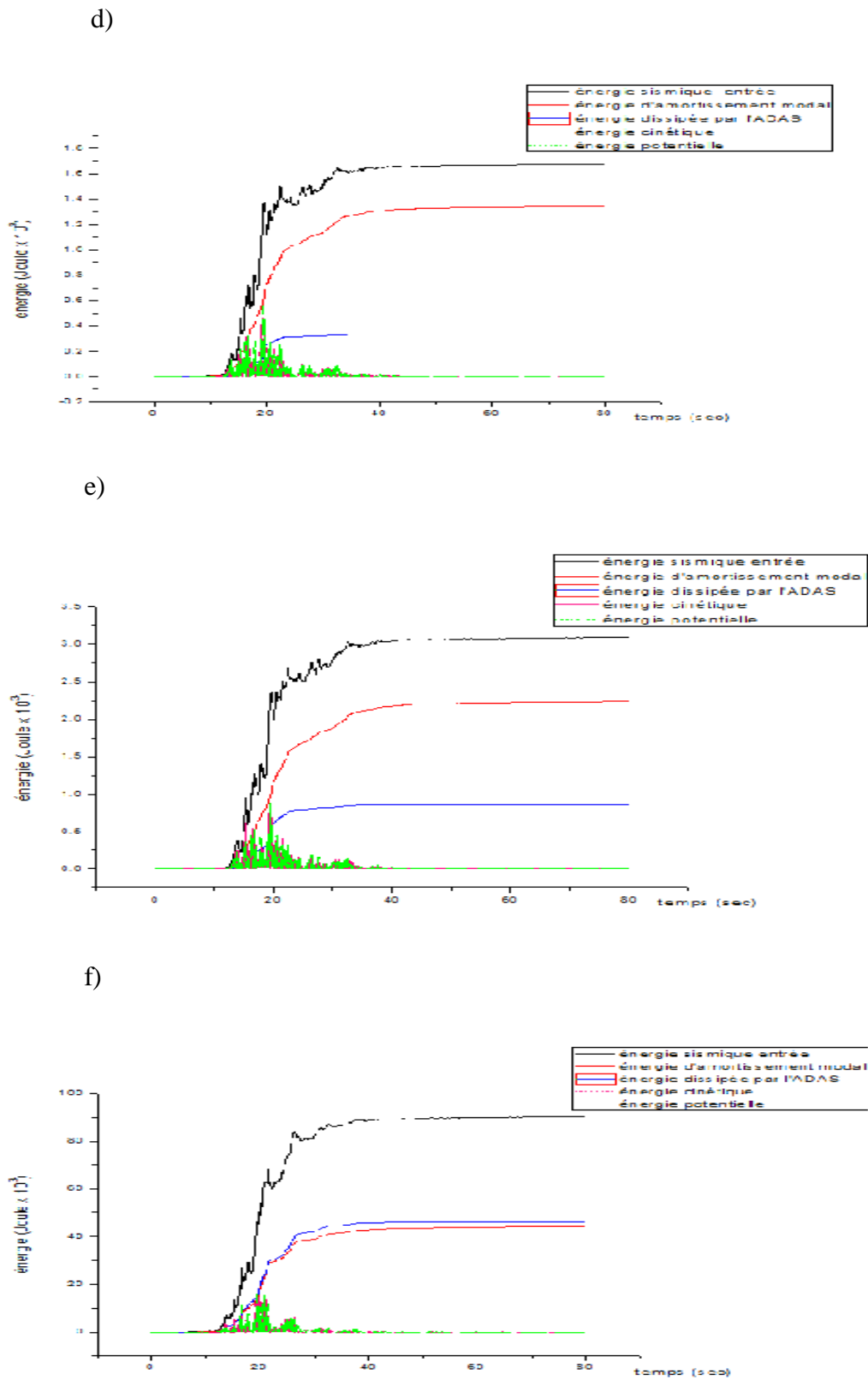
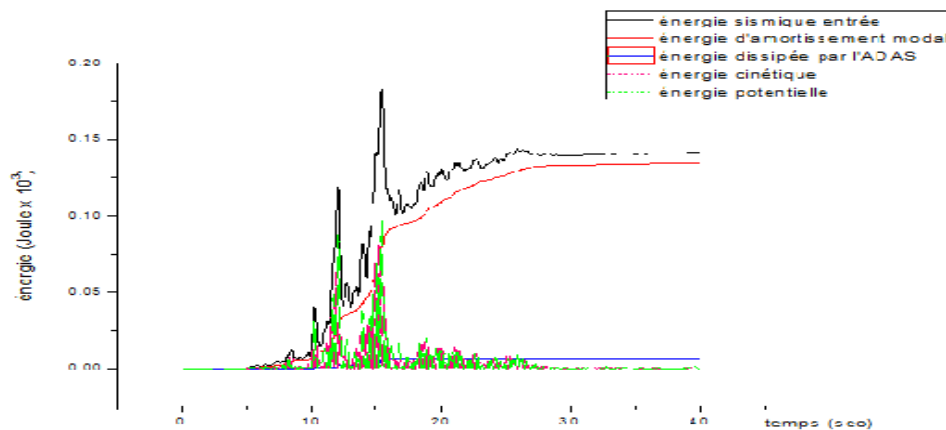


Figure 4.5: Diagrammes des énergies absorbées par la structure sous l'excitation sismique de la composante de Yermo du séisme de Landers pour une rigidité des dissipateurs  $K_{ADAS} = 25\%$  : a)  $0,025C_s$  \_ b)  $0,05C_s$  \_ c)  $0,100C_s$  \_ d)  $0,150C_s$  \_ e)  $0,200C_s$  \_ f)  $C_s$

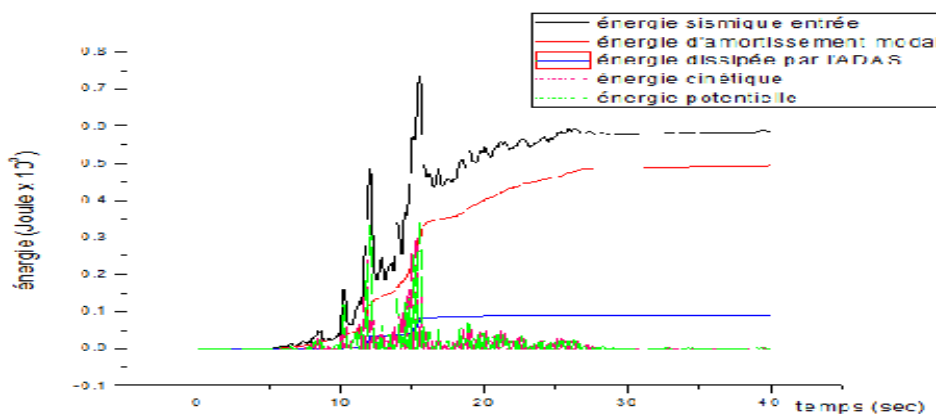
D'après ces courbes, On constate que l'augmentation du coefficient sismique entraîne une augmentation de l'énergie sismique entrée, de l'énergie d'amortissement modal et de l'énergie absorbée par le système de dissipation d'énergie. Par conséquent, la différence entre l'énergie d'amortissement modal et celle absorbée par le système de dissipation d'énergie est réduite avec l'augmentation du coefficient sismique.

Pour une excitation sismique faible ( $PGA = 0,151g$ ) et pour de faibles coefficients sismiques, on remarque que l'énergie dissipée par le système de dissipation d'énergie est presque négligeable devant l'énergie d'amortissement modal.

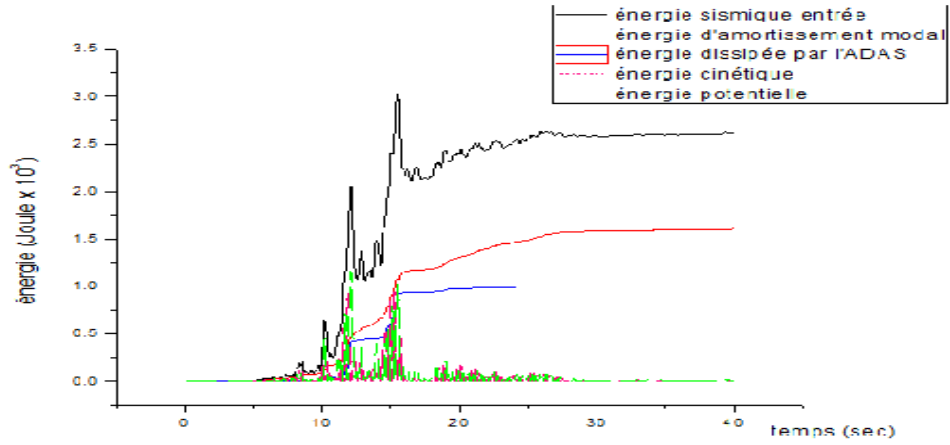
a)



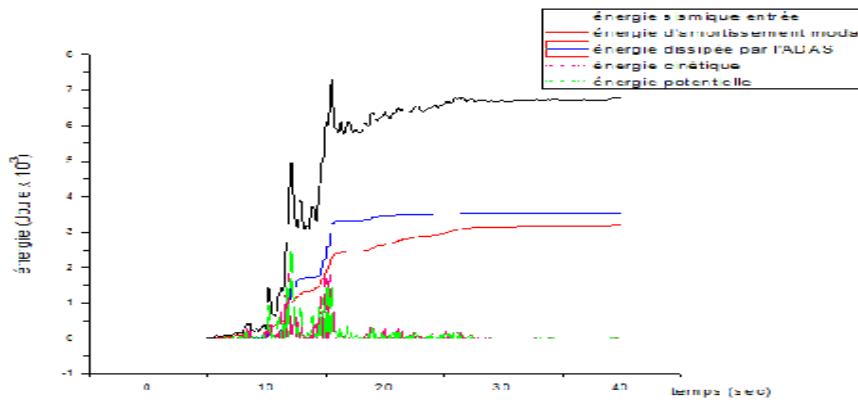
b)



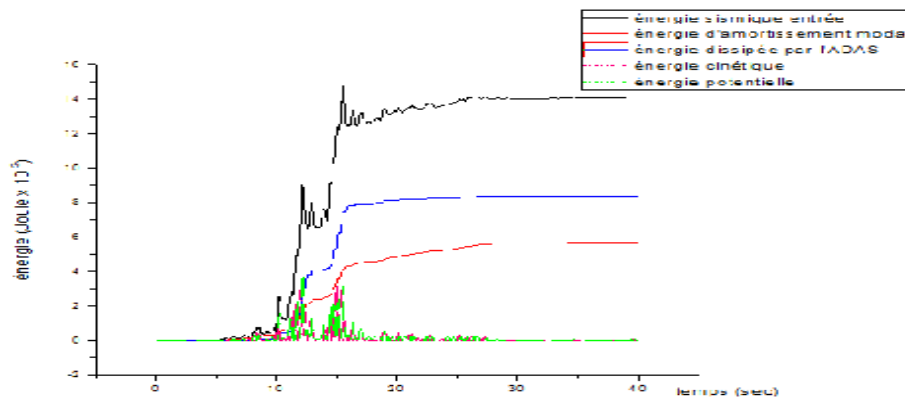
c)



d)



e)



f)

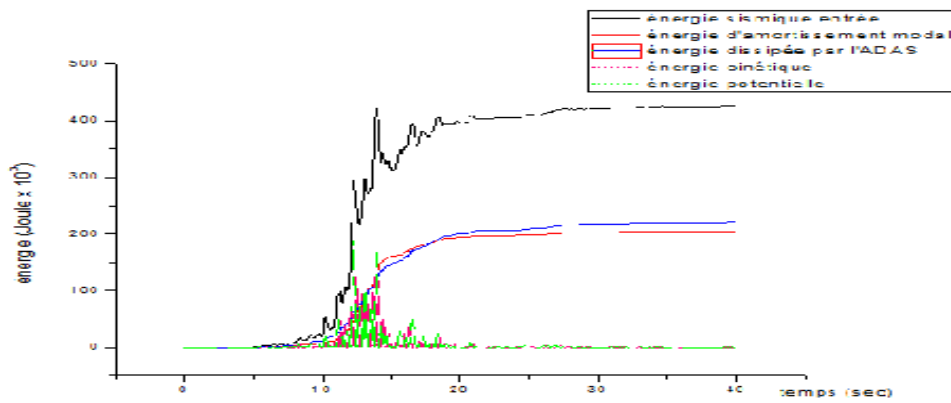
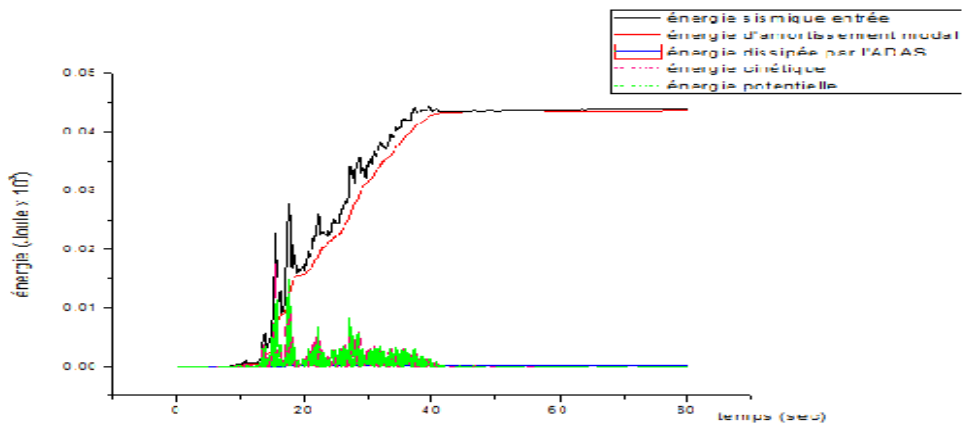


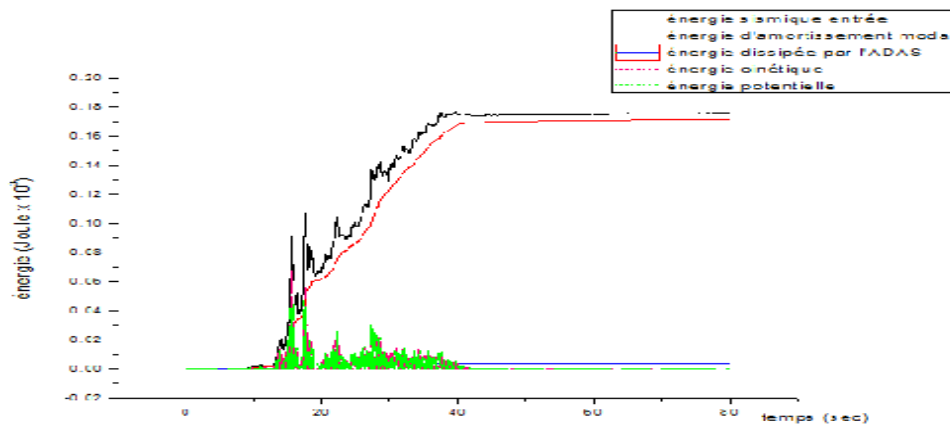
Figure 4.6 : Diagrammes des énergies absorbées par la structure sous l'excitation sismique de la composante d'El Centro du séisme d'Imperial Valley pour une rigidité des dissipateurs

$K_{ADAS} = 50\%$  : a)  $0,025C_s$  \_ b)  $0,05C_s$  \_ c)  $0,100C_s$  \_ d)  $0,150C_s$  \_ e)  $0,200C_s$  \_ f)  $C_s$

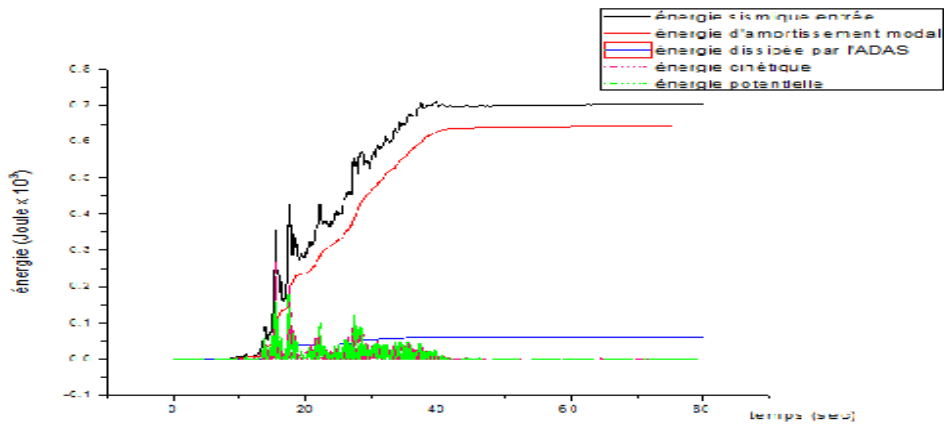
a)



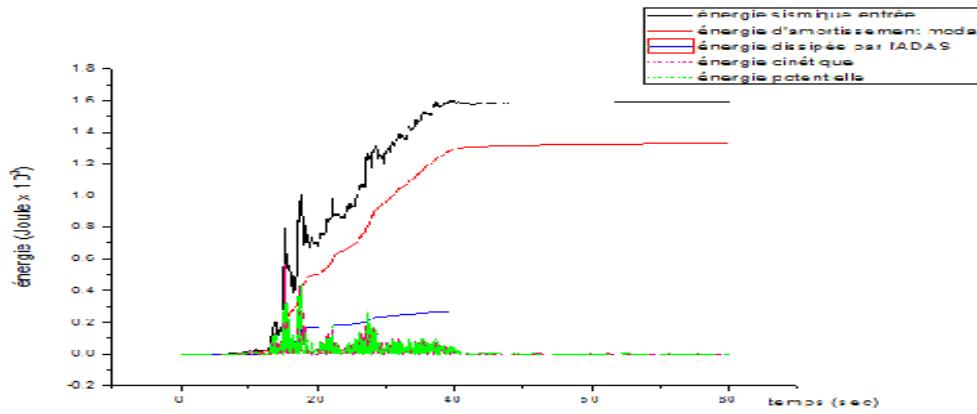
b)



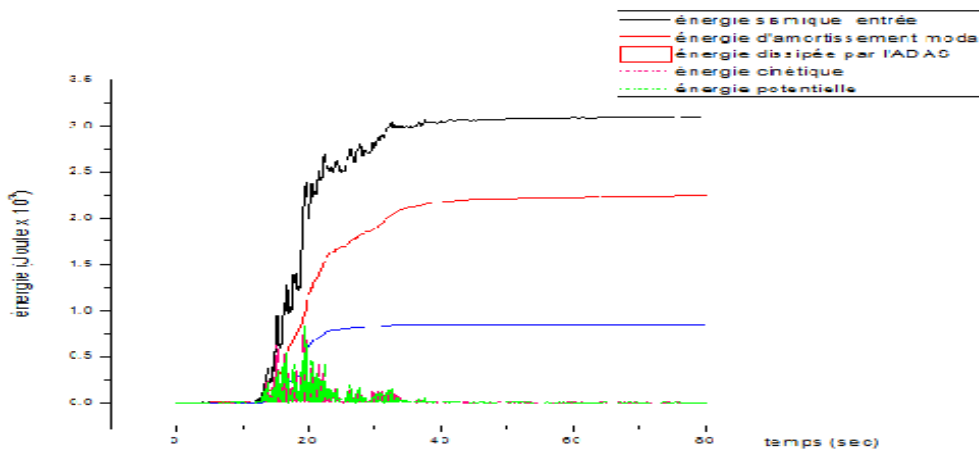
c)



d)



e)





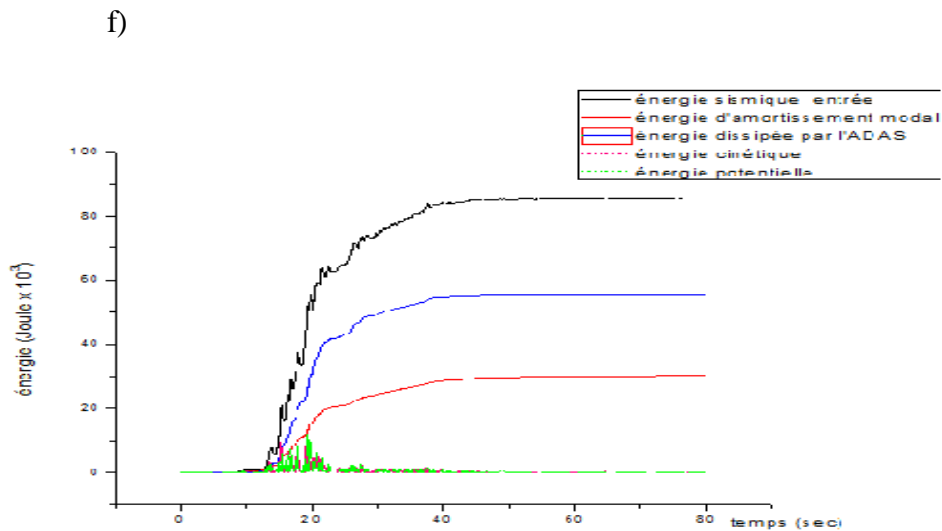
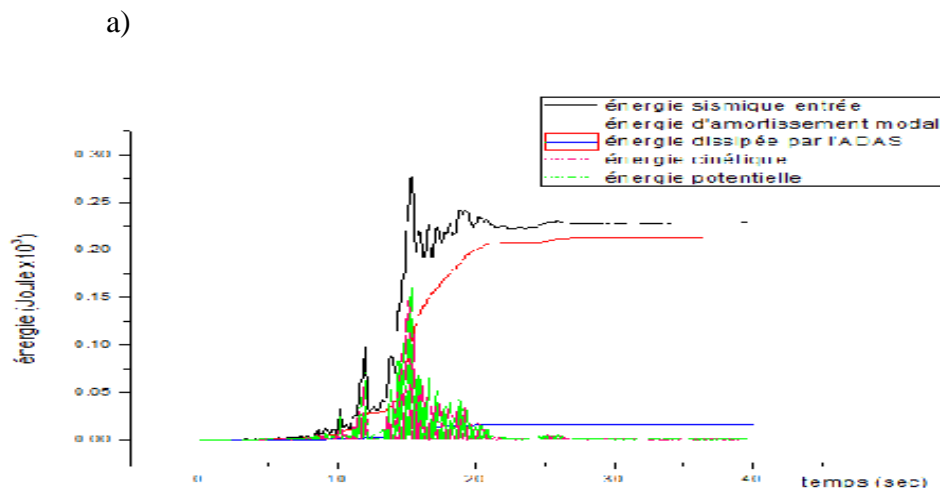


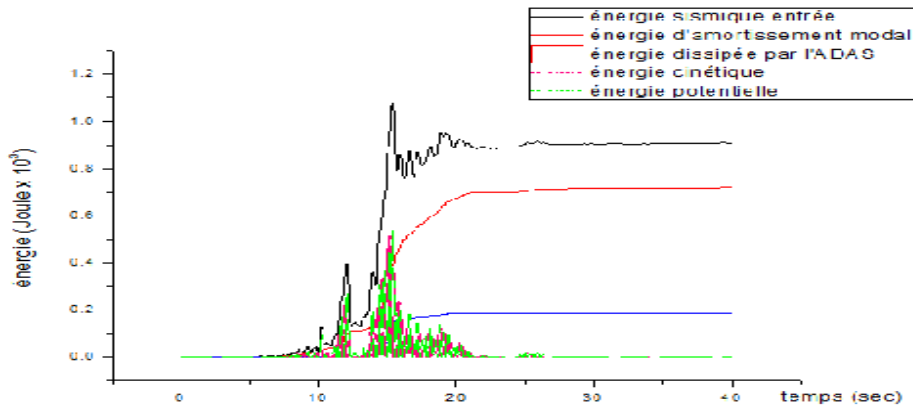
Figure 4.7 : Diagrammes des énergies absorbées par la structure sous l'excitation sismique de la composante de Yermo du séisme de Landers pour une rigidité des dissipateurs  $K_{ADAS} = 50\%$  : a)  $0,025C_s$  \_ b)  $0,05C_s$  \_ c)  $0,100C_s$  \_ d)  $0,150C_s$  \_ e)  $0,200C_s$  \_ f)  $C_s$

Des figures précédentes, on remarque que l'énergie dissipée par les dissipateurs ADAS pour cette combinaison de rigidité est plus importante que celle dissipée dans la première combinaison.

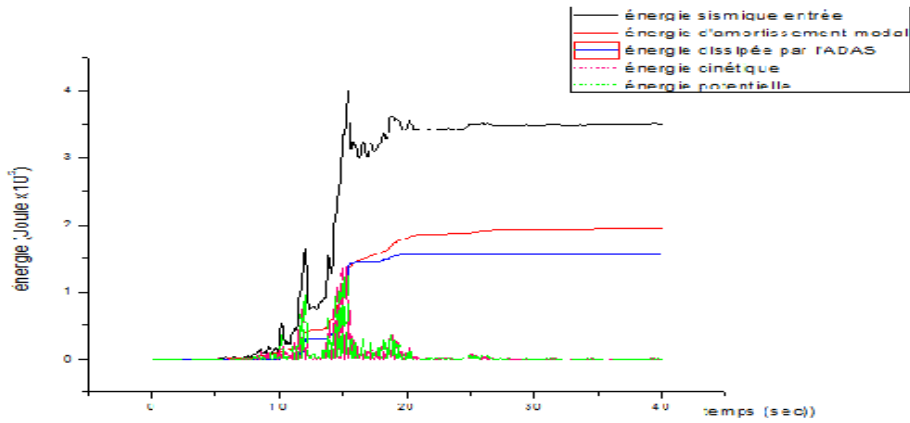
La comparaison de ces figures montre l'efficacité de l'augmentation de la rigidité du système de dissipation de l'énergie à dissiper l'énergie sismique entrée.



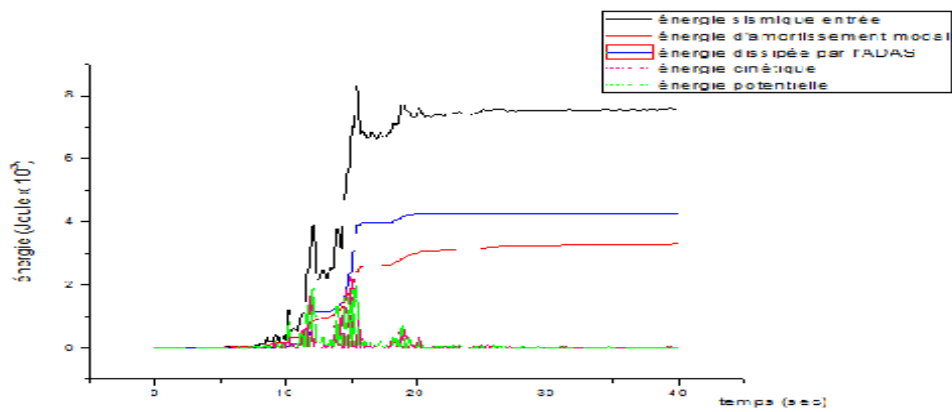
b)



c)



d)



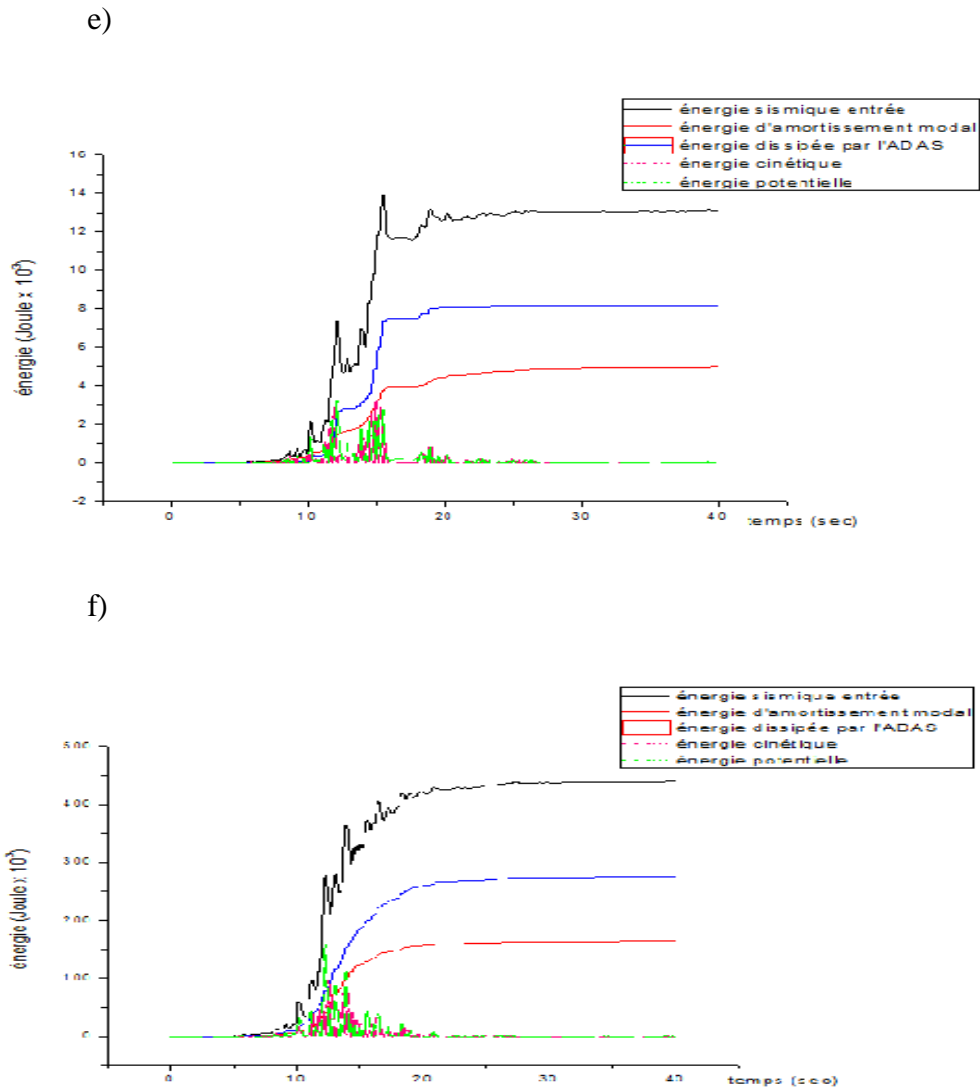
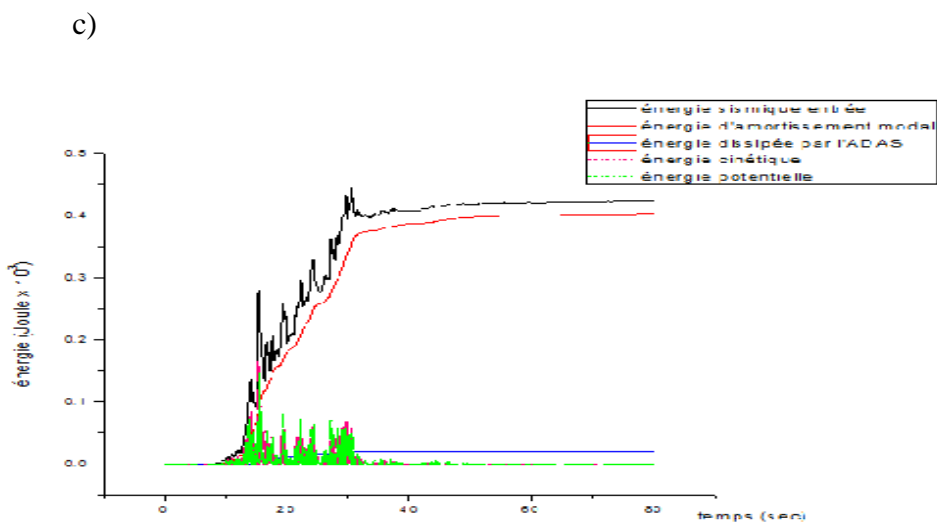
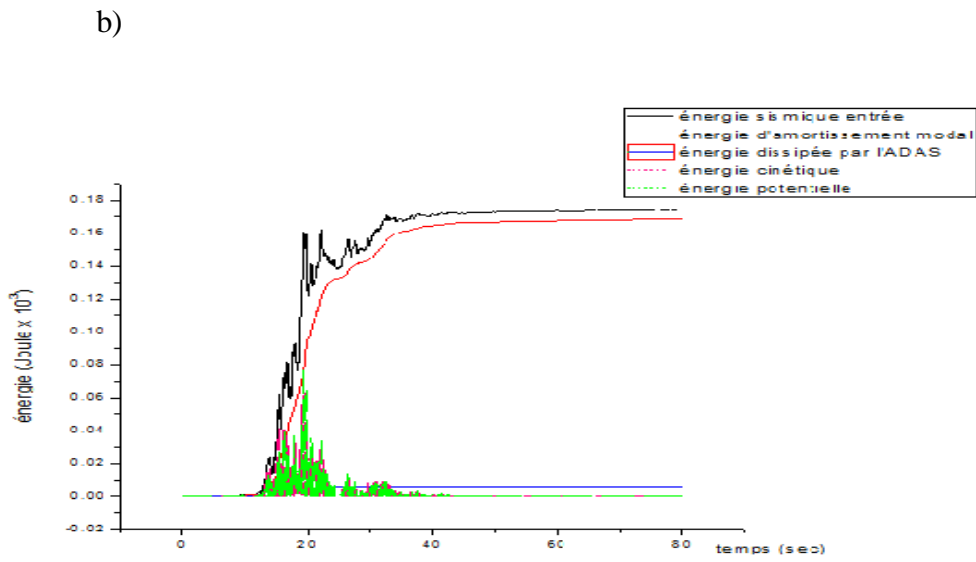
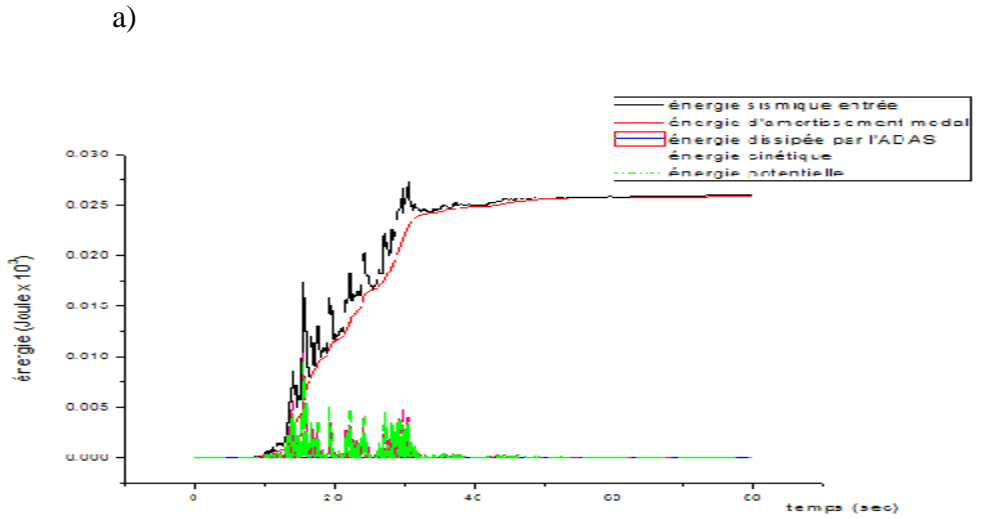


Figure 4.8 : Diagrammes des énergies absorbées par la structure sous l'excitation sismique de la composante d'El Centro du séisme d'Imperial Valley pour une rigidité des dissipateurs  $K_{ADAS} = 75\%$  : a)  $0,025C_s$  \_ b)  $0,05C_s$  \_ c)  $0,100C_s$  \_ d)  $0,150C_s$  \_ e)  $0,200C_s$  \_ f)  $C_s$



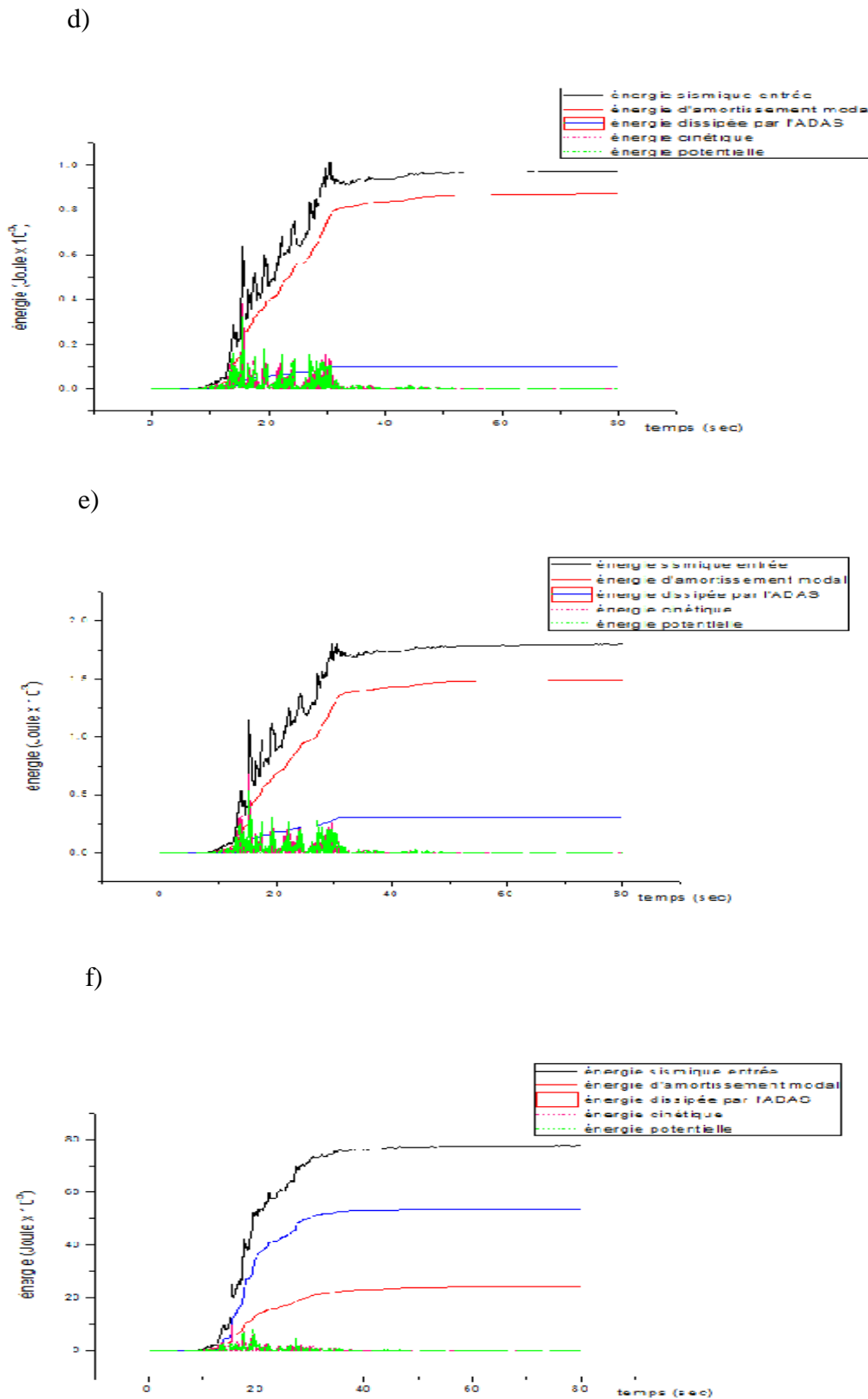


Figure 4.9 : Diagrammes des énergies absorbées par la structure sous l'excitation sismique de la composante de Yermo du séisme de Landers pour une rigidité des dissipateurs

$K_{ADAS} = 75\%$  : a)  $0,025C_s$  \_ b)  $0,05C_s$  \_ c)  $0,100C_s$  \_ d)  $0,150C_s$  \_ e)  $0,200C_s$  \_ f)  $C_s$

On remarque que l'énergie dissipée par l'ADAS est plus élevée que l'énergie d'amortissement modal et qu'elle la dépasse dans certains cas.

Ces figures montrent aussi que l'énergie sismique entrée reste presque invariable avec l'augmentation de la rigidité du système de dissipation d'énergie et que cette augmentation entraîne une augmentation dans l'énergie absorbée par le système de dissipation d'énergie et une réduction dans l'énergie de l'amortissement modal.

Pour que ces résultats soient plus précis, on a transformé les courbes en valeurs ainsi qu'en pourcentages et on les a présentés en tableaux ;

Coefficient sismique	Energie Sismique entrée Joule x 10 <sup>3</sup>	Energie dissipée par				Total de l'énergie dissipée (%)	L'énergie restante (%)
		l'amortissement modal		l'ADAS			
		Joule x 10 <sup>3</sup>	(%)	Joule x 10 <sup>3</sup>	(%)		
0,025Cs	0,2958	0,2431	82,18	0,01798	6,07	88,25	11,75
0,050Cs	1,210	0,9351	77,28	0,2407	19,89	97,17	2,83
0,100Cs	5,611	3,359	59,86	2,211	39,40	99,26	0,74
0,150Cs	12,71	6,618	52,06	6,003	47,23	99,29	0,71
0,200Cs	21,48	10,56	49,16	10,77	50,13	99,29	0,71
Cs	471,3	248,9	52,81	129,8	27,54	80,35	19,65

Tableau 4-3: Comparaison des résultats des énergies pour les différents coefficients sismiques sous l'excitation sismique de la composante d'El Centro du séisme d'Imperial Valley pour une rigidité des dissipateurs  $K_{ADAS} = 25\%$

Coefficient sismique	Energie Sismique entrée Joule x 10 <sup>3</sup>	Energie dissipée par				Total de l'énergie dissipée (%)	L'énergie restante (%)
		l'amortissement modal		l'ADAS			
		Joule x 10 <sup>3</sup>	(%)	Joule x 10 <sup>3</sup>	(%)		
0,025Cs	0,1832	0,1349	73,63	0,006239	3,40	77,03	22,97
0,050Cs	0,7336	0,4944	67,39	0,08972	12,23	79,62	20,38
0,100Cs	3,017	1,605	53,2	1,004	33,27	86,47	13,53
0,150Cs	7,388	3,202	43,34	3,537	47,87	91,21	08,79
0,200Cs	14,78	5,724	38,73	8,375	56,66	95,39	04,61
Cs	426,9	204,9	48	221,1	51,8	99,8	0,20

Tableau 4-4: Comparaison des résultats des énergies pour les différents coefficients sismiques sous l'excitation sismique de la composante d'El Centro du séisme d'Imperial Valley pour une rigidité des dissipateurs  $K_{ADAS} = 50\%$

Coefficient sismique	Energie Sismique entrée Joule x 10 <sup>3</sup>	Energie dissipée par				Total de l'énergie dissipée (%)	L'énergie restante (%)
		l'amortissement modal		l'ADAS			
		Joule x 10 <sup>3</sup>	(%)	Joule x 10 <sup>3</sup>	(%)		
0,025Cs	0,2765	0,2134	77,18	0,01491	5,4	82,58	17,42
0,050Cs	1,079	0,721	66,82	0,1862	17,25	84,07	15,93
0,100Cs	3,997	1,943	48,61	1,559	39	87,61	12,39
0,150Cs	8,293	3,290	39,67	4,268	51,46	91,13	8,87
0,200Cs	13,95	4,963	35,57	8,141	58,35	93,92	6,08
Cs	440,2	164,3	37,32	275,2	66,51	99,83	0,17

Tableau 4-5: Comparaison des résultats des énergies pour les différents coefficients sismiques sous l'excitation sismique de la composante d'El Centro du séisme d'Imperial Valley pour une rigidité des dissipateurs  $K_{ADAS} = 75\%$

Des trois tableaux, on constate que l'énergie sismique entrée augmente en accord avec l'augmentation du coefficient sismique.

En augmentant le coefficient sismique (à partir de 0,150Cs), et en augmentant la rigidité des dissipateurs ADAS (25%, 50% puis 75%), on remarque que l'énergie dissipée par l'ADAS devient de plus en plus élevée et que l'amortissement modal diminue.

Pour un coefficient sismique 0,200Cs, le total de l'énergie dissipée par les deux systèmes (modal et dissipatif) se réduit, elle est de 99,29%, 95,39% et 93,92% et par conséquent l'énergie mécanique (l'énergie restante) qui représente l'ensemble des énergies "potentielle et cinématique" augmente ; elle atteint 0,71%, 04,61% et 06,08% de l'énergie sismique entrée du séisme d'El Centro pour  $K_{ADAS} = 25\%$  ,  $K_{ADAS} = 50\%$  et  $K_{ADAS} = 75\%$  respectivement et ce qui est expliqué par la croissance de la souplesse de la structure en augmentant la rigidité des dissipateurs ADAS.

Les dissipateurs ADAS peuvent dissiper jusqu'à 50,13%, 56,66% et 58,35% de l'énergie sismique entrée pour le coefficient sismique 0,200Cs, comme ils peuvent dissiper jusqu'à 27,54%, 51,8% et 66,51% de l'énergie sismique entrée pour le coefficient sismique Cs sous l'excitation sismique de la composante d'El Centro pour  $K_{ADAS} = 25\%$  ,  $K_{ADAS} = 50\%$  et  $K_{ADAS} = 75\%$  respectivement.

Coefficient sismique	Energie Sismique entrée Joule x 10 <sup>3</sup>	Energie dissipée par				Total de l'énergie dissipée (%)	L'énergie restante (%)
		l'amortissement modal		l'ADAS			
		Joule x 10 <sup>3</sup>	(%)	Joule x 10 <sup>3</sup>	(%)		
0,025Cs	0,04334	0,04282	99,07	0,0003633	0,84	99,91	0,09
0,050Cs	0,1744	0,1686	96,67	0,005617	3,22	99,89	0,11
0,100Cs	0,7182	0,6385	88,90	0,07903	11	99,90	0,10
0,150Cs	1,678	1,344	80,1	0,3325	19,81	99,91	0,09
0,200Cs	3,096	2,24	72,35	0,835	27,55	99,90	0,10
Cs	90,32	44,25	49	46,01	50,94	99,94	0,06

Tableau 4-6: Comparaison des résultats des énergies pour les différents coefficients sismiques sous l'excitation sismique de la composante de Yermo du séisme de Landers pour une rigidité des dissipateurs  $K_{ADAS} = 25\%$

Coefficient sismique	Energie Sismique entrée Joule x 10 <sup>3</sup>	Energie dissipée par				Total de l'énergie dissipée (%)	L'énergie restante (%)
		l'amortissement modal		l'ADAS			
		Joule x 10 <sup>3</sup>	(%)	Joule x 10 <sup>3</sup>	(%)		
0,025Cs	0,04431	0,04370	98,62	0,0002673	0,60	99,22	0,78
0,050Cs	0,1773	0,1718	96,90	0,004169	2,35	99,25	0,75
0,100Cs	0,7100	0,6448	90,81	0,06063	8,54	99,35	0,65
0,150Cs	1,602	1,328	82,89	0,2666	16,64	99,53	0,47
0,200Cs	2,865	2,143	74,79	0,7133	24,89	99,68	0,32
Cs	85,56	30,24	35,34	55,29	64,62	99,96	0,04

Tableau 4-7: Comparaison des résultats des énergies pour les différents coefficients sismiques sous l'excitation sismique de la composante de Yermo du séisme de Landers pour une rigidité des dissipateurs  $K_{ADAS} = 50\%$

Coefficient sismique	Energie Sismique entrée Joule x 10 <sup>3</sup>	Energie dissipée par				Total de l'énergie dissipée (%)	L'énergie restante (%)
		l'amortissement modal		l'ADAS			
		Joule x 10 <sup>3</sup>	(%)	Joule x 10 <sup>3</sup>	(%)		
0,025Cs	0,02738	0,02593	94,70	0,0000832	0,30	95	05
0,050Cs	0,1098	0,1031	93,90	0,001322	1,20	95,10	04,90
0,100Cs	0,4441	0,4033	90,81	0,02061	4,64	95,45	04,55
0,150Cs	1,017	0,8768	86,21	0,1003	9,86	96,07	3,93
0,200Cs	1,855	1,493	80,48	0,3013	16,24	96,72	3,28
Cs	77,71	24,36	31,34	53,32	68,61	99,95	0,05



Tableau 4-8 : Comparaison des résultats des énergies pour les différents coefficients sismiques sous l'excitation sismique de la composante de Yermo du séisme de Landers pour une rigidité des dissipateurs  $K_{ADAS} = 75\%$

Lors d'une excitation sismique faible et pour le coefficient sismique 0,200Cs, les dissipateurs ADAS dissipent 27,55%, 24,89% et 16,24% de l'énergie sismique entrée, par contre ils peuvent dissiper jusqu'à 50,94%, 64,62% et 68,61% de l'énergie sismique entrée pour le coefficient sismique Cs sous l'excitation sismique de Landers pour  $K_{ADAS} = 25\%$ ,  $K_{ADAS} = 50\%$  et  $K_{ADAS} = 75\%$  respectivement.

Pour tous les coefficients sismiques et pour les différentes combinaisons de rigidité, le total de l'énergie dissipée par les deux systèmes (modal et dissipatif) dépasse les 95% et il peut arriver jusqu'à 99,95 pour le coefficient sismique Cs avec un  $K_{ADAS} = 75\%$  par conséquent l'énergie mécanique (l'ensemble des énergies "potentielle et cinématique") est presque nulle.

#### IV.6.2. Comportement hystérétique des dispositifs ADAS

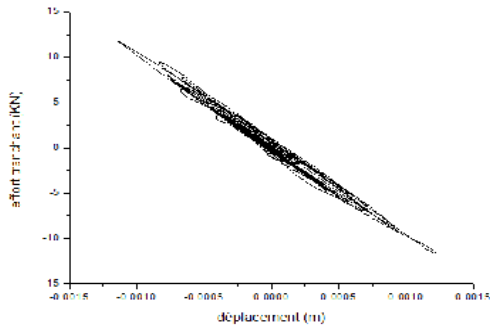
Une partie de l'énergie induite lors d'un séisme est absorbée par les déformations plastiques correspondant au comportement hystérésis (efforts – déformations) du système de dissipation d'énergie ADAS qui se caractérise par la surface de la boucle d'hystérésis ainsi que par les valeurs maximales des efforts tranchants et des déformations.

Pour illustrer cet effet et pour montrer où la dissipation d'énergie sera maximale, on a divisé la structure en deux paliers de deux niveaux chacun et on a tracé les diagrammes efforts-déformations d'un dissipateur ADAS, sous les deux excitations sismiques et pour les trois combinaisons de rigidité sous les différents coefficients sismiques.

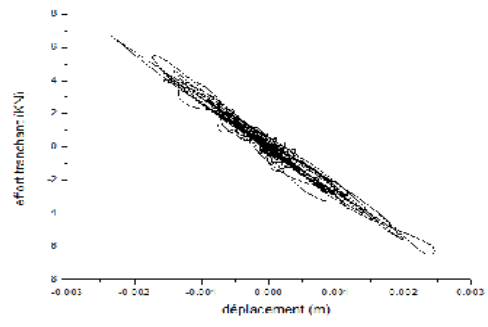
Pour étudier le 1<sup>er</sup> palier, on a choisi le 2<sup>ème</sup> niveau et pour étudier le 2<sup>ème</sup> palier, on a choisi le 3<sup>ème</sup> niveau.

Les résultats sont présentés dans les courbes suivantes :

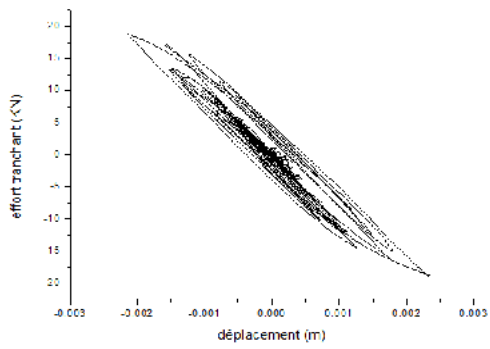
I-a)



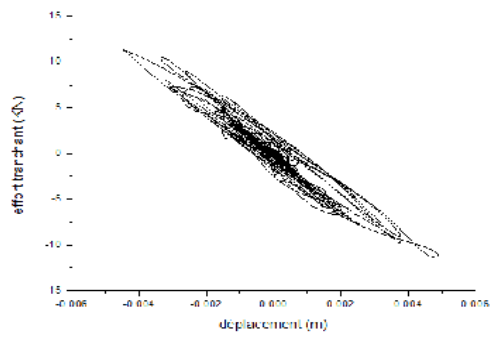
II-a)



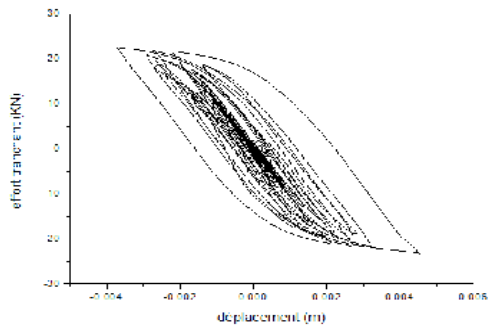
I-b)



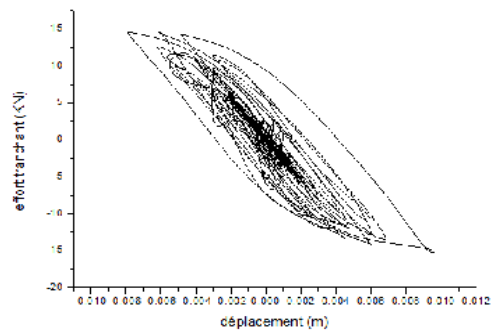
II-b)



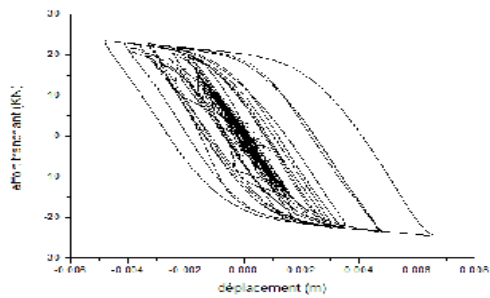
I-c)



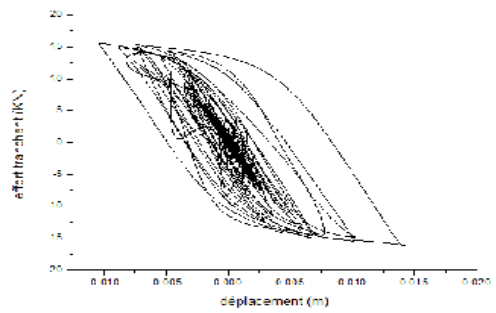
II-c)



I-d)



II-d)



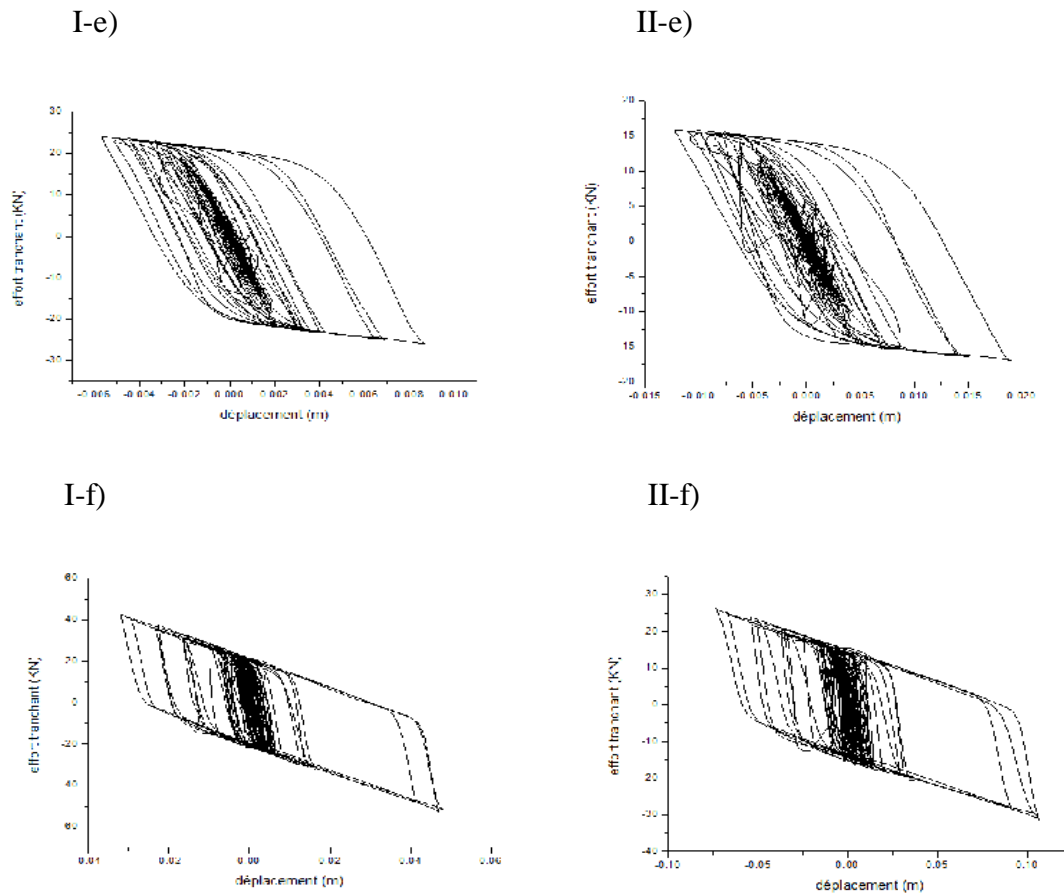
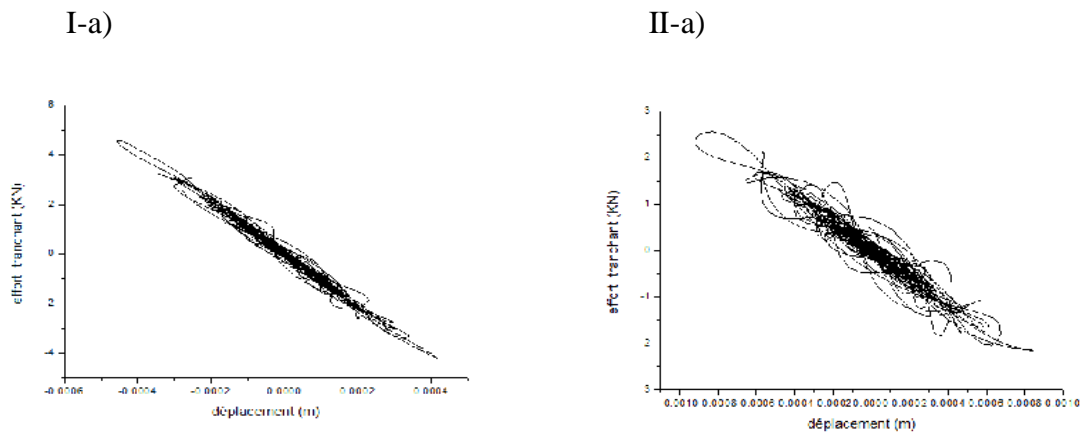
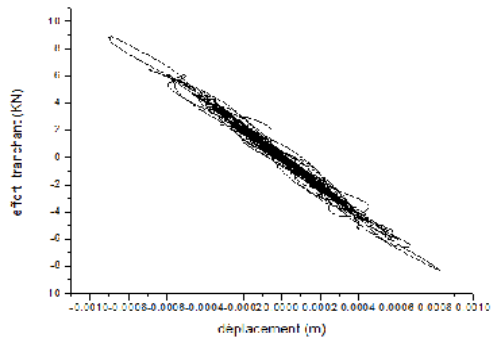


Figure 4.10 : Comparaison entre les deux paliers de niveau : I) 1<sup>er</sup> palier et II) 2<sup>ème</sup> palier des diagrammes efforts-déformations d'un dissipateur ADAS, sous l'excitation sismique de la composante d'El Centro du séisme d'Imperial Valley pour une rigidité  $K_{ADAS} = 25\%$  :  
 a)  $0,025C_s$  \_ b)  $0,05C_s$  \_ c)  $0,100C_s$  \_ d)  $0,150C_s$  \_ e)  $0,200C_s$  \_ f)  $C_s$

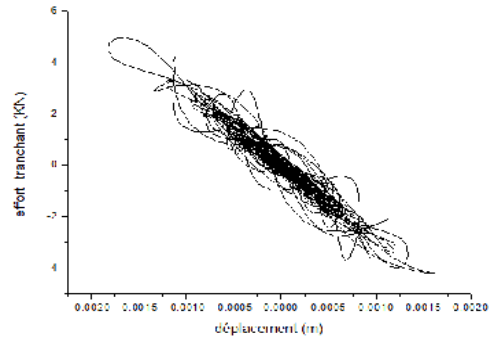
La remarque tirée de ces comparaisons est que les surfaces des boucles d'hystérésis sont augmentées en accord avec l'augmentation du coefficient sismique, et que les surfaces du 1<sup>er</sup> palier sont plus grandes que celles du 2<sup>ème</sup> palier.



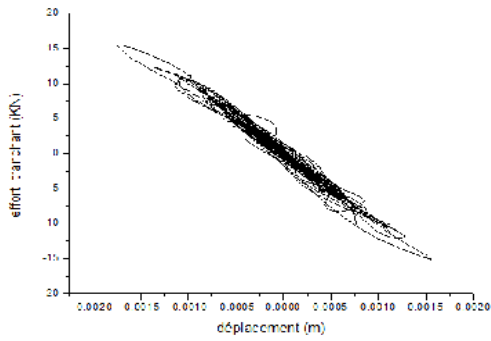
I-b)



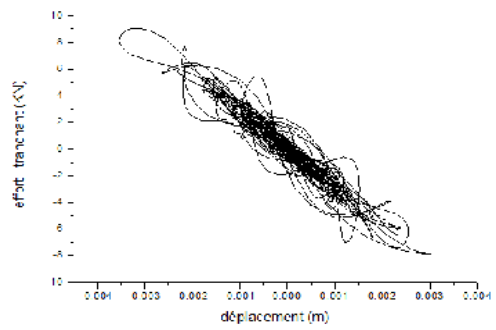
II-b)



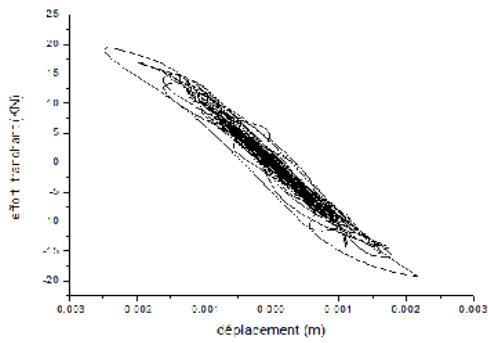
I-c)



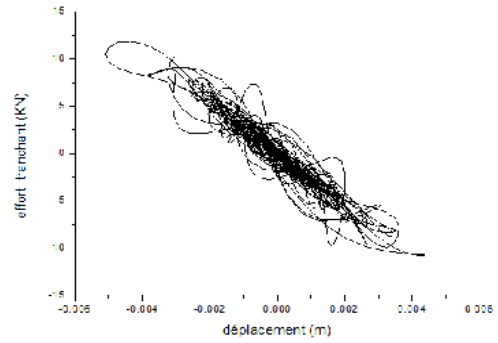
II-c)



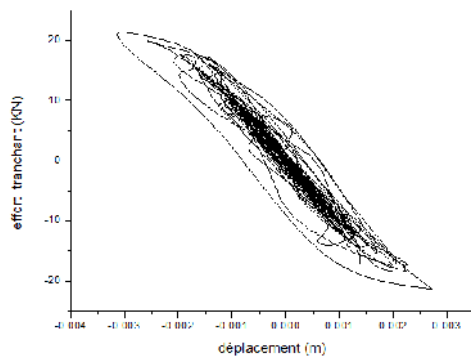
I-d)



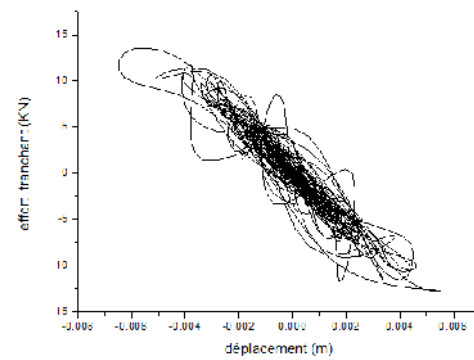
II-d)



I-e)



II-e)



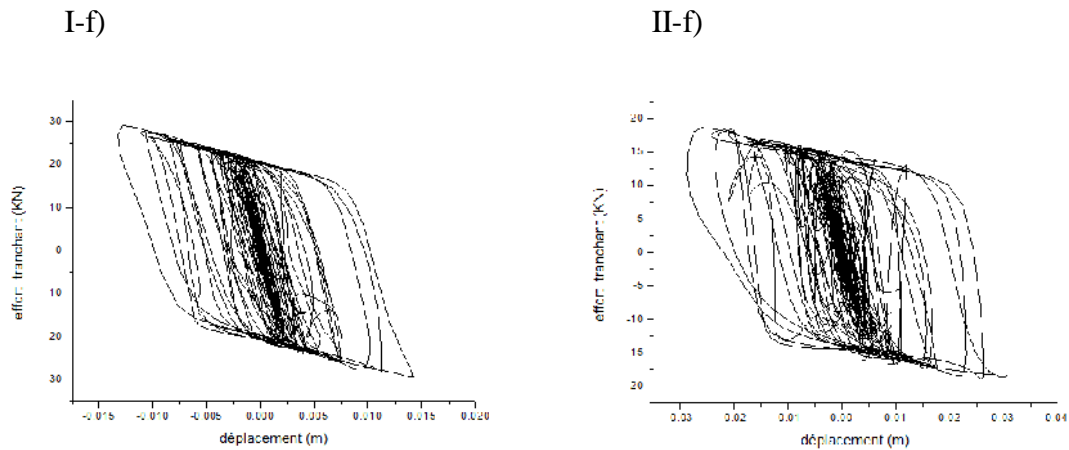
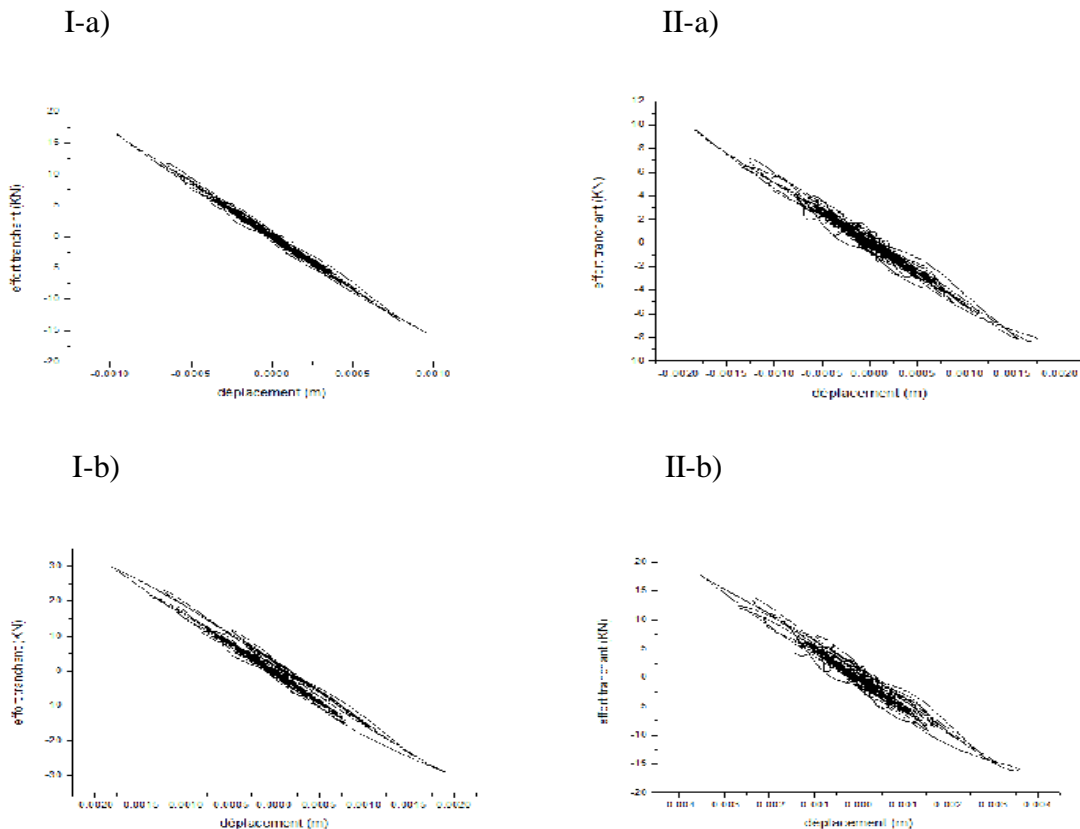
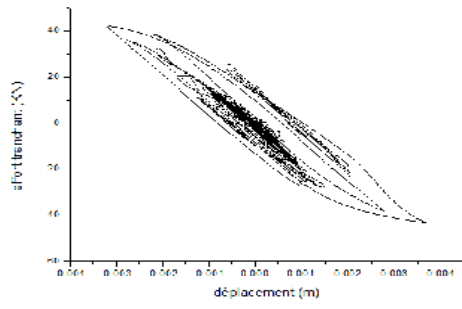


Figure 4.11 : Comparaison entre les deux paliers de niveau : I) 1<sup>er</sup> palier et II) 2<sup>ème</sup> palier des diagrammes efforts-déformations d'un dissipateur ADAS, sous l'excitation sismique de la composante de Yermo du séisme de Landers pour une rigidité  $K_{ADAS} = 25\%$  : a)  $0,025C_s$  b)  $0,05C_s$  c)  $0,100C_s$  d)  $0,150C_s$  e)  $0,200C_s$  f)  $C_s$

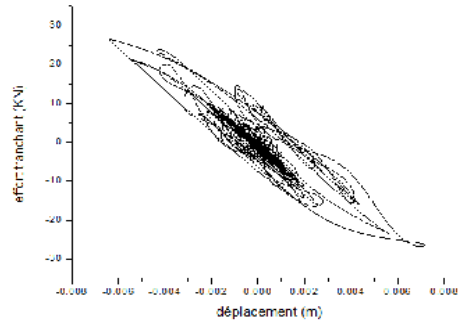
La remarque tirée de la comparaison des deux figures (4.10) et (4.11) est que les surfaces des boucles d'hystérésis correspondant à la première excitation sismique (El Centro) sont plus grandes que celles correspondant à la deuxième excitation sismique (Landers) en plus de l'augmentation de cette surface en accord avec l'augmentation du coefficient sismique, et que les surfaces du 1<sup>er</sup> palier sont plus grandes que celles du 2<sup>ème</sup> palier.



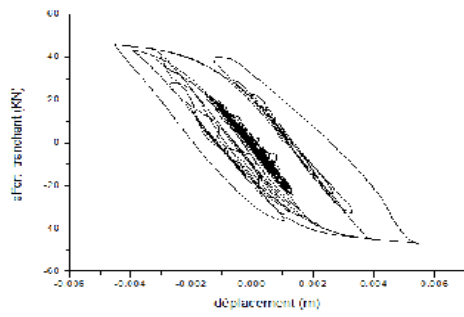
I-c)



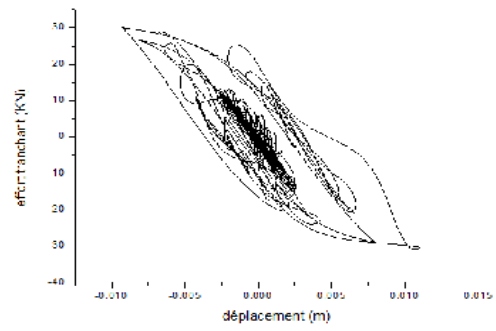
II-c)



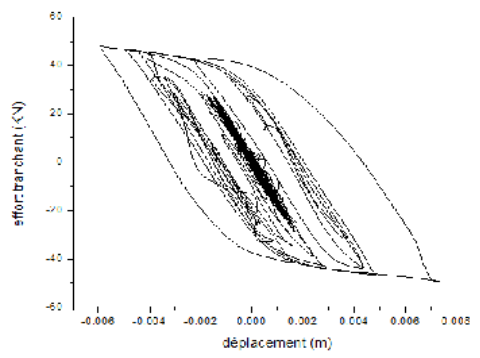
I-d)



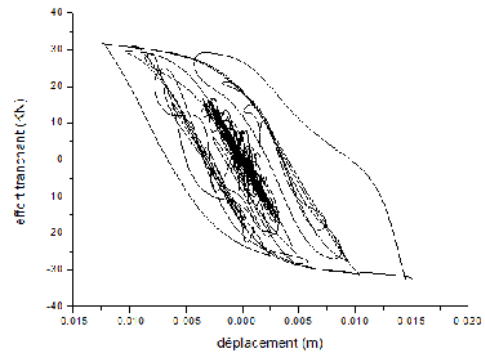
II-d)



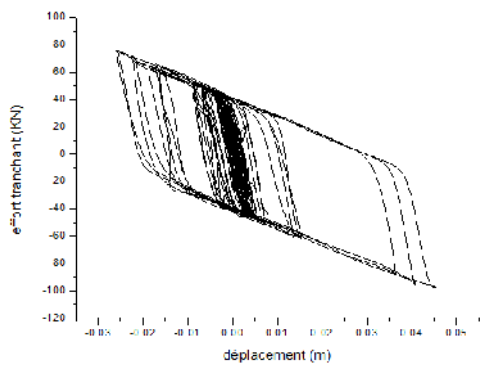
I-e)



II-e)



I-f)



II-f)

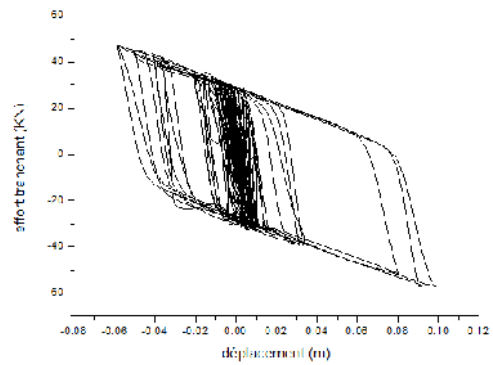
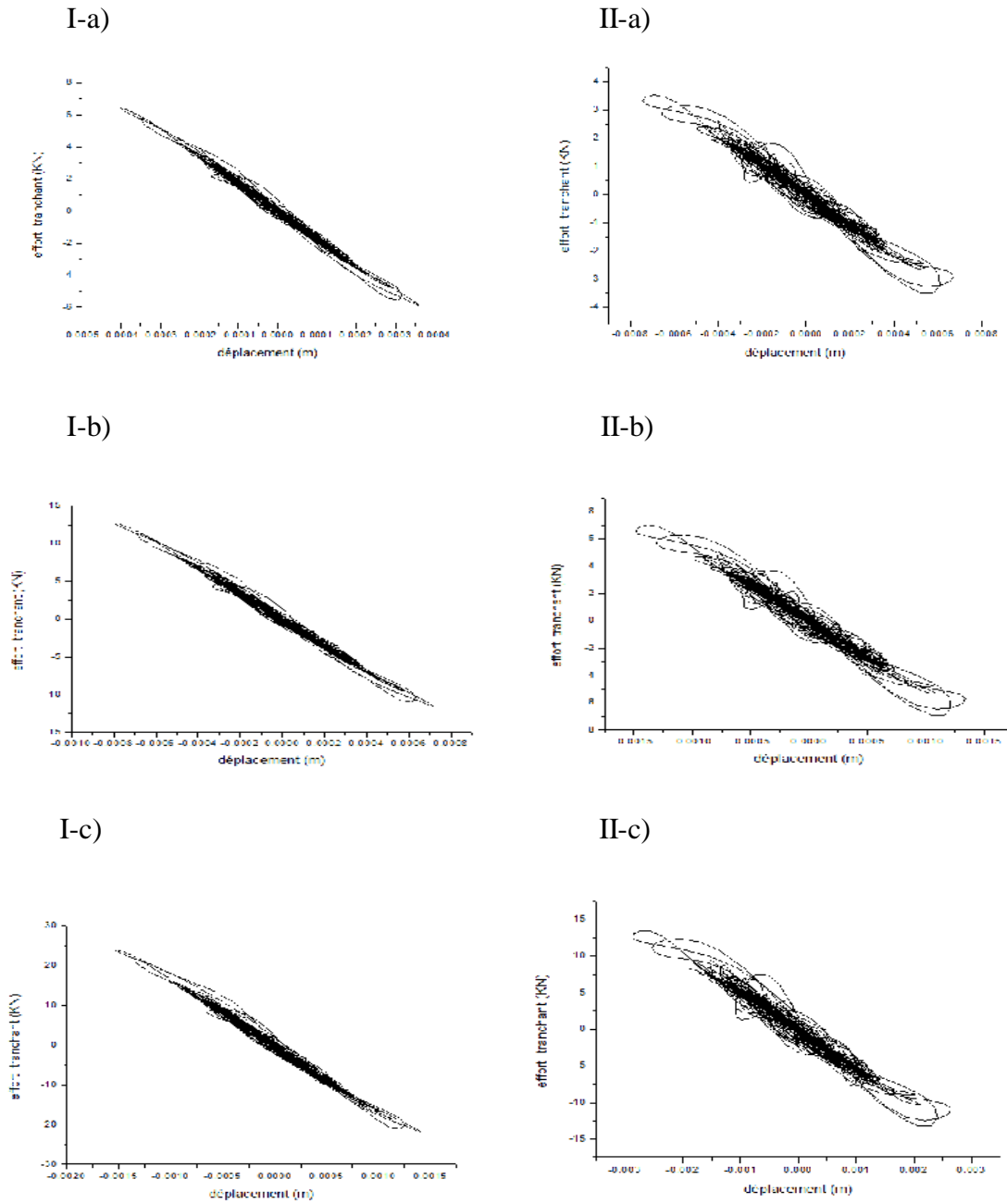


Figure 4.12 : Comparaison entre les deux paliers de niveau : I) 1<sup>er</sup> palier et II) 2<sup>ème</sup> palier des diagrammes efforts-déformations d'un dissipateur ADAS, sous l'excitation sismique de la composante d'El Centro du séisme d'Imperial Valley pour une rigidité  $K_{ADAS} = 50\%$  :

a)  $0,025C_s$  \_ b)  $0,05C_s$  \_ c)  $0,100C_s$  \_ d)  $0,150C_s$  \_ e)  $0,200C_s$  \_ f)  $C_s$



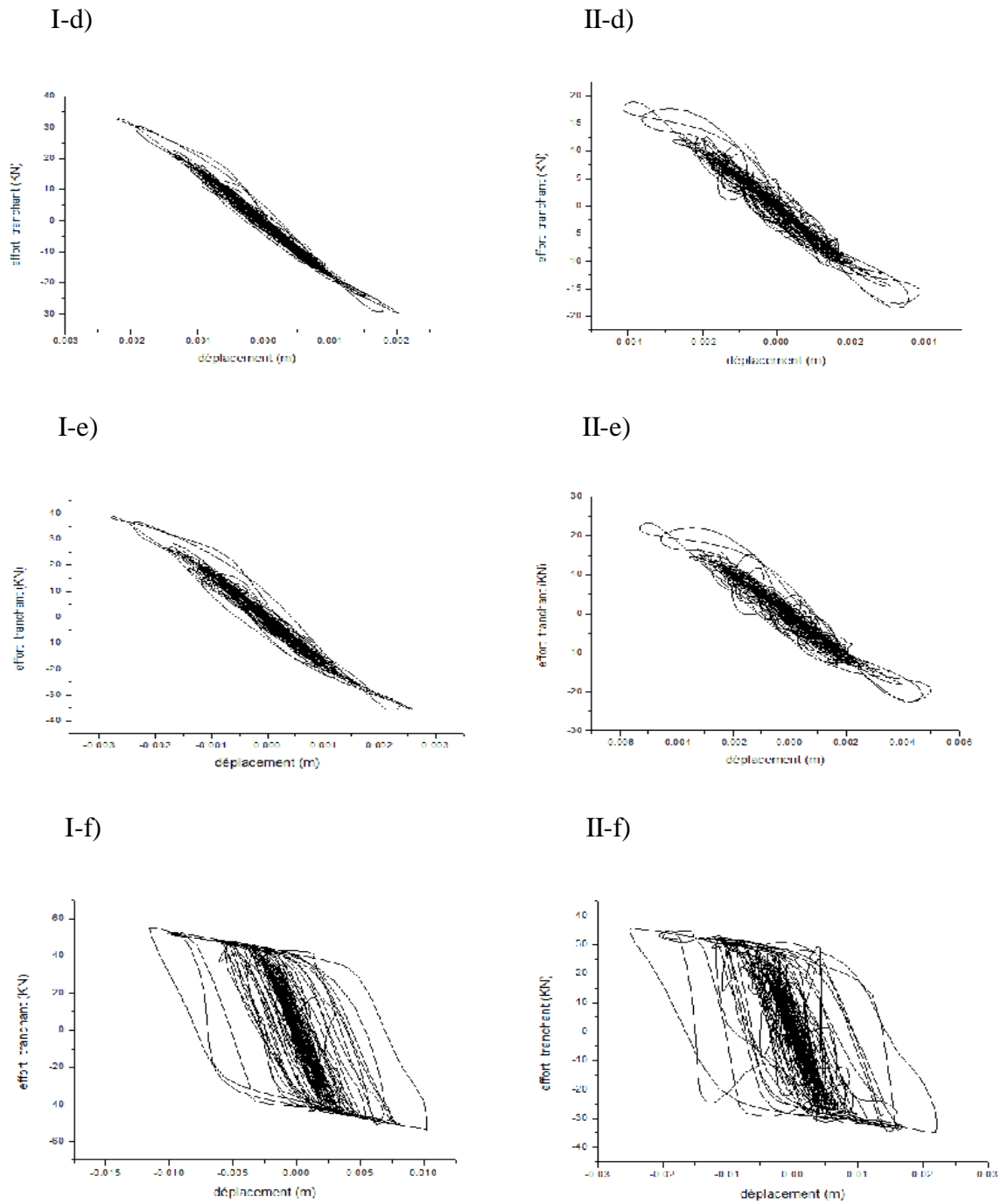
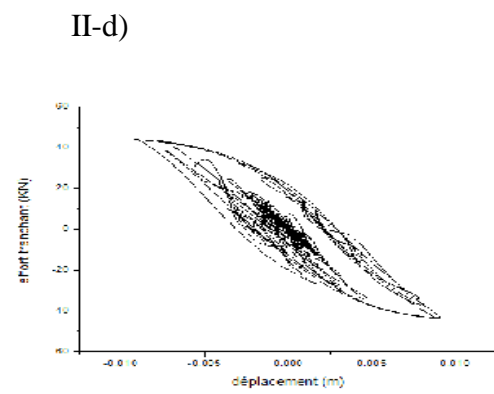
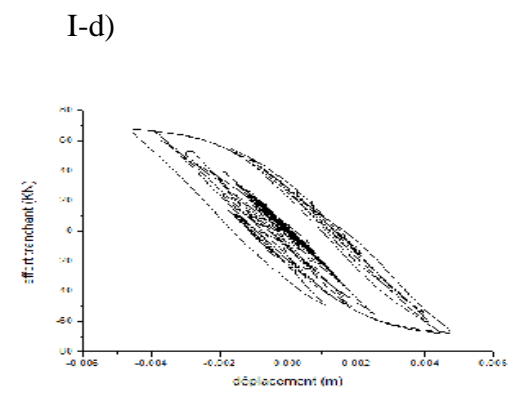
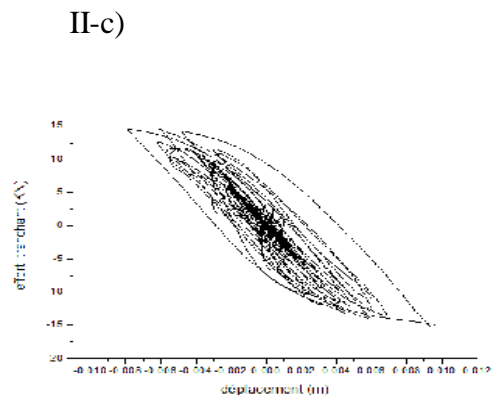
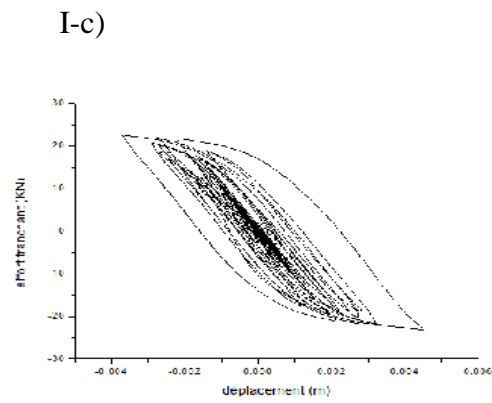
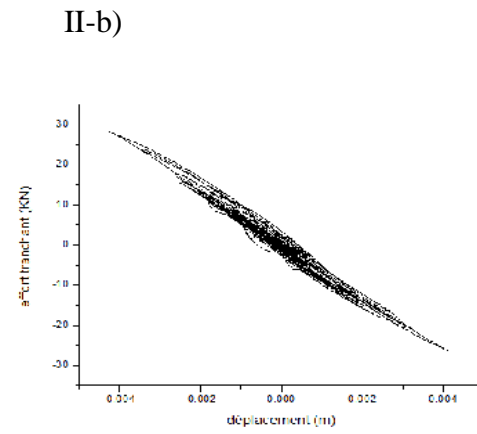
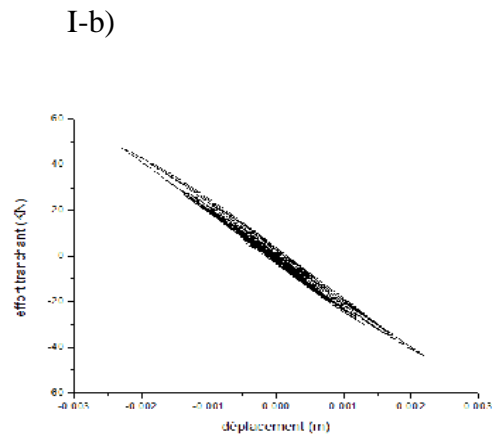
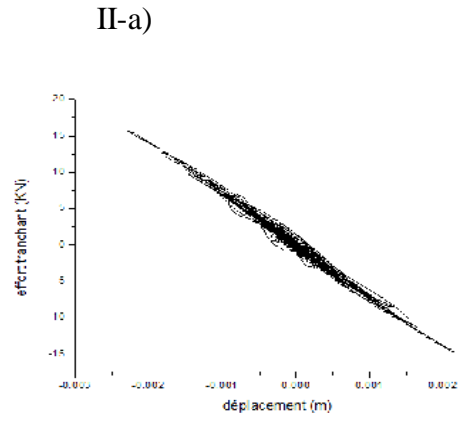
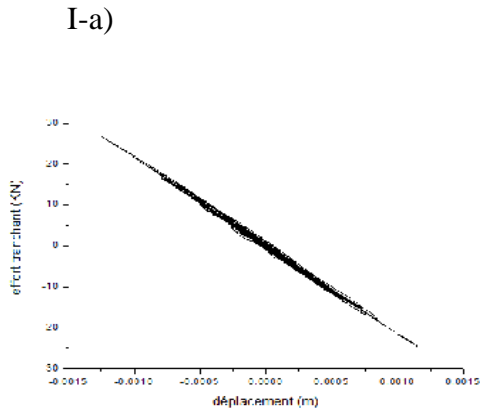


Figure 4.13 : Comparaison entre les deux paliers de niveau : I) 1<sup>er</sup> palier et II) 2<sup>ème</sup> palier des diagrammes efforts-déformations d'un dissipateur ADAS, sous l'excitation sismique de la composante de Yermo du séisme de Landers pour une rigidité  $K_{ADAS} = 50\%$  : a)  $0,025C_s$  , b)  $0,05C_s$  , c)  $0,100C_s$  , d)  $0,150C_s$  , e)  $0,200C_s$  , f)  $C_s$





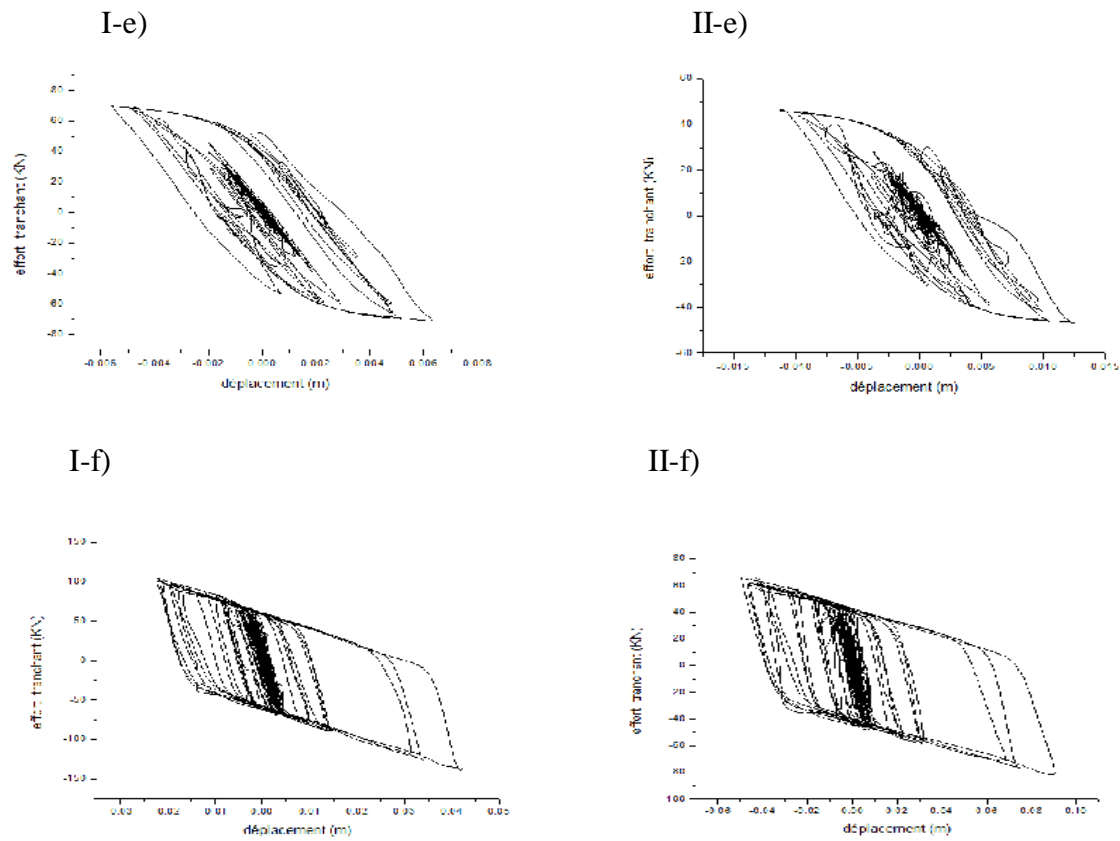
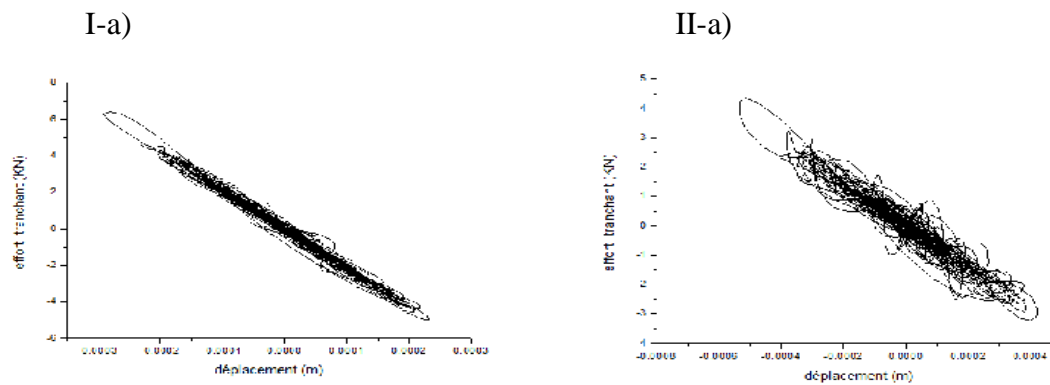
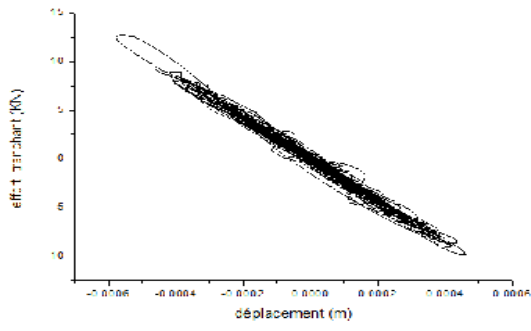


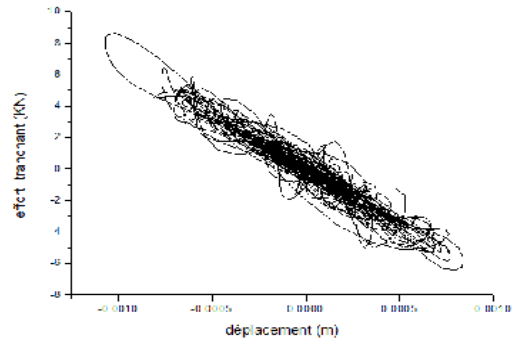
Figure 4.14 : Comparaison entre les deux paliers de niveau : I) 1<sup>er</sup> palier et II) 2<sup>ème</sup> palier des diagrammes efforts-déformations d'un dissipateur ADAS, sous l'excitation sismique de la composante d'El Centro du séisme d'Imperial Valley pour une rigidité  $K_{ADAS} = 75\%$  :  
 a)  $0,025C_s$  \_ b)  $0,05C_s$  \_ c)  $0,100C_s$  \_ d)  $0,150C_s$  \_ e)  $0,200C_s$  \_ f)  $C_s$



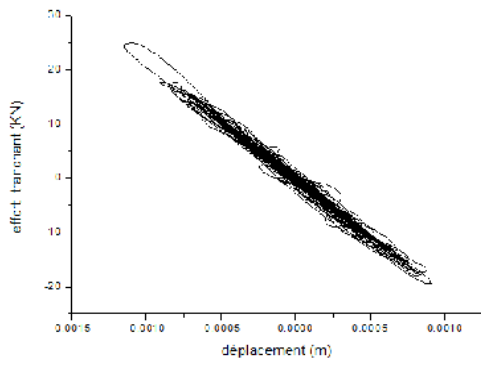
I-b)



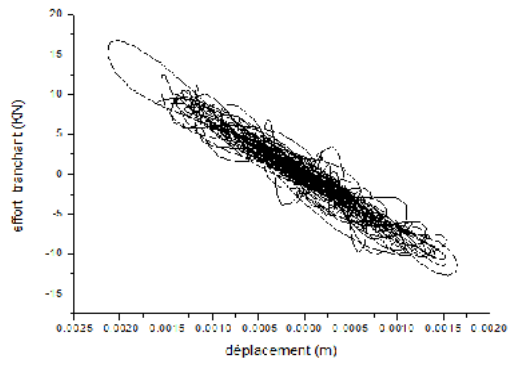
II-b)



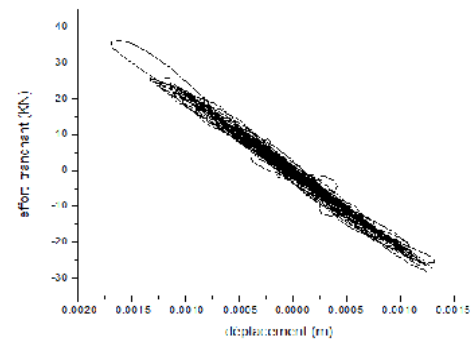
I-c)



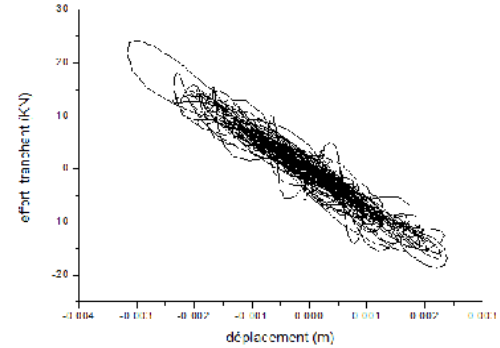
II-c)



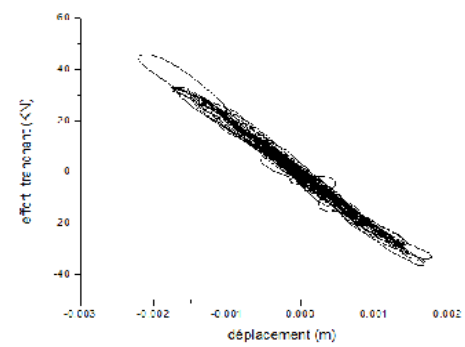
I-d)



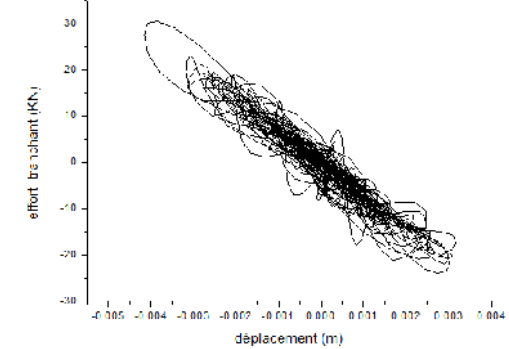
II-d)



I-e)



II-e)



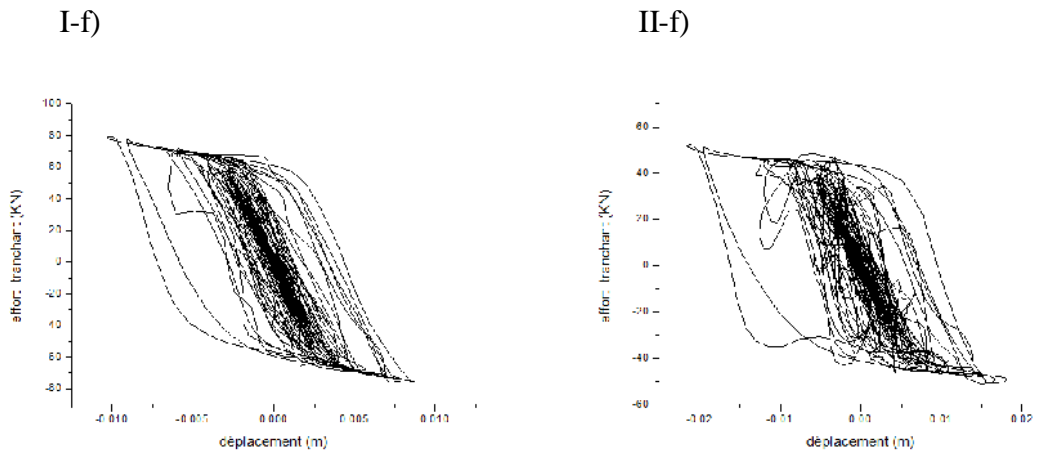


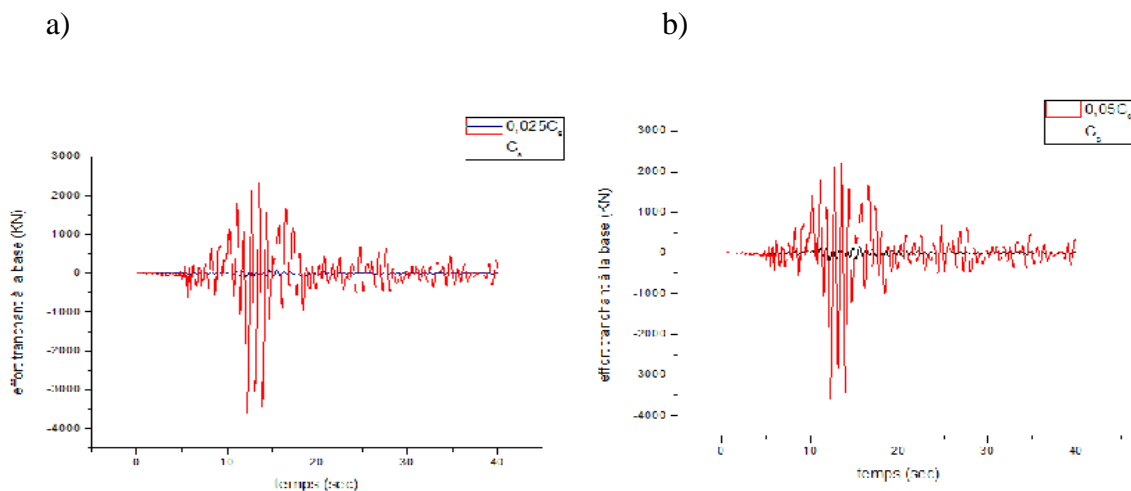
Figure 4.15 : Comparaison entre les deux paliers de niveau : I) 1<sup>er</sup> palier et II) 2<sup>ème</sup> palier des diagrammes efforts-déformations d'un dissipateur ADAS, sous l'excitation sismique de la composante de Yermo du séisme de Landers pour une rigidité  $K_{ADAS} = 75\%$  : a)  $0,025C_s$  \_ b)  $0,05C_s$  \_ c)  $0,100C_s$  \_ d)  $0,150C_s$  \_ e)  $0,200C_s$  \_ f)  $C_s$

#### IV.6.3. Effort tranchant à la base

L'un des paramètres qui nous renseigne sur l'état de sollicitation de la structure sous l'effet de l'excitation sismique est la valeur de l'effort tranchant et ce dernier sera maximal à la base, donc on peut se suffire d'étudier la variation de l'effort tranchant à la base seulement.

On doit faire des comparaisons entre le cas linéaire et les autres cas comme suit :

1. Linéaire /  $0.200C_s$
2. Linéaire /  $0.150C_s$
3. Linéaire /  $0.100C_s$
4. Linéaire /  $0.050C_s$
5. Linéaire /  $0.025C_s$



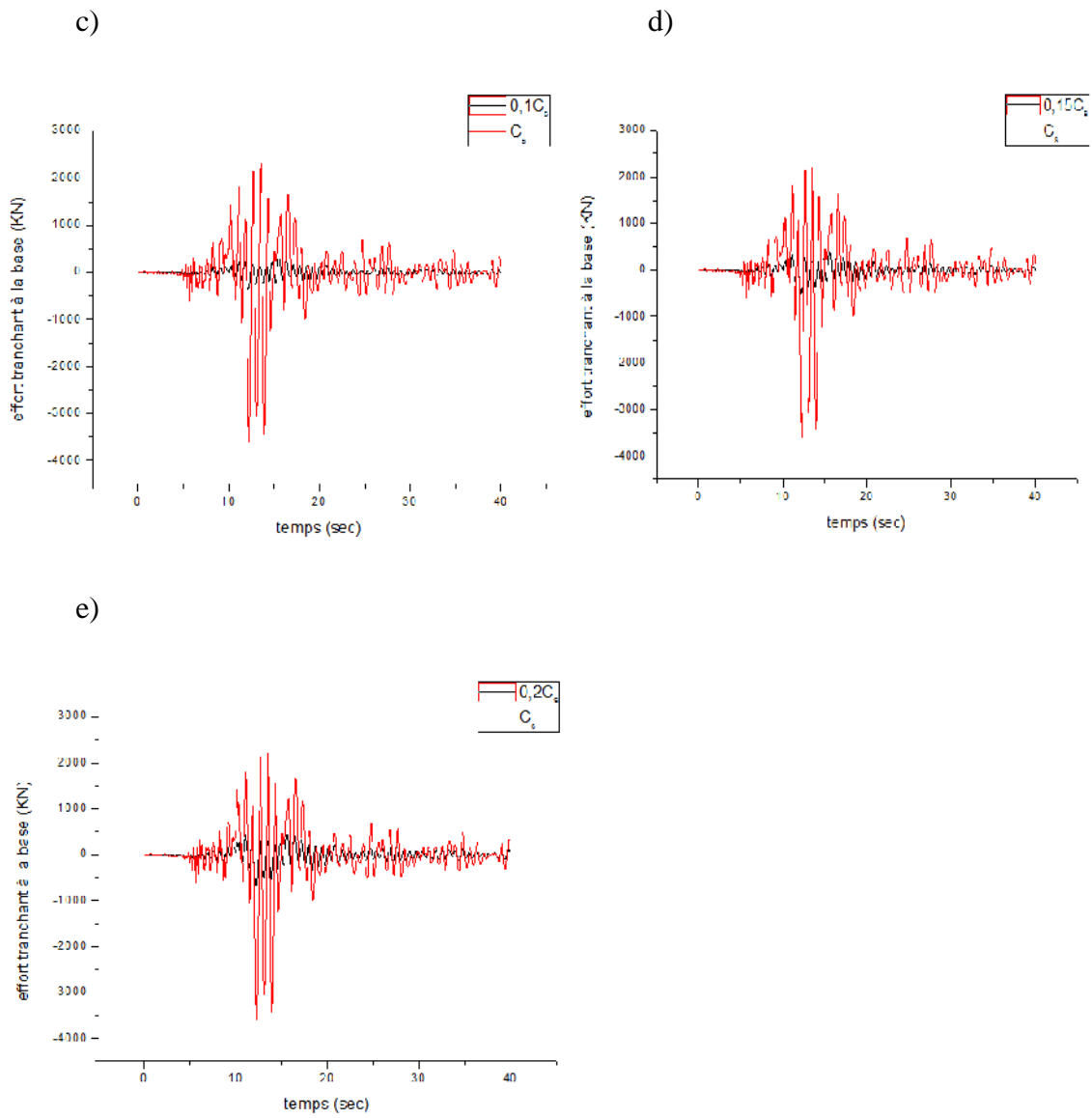


Figure 4.16 : variation des efforts tranchants dans la direction X sous l'excitation sismique de la composante d'El Centro du séisme d'Imperial Valley pour une rigidité  $K_{ADAS} = 25\%$  :

- a) Linéaire /  $0.025C_s$ , b) Linéaire /  $0.050C_s$ , c) Linéaire /  $0.100C_s$ , d) Linéaire /  $0.150C_s$ , e) Linéaire /  $0.200C_s$

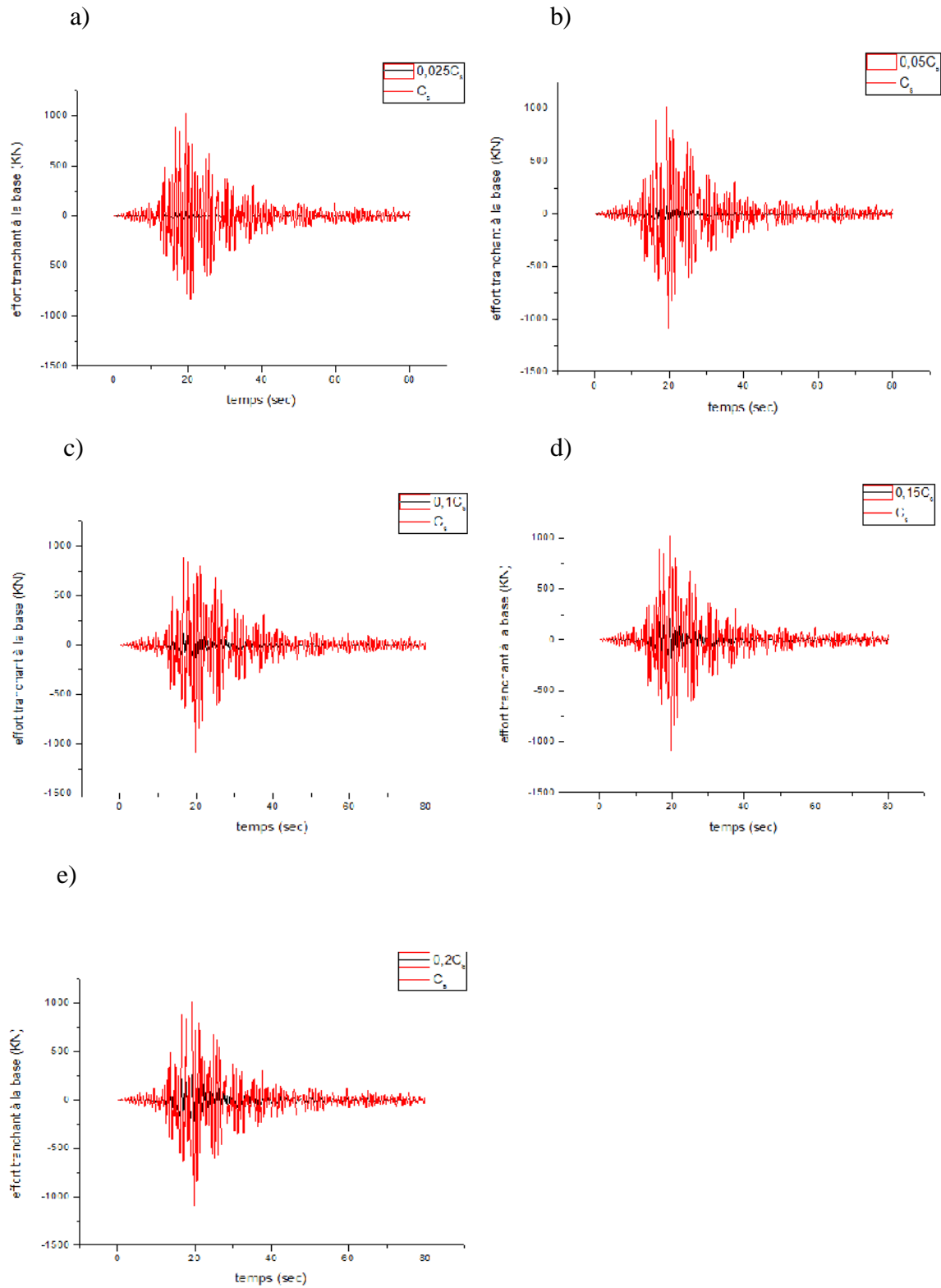


Figure 4.17 : variation des efforts tranchants dans la direction X sous l'excitation sismique de la composante Yermo du séisme de Landers pour une rigidité  $K_{ADAS} = 25\%$  :

- a) Linéaire /  $0.025C_s$ , b) Linéaire /  $0.050C_s$ , c) Linéaire /  $0.100C_s$ , d) Linéaire /  $0.150C_s$ , e) Linéaire /  $0.200C_s$

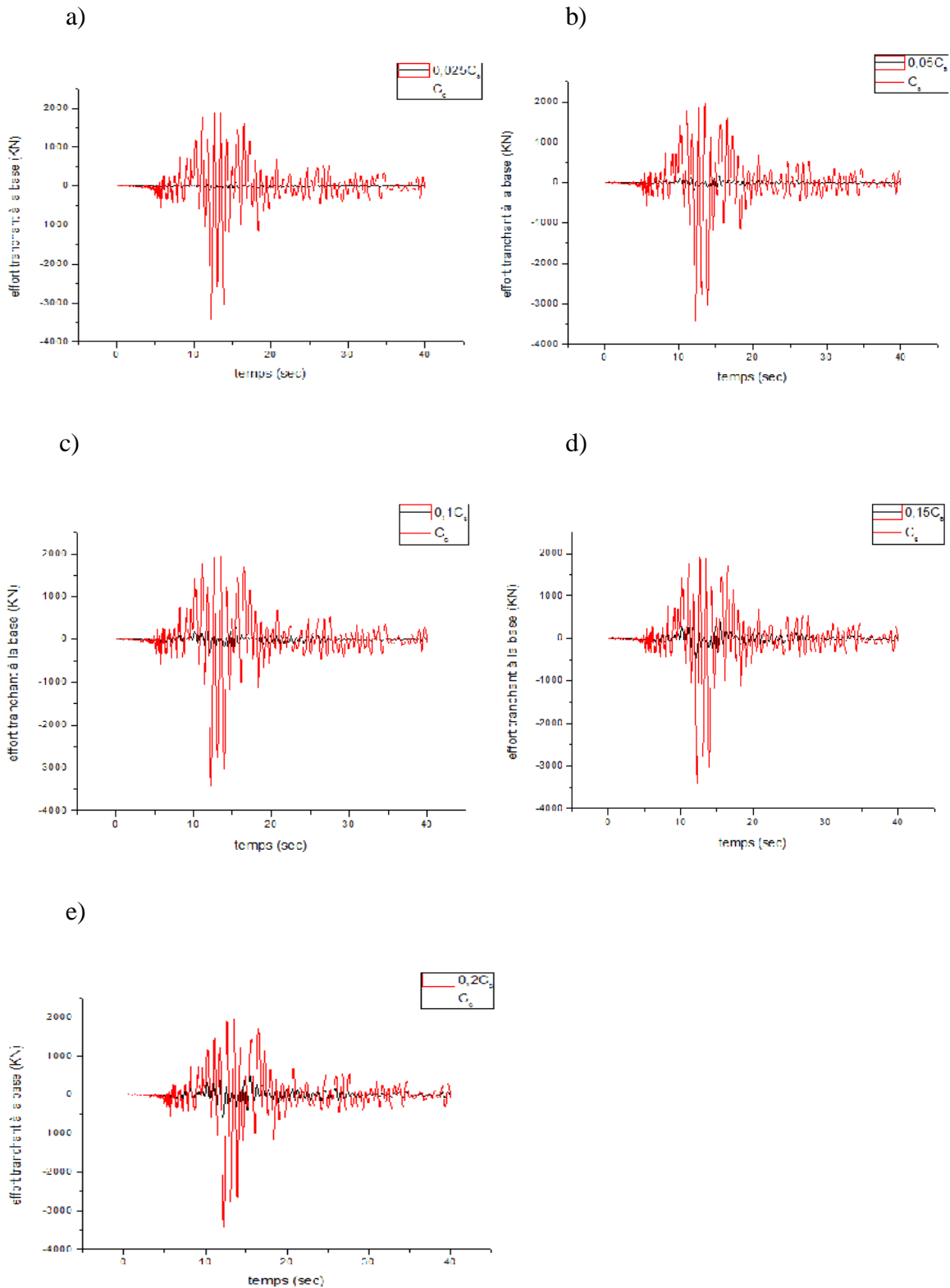


Figure 4.18 : variation des efforts tranchants dans la direction X sous l'excitation sismique de la composante d'El Centro du séisme d'Imperial Valley pour une rigidité  $K_{ADAS} = 50\%$  :

- a) Linéaire /  $0.025C_s$ , b) Linéaire /  $0.050C_s$ , c) Linéaire /  $0.100C_s$ , d) Linéaire /  $0.150C_s$ , e) Linéaire /  $0.200C_s$

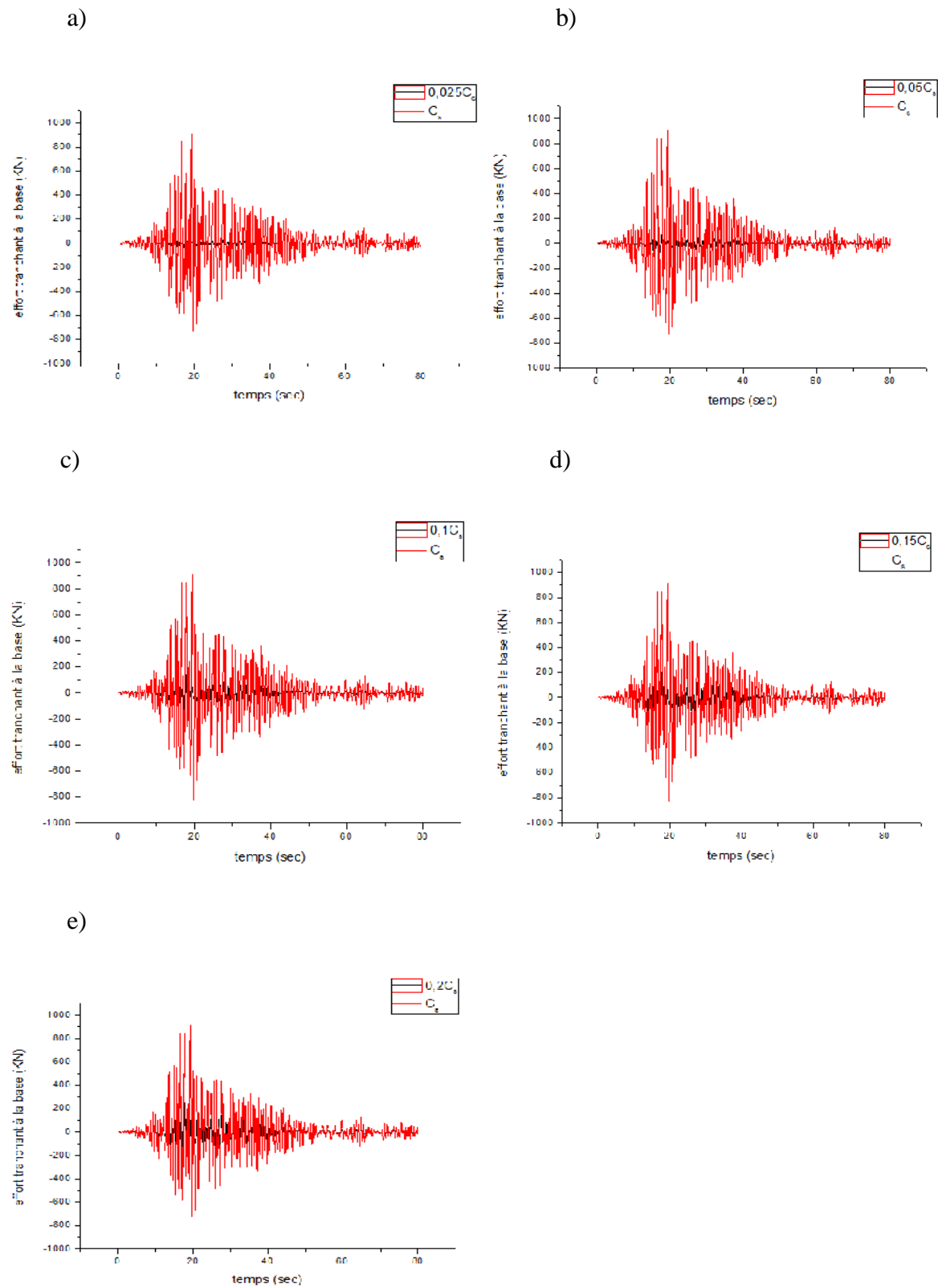


Figure 4.19 : variation des efforts tranchants dans la direction X sous l'excitation sismique de la composante Yermo du séisme de Landers pour une rigidité  $K_{ADAS} = 50\%$  :

- a) Linéaire /  $0,025C_s$ , b) Linéaire /  $0,05C_s$ , c) Linéaire /  $0,100C_s$ , d) Linéaire /  $0,150C_s$ ,
- e) Linéaire /  $0,200C_s$



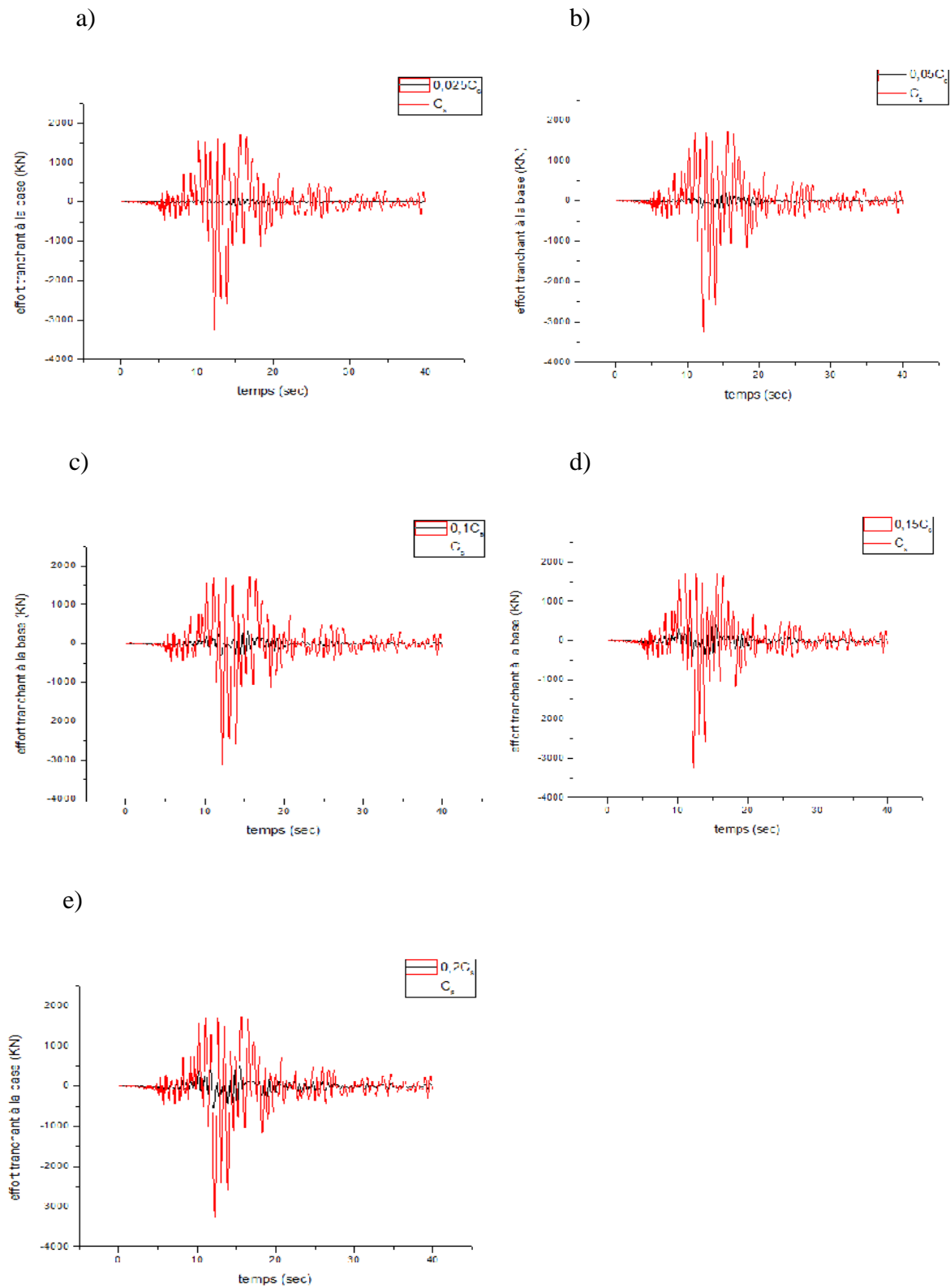


Figure 4.20 : variation des efforts tranchants dans la direction X sous l'excitation sismique de la composante d'El Centro du séisme d'Imperial Valley pour une rigidité  $K_{ADAS} = 75\%$  :

a) Linéaire /  $0.025C_s$ , b) Linéaire /  $0.050C_s$ , c) Linéaire /  $0.100C_s$ , d) Linéaire /  $0.150C_s$ , e) Linéaire /  $0.200C_s$

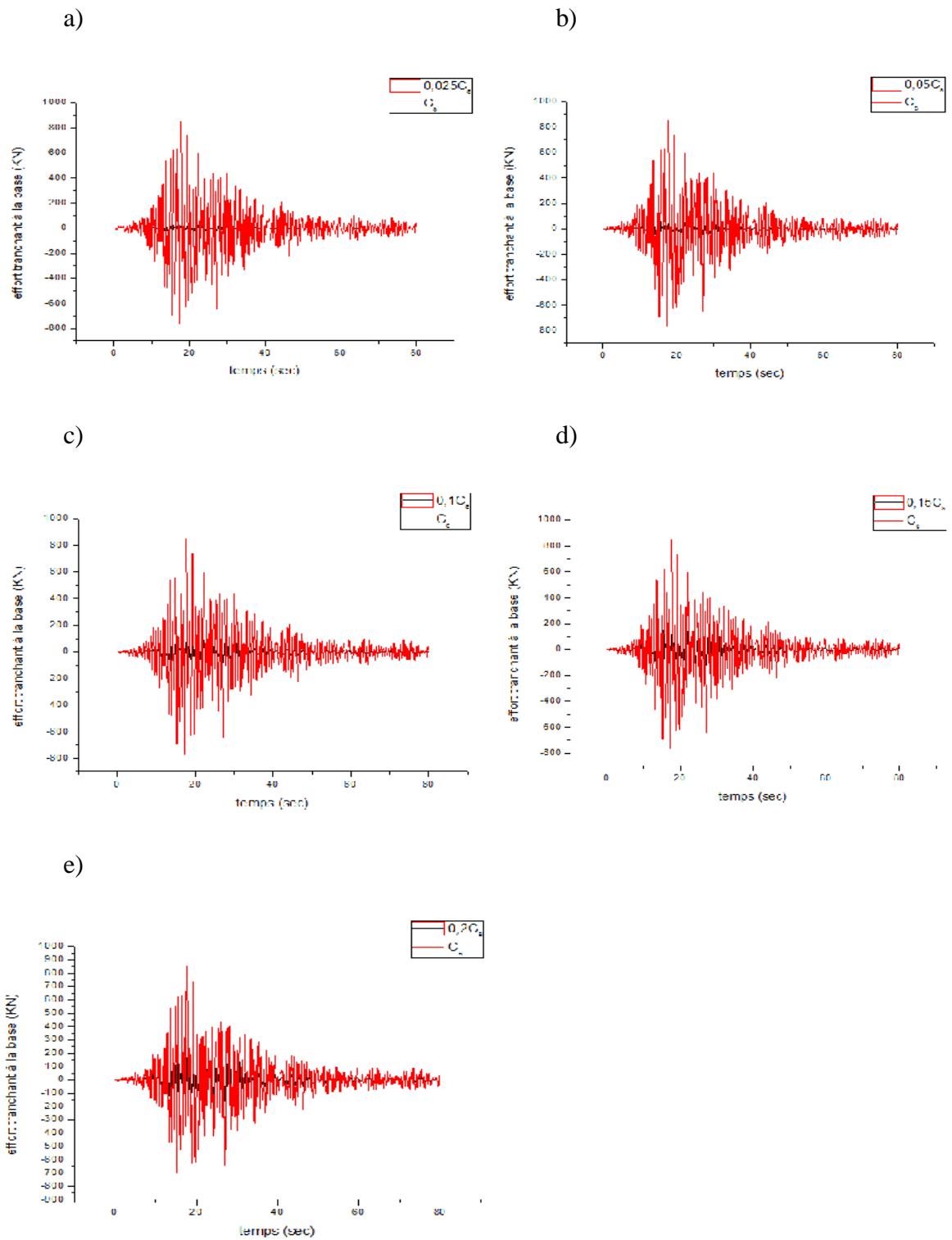


Figure 4.21 : variation des efforts tranchants dans la direction X sous l'excitation sismique de la composante Yermo du séisme de Landers pour une rigidité  $K_{ADAS} = 75\%$  :

- a) Linéaire /  $0.025C_s$ , b) Linéaire /  $0.050C_s$ , c) Linéaire /  $0.100C_s$ , d) Linéaire /  $0.150C_s$ , e) Linéaire /  $0.200C_s$

Des figures précédentes, on remarque que la valeur de l'effort tranchant à la base augmente en accord avec l'augmentation du coefficient sismique.

Pour être plus précis, on transforme ces résultats en tableaux ;

Coefficient sismique	Rigidité des dissipateurs $K_{ADAS}$				
	25%	50%		75%	
	Effort tranchant (KN)	Effort tranchant (KN)	Réduction (%)	Effort tranchant (KN)	Réduction (%)
0,025Cs	103,3	89,74	13,12	120,8	-
0,050Cs	198,1	175,6	11,35	221,2	-
0,100Cs	364,3	328,2	09,90	347,9	04,50
0,150Cs	519,2	467,6	09,94	436,2	15,98
0,200Cs	676,5	605,5	10,50	557,4	17,60
Cs	3595	3416	04,98	3246	09,70

Tableau 4-9: Comparaison des résultats des efforts tranchants pour les différents coefficients sismiques sous l'excitation sismique de la composante d'El Centro du séisme d'Imperial Valley pour les différentes rigidités des dissipateurs.

On constate que l'augmentation de la rigidité des dissipateurs sous une excitation sismique moyenne provoque une réduction de l'effort tranchant à la base et par conséquent la sollicitation de la structure. Cette réduction peut atteindre jusqu'à 10,50% et 17,60% pour un coefficient sismique de 0,200Cs pour les deux combinaisons de rigidité 50% et 75% respectivement.

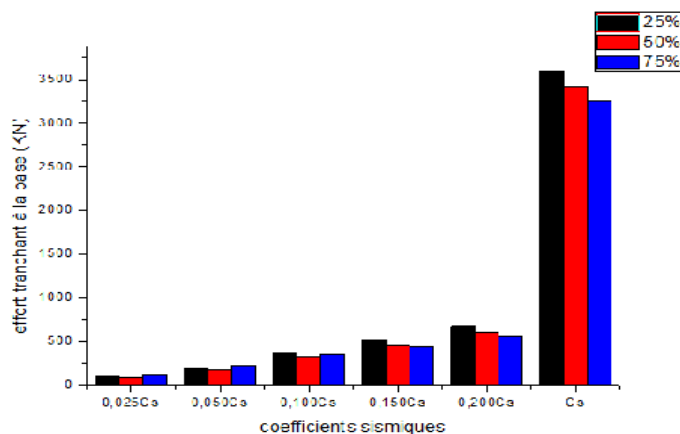


Figure 4.22: Comparaison des résultats des efforts tranchants pour les différents coefficients sismiques sous l'excitation sismique d'El Centro pour les différentes rigidités des dissipateurs

Coefficient sismique	Rigidité des dissipateurs $K_{ADAS}$				
	25%	50%		75%	
	Effort tranchant (KN)	Effort tranchant (KN)	Réduction (%)	Effort tranchant (KN)	Réduction (%)
0,025Cs	39,35	37,81	03,91	28,23	28,26
0,050Cs	77,65	75,01	03,4	56,37	27,40
0,100Cs	147,9	145,4	01,69	111,9	24,34
0,150Cs	210,5	207,3	01,52	165,6	21,33
0,200Cs	264,4	258,6	02,19	216,2	18,22
Cs	1087	911,6	16,13	855,5	21,29

Tableau 4-10: Comparaison des résultats des efforts tranchants pour les différents coefficients sismiques sous l'excitation sismique de la composante de Yermo du séisme de Landers pour les différentes rigidités des dissipateurs.

On constate que la combinaison de rigidité  $K_{ADAS}=75\%$  provoque une réduction remarquable de l'effort tranchant à la base sous une excitation sismique faible, elle peut atteindre jusqu'à 21,29% pour un coefficient sismique Cs comme elle peut arriver jusqu'à 28,26% pour un coefficient sismique de 0,025Cs.

La variation de l'effort tranchant à la base d'un coefficient sismique à l'autre pour la combinaison de rigidité  $K_{ADAS}=75\%$  peut être illustrée dans l'histogramme suivant :

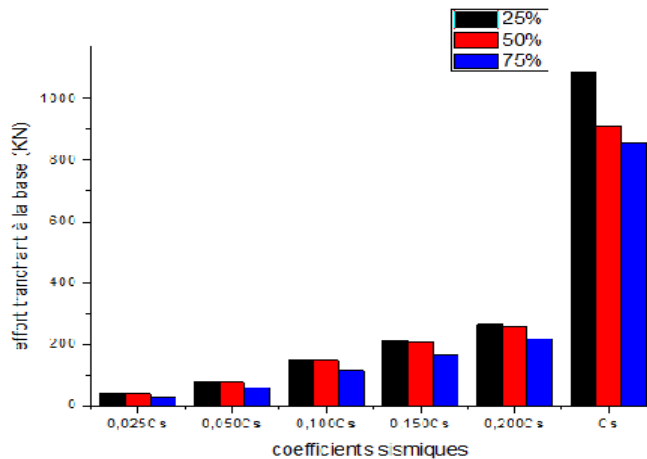
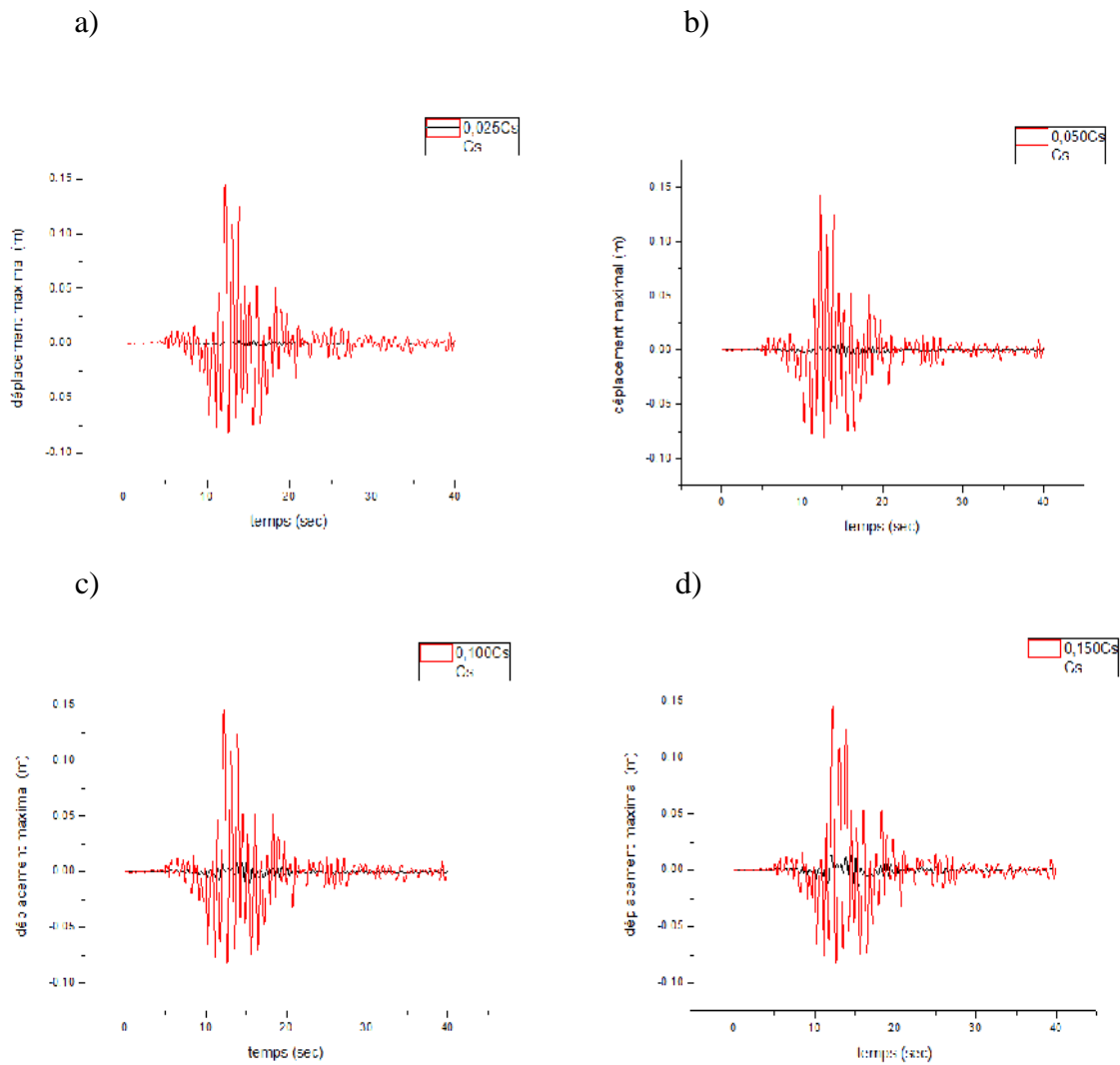


Figure 4.23: Comparaison des résultats des efforts tranchants pour les différents coefficients sismiques sous l'excitation sismique de Landers pour les différentes rigidités des dissipateurs

#### IV.6.4. Déplacements

Le déplacement est un des paramètres qui nous donne une idée sur la réponse de la structure et sa capacité de résister aux excitations sismiques qui lui ont été appliqués.

D'après tout ce qui précède, on peut admettre que la meilleure combinaison de rigidité est celle où  $K_{ADAS} = 75\%$ , par conséquent, dans l'étude des déplacements, on se suffit d'illustrer ce cas, sachant que le déplacement maximal sera celui du dernier niveau.



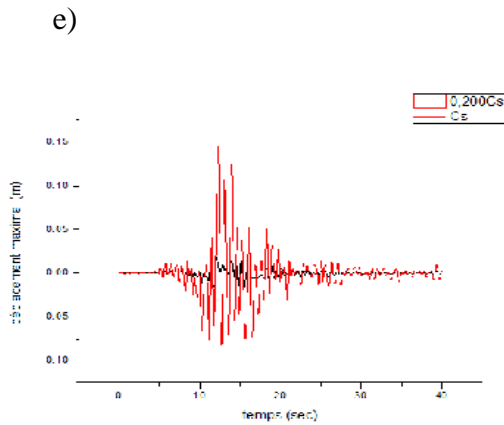
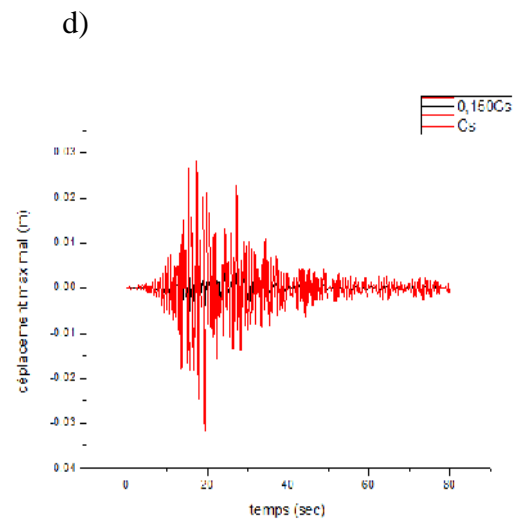
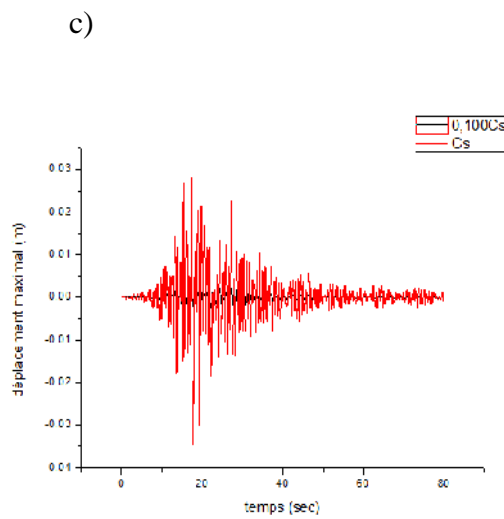
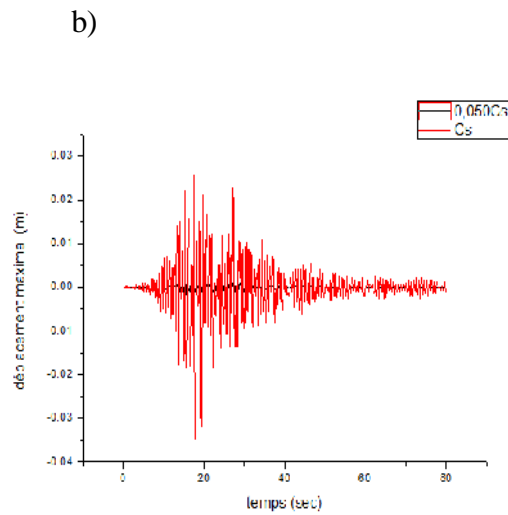
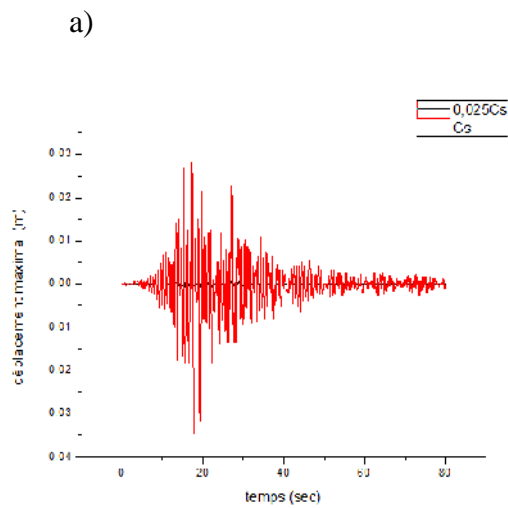


Figure 4.24 : variation des efforts tranchants dans la direction X sous l'excitation sismique de la composante d'El Centro du séisme d'Imperial Valley pour une rigidité  $K_{ADAS} = 75\%$  :

a) Linéaire / 0.025Cs, b) Linéaire / 0.050Cs, c) Linéaire / 0.100Cs, d) Linéaire / 0.150Cs, e) Linéaire / 0.200Cs



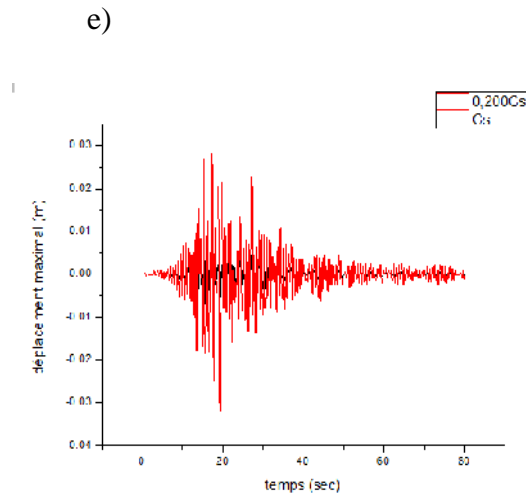


Figure 4.25 : variation des efforts tranchants dans la direction X sous l'excitation sismique de la composante Yermo du séisme de Landers pour une rigidité  $K_{ADAS} = 75\%$  :

- a) Linéaire /  $0.025C_s$ , b) Linéaire /  $0.050C_s$ , c) Linéaire /  $0.100C_s$ , d) Linéaire /  $0.150C_s$ ,  
e) Linéaire /  $0.200C_s$

Coefficient sismique	Rigidité des dissipateurs $K_{ADAS}$				
	25%	50%		75%	
	Déplacement (m)	Déplacement (m)	Réduction (%)	Déplacement (m)	Réduction (%)
0,025Cs	0,003878	0,002935	24,31	0,003517	09,30
0,050Cs	0,007670	0,005583	27,20	0,006511	15,11
0,100Cs	0,01524	0,01073	29,59	0,01084	28,78
0,150Cs	0,02296	0,01678	26,91	0,01384	39,72
0,200Cs	0,03088	0,02366	23,38	0,01845	40,25
Cs	0,1805	0,1582	12,35	0,1450	19,42

Tableau 4-11 : Comparaison des résultats des déplacements pour les différents coefficients sismiques sous l'excitation sismique de la composante d'El Centro du séisme d'Imperial Valley pour les différentes rigidités des dissipateurs.

On remarque que l'augmentation de la rigidité des dissipateurs sous une excitation sismique moyenne provoque une réduction importante du déplacement de la structure. Cette réduction peut atteindre jusqu'à 23,38% et 40,25% pour un coefficient sismique de 0,200Cs pour les deux combinaisons de rigidité 50% et 75% respectivement

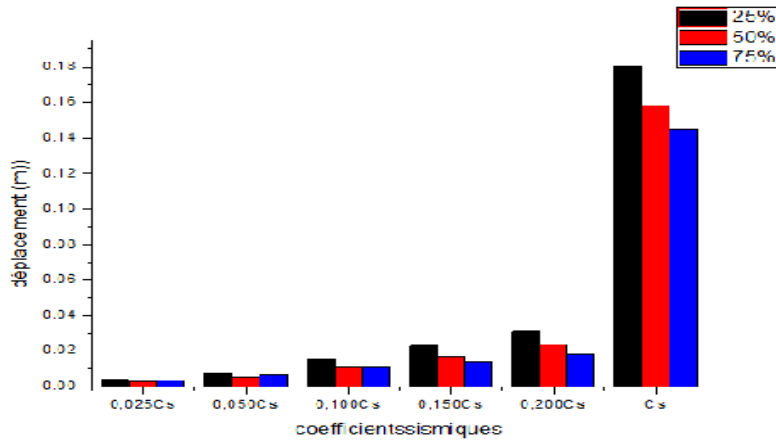


Figure 4.26: Comparaison des résultats des déplacements pour les différents coefficients sismiques sous l'excitation sismique d'El Centro pour les différentes rigidités des dissipateurs

Coefficient sismique	Rigidité des dissipateurs $K_{ADAS}$				
	25%		50%		75%
	Déplacement (m)	Déplacement (m)	Réduction (%)	Déplacement (m)	Réduction (%)
0,025Cs	0,001440	0,001115	22,57	0,000873	39,37
0,050Cs	0,002853	0,002214	22,40	0,001744	38,87
0,100Cs	0,005518	0,004307	21,95	0,003474	37,04
0,150Cs	0,007913	0,006219	21,40	0,005168	34,69
0,200Cs	0,01005	0,008009	20,30	0,006801	32,33
Cs	0,04805	0,03985	17,07	0,03476	27,66

Tableau 4-12: Comparaison des résultats des déplacements pour les différents coefficients sismiques sous l'excitation sismique de la composante de Yermo du séisme de Landers pour les différentes rigidités des dissipateurs.

On constate que la combinaison de rigidité  $K_{ADAS}=75\%$  provoque une réduction remarquable du déplacement du dernier niveau de la structure sous une excitation sismique faible, elle peut atteindre jusqu'à 32,33% pour un coefficient sismique de 0,200Cs comme elle peut arriver jusqu'à 39,37% pour un coefficient sismique de 0,025Cs.

La variation des déplacements d'un coefficient sismique à l'autre pour la combinaison de rigidité  $K_{ADAS}=75\%$  peut être illustrée dans l'histogramme suivant :



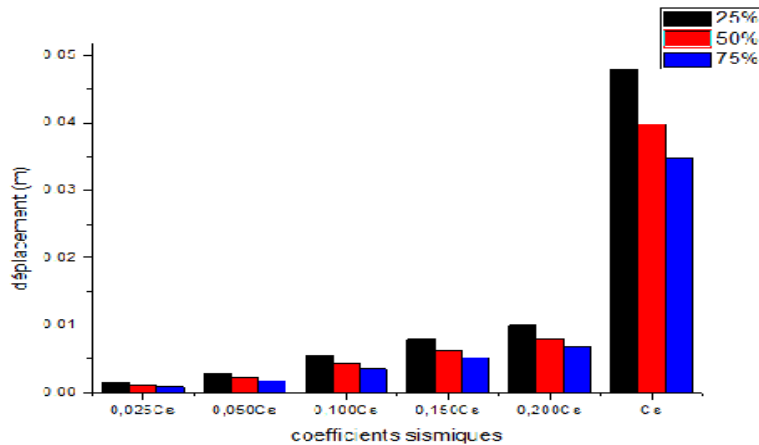


Figure 4.27: Comparaison des résultats des déplacements pour les différents coefficients sismiques sous l'excitation sismique de Landers pour les différentes rigidités des dissipateurs.

#### IV.7. Interprétation des résultats

Une comparaison est faite entre les courbes énergétiques ainsi qu'entre les boucles d'hystérésis pour des différents coefficients sismiques et pour des différentes combinaisons de rigidité sous deux chargements sismiques ; le premier d'une excitation sismique moyenne ( $PGA = 0,436g$ ) et le deuxième d'une excitation sismique faible ( $PGA = 0,151g$ ).

On constate que l'augmentation du coefficient sismique entraîne une augmentation de l'énergie sismique entrée, de l'énergie d'amortissement modal et de l'énergie absorbée par le système de dissipation d'énergie. Par conséquent, la différence entre l'énergie sismique entrée et celle absorbée par le système de dissipation d'énergie est réduite avec l'augmentation du coefficient sismique et l'augmentation de la rigidité du système de dissipation d'énergie, ce qui montre l'influence et l'efficacité d'un système de dissipation d'énergie dans une structure de période courte.

On remarque que l'énergie sismique entrée reste presque invariable avec l'augmentation de la rigidité du système de dissipation d'énergie et que cette augmentation entraîne une augmentation dans l'énergie absorbée par le système de dissipation d'énergie et une réduction dans l'énergie de l'amortissement modal.

On remarque aussi que les surfaces des boucles d'hystérésis sont augmentées en accord avec l'augmentation du coefficient sismique pour les deux excitations sismiques utilisées. Ceci est

expliqué par l'augmentation de l'énergie absorbée par le système de dissipation d'énergie avec l'augmentation du coefficient sismique.

Le système de dissipation d'énergie est plus efficace à dissiper l'énergie sismique induite lors d'une excitation sismique moyenne ou élevée et devient moins efficace pour des excitations faibles comme le montre l'accélérogramme du séisme de LANDERS qui a un PGA de 0.151 g.

La dissipation d'énergie est plus importante lors d'une excitation sismique moyenne ou élevée et elle devient moins importante pour des excitations faibles comme le montre le cas de l'accélérogramme du séisme de LANDERS qui a un PGA de 0.151 g.

La dissipation d'énergie est plus importante dans les structures qui possèdent des systèmes de dissipation d'énergie assez rigides.

**Chapitre V :**  
**INFLUENCE DES DISSIPATEURS**  
**SUR LES STRUCTURES**  
**DE PERIODE**  
**LONGUE**

## Chapitre V

### INFLUENCE DES DISSIPATEURS SUR LES STRUCTURES DE PERIODE LONGUE

#### V.1. Introduction

Pour illustrer l'influence de la hauteur du bâtiment sur l'efficacité du système de dissipation d'énergie, une analyse a été faite sur la même structure étudiée dans le chapitre précédent, mais en changeant cette fois le nombre de niveaux et bien sûr les sections des poteaux (profiles). Le système de dissipation choisi est le même que celui de l'étude précédente sous les mêmes excitations sismiques ; El Centro (avec un  $PGA = 0,436g$ ) et Landers (avec un  $PGA = 0,151g$ ).

Maintenant l'objectif est d'évaluer l'influence de ces mécanismes sur un édifice de période relativement longue sous une sollicitation sismique donnée.

#### V.2. Description de la structure

Dans cette partie, on traite le second cas théorique, qui consiste en un bâtiment métallique de vingt niveaux, de forme rectangulaire en plan. Les dimensions dans le plan sont : 18 m dans la direction X et 15 m dans la direction Y, ce qui donne une superficie de  $270 \text{ m}^2$ . La structure comporte trois travées dans le sens d'analyse avec une longueur de 6 m chacune ainsi que trois travées dans la direction perpendiculaire avec une longueur de 5 m chacune. La hauteur entre les étages est de 3 m.

Pour ce bâtiment, les portiques sont constitués de poutres et de solives IPE 330, de cinq palier de niveaux, chaque palier comporte quatre niveaux ; les poteaux du premier palier sont de type HE500B, ceux du deuxième palier sont de type HE450B, ceux du troisième palier sont de type HE400B, ceux du quatrième palier sont de type HE340B et ceux du cinquième palier sont de type HE240A. Le contreventement est assuré par des diagonales de type chevron UPN160. On ce qui concerne les planchers, qui reposent sur l'ensemble de poutres et de solives métalliques, on a choisi des planchers mixtes à dalle collaborant. Le plancher terrasse est identique aux planchers courants sauf pour la partie supérieure qui comprend des couches supplémentaires (étanchéité, gravillon,...)

Le plancher est constitué d'une dalle de 16,5 cm d'épaisseur du béton armé reposant sur bac d'acier et posé sur les poutrelles, ce qui peut donner au plancher une rigidité suffisante pour pouvoir appliquer l'hypothèse de diaphragme rigide.

Dans la direction d'analyse, dans ce cas la direction X, les dissipateurs d'énergie sont placés au niveau des portiques de rive, dans les trois travées, dans des contreventements de type chevron, puisque ce type de contreventement permet une meilleure performance des dissipateurs hystérétiques de type ADAS.

Il est à noter que pour contrôler les variables de l'étude, les dissipateurs sont placés dans un seul sens, d'ailleurs c'est uniquement dans cette direction que sont appliqués les accélérogrammes sismiques ; d'où, dans le sens qui n'est pas celui de l'analyse, là où les accélérogrammes sismiques ne sont pas appliqués, on n'utilise pas de dissipateurs. Toutefois, si l'on considère une analyse tridimensionnelle de la structure, on doit tenir compte, dans l'analyse de la structure, de la participation modale des modes correspondants à la direction perpendiculaire à celle des modes d'analyse et de torsion (participation qui n'est pas prise en considération dans l'analyse plane).

Dans la direction perpendiculaire à la direction de l'analyse, à savoir la direction Y, également en travée centrale au niveau des portiques de rive, on place des contreventements sans dissipateurs ; de type chevron aussi ; dans le but de fournir une rigidité latérale au bâtiment dans ce sens.

Dans cet édifice, en particulier, nous essayons seulement la proportion de rigidité latérale où la contribution des portiques est de 25% et celle des dispositifs de dissipation d'énergie est de 75%.

Le cisaillement à la base est divisé par le nombre de dissipateurs qui sont au premier niveau (6) et cette valeur est attribuée aux deux premiers niveaux. L'effort tranchant du troisième niveau est divisé par le nombre de dissipateurs qui sont au troisième niveau(6) et cette valeur est attribuée aux troisième et quatrième niveaux. L'effort tranchant du cinquième niveau est divisé par le nombre de dissipateurs qui sont au cinquième niveau(6) et cette valeur est attribuée aux cinquième et sixième niveaux,...

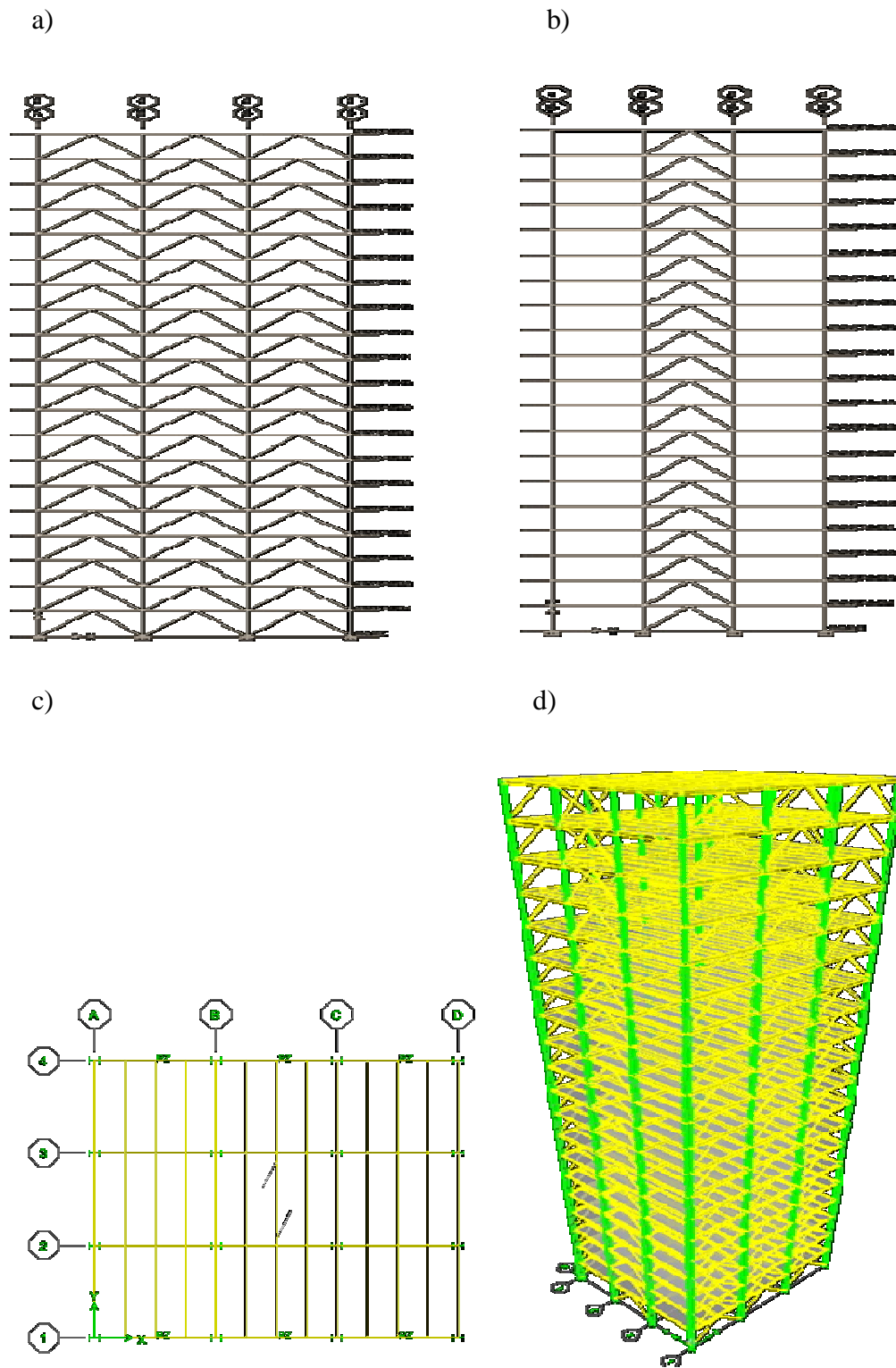


Figure 5.1 : la structure étudiée : a) vue en élévation dans la direction X, b) vue en élévation dans la direction Y, c) vue en plan avec l'emplacement des dissipateurs (PZ), d) vue en 3D

### V.3. Description du système de dissipation d'énergie

Le dispositif choisi pour cette étude est le même que celui utilisé dans le chapitre précédent ; un ADAS 75\_10, ce qui signifie des plaques métalliques de hauteur  $h = 150mm$ , de largeur de base  $b = 75mm$  et d'épaisseur  $t = 10mm$ .

La limite d'élasticité des plaques d'acier utilisées pour l'ADAS est  $\sigma_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$ , pour un acier-E36.

### V.4. Accélérogrammes d'analyse

Dans l'analyse dynamique des réponses des structures par accélérogramme, pour comparer la réponse dynamique de la structure pour différents coefficients sismiques, et sous les deux excitations sismiques:

- La composante d'El CENTRO du séisme d'IMPERIAL VALLEY (1979).
- La composante de YERMO du séisme de LANDERS (1992).

### V.5. Coefficients sismiques

Afin de trouver l'effort tranchant statique à la base  $V$ , avec lequel on doit déterminer le pré dimensionnement des dissipateurs d'énergie, on a utilisé le règlement IBC2000 (International Building Code).

$$V = C_s W$$

Avec :

$C_s$  : Le coefficient de la réponse sismique,

$W$  : Le poids de la structure.

Les résultats du calcul statique et les valeurs des efforts tranchants avec lesquelles on doit déterminer les paramètres des dissipateurs ADAS qui les définissent dans le programme de simulation ETABS sont mentionnés dans les deux tableaux suivants :

N° d'étage	$h_i$ (m)	$W_i$ (KN)	$W_i * h_i$	$F_x$	$V_x$ (KN)
1	3	1254,87	3764,61	6,772338	1283,277
2	6	1254,87	7529,22	13,54468	1276,504
3	9	1254,87	11293,83	20,31701	1262,96
4	12	1165,98	13991,76	25,17045	1242,643
5	15	1165,98	17489,7	31,46306	1217,472
6	18	1165,98	20987,64	37,75568	1186,009
7	21	1165,98	24485,58	44,04829	1148,253
8	24	1158,46	27803,04	50,01623	1104,205
9	27	1158,46	31278,42	56,26825	1054,189
10	30	1158,46	34753,8	62,52028	997,9206
11	33	1158,46	38229,18	68,77231	935,4003
12	36	1134,05	40825,8	73,4435	866,628
13	39	1134,05	44227,95	79,56379	793,1845
14	42	1134,05	47630,1	85,68408	713,6207
15	45	1134,05	51032,25	91,80437	627,9366
16	48	1112,94	53421,12	96,10182	536,1322
17	51	1112,94	56759,94	102,1082	440,0304
18	54	1112,94	60098,76	108,1146	337,9222
19	57	1112,94	63437,58	114,1209	229,8077
20	60	1071,8	64308	115,6868	115,6868
La somme			713348,3	1283,277	

Tableau 5-1: résultats du calcul statique et valeurs des efforts tranchants

Avec ;  $h_i$  : Hauteur d'étage (m)

$W_i$  : Poids d'étage du niveau « n » (KN)

$F_x$  : distribution de l'effort tranchant (KN) où 
$$F_x = V \frac{W_x h_x}{\sum_{i=1}^n W_i h_i}$$

$V_x$  : Effort tranchant du niveau « n » (KN) où 
$$V_x = \sum_{i=x}^n F_i$$



adas1	$V_{adas}$	160,4096	adas6	$V_{adas}$	116,925
	$K_{eff}$	7890,289		$K_{eff}$	5751,354
	$K_1$	54415,78		$K_1$	39664,51
	$F_y$	110,6273		$F_y$	80,63796
adas2	$V_{adas}$	157,8699	adas7	$V_{adas}$	99,14806
	$K_{eff}$	7765,369		$K_{eff}$	4876,934
	$K_1$	53554,27		$K_1$	33634,02
	$F_y$	108,8758		$F_y$	68,37797
adas3	$V_{adas}$	152,184	adas8	$V_{adas}$	78,49208
	$K_{eff}$	7485,687		$K_{eff}$	3860,899
	$K_1$	51625,42		$K_1$	26626,89
	$F_y$	104,9545		$F_y$	54,13247
adas4	$V_{adas}$	143,5317	adas9	$V_{adas}$	55,0038
	$K_{eff}$	7060,092		$K_{eff}$	2705,549
	$K_1$	48690,29		$K_1$	18658,96
	$F_y$	98,98736		$F_y$	37,93366
adas5	$V_{adas}$	131,7736	adas10	$V_{adas}$	28,72596
	$K_{eff}$	6481,732		$K_{eff}$	1412,984
	$K_1$	44701,6		$K_1$	9744,715
	$F_y$	90,87835		$F_y$	19,81101

Tableau 5-2 : Les paramètres des dix dissipateurs

avec  $V_{adas}$  : L'effort tranchant du 1<sup>er</sup> niveau du palier (KN)

$K_{eff}$  : La rigidité effective du dissipateur (KN.m)

$K_1$  : La rigidité élastique du dissipateur (KN.m)

$F_y$  : La limite d'élasticité du dissipateur (KN)

On a analysé cette structure en faisant varier le coefficient sismique pour des valeurs de  $0,025C_s$ ,  $0,050C_s$ ,  $0,100C_s$ ,  $0,150C_s$ ,  $0,200C_s$  et  $C_s$

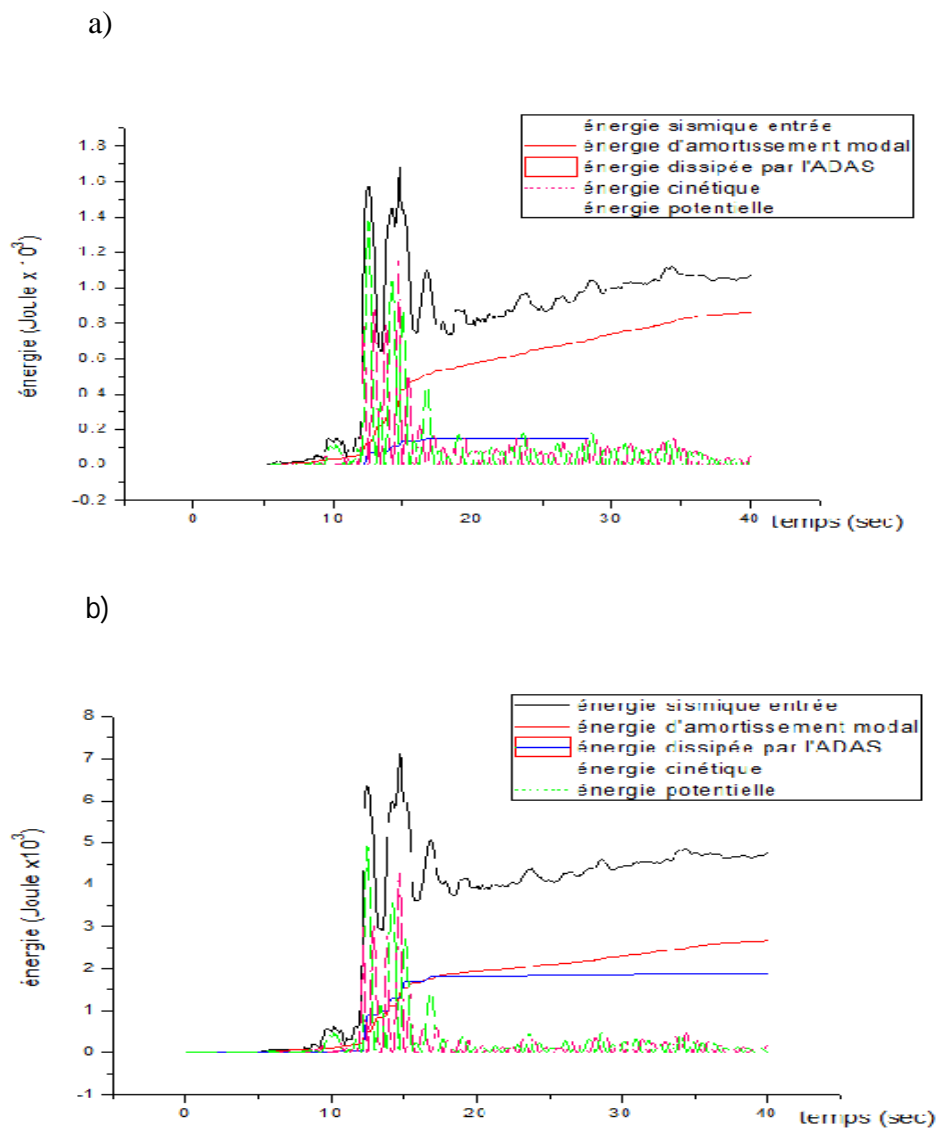
## V.6. Comparaison des résultats

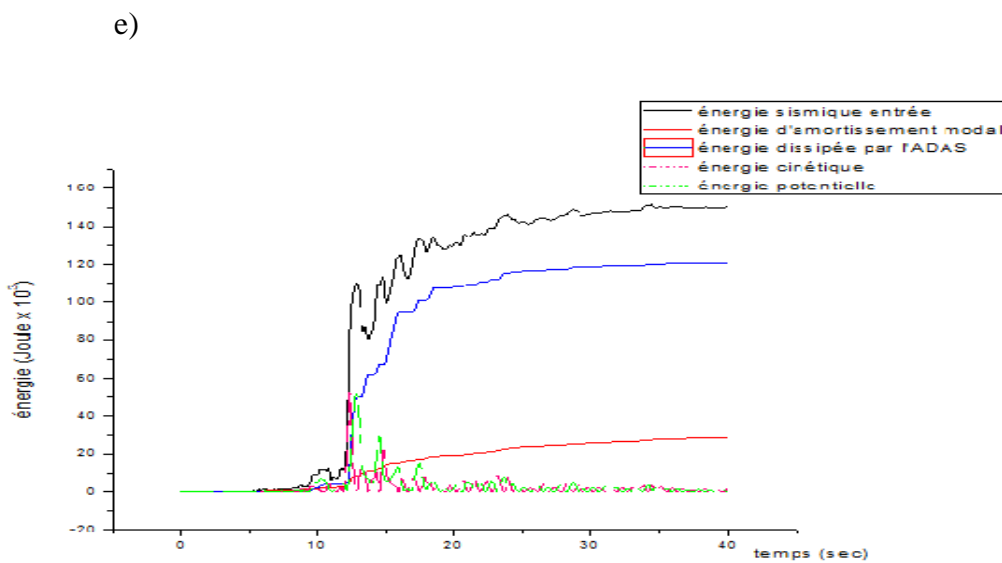
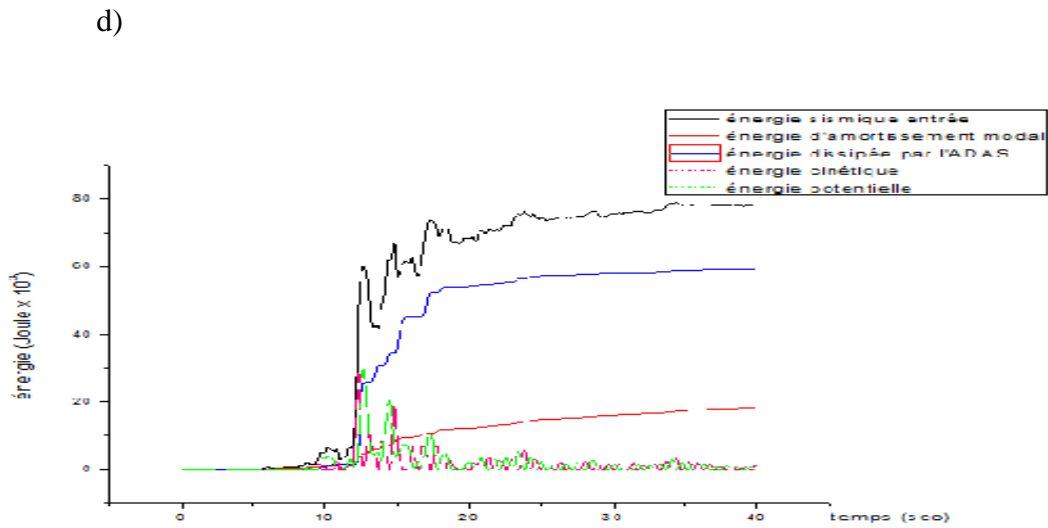
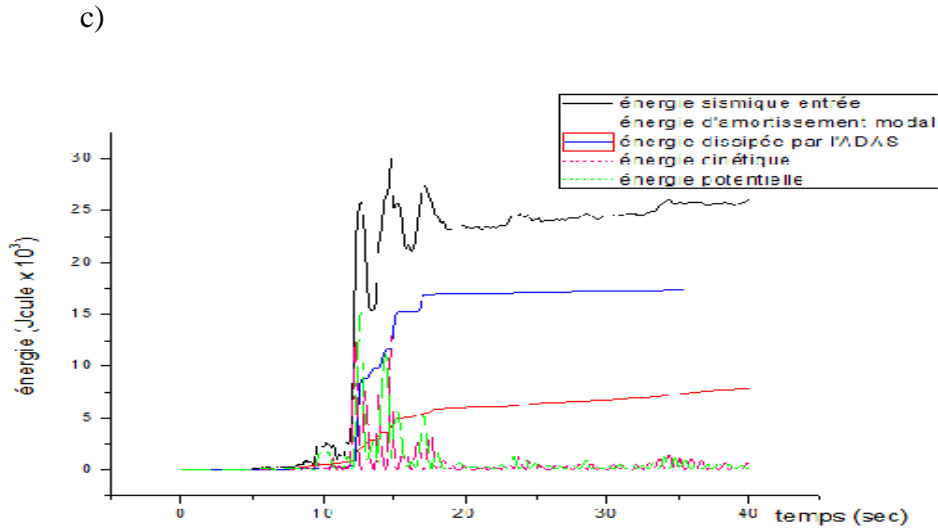
### V.6.1. Energies

l'énergie induite lors d'un séisme (Input Energy) peut être divisée en quatre formes d'énergie ; l'énergie dissipé par le système de dissipation d'énergie ADAS (Non-linear Link Energy) , l'énergie dissipé par l'amortissement structural (Modal Damping Energy) ,l'énergie cinétique (Kinetic Energy) et l'énergie potentielle (Potential Energy) .

$$E_{sismique} = E_{ADAS} + E_{modal} + E_{cinétique} + E_{potentielle}$$

Les résultats sont représentés dans les courbes énergétiques suivantes :





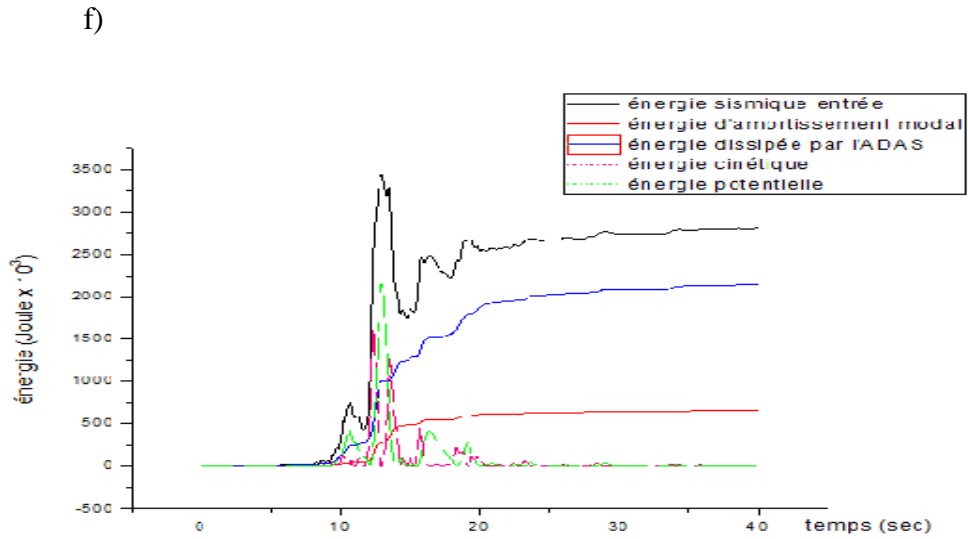
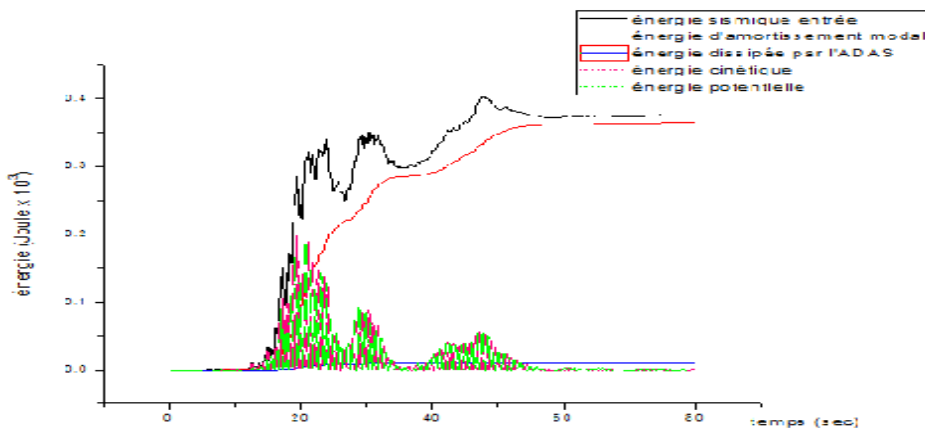


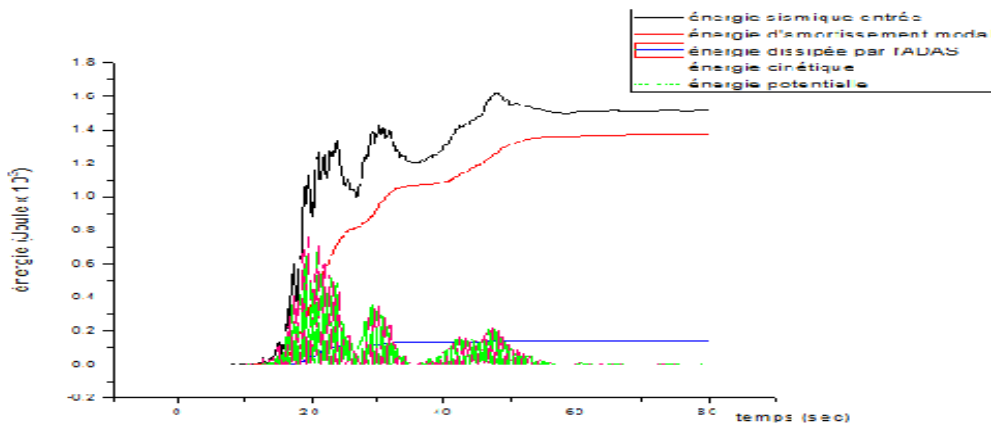
Figure 5.2: Diagrammes des énergies absorbées par la structure sous l'excitation sismique de la composante d'El Centro du séisme d'Imperial Valley pour une rigidité des dissipateurs

$K_{ADAS} = 75\%$  : a)  $0,025C_s$  \_ b)  $0,05C_s$  \_ c)  $0,100C_s$  \_ d)  $0,150C_s$  \_ e)  $0,200C_s$  \_ f)  $C_s$

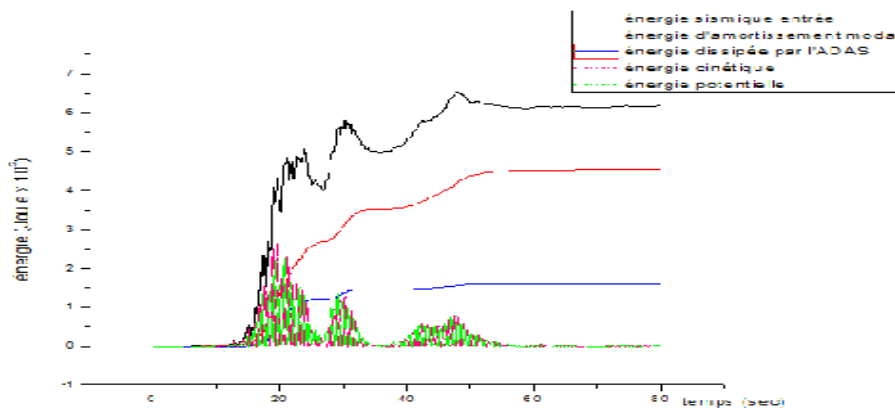
a)



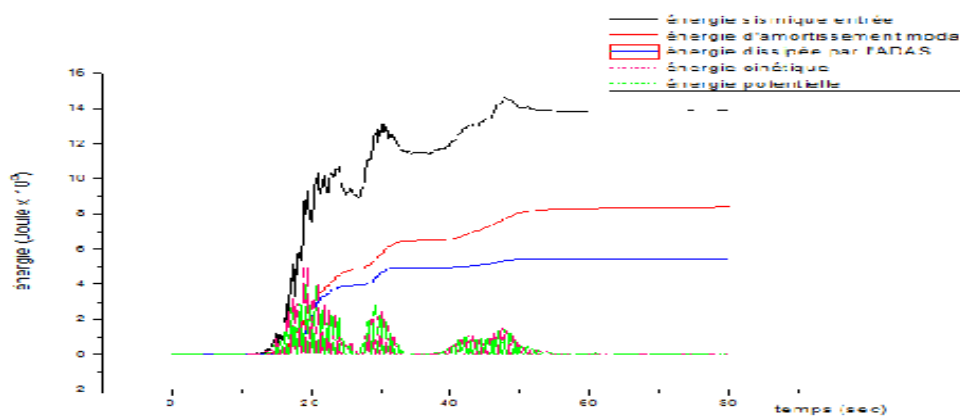
b)



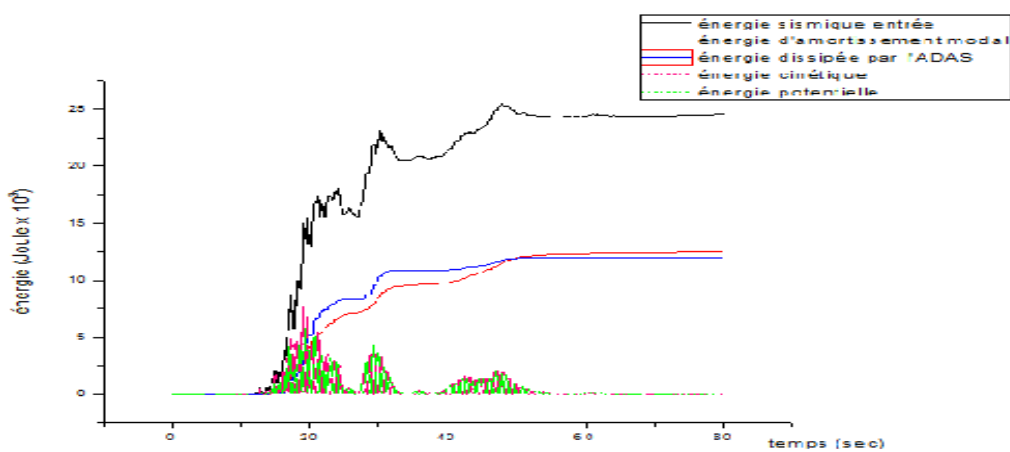
c)



d)



e)



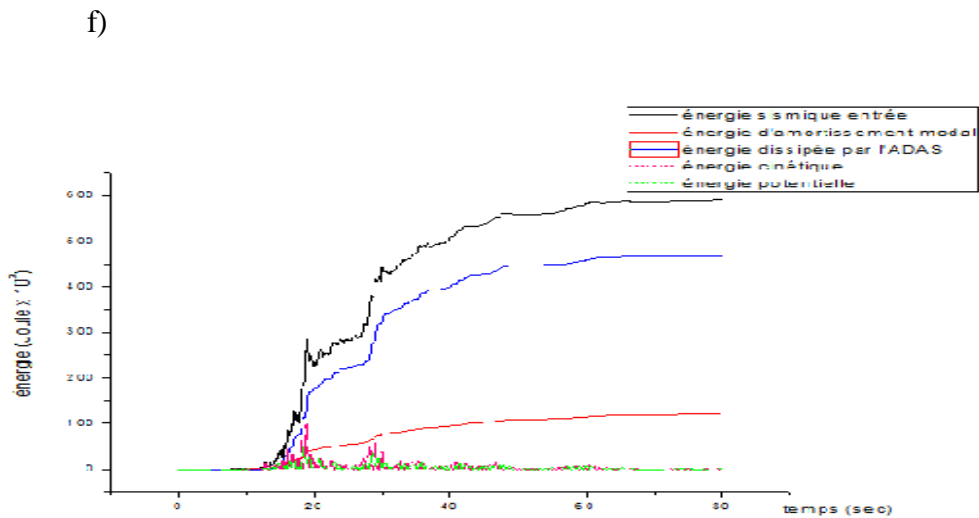


Figure 5.3 : Diagrammes des énergies absorbées par la structure sous l'excitation sismique de la composante de Yermo du séisme de Landers pour une rigidité des dissipateurs

$$K_{ADAS} = 75\% : a)0,025C_s \text{ } b)0,05C_s \text{ } c)0,100C_s \text{ } d)0,150C_s \text{ } e)0,200C_s \text{ } f)C_s$$

On remarque que l'énergie dissipée par l'ADAS est plus élevée que l'énergie d'amortissement modal et qu'elle la dépasse dans certains cas.

Sous l'excitation sismique d'El Centro, le taux de l'énergie dissipée par l'ADAS est plus élevé que celui sous l'excitation sismique de Landers.

Pour que ces résultats soient plus précis, on a transformé les courbes en valeurs ainsi qu'en pourcentages et on les a présentés en tableaux ;

Coefficient sismique	Energie Sismique entrée (Joule x 10 <sup>3</sup> )	Energie dissipée par				Total de l'énergie dissipée (%)	L'énergie restante (%)
		l'amortissement modal		l'ADAS			
		Joule x 10 <sup>3</sup>	(%)	Joule x 10 <sup>3</sup>	(%)		
0,025Cs	1,704	0,8641	50,71	0,1552	09,11	59,82	40,18
0,050Cs	7,095	2,668	37,60	1,892	26,67	64,27	35,73
0,100Cs	29,97	7,845	26,17	17,43	58,16	84,33	15,67
0,150Cs	79,07	18,33	23,18	59,15	74,80	97,98	02,02
0,200Cs	151,3	28,51	18,84	120,6	79,70	98,54	01,46
Cs	3441	660,1	19,18	2140	62,19	81,37	18,63

Tableau 5-3: Comparaison des résultats des énergies pour les différents coefficients sismiques sous l'excitation sismique de la composante d'El Centro du séisme d'Imperial Valley pour une rigidité des dissipateurs  $K_{ADAS} = 75\%$

En augmentant le coefficient sismique, pour ce cas de combinaison et sous l'excitation sismique d'El Centro, on remarque que l'énergie dissipée par l'ADAS devient de plus en plus élevée et que l'amortissement modal diminue par conséquent ; elle peut dépasser la moitié de l'énergie sismique entrée à partir d'un coefficient sismique 0,100Cs

Pour un coefficient sismique 0,200Cs, elle est de 79,70% et pour un coefficient sismique Cs, elle est de 62,19%.

Le total de l'énergie dissipée par les deux systèmes (modal et dissipatif) augmente en accord avec l'augmentation du coefficient sismique, elle dépasse les 80% de l'énergie sismique entrée à partir d'un coefficient sismique 0,100Cs. Elle est de 98,54% pour un coefficient sismique 0,200Cs, et elle est de 81,37% pour un coefficient sismique Cs.

L'énergie mécanique (l'énergie restante) qui représente l'ensemble des énergies "potentielle et cinématique" diminue avec l'augmentation du coefficient sismique; elle atteint 01,46% de l'énergie sismique entrée pour un coefficient sismique 0,200Cs et 18,63% pour un coefficient sismique Cs.

Coefficient sismique	Energie Sismique entrée (Joule x 10 <sup>3</sup> )	Energie dissipée par				Total de l'énergie dissipée (%)	L'énergie restante (%)
		l'amortissement modal		l'ADAS			
		Joule x 10 <sup>3</sup>	(%)	Joulex10 <sup>3</sup>	(%)		
0,025Cs	0,4020	0,3643	90,62	0,01003	02,49	93,11	06,89
0,050Cs	01,623	01,371	84,47	0,1426	08,78	93,25	06,75
0,100Cs	06,545	04,557	69,62	01,598	24,41	94,03	05,97
0,150Cs	14,58	08,396	57,58	05,462	37,46	95,04	04,96
0,200Cs	25,46	12,49	49,06	11,97	47,01	96,07	03,93
Cs	592,4	121,6	20,52	468	79,00	99,52	00,48

Tableau 5-4: Comparaison des résultats des énergies pour les différents coefficients sismiques sous l'excitation sismique de la composante de Yermo du séisme de Landers pour une rigidité des dissipateurs  $K_{ADAS} = 75\%$

Pour ce cas de combinaison et sous l'excitation sismique de Landers, on remarque que l'énergie d'amortissement modal est plus élevée que celle dissipée par l'ADAS pour les différents coefficients sismiques et elles deviennent presque égales pour le coefficient sismique 0,200Cs (49,06% pour la première et 47,01% pour la deuxième). Pour le coefficient sismique Cs, l'énergie dissipée par l'ADAS atteint 79% de l'énergie sismique entrée.

Le total de l'énergie dissipée par les deux systèmes (modal et dissipatif) augmente en accord avec l'augmentation du coefficient sismique, elle dépasse les 93% de l'énergie sismique

entrée pour les différents coefficients sismiques. Elle est de 99,52% pour un coefficient sismique  $C_s$ .

### V.6.2. Comportement hystérétique des dispositifs ADAS

Une partie de l'énergie induite lors d'un séisme est absorbée par les déformations plastiques correspondant au comportement hystérésis (efforts – déformations) du système de dissipation d'énergie ADAS qui se caractérise par la surface de la boucle d'hystérésis ainsi que par les valeurs maximales des efforts tranchants et des déformations.

Pour illustrer cet effet et pour montrer où la dissipation d'énergie sera maximale, on a divisé la structure en cinq paliers de quatre niveaux chacun et dans chaque palier, on va étudier le premier niveau seulement.

On va tracer les diagrammes efforts-déformations des trois dissipateurs ADAS, sous les deux excitations sismiques pour les différents coefficients sismiques.

Les résultats sont présentés dans les courbes suivantes :

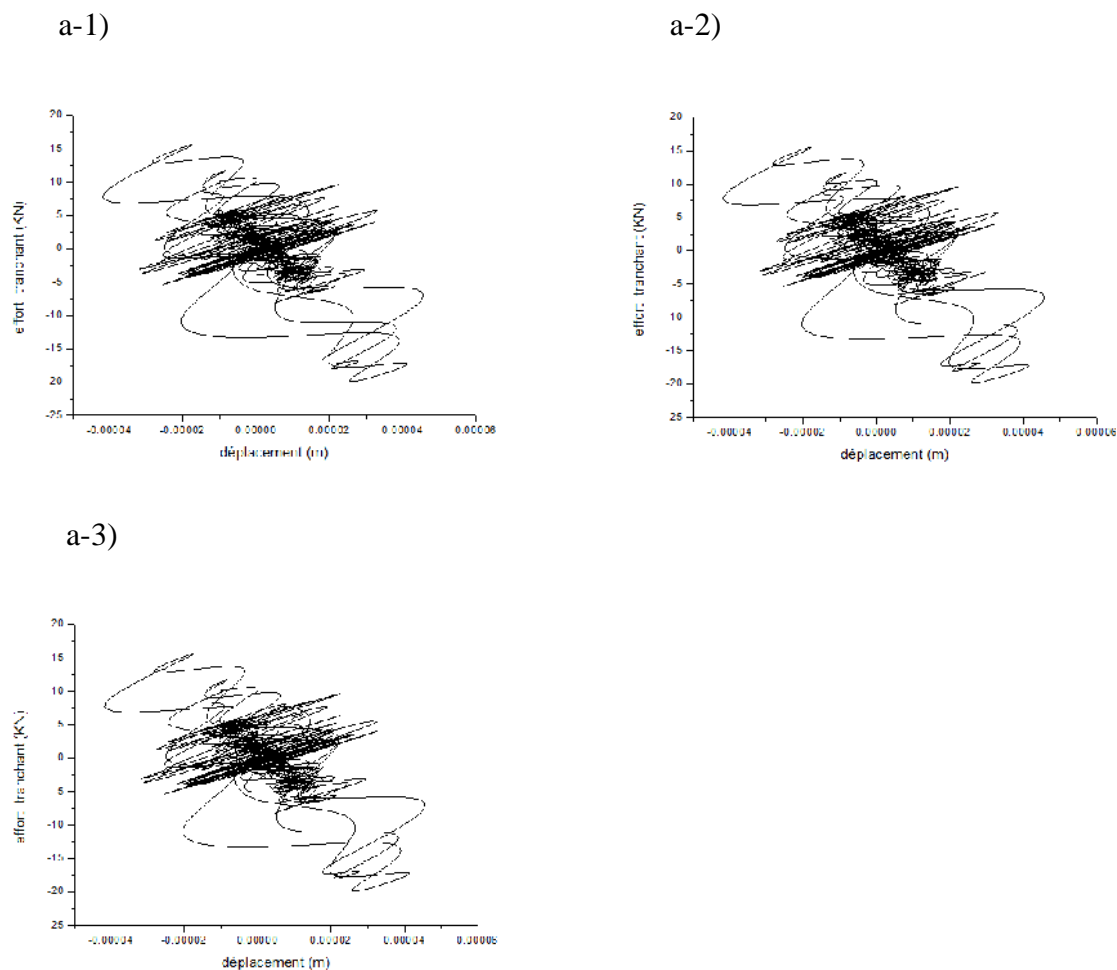




Figure 5.4 : Comparaison entre les trois diagrammes efforts-déformations des trois dissipateurs ADAS installés dans la première, la deuxième et la troisième travée du premier niveau respectivement, sous l'excitation sismique de la composante d'El Centro du séisme d'Imperial Valley pour une rigidité  $K_{ADAS} = 75\%$  et pour le coefficient sismique  $0,025C_s$

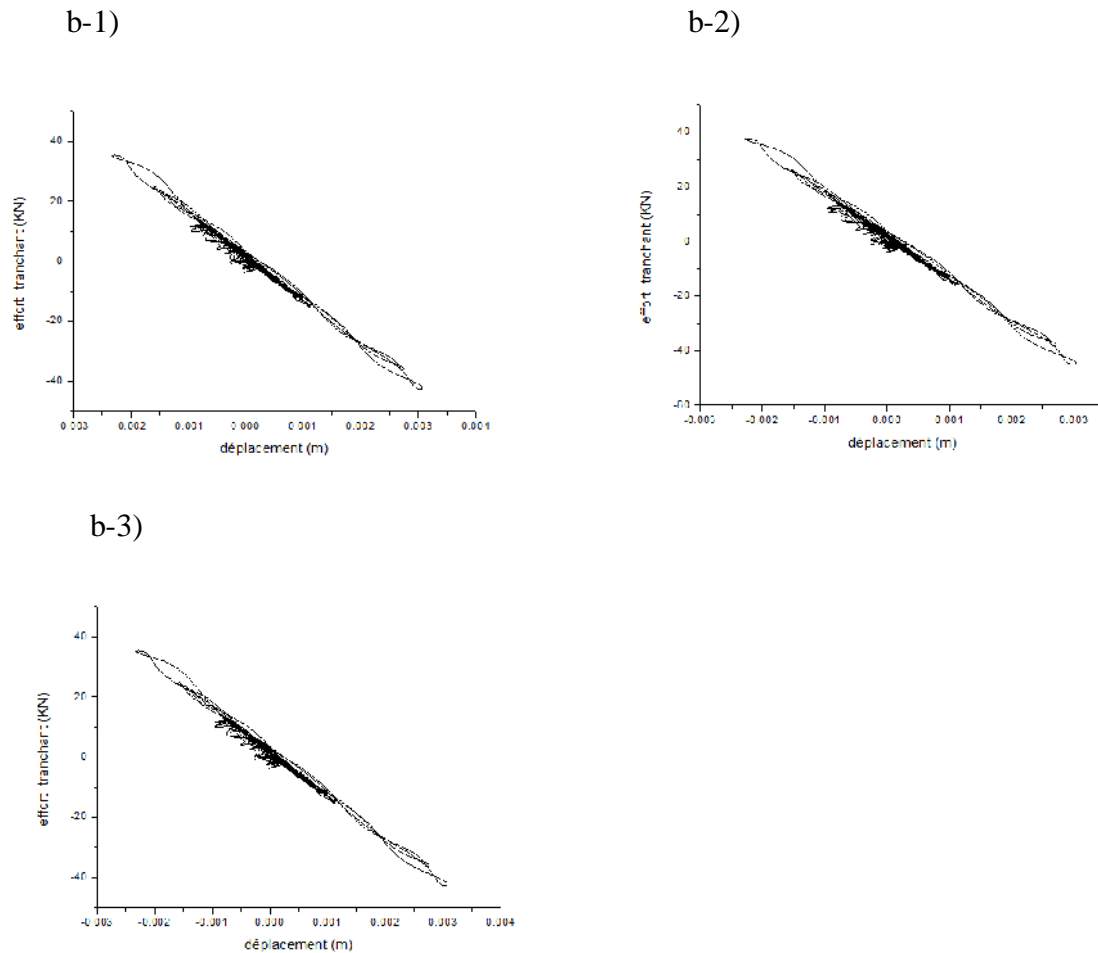


Figure 5.5 : Comparaison entre les trois diagrammes efforts-déformations des trois dissipateurs ADAS installés dans la première, la deuxième et la troisième travée du cinquième niveau respectivement, sous l'excitation sismique de la composante d'El Centro du séisme d'Imperial Valley pour une rigidité  $K_{ADAS} = 75\%$  et pour le coefficient sismique  $0,025C_s$

On remarque que les trois diagrammes efforts-déformations correspondant aux trois dissipateurs ADAS installés dans la première, la deuxième et la troisième travée des deux niveaux illustrés dans les deux figures précédentes ont presque la même allure, donc on peut se suffire pour les autres niveaux d'étudier seulement le comportement du dissipateur de la travée centrale.

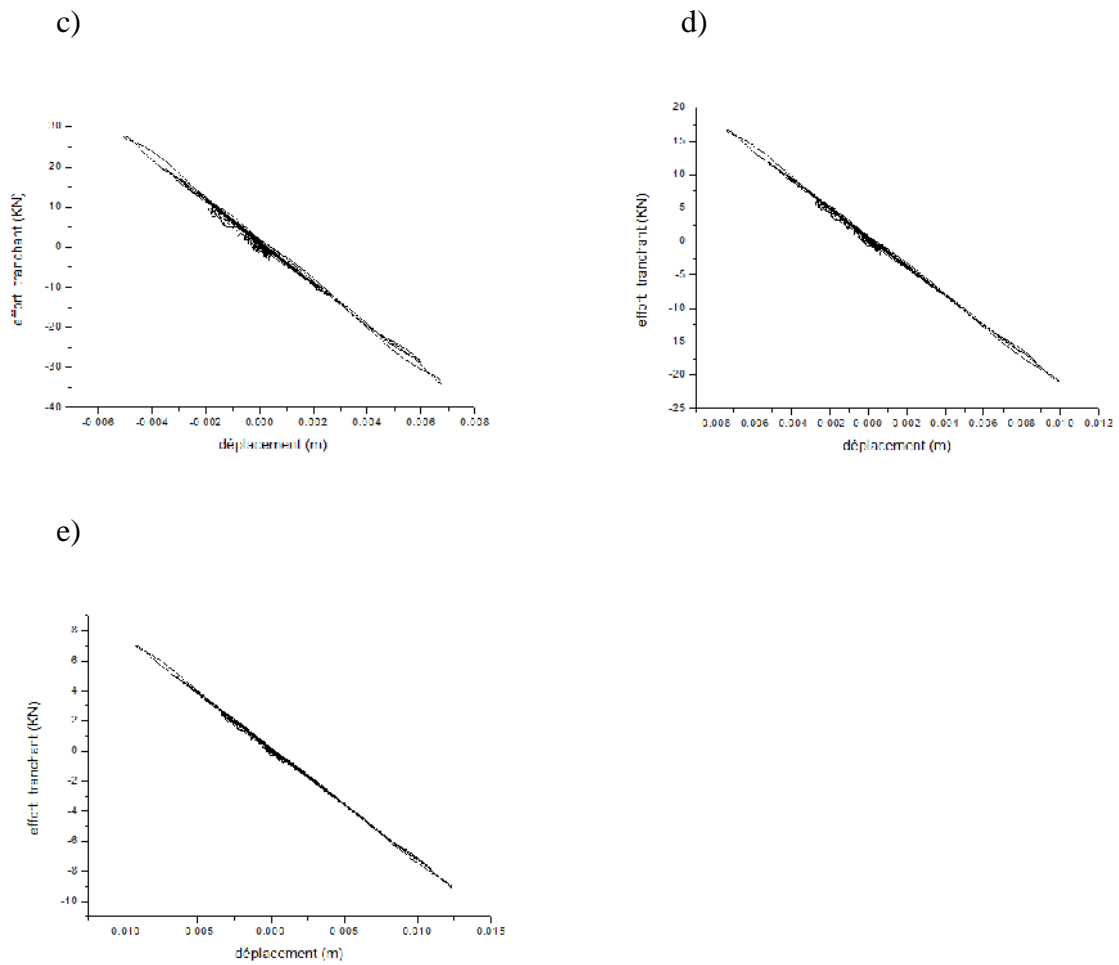
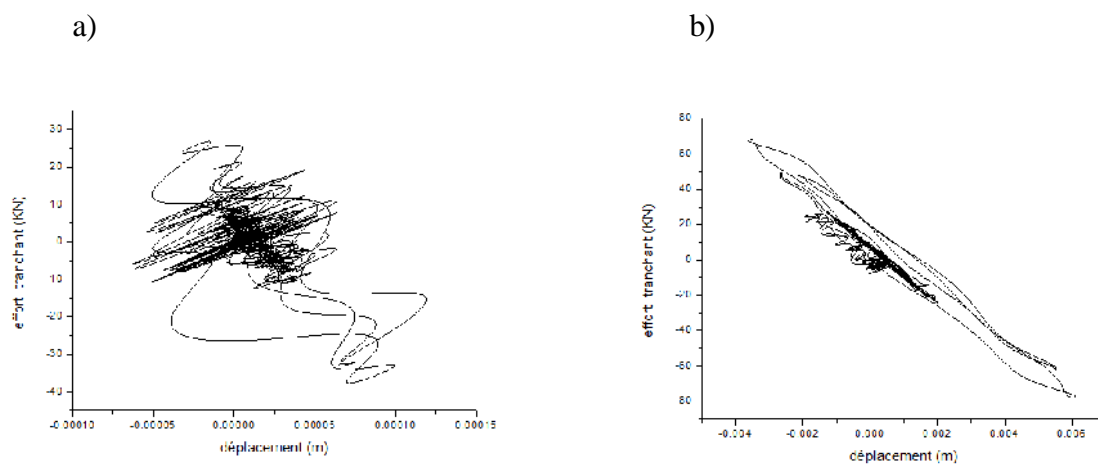


Figure 5.6 : Comparaison entre les cinq paliers de niveau : a) 1<sup>er</sup> plier, b) 2<sup>ème</sup> plier, c) 3<sup>ème</sup> plier, d) 4<sup>ème</sup> plier et e) 5<sup>ème</sup> plier des diagrammes efforts-déformations des dissipateurs ADAS, sous l'excitation sismique de la composante d'El Centro du séisme d'Imperial Valley pour une rigidité  $K_{ADAS} = 75\%$  et pour le coefficient sismique 0,025Cs



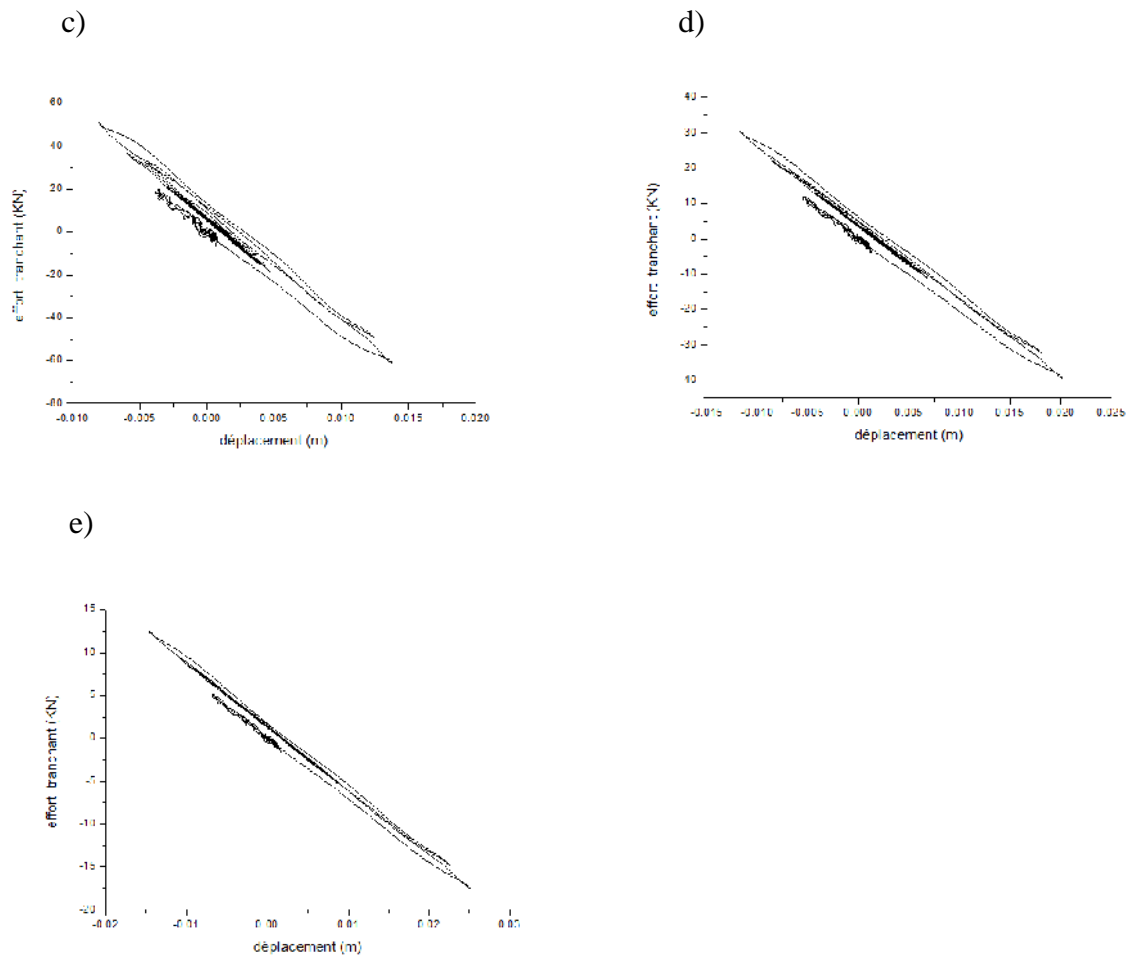
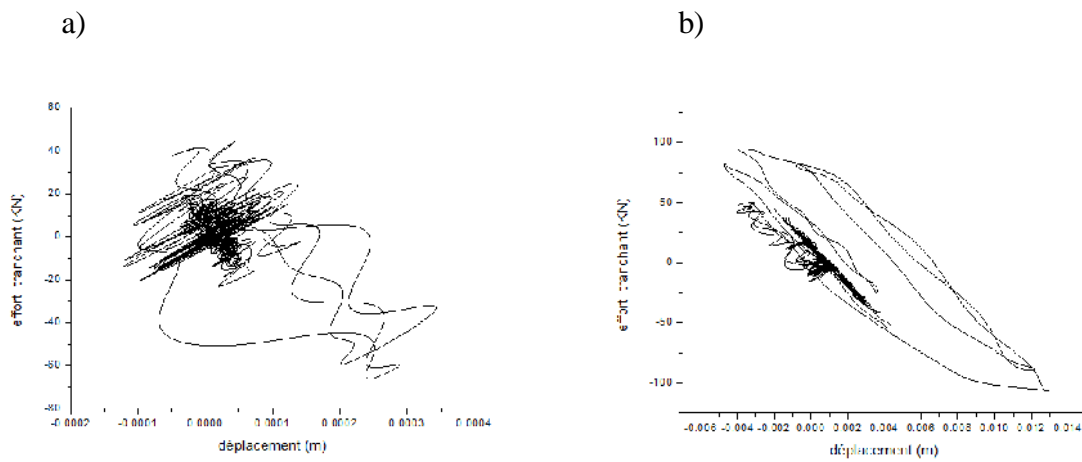


Figure 5.7 : Comparaison entre les cinq paliers de niveau : a) 1<sup>er</sup> palier, b) 2<sup>ème</sup> plier, c) 3<sup>ème</sup> plier, d) 4<sup>ème</sup> plier et e) 5<sup>ème</sup> plier des diagrammes efforts-déformations des dissipateurs ADAS, sous l'excitation sismique de la composante d'El Centro du séisme d'Imperial Valley pour une rigidité  $K_{ADAS} = 75\%$  et pour le coefficient sismique 0,050Cs



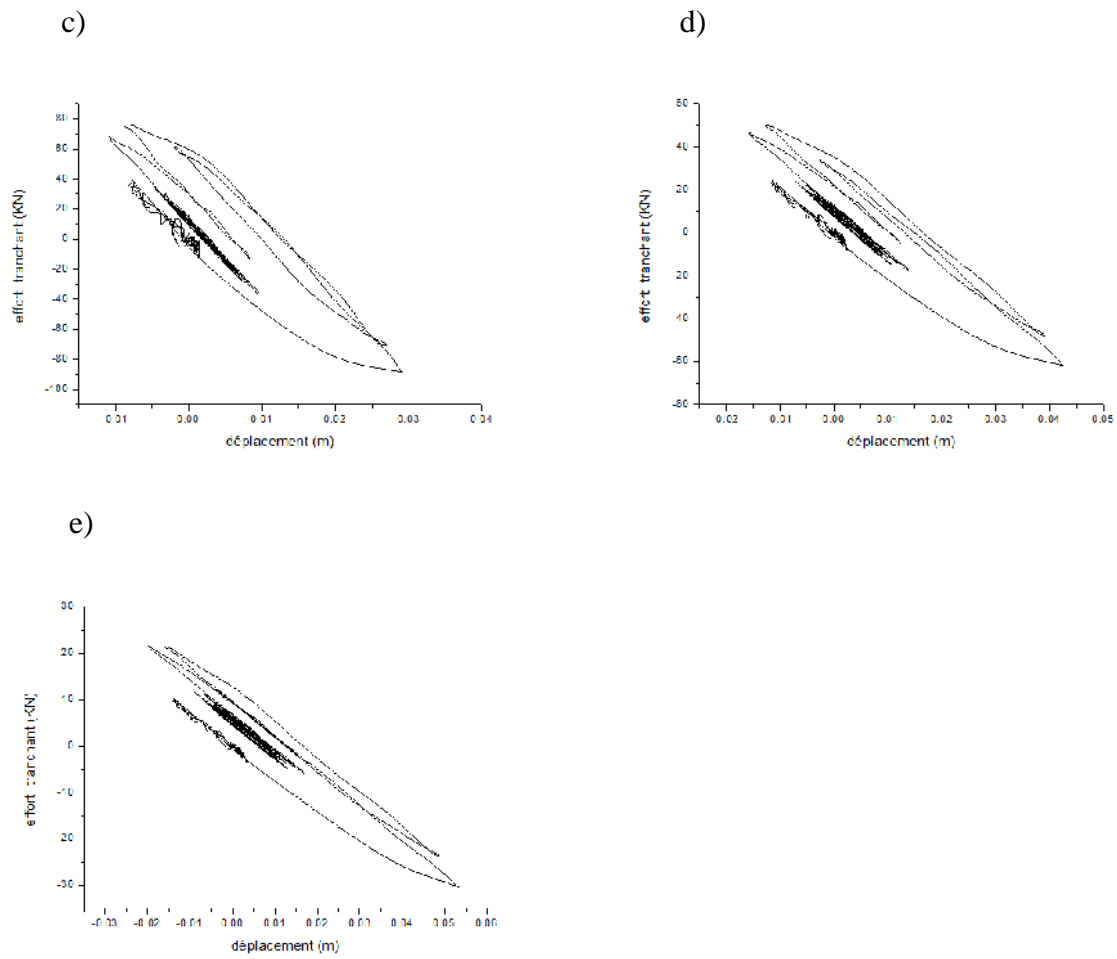
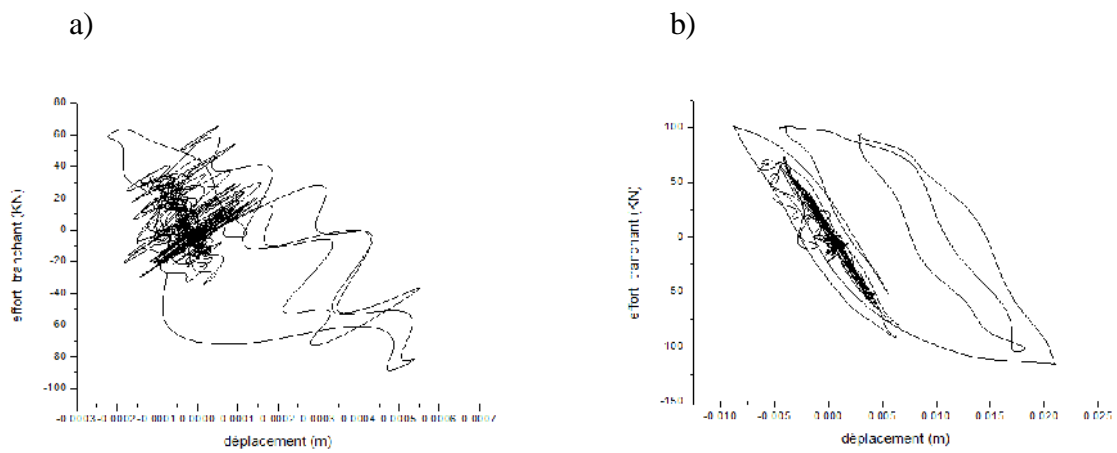


Figure 5.8 : Comparaison entre les cinq paliers de niveau : a) 1<sup>er</sup> plier, b) 2<sup>ème</sup> plier, c) 3<sup>ème</sup> plier, d) 4<sup>ème</sup> plier et e) 5<sup>ème</sup> plier des diagrammes efforts-déformations des dissipateurs ADAS, sous l'excitation sismique de la composante d'El Centro du séisme d'Imperial Valley pour une rigidité  $K_{ADAS} = 75\%$  et pour le coefficient sismique 0,100Cs



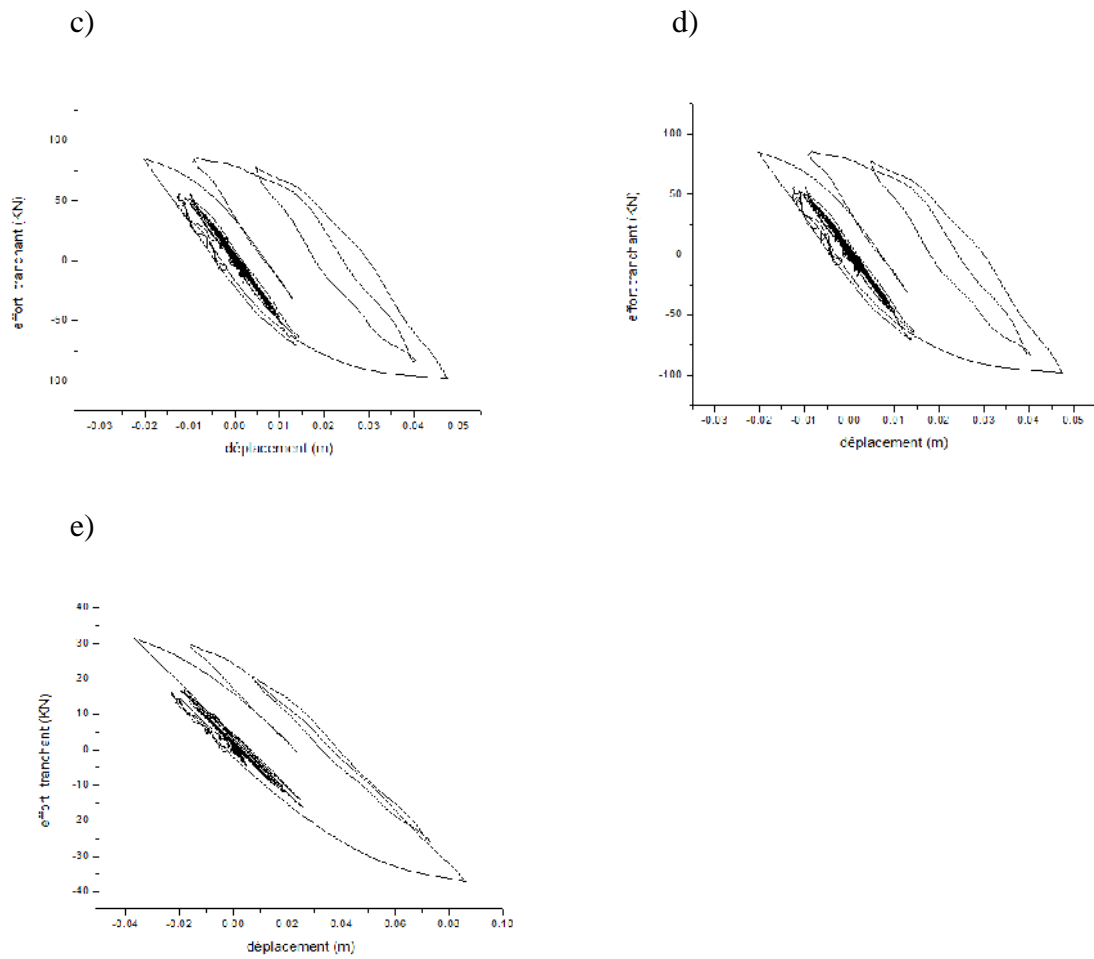
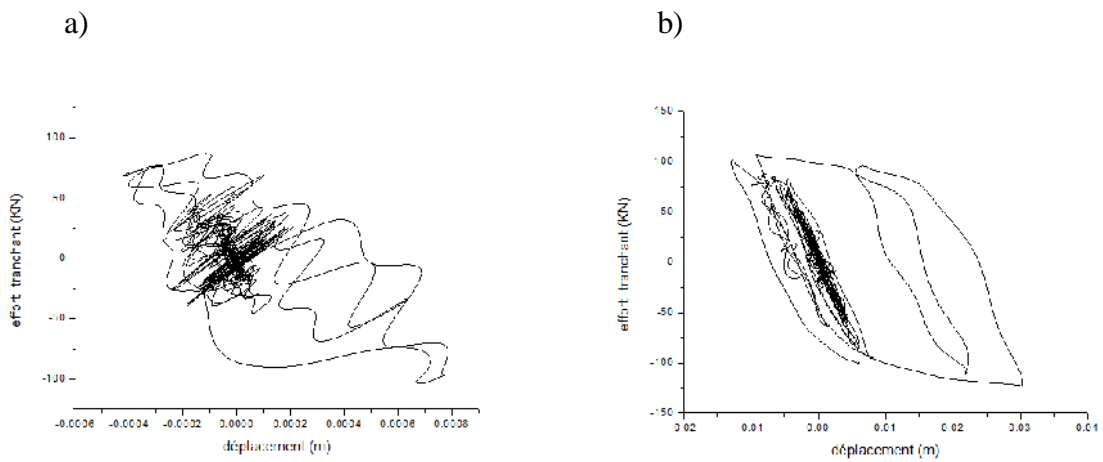


Figure 5.9 : Comparaison entre les cinq paliers de niveau : a) 1<sup>er</sup> palier, b) 2<sup>ème</sup> palier, c) 3<sup>ème</sup> palier, d) 4<sup>ème</sup> palier et e) 5<sup>ème</sup> palier des diagrammes efforts-déformations des dissipateurs ADAS, sous l'excitation sismique de la composante d'El Centro du séisme d'Imperial Valley pour une rigidité  $K_{ADAS} = 75\%$  et pour le coefficient sismique 0,150Cs



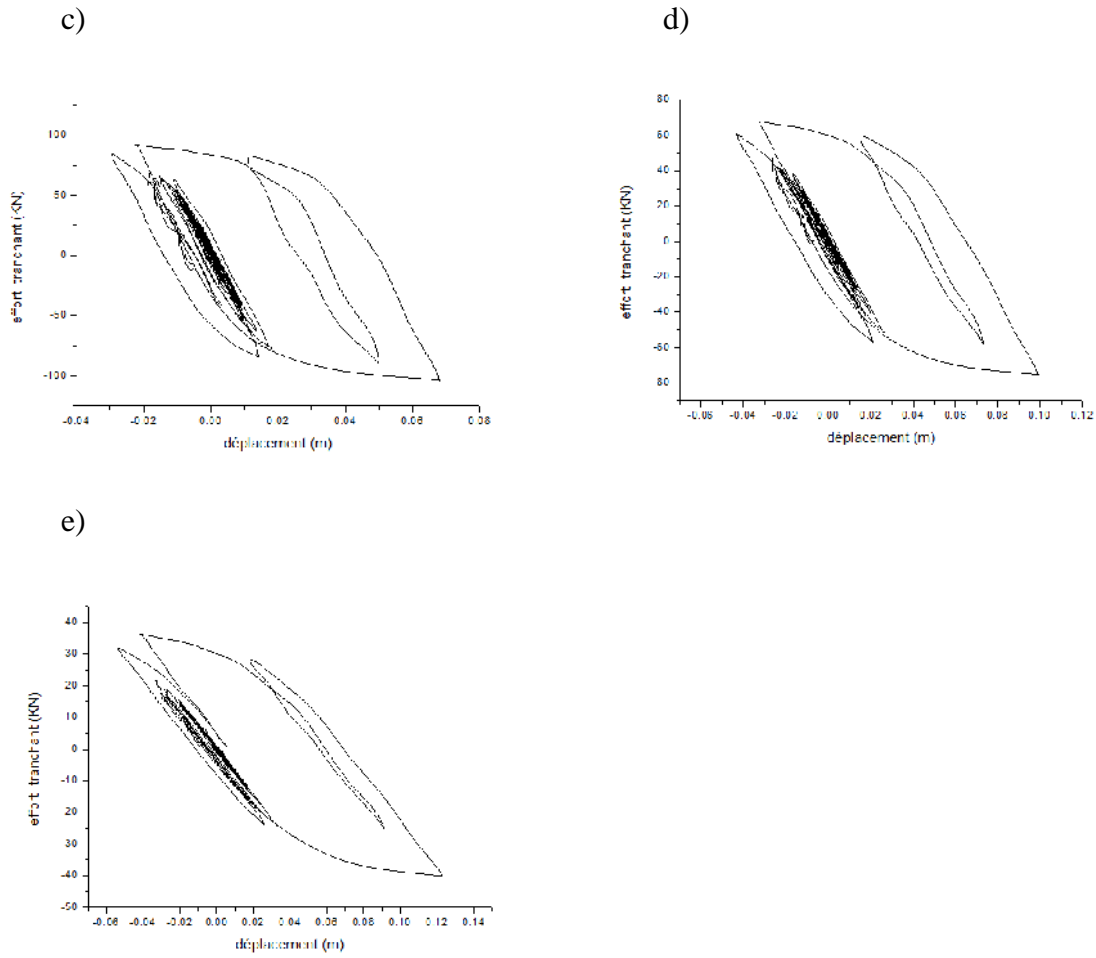
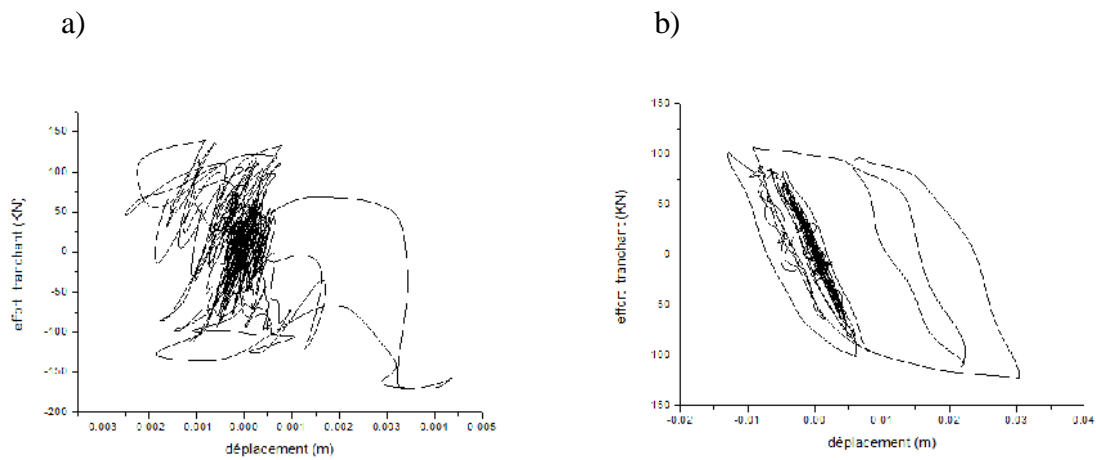


Figure 5.10 : Comparaison entre les cinq paliers de niveau : a) 1<sup>er</sup> palier, b) 2<sup>ème</sup> palier, c) 3<sup>ème</sup> palier, d) 4<sup>ème</sup> palier et e) 5<sup>ème</sup> palier des diagrammes efforts-déformations des dissipateurs ADAS, sous l'excitation sismique de la composante d'El Centro du séisme d'Imperial Valley pour une rigidité  $K_{ADAS} = 75\%$  et pour le coefficient sismique 0,200Cs



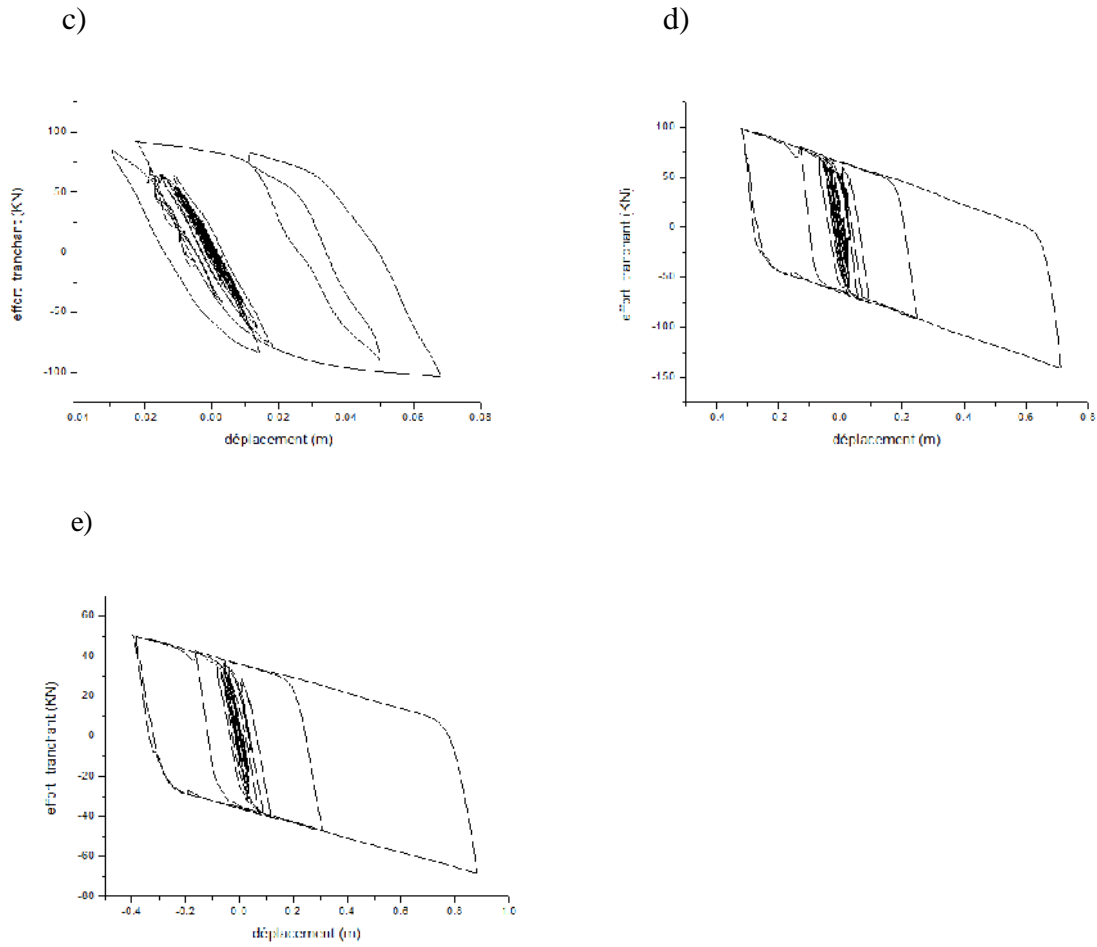
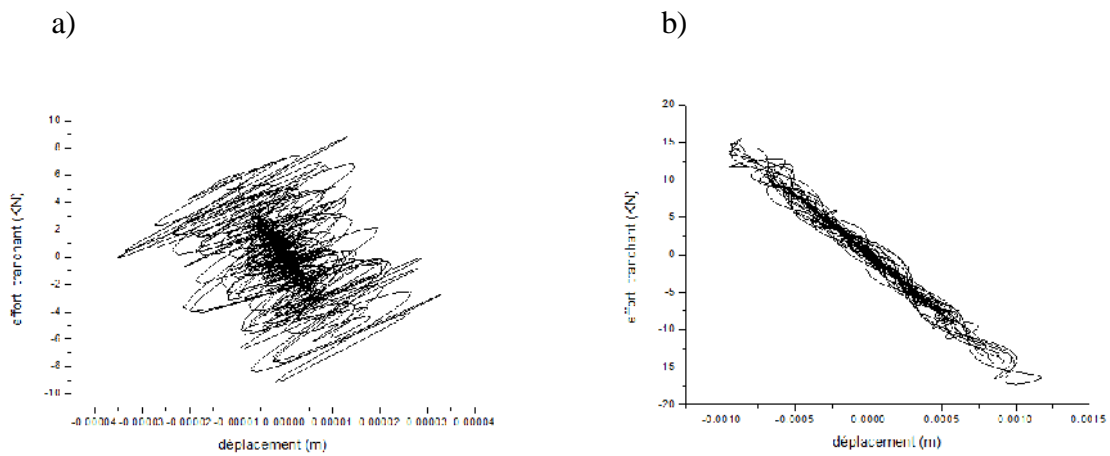


Figure 5.11 : Comparaison entre les cinq paliers de niveau : a) 1<sup>er</sup> palier, b) 2<sup>ème</sup> palier, c) 3<sup>ème</sup> palier, d) 4<sup>ème</sup> palier et e) 5<sup>ème</sup> palier des diagrammes efforts-déformations des dissipateurs ADAS, sous l'excitation sismique de la composante d'El Centro du séisme d'Imperial Valley pour une rigidité  $K_{ADAS} = 75\%$  et pour le coefficient sismique  $C_s$



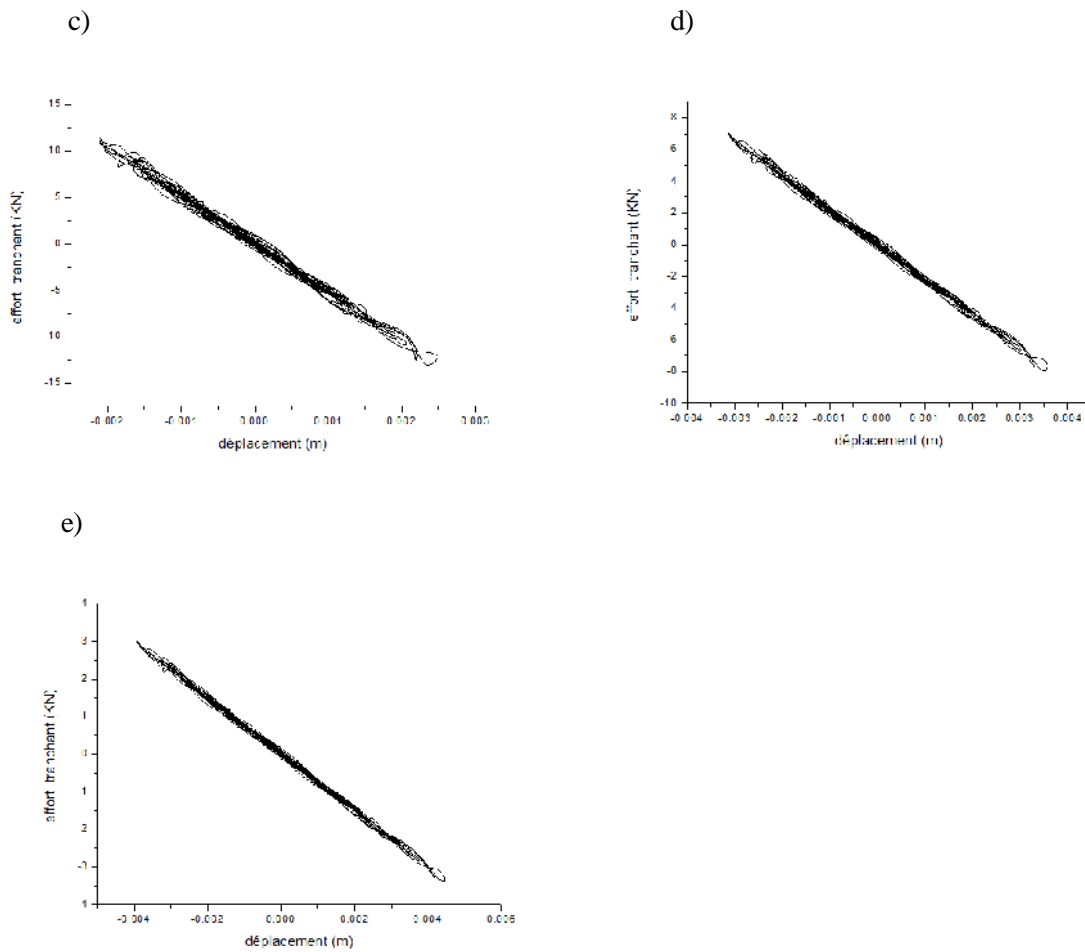
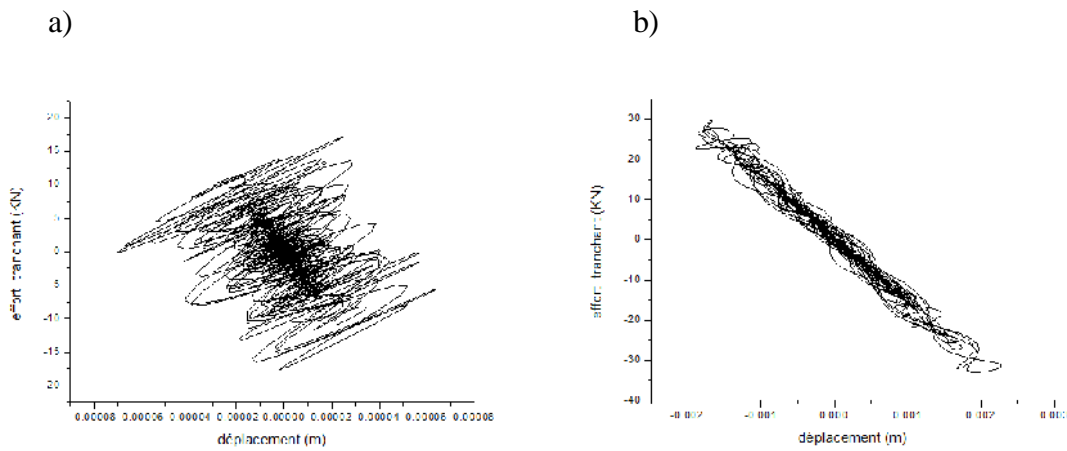


Figure 5.12 : Comparaison entre les cinq paliers de niveau : a) 1<sup>er</sup> palier, b) 2<sup>ème</sup> palier, c) 3<sup>ème</sup> palier, d) 4<sup>ème</sup> palier et e) 5<sup>ème</sup> palier des diagrammes efforts-déformations des dissipateurs ADAS, sous l'excitation sismique de la composante de Yermo du séisme de Landers pour une rigidité  $K_{ADAS} = 75\%$  et pour le coefficient sismique  $0,025C_s$





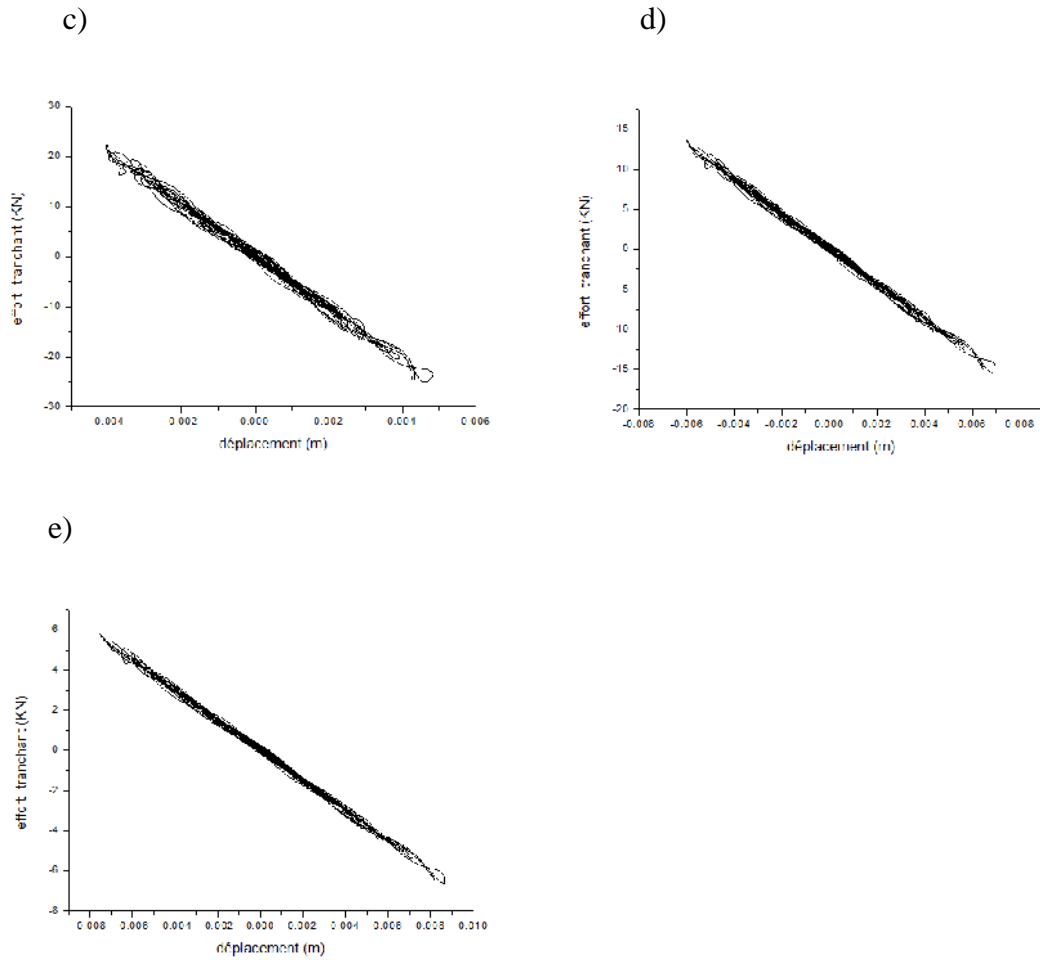
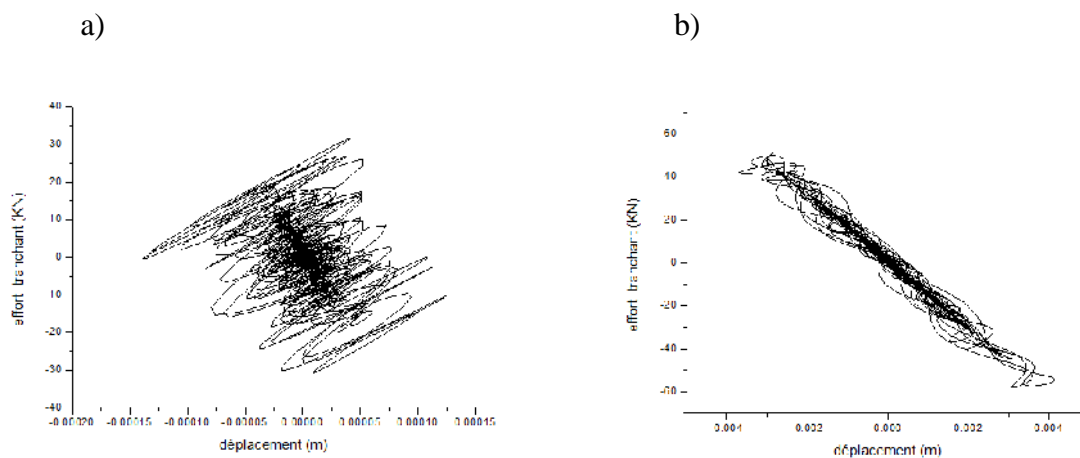


Figure 5.13 : Comparaison entre les cinq paliers de niveau : a) 1<sup>er</sup> palier, b) 2<sup>ème</sup> plier, c) 3<sup>ème</sup> plier, d) 4<sup>ème</sup> plier et e) 5<sup>ème</sup> plier des diagrammes efforts-déformations des dissipateurs ADAS, sous l'excitation sismique de la composante de Yermo du séisme de Landers pour une rigidité  $K_{ADAS} = 75\%$  et pour le coefficient sismique 0,050Cs



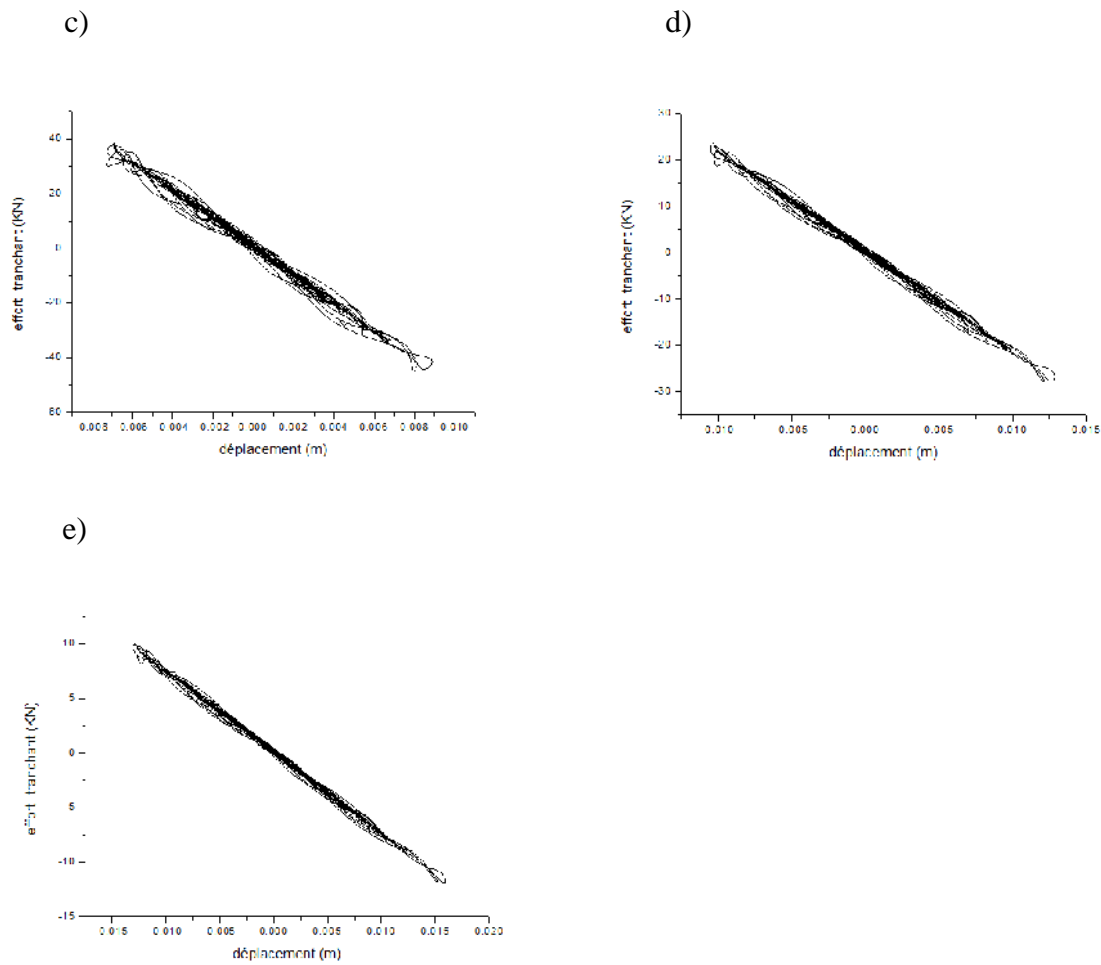
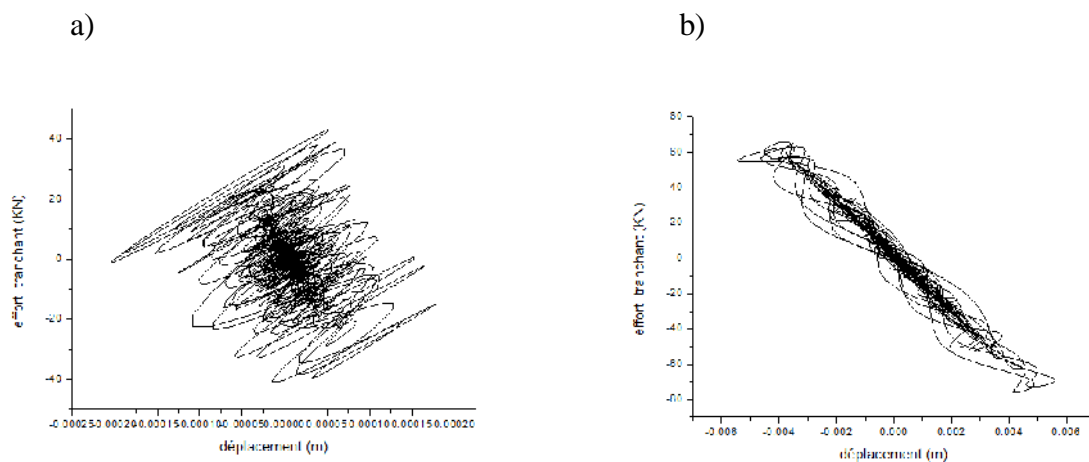


Figure 5.14 : Comparaison entre les cinq paliers de niveau : a) 1<sup>er</sup> plier, b) 2<sup>ème</sup> plier, c) 3<sup>ème</sup> plier, d) 4<sup>ème</sup> plier et e) 5<sup>ème</sup> plier des diagrammes efforts-déformations des dissipateurs ADAS, sous l'excitation sismique de la composante de Yermo du séisme de Landers pour une rigidité  $K_{ADAS} = 75\%$  et pour le coefficient sismique 0,100Cs



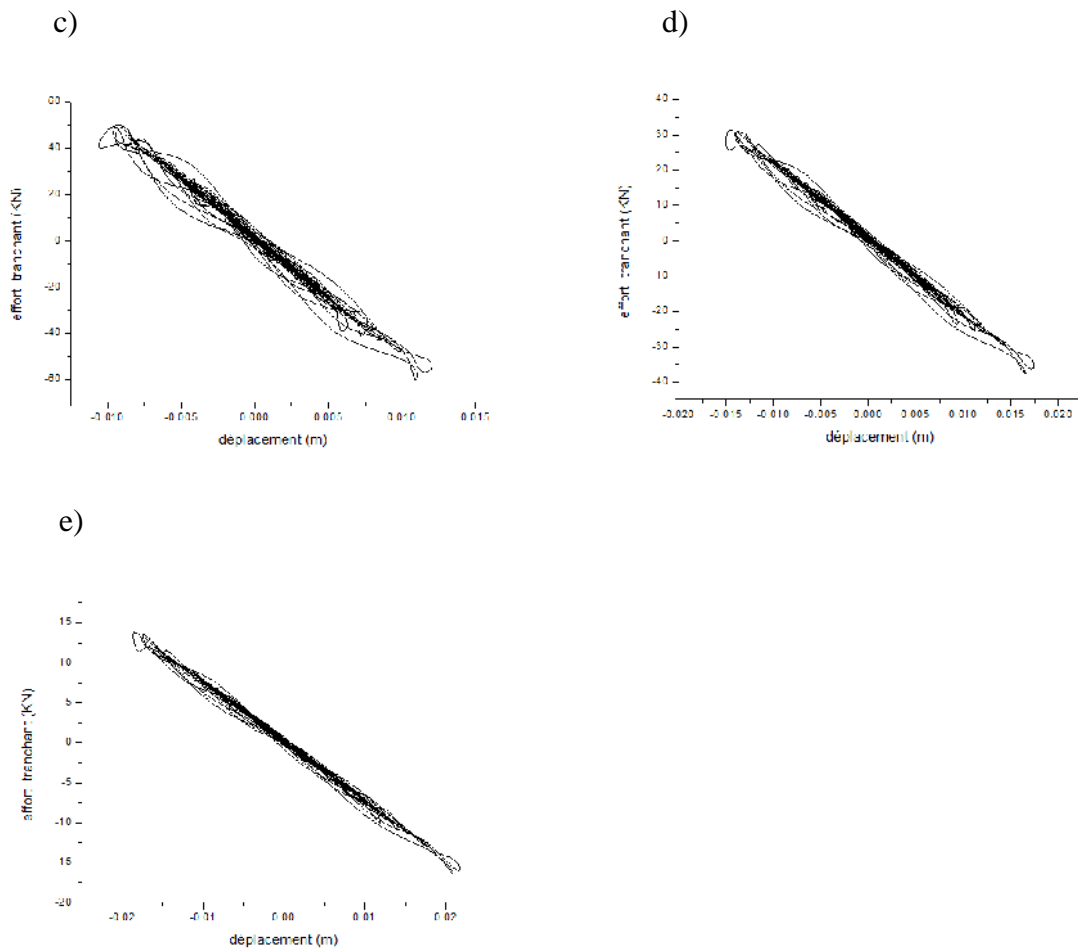
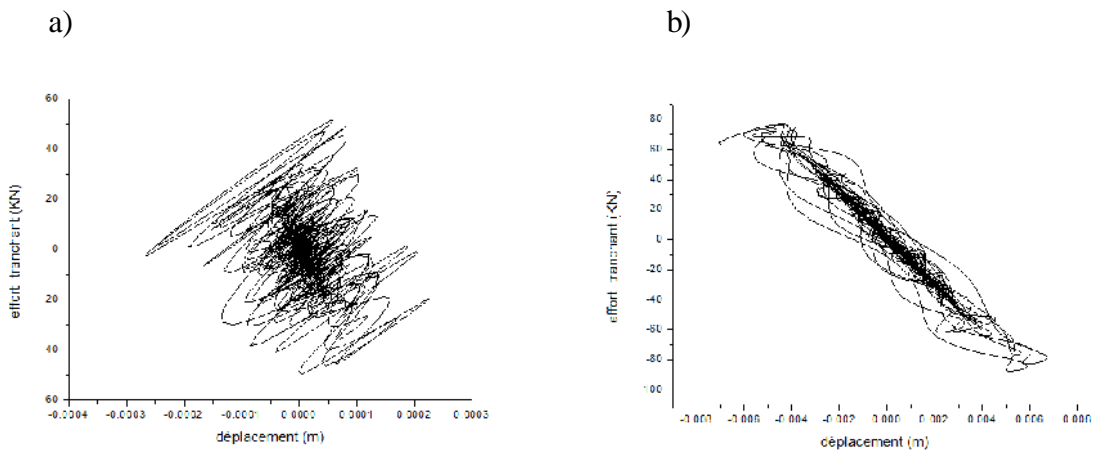


Figure 5.15 : Comparaison entre les cinq paliers de niveau : a) 1<sup>er</sup> palier, b) 2<sup>ème</sup> palier, c) 3<sup>ème</sup> palier, d) 4<sup>ème</sup> palier et e) 5<sup>ème</sup> palier des diagrammes efforts-déformations des dissipateurs ADAS, sous l'excitation sismique de la composante de Yermo du séisme de Landers pour une rigidité  $K_{ADAS} = 75\%$  et pour le coefficient sismique 0,150Cs



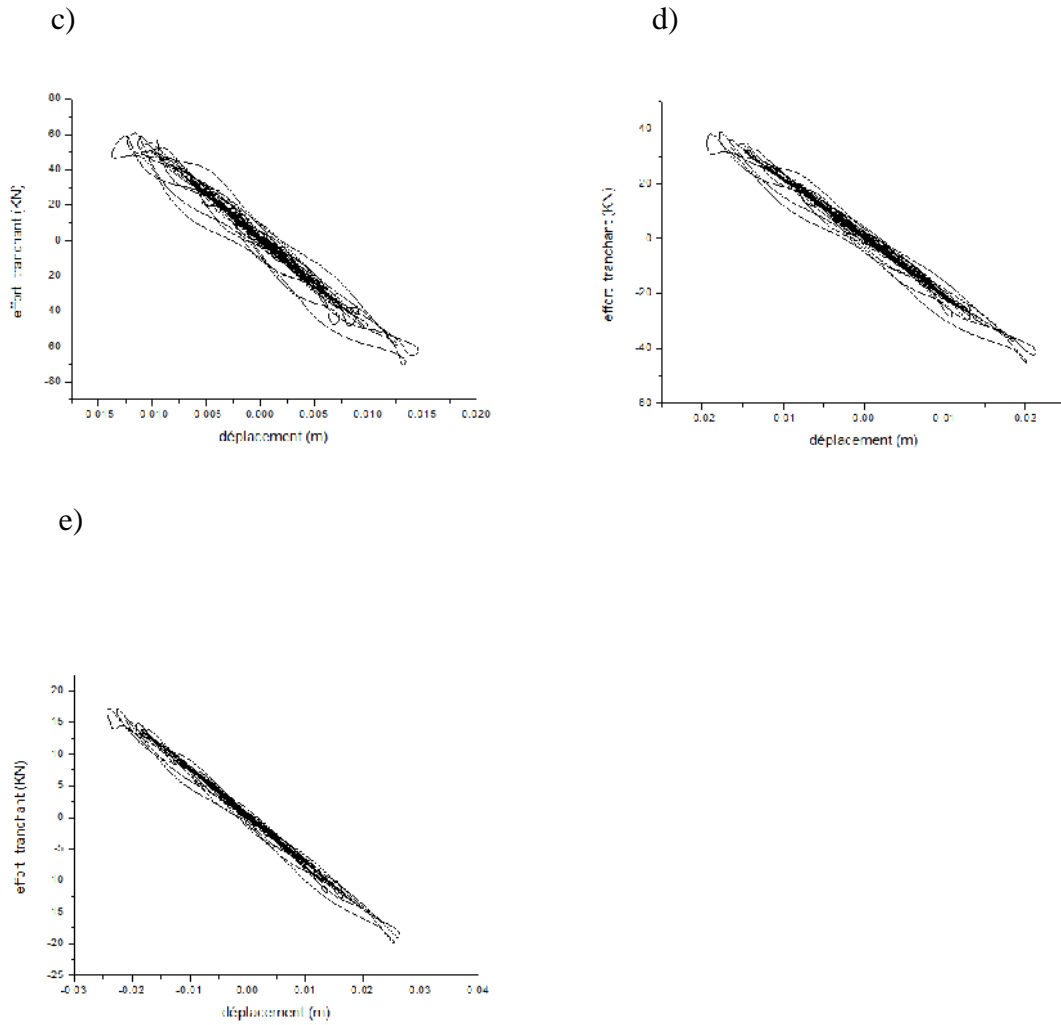
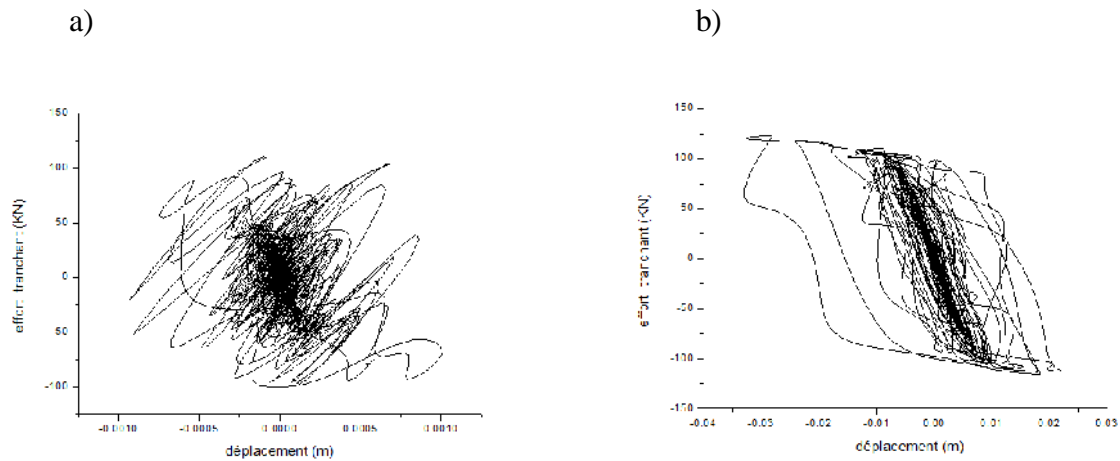


Figure 5.16 : Comparaison entre les cinq paliers de niveau : a) 1<sup>er</sup> palier, b) 2<sup>ème</sup> plier, c) 3<sup>ème</sup> plier, d) 4<sup>ème</sup> plier et e) 5<sup>ème</sup> plier des diagrammes efforts-déformations des dissipateurs ADAS, sous l'excitation sismique de la composante de Yermo du séisme de Landers pour une rigidité  $K_{ADAS} = 75\%$  et pour le coefficient sismique 0,200Cs



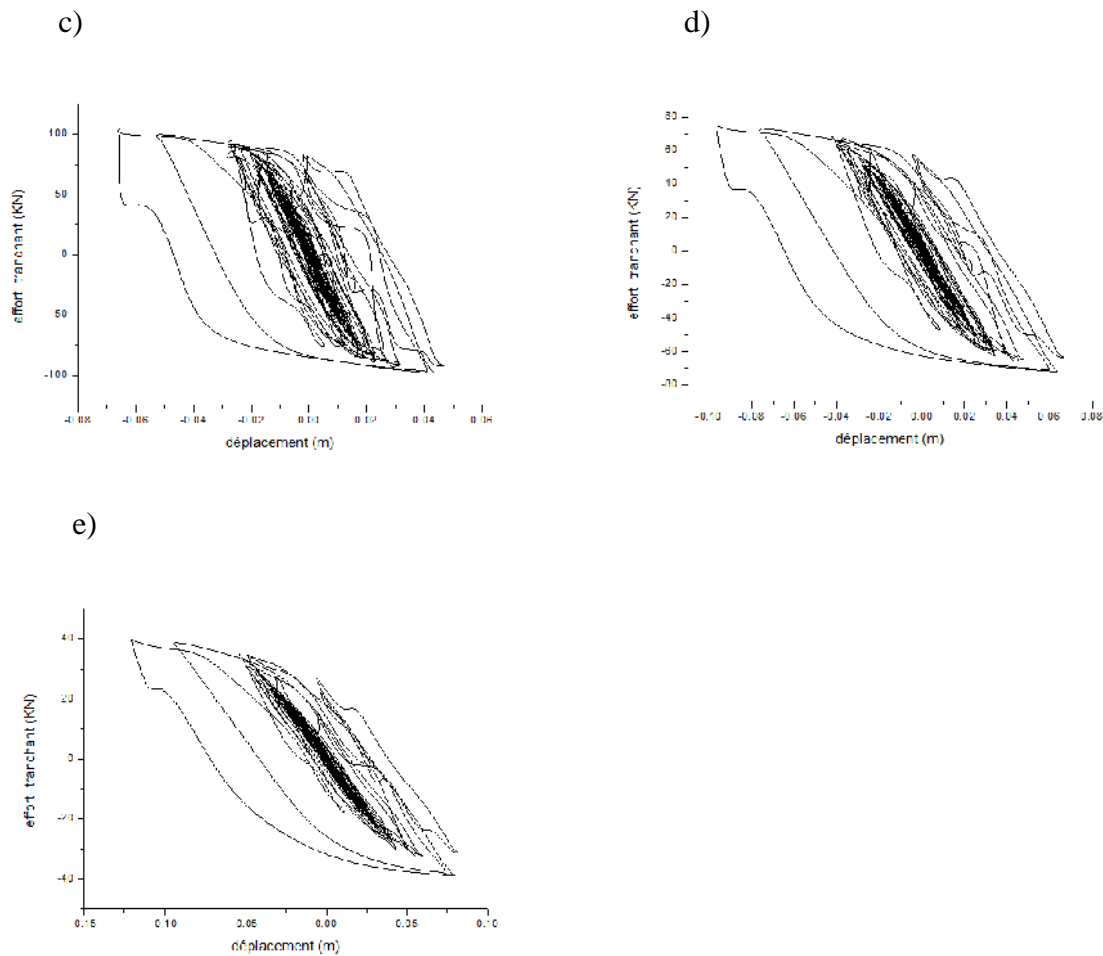


Figure 5.17 : Comparaison entre les cinq paliers de niveau : a) 1<sup>er</sup> palier, b) 2<sup>ème</sup> palier, c) 3<sup>ème</sup> palier, d) 4<sup>ème</sup> palier et e) 5<sup>ème</sup> palier des diagrammes efforts-déformations des dissipateurs ADAS, sous l'excitation sismique de la composante de Yermo du séisme de Landers pour une rigidité  $K_{ADAS} = 75\%$  et pour le coefficient sismique  $C_s$

De ces figures, on remarque que les surfaces des boucles d'hystérésis correspondant à la première excitation sismique (El Centro) sont plus grandes que celles correspondant à la deuxième excitation sismique (Landers) en plus de l'augmentation de cette surface en accord avec l'augmentation du coefficient sismique.

Les surfaces du dernier palier sont plus grandes que celles des paliers qui le précèdent.

### V.6.3. Effort tranchant à la base

La valeur de l'effort tranchant à la base permet de se renseigner sur l'état de sollicitation de la structure sous l'effet de l'excitation sismique.

Des comparaisons entre le cas linéaire et les autres cas sont faites comme suit :

1. Linéaire /  $0.200C_s$
2. Linéaire /  $0.150C_s$
3. Linéaire /  $0.100C_s$
4. Linéaire /  $0.050C_s$
5. Linéaire /  $0.025C_s$

Les résultats sont illustrés dans ces courbes ;

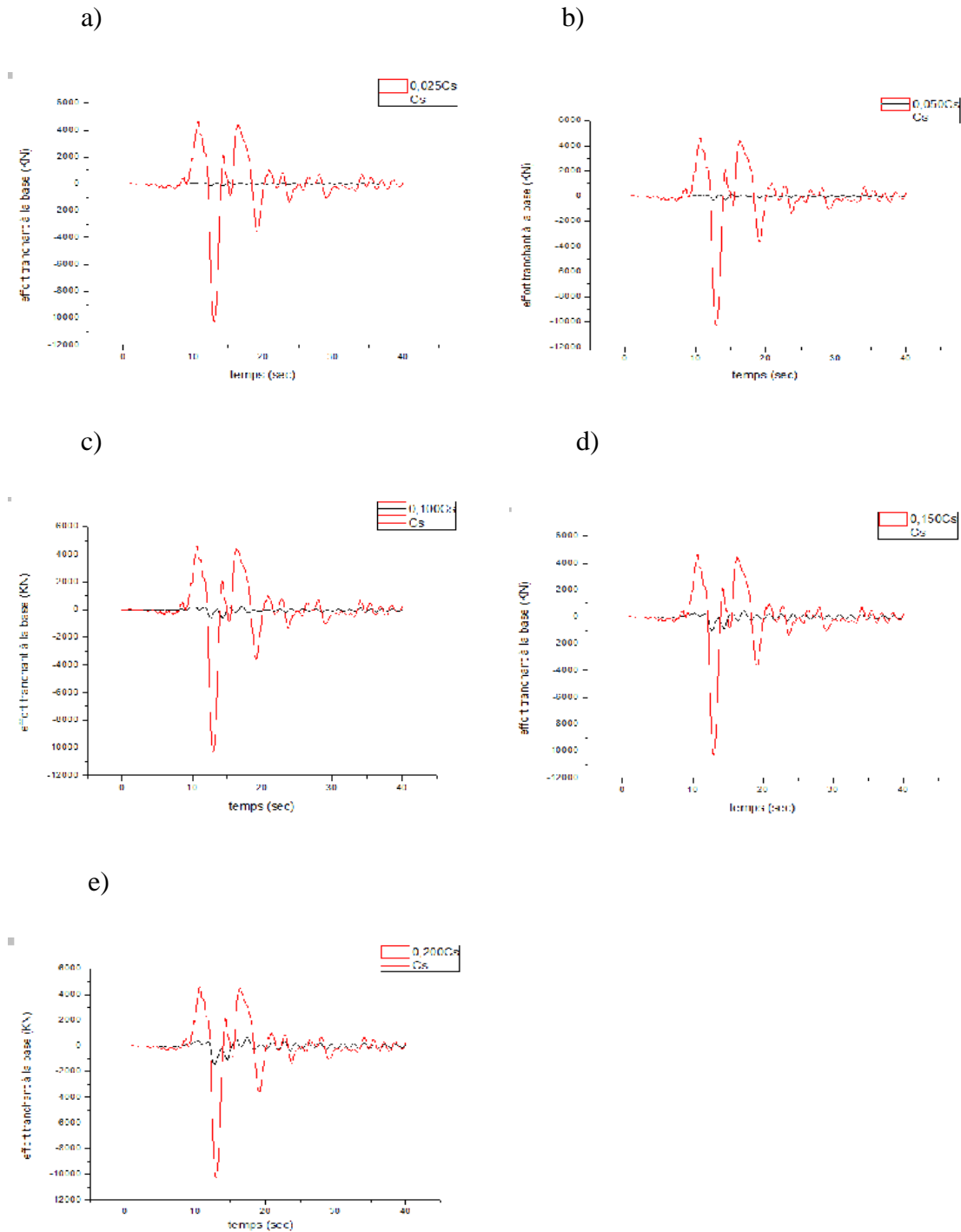


Figure 5.18 : variation des efforts tranchants dans la direction X sous l'excitation sismique de la composante d'El Centro du séisme d'Imperial Valley pour une rigidité  $K_{ADAS} = 75\%$  : a) Linéaire /  $0.025C_s$ , b) Linéaire /  $0.050C_s$ , c) Linéaire /  $0.100C_s$ , d) Linéaire /  $0.150C_s$ , e) Linéaire /  $0.200C_s$

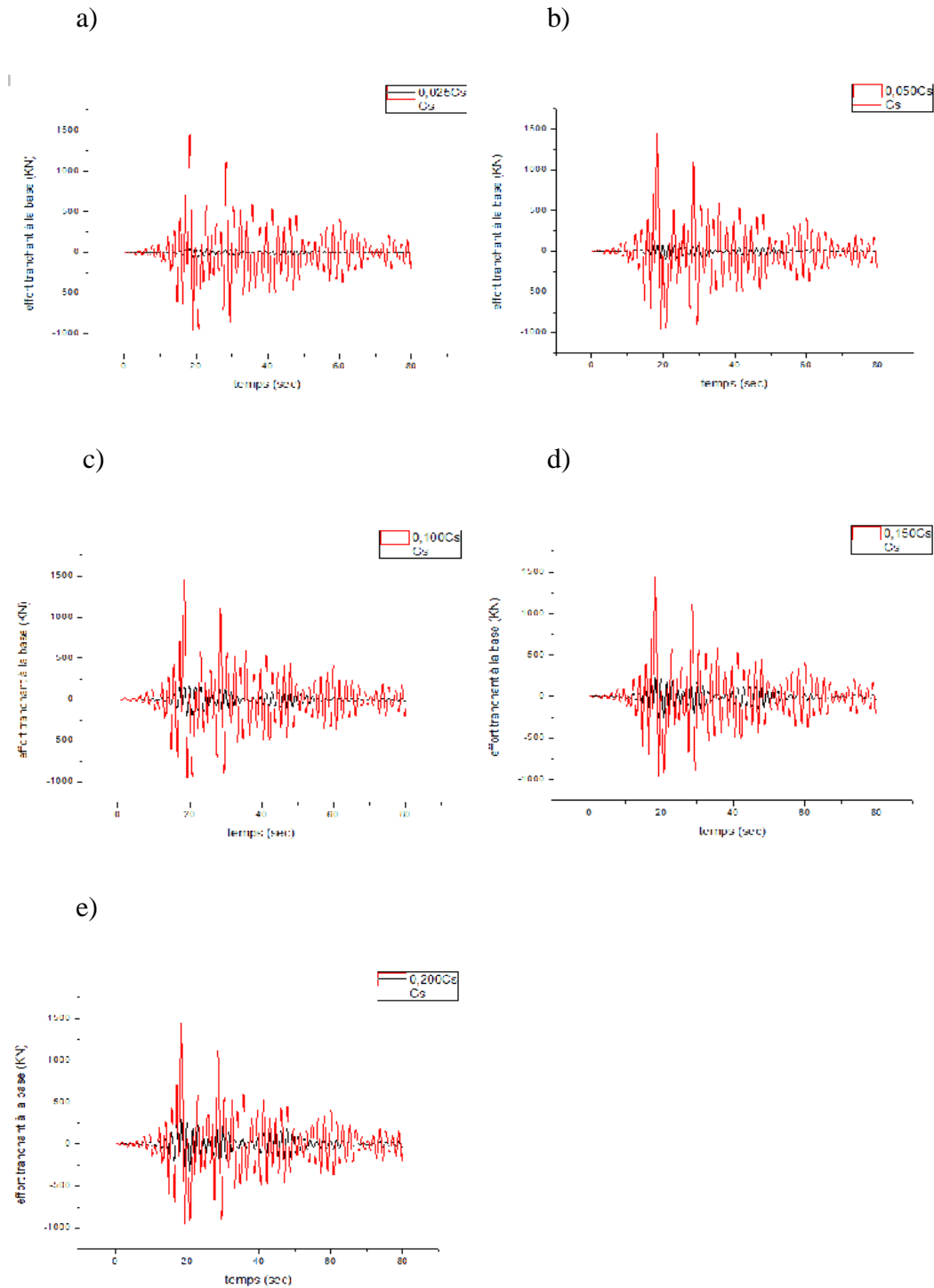


Figure 5.19 : variation des efforts tranchants dans la direction X sous l'excitation sismique de la composante Yermo du séisme de Landers pour une rigidité  $K_{ADAS} = 75\%$  :

- a) Linéaire /  $0.025C_s$ , b) Linéaire /  $0.050C_s$ , c) Linéaire /  $0.100C_s$ , d) Linéaire /  $0.150C_s$ ,  
e) Linéaire /  $0.200C_s$

Des figures (5.18) et (5.19), on remarque que la valeur de l'effort tranchant à la base augmente en accord avec l'augmentation du coefficient sismique.

Pour être plus précis, les valeurs des efforts tranchants sous les deux excitations sismiques sont rassemblés dans ce tableau ;

Coefficient sismique	Efforts tranchants (KN) sous L'excitation sismique de	
	El Centro	Landers
0,025Cs	147,10	54,31
0,050Cs	299,99	106
0,100Cs	637,5	195,1
0,150Cs	1024	264,8
0,200Cs	1455	320
Cs	10300	1457

Tableau 5-5: Comparaison des résultats des efforts tranchants pour les différents coefficients sismiques et sous les deux excitations sismiques.

L'effort tranchant à la base maximal que peut subir une structure de vingt niveaux sous l'excitation sismique d'El Centro pour une rigidité  $K_{ADAS} = 75\%$  est de 10300 KN et sous l'excitation sismique de Landers est de 1457 KN pour un coefficient sismique Cs.

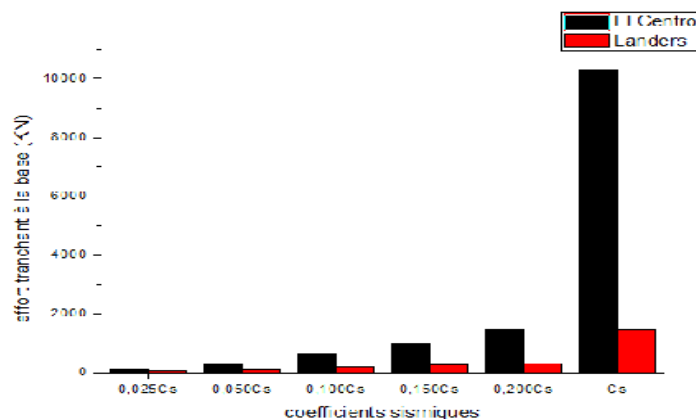


Figure 5.20: Comparaison des résultats des efforts tranchants pour les différents coefficients sismiques et sous les deux excitations sismiques.



### V.6.4. Déplacements

Le déplacement est un des paramètres qui nous donne une idée sur la réponse de la structure et sa capacité de résister aux excitations sismiques qui lui ont été appliqués.

Pour la combinaison de rigidité où  $K_{ADAS} = 75\%$  et sachant que le déplacement maximal sera celui du dernier niveau.

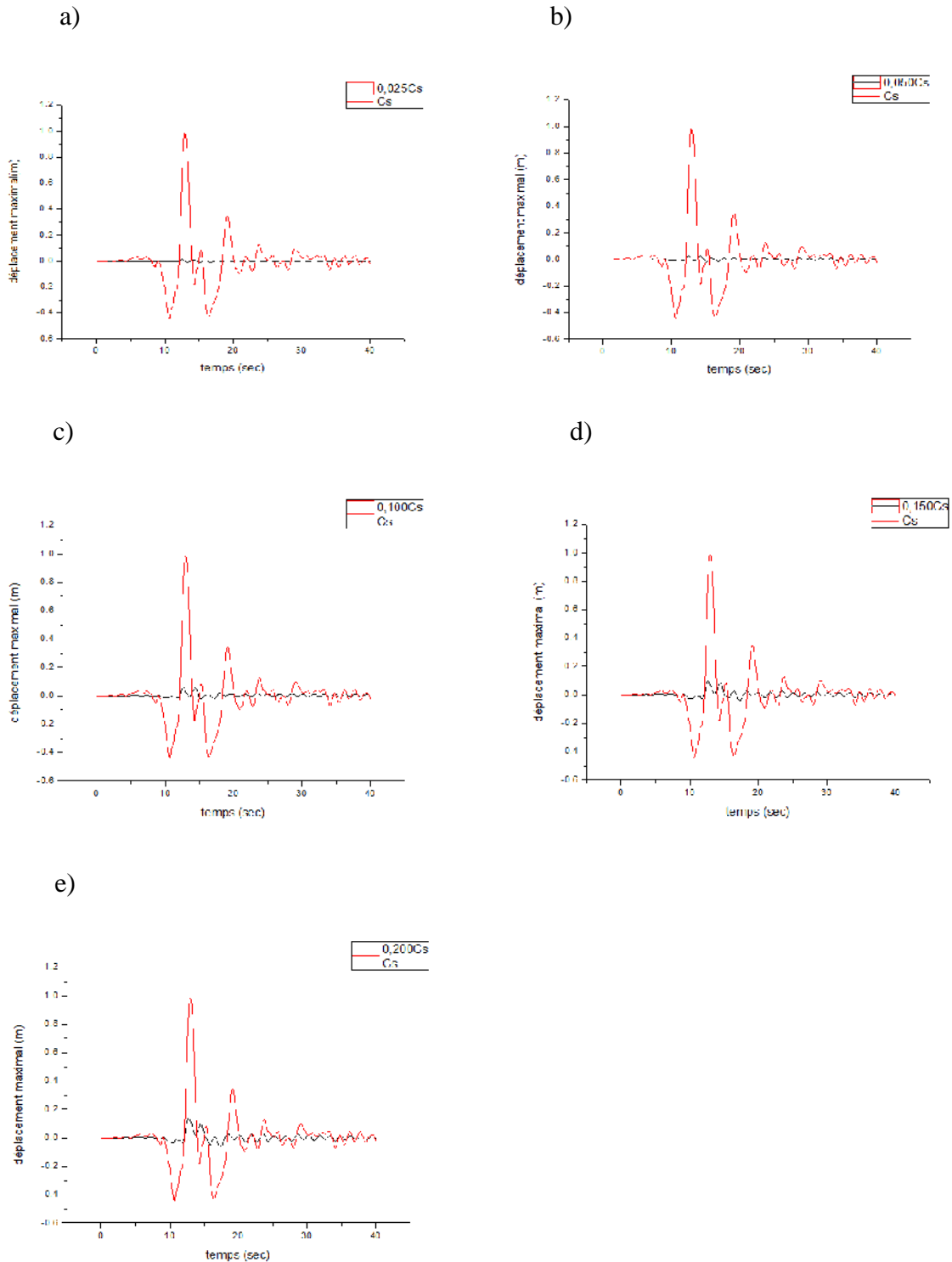


Figure 5.21 : variation des déplacements dans la direction X sous l'excitation sismique de la composante d'El Centro du séisme d'Imperial Valley pour une rigidité  $K_{ADAS} = 75\%$  :

- a) Linéaire /  $0.025C_s$ , b) Linéaire /  $0.050C_s$ , c) Linéaire /  $0.100C_s$ , d) Linéaire /  $0.150C_s$ , e) Linéaire /  $0.200C_s$

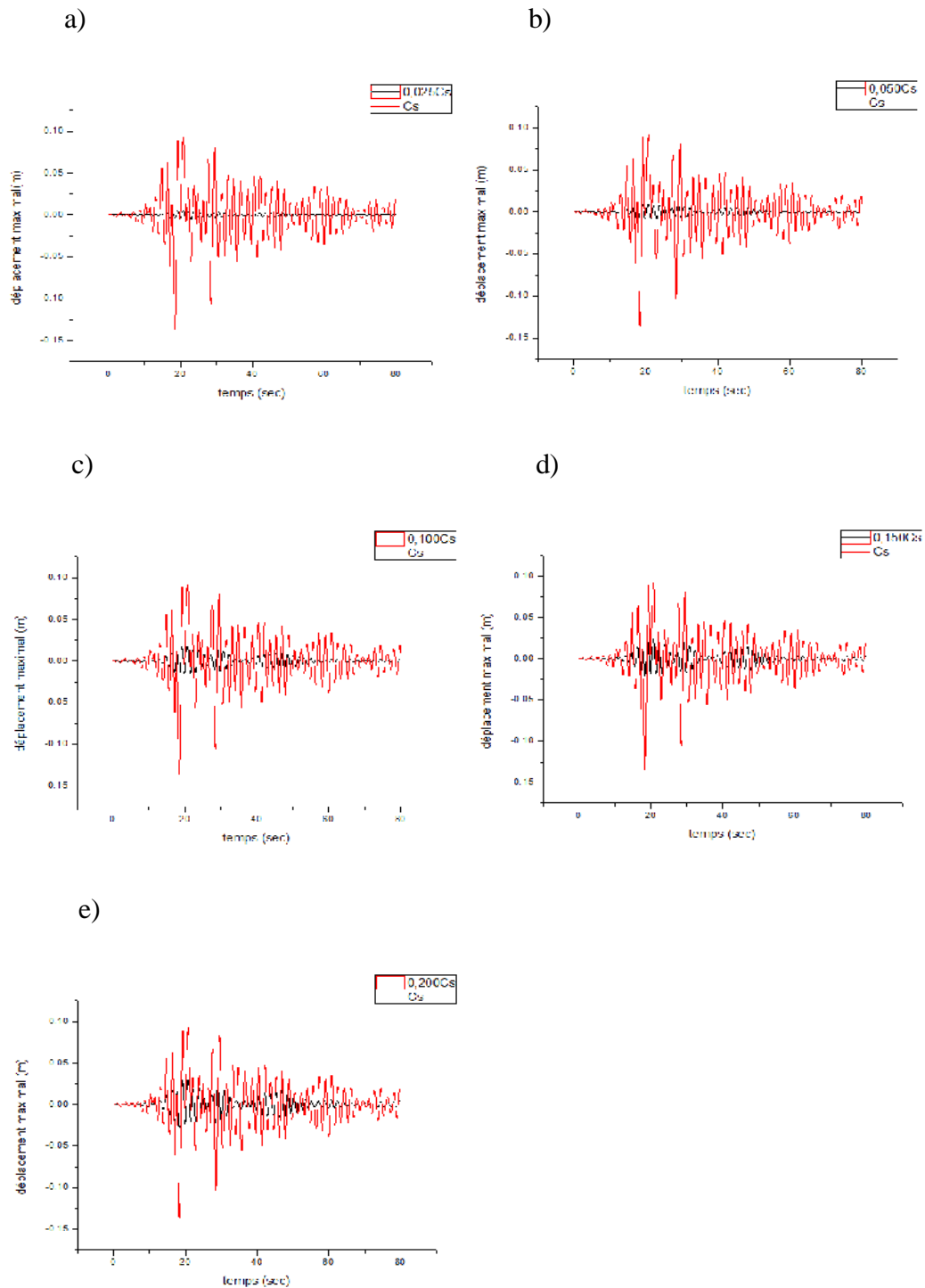


Figure 5.22 : variation des déplacements dans la direction X sous l'excitation sismique de la composante Yermo du séisme de Landers pour une rigidité  $K_{ADAS} = 75\%$  :

- a) Linéaire /  $0.025C_s$ , b) Linéaire /  $0.050C_s$ , c) Linéaire /  $0.100C_s$ , d) Linéaire /  $0.150C_s$ ,  
e) Linéaire /  $0.200C_s$

Des figures (5-20) et (5-21), on remarque que la valeur des déplacements augmente en accord avec l'augmentation du coefficient sismique.

Pour être plus précis, les valeurs des déplacements sous les deux excitations sismiques sont rassemblés dans ce tableau ;

Coefficient sismique	Déplacements (m) sous L'excitation sismique de	
	El Centro	Landers
0,025Cs	0,01384	0,004993
0,050Cs	0,02818	0,009746
0,100Cs	0,05987	0,01797
0,150Cs	0,09666	0,02442
0,200Cs	0,1379	0,02965
Cs	0,9865	0,1358

Tableau 5-6: Comparaison des résultats des déplacements pour les différents coefficients sismiques et sous les deux excitations sismiques.

Le déplacement maximal que peut atteindre une structure de vingt niveaux sous l'excitation sismique d'El Centro pour une rigidité  $K_{ADAS} = 75\%$  est de 98,65 cm et sous l'excitation sismique de Landers est de 13,58 cm pour un coefficient sismique Cs.

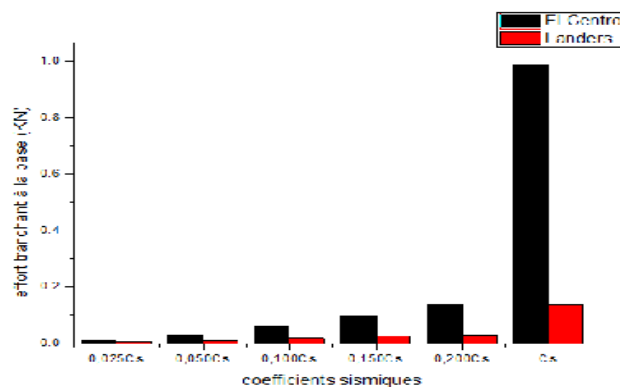


Figure 5.23: Comparaison des résultats des déplacements pour les différents coefficients sismiques et sous les deux excitations sismiques.

## V.7. Interprétation des résultats

Après la comparaison qui était faite entre les courbes énergétiques, entre les boucles d'hystérésis, entre les efforts tranchants ainsi qu'entre les déplacements d'un bâtiment de vingt niveaux pour les différents coefficients sismiques pour la combinaison de rigidité  $K_{ADAS} = 75\%$  sous deux chargements sismiques ; le premier d'une excitation sismique moyenne ( $PGA = 0,436g$ ) et le deuxième d'une excitation sismique faible ( $PGA = 0,151g$ ), on constate que l'augmentation du coefficient sismique entraîne une augmentation de l'énergie sismique entrée, de l'énergie d'amortissement modal et de l'énergie absorbée par le système de dissipation d'énergie.

La dissipation d'énergie est plus importante lors d'une excitation sismique moyenne ou élevée et elle devient moins importante pour des excitations faibles comme le montre le cas de l'accélérogramme du séisme de LANDERS qui a un PGA de 0.151 g.

Le système de dissipation d'énergie est plus efficace à dissiper l'énergie sismique induite lors d'une excitation sismique moyenne ou élevée et devient moins efficace pour des excitations faibles comme le montre l'accélérogramme du séisme de LANDERS qui a un PGA de 0.151 g.

**CONCLUSION**

**GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

Pour bien construire en zone sismique, il est nécessaire de comprendre le mécanisme générateur des séismes et de caractériser l'évènement sismique et ses paramètres.

De nouveaux dispositifs parasismiques ont été inventés afin de limiter les dégâts humains et matériels causés suite à un séisme et dont leurs performances à réduire la réponse sismique sont prouvées.

Dans ce mémoire, on a étudié l'influence des dispositifs de dissipation d'énergie de type hystérétique (ADAS) sur le comportement des bâtiments, respectivement de période courte et de période longue (quatre et vingt niveaux) en analysant comment les paramètres importants de limite d'élasticité des dissipateurs ainsi que le pourcentage de rigidité latérale agissent en rapport avec la rigidité latérale du bâtiment qui est soumis à deux excitations sismiques différentes ; l'une modérée et l'autre faible et pour différents coefficients sismiques.

La réponse des deux bâtiments a été déterminée en termes d'énergie (sismique, d'amortissement modal, dissipée par le dispositif ADAS, cinétique et potentielle), du comportement hystérétiques de ces dispositifs, de déplacement et de l'effort tranchant transmis à ces deux structures pour évaluer l'influence des différents paramètres cités auparavant sur leurs réponses dynamiques.

Les analyses numériques effectuées par l'étude comparative entre les trois pourcentages de rigidité latérale des dissipateurs ADAS (25%, 50% puis 75%) par rapport à la rigidité latérale du bâtiment nous ont permis de déduire les conclusions suivantes :

- L'énergie dissipée par l'ADAS devient de plus en plus élevée et l'amortissement modal diminue.
- L'énergie mécanique (l'ensemble des énergies "potentielle et cinétique") augmente.
- L'énergie sismique entrée reste presque invariable.
- L'effort tranchant à la base diminue.
- Le déplacement maximal de la structure se réduit d'une façon importante.

Les analyses numériques effectuées par l'étude comparative entre les différents coefficients sismiques nous ont permis de déduire qu'en accord avec l'augmentation du coefficient sismique, on remarque :

- Une augmentation de l'énergie sismique entrée, de l'énergie d'amortissement modal et de l'énergie absorbée par le système de dissipation d'énergie.
- Une augmentation de l'effort tranchant à la base.
- Une augmentation du déplacement maximal de la structure.
- Une augmentation de la surface des boucles d'hystérésis.
- Une réduction de la différence entre l'énergie d'amortissement modal et celle absorbée par les dissipateurs d'énergie.

Les analyses numériques effectuées par l'étude comparative entre les deux excitations sismiques nous ont permis de déduire les conclusions suivantes :

- Sous une excitation sismique élevée ou moyenne, le taux de l'énergie dissipée par l'ADAS est plus élevé que celui sous une excitation sismique faible.
- Les surfaces des boucles d'hystérésis correspondant à une excitation sismique élevée ou moyenne sont plus grandes que celles correspondant à une excitation sismique faible.
- Les déplacements et les efforts tranchants résultant d'une excitation sismique élevée ou moyenne sont plus grandes que ceux résultant d'une excitation sismique faible.

Les analyses numériques effectuées par l'étude comparative entre les deux bâtiments (de période courte : avec quatre niveaux et de période longue : avec vingt niveaux) nous ont permis de déduire que le système de dissipation d'énergie est très efficace pour les deux types de bâtiments.

Par conséquent, nous pouvons conclure que les systèmes de dissipation d'énergie sont efficaces pour tous types de bâtiments et que leur efficacité devient plus importante dans les structures qui possèdent des systèmes de dissipation d'énergie assez rigides et qui sont soumis à des excitations sismiques moyennes ou élevées.

**REFERENCES**

**BIBLIOGRAPHIQUES**



- [1]: Soong T.T., Costantinou M.C. (1994), “Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering”, International Centre for Mechanical Sciences, Springer Verlag, New York.
- [2]: FEMA 274, (chapter 8) “Seismic isolation and energy dissipation (Systematic Rehabilitation)”, *Federal Emergency Management Agency Washington*.
- [3]: Moreschi L.M. (2000), “Seismic Design of Energy Dissipation Systems for Optimal Structural Performance”, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [4]: FEMA 274, (chapter 9) “Seismic isolation and energy dissipation (Systematic Rehabilitation)”, *Federal Emergency Management Agency Washington*.
- [5]: Aiken I.D. (1996), “Passive energy dissipation-hardware and applications” Los Angeles.
- [6]: Marsico M.R. “Seismic isolation and energy dissipation: theoretical basis and Applications”, universita degli studi di Napoli Federico II.
- [7]: Kelly J. M., Skinner R. I., Heine A.J. (1972), "Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures", Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol. 5, No. 3, pp. 63 - 68.
- [8]: Skinner R.I., Kelly J.M., Heine A.J. ( 1975 ), " Hysteresis Dampers for Earthquake-Resistant Structures", Earthquake engineering and Structural Dynamics, Vol. 3, pp. 287 - 296.
- [9]: U.S Army corps of engineers (1997), Engineering Instructions “Seismic Isolation and Energy Dissipation Systems”
- [10]: José Soto Miranda (2008), « Análisis y diseño de estructuras con disipadores de energía metálicos en base a criterios de desempeño », Universidad Austral de Chile.
- [11] : Cundumi Sánchez O. (2005), “a variable damping semi active device for control of the seismic response of buildings” , university of puerto rico mayagüez campus.
- [12]: Aiken I., (2006), “Energy Dissipation Devices”, 8 NCEE Tutorial on State of the Art Technologies.
- [13]: Handbook Of Structural Engineering. Chapter 35
- [14]: Fahim.S et al. (1996), “Passive Energy Dissipation Devices For Seismic Applications” Building and fire research laboratory. U.S Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology.
- [15]: Etienne JOLY (2005), « Les nouvelles technologies du bâtiment au Japon ». Ambassade de France au Japon ; Service pour la Science et la Technologie.
- [16]: Ali Sehat T. (2006), “Energy Dissipation systems For Seismic Resistance”, The construction industry portal of Iran. Civil Engineering University of East London.

- [17]: Aiken I.D., Whittaker A. S., Kelly J.M. (1993), "Testing of Passive Energy Dissipation Systems", Earthquake Spectra, vol. 9, no. 3, Earthquake Engineering Research Institute California.
- [18]: Reinhorn A.M., Constantinou M.C. and Li C. (1995), "Use of supplemental damping devices for seismic strengthening of lightly reinforced concrete frames", Department of Civil Engineering, State University of New York at Buffalo.
- [19]: Maldonado-Mercado J. C. (1995), "Passive and active control of structures", Massachusetts institute of technology.
- [20]: Hirokazu I. et al. (2005), "Vibration and shock handbook"; "chapter 29: Seismic Base Isolation and Vibration Control" , Kyoto University.
- [21]: Ahsan Kareem et al. (1999), "Mitigation of Motions of Tall Buildings with Specific Examples of Recent Applications.
- [22]: Soong T. T., Spencer Jr. B. F. (2002), "Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice", Engineering Structures, Vol. 24, 243-259.
- [23]: "Control of Civil Structures", chapter 02. (2005).
- [24]: « Le risque sismique », (2009) ; <http://www.prim.net> > dossier risque sismique
- [25] : « Cours de génie parasismique semestre d'été 2007 », Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
- [26] : « zonage sismique de l'Algérie » sur le website : <http://www.algerie-monde.com>
- [27] : « la sismicité de l'Algérie » sur le website : <http://www.craag.dz>
- [28] : Ministère de l'habitat et de l'urbanisme, document technique réglementaire dtr b c 2 48 règles parasismiques algériennes rpa 99 / version 2003
- [29] : Dariush M., Jim H. « Microzonage sismique », Université de Carleton et Commission géologique du Canada, Ottawa
- [30] : « effet de site » sur le website : <http://www.irsn.fr>
- [31] : AMOURI C., « Construction des spectres de réponse pour la région de Constantine » Université Mentouri de Constantine, Département de Génie Civil
- [32] : Catherine BERGE- THIERRY, (2008), « les séismes et la sureté des installations à risques », Accueil Polytechnique, 19 septembre 2008.
- [33] : CHAMBARD R., Luscio H., « Construction Parasismique : Protection et Conception »
- [34]: Zacek. M, (2008), " Construction parasismique des bâtiments", Editions Parenthèses.
- [35]: Khosravian A. , Hosseini A., "Application of a Genetic Algorithm for Optimal Passive

Control of Buildings with Metallic Dampers”, Faculty of Civil Engineering; University of Tehran.

- [36]: Alehashem S. M. S., Keyhani A., and Pourmohammad H., (2008), “Behavior and Performance of Structures Equipped With ADAS & TADAS Dampers (a Comparison with Conventional Structures), The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China.
- [37]: De la Llera J. C., Esguerra C., Almazan J. L., (2004), “ Earthquake behavior of structures with copper energy dissipaters”, (Department of Structural and Geotechnical Engineering; Pontificia Universidad Catolica de Chile); Earthquake Engng Struct. Dyn. 2004; 33:329–358 (DOI: 10.1002/eqe.354)
- [38]: Tehranizadeh M., “Behavior of friction damping on semi-rigid "khorjinee" steel framing connection”, Civil engineering, Inter. Inst. of Earthquake Engr. and Seismology (IIEES)& Amir Kabir Univ., Tehran,Iran, (12 WCEE 2000).
- [39] : Palazzo G. L., Crisafulli F.J., « Evaluación de la Eficiencia de Disipadores por Fluencia usados para la Rehabilitación de Pórticos »
- [40]: Abdollahzadeh G.R., Bayat M., (2010), “The Influences of the Different PGA and Heights of Structures on Steel Braced Frame Systems Equipped with ADAS dampers”, Department of Civil Engineering, Babol University of technology.
- [41]: Lestuzzi P., (2007), “Génie Parasismique; Analyse non-linéaire dynamique”, EPFL-ENAC-SGC.
- [42]: Xia C., Hanson R. D., (1992), “Influence of ADAS Element Parameters on Building Seismic Response”, Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No. 7, July, 1992. ASCE, ISSN 0733-9445/92/0007-1903. Paper No. 1762.
- [43]: Symans M. D., Charney F. A., Whittaker A. S., Constantinou M. C., (2008), “Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments”, (journal of structural engineering © ASCE / January 2008 / 3)
- [44]: Costantinou M.C.,Symans M.D. (1992), “Experimental and Analytical Investigation of Seismic Response of Structures with Supplemental Fluid Viscous Dampers”, Technical Report NCEER-92-0032, University of New York.
- [45]: Gang L., Hongnan L. (2008), “ Earthquake-resistant design of RC frame with ‘dual Functions’ metallic dampers”, The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China.
- [46]: Naeim F., and Kelly J. M. (1999), " Design of seismic isolated structures from theory to practice", John Wiley & Sons; New York.
- [47]: Farzad Naeim (2001), “Chapter 5; Linear Static Seismic Lateral Force Procedures: THE SEISMIC DESIGN HANDBOOK”.
- [48]: Logiciel « ETABS » Extended Three Dimensional Analysis of Building Systems) version (9.0) Computers and Structures, Inc. Berkeley, California, USA