



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

*République Algérienne Démocratique et Populaire*

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

*Ministère de l'enseignement supérieur et de recherche scientifique*

جامعة العربي التبسي - تبسة

*Université Larbi Tébessi- Tébessa -*

*Faculté des Sciences et de la Technologie*

*Département de Génie Civil*

**MEMOIRE**

*Présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique*

*En Filière : Génie Civil*

*Spécialité : Structures*

*Par : Adjailia Sihem*

*Sujet*

**COMPORTEMENT SISMIQUE D'UNE  
STRUCTURE A ISOLATION DE BASE,  
INTEGRANT L'INTERACTION SOL –  
STRUCTURE**

*Présenté et soutenu publiquement, le 08 / 06 / 2024.*

*Devant le jury composé de :*

*M. Harkati Elhadi*

*Président*

*M. Atmania Ibrahim*

*Encadreur*

*M. Ayeb Belkhir*

*Examineur 1*

*Promotion : 2023-2024*

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# *Remerciement*

*Tout d'abord, Merci Allah de nous avoir donné la  
Capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller  
jusqu'au bout*

*du rêve et la volonté et la patience de mener à terme le présent travail.*

*C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que  
nous remercions mon*

*encadreur Mr B. ATHAMNIA de m'avoir fait confiance et accepter de  
diriger mon*

*mémoire ainsi que pour sa disponibilité tout le long de ce travail.*

*Mes remerciements vont également aux membres du jury d'avoir honoré ma  
Soutenance et pour l'effort fourni afin de juger ce modeste travail.*

*Je n'oublierai jamais de remercier du fond du cœur ma mère, mes frères  
(ZAKARIA, RIAD) et mes sœurs (MOUNIRA, IMENE et HANADI)*

*pour leur Soutien.*

*Mes remerciements sont exprimés également :*

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce projet  
de*

*fin d'étude.*

## *Dédicace*

*Je voudrais humblement dédier ce travail à la mémoire de mon père bien –aime, celui que a été mon source d'inspiration. Il m'a tout donné et m'a soutenu de manière inconditionnelle jusqu' à son dernier souffle. Que Dieu l'accueille dans son vaste paradis, où sa lumière continuera à briller pour l'éternité.*

*A ma très chère maman, aucune dédicace ne saurait exprimer pleinement l'affection et le respect que j'éprouve pour elle. Que ce travail puisse être une modeste manifestation de gratitude pour tous les nobles sacrifices qu'elle a consentis pour assurer mon éducation et mes études .*

*A mes chères sœurs et frères, Zakaria, Riad ,Mounira , Imene ,Hanadi , votre soutien et votre amour ont été inestimables dans m vie , et je vous en suis profondément reconnaissant .*

*A tout ma famille , en particulier la famille Mazouz , je vous exprime ma gratitude pour votre soutien constant et vos encouragement tout au long de mon parcours .*

*Et enfin ,à tous mes collègues de la promotion de Génie civil  
2024*

## ***Liste des tableaux***

- **Tableau 01 : Paramètres des isolateurs LRB.....54**
- **Tableau 02 : Les propriétés des sols.....87**

## Liste des figures

- **Figure 1** : Principe de l'isolation de base.....29
- **Figure 2** : Appui en caoutchouc synthétique.....30
- **Figure 3** : Appui en caoutchouc laminé avec noyau de plomb.....31
- **Figure 4** : appui à pendule avec élément incurvé.....32
- **Figure 5** : Les différentes méthodes de modélisation de la structure avec SSI.....37
- **Figure 6** : Illustration de l'Analyse Directe de l'Interaction Sol-Structure à l'aide des Éléments Finis.....38
- **Figure 7** : La division d'un problème a par superposition - Approche de sous-structure.....39
- **Figure 8** : La Figure 8 présente la configuration générale du portique ainsi que la représentation du dispositif LRB.....49
- **Figure 9** : Comportement hystérétique des appuis en caoutchouc avec noyau en plomb (LRB).....50
- **Figure 10** : présente l'enregistrement du mouvement sismique du sol de Kobe, Japon (KJMA).....55
- **Figure 11** : présente l'enregistrement du mouvement sismique du sol de Northridge-01, Rinaldi Receiving Sta (RRS).....56
- **Figure 12** : présente l'enregistrement du mouvement sismique du sol de Chi-Chi Taiwan, (TCU052).....56
- **Figure 13** : Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme KOBE, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 5$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .....57
- **Figure 14** : Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2.5, 3$ ), sous séisme KOBE, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 7.5$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .....58
- **Figure 15** : Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme KOBE, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 10$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .....58

- **Figure 16** : Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme RRS228, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 5$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .....60
- **Figure 17** : Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme RRS228, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 7.5$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .....61
- **Figure 18** : Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme RRS228, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 10$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .....62
- **Figure 19** : Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme TCU052, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 5$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .....62
- **Figure 20** : Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme TCU052, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 7.5$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .....63
- **Figure 21** : Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme TCU052, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 10$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .....63
- **Figure 22** : Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme KOBE, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 5$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 15\%$ .....65
- **Figure 23** : Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme KOBE, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 7.5$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 15\%$ .....65

- **Figure 24** : Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme KOBE, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 10$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 15\%$ .....66
  
- **Figure25** : Comparaison des Déplacements au Dernier Niveau et à la Base en Fonction de la Variation du Coefficient d'Amortissement  $\beta=10-15-20-30\%$  des Isolateurs (LRB) pour un Rapport de Rigidité  $\lambda=5$  sous Séisme KOBE. ....67
  
- **Figure 26** : Comparaison des Déplacements au Dernier Niveau et à la Base en Fonction de la Variation du Coefficient d'Amortissement  $\beta=10-15-20-30\%$ des Isolateurs (LRB) pour un Rapport de Rigidité  $\lambda=7.5$  sous Séisme KOBE.....68.
  
- **Figure27** : Comparaison des Déplacements au Dernier Niveau et à la Base en Fonction de la Variation du Coefficient d'Amortissement  $\beta=10-15-20-30\%$  des Isolateurs (LRB) pour un Rapport de Rigidité  $\lambda=10$  sous Séisme KOBE.....69
  
- **Figure28** : Comparaison des Déplacements au Dernier Niveau et à la Base en Fonction de la Variation du Coefficient d'amortissement  $\beta=10-15-20-30\%$ des Isolateurs (LRB) pour un Rapport de Rigidité  $\lambda=5$  sous Séisme RRS228.....71
  
- **Figure29** : Comparaison des Déplacements au Dernier Niveau et à la Base en Fonction de la Variation du Coefficient d'amortissement  $\beta=10-15-20-30\%$  des Isolateurs (LRB) pour un Rapport de Rigidité  $\lambda=7.5$  sous Séisme RRS228.....72
  
- **Figure30** : Déplacements maximaux au dernier niveau et à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la variation du coefficient d'amortissement ( $\beta = 10\%, 15\%, 20\%, 30\%$ ) des isolateurs avec un rapport de rigidité constant de  $\lambda = 10$  sous l'influence du séisme RRS228.....73
  
- **Figure 31** : Comparaison des déplacements maximaux au sommet et à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la variation du coefficient d'amortissement  $\beta$  (10%, 15%, 20%, 30%)des isolateurs (LRB) pour un rapport de rigidité constant  $\lambda = 5$  sous le séisme TCU052.....75
  
- **Figure 32** : Comparaison des déplacements maximaux au sommet et à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la variation du coefficient



- d'amortissement  $\beta$  (10%, 15%, 20%, 30%) des isolateurs (LRB) pour un rapport de rigidité constant  $\lambda = 7.5$  sous le séisme TCU052.....76
- **Figure 33** : Comparaison des déplacements maximaux au sommet et à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la variation du coefficient d'amortissement  $\beta$  (10%, 15%, 20%, 30%) des isolateurs (LRB) pour un rapport de rigidité constant  $\lambda = 10$  sous le séisme TCU052.....77
  - **Figure 34**: Comparaison des efforts tranchants à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective ( $T_f = 2, 2.5, 3$ ) sous trois séismes (KOBE, RRS228, TCU052) et un rapport de rigidité constant  $\lambda = 5$ .....79
  - **Figure 35** : Comparaison des efforts tranchants à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective ( $T_f = 2, 2.5, 3$ ) sous trois séismes (KOBE, RRS228, TCU052) et un rapport de rigidité constant  $\lambda = 7.5$ .....79
  - **Figure 36** : Comparaison des efforts tranchants à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective ( $T_f = 2, 2.5, 3$ ) sous trois séismes (KOBE, RRS228, TCU052) et un rapport de rigidité constant  $\lambda = 10$ .....80
  - **Figure 37** : Comparaison des efforts tranchants à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective ( $T_f = 2, 2.5, 3$ ) sous trois séismes (KOBE, RRS228, TCU052) et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .....81
  - **Figure 38** : Comparaison des efforts tranchants à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective ( $T_f = 2, 2.5, 3$ ) sous trois séismes (KOBE, RRS228, TCU052) et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 15\%$ .....82
  - **Figure 39** : Comparaison des efforts tranchants à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective ( $T_f = 2, 2.5, 3$ ) sous trois séismes (KOBE, RRS228, TCU052) et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 20\%$ .....82
  - **Figure 40**: Comparaison des efforts tranchants à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective ( $T_f = 2, 2.5, 3$ ) sous trois séismes (KOBE, RRS228, TCU052) et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 30\%$ .....83
  - **Figure 41**: Présente la configuration générale du portique étudié avec interaction sol-structure.....86
  - **Figure 42** : Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme KOBE, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 5$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .....88

- **Figure 43** : Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme KOBE, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 7.5$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .....88
- **Figure44** : Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour unportique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme KOBE, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 10$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .....89
- **Figure45** : Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour unportique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme RRS228, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 5$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .....91
- **Figure46**: Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour unportique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme RRS228, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 7.5$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .....91
- **Figure47** : Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour unportique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme RRS228, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 10$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .....92
- **Figure48** : Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour unportique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme TCU052, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 5$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .....93
- **Figure49** : Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour unportique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme TCU052, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 7.5$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .....94
- **Figure50** : Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour unportique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme TCU052, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 10$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .....94

- **Figure 51** : Comparaison des Déplacements au Dernier Niveau et à la Base en Fonction de la Variation du Coefficient d'Amortissement  $\beta=10-15-20-30\%$  des Isolateurs (LRB) pour un Rapport de Rigidité  $\lambda=5$  sous Séisme KOBE.....96
- **Figure 52** : Comparaison des Déplacements au Dernier Niveau et à la Base en Fonction de la Variation du Coefficient d'Amortissement  $\beta=10-15-20-30\%$  des Isolateurs (LRB) pour un Rapport de Rigidité  $\lambda=7.5$  sous Séisme KOBE.....96
- **Figure 53** : Comparaison des Déplacements au Dernier Niveau et à la Base en Fonction de la Variation du Coefficient d'Amortissement  $\beta=10-15-20-30\%$  des Isolateurs (LRB) pour un Rapport de Rigidité  $\lambda=10$  sous Séisme KOBE.....97
- **Figure 54** : Comparaison des Déplacements au Dernier Niveau et à la Base en Fonction de la Variation du Coefficient d'amortissement  $\beta=10-15-20-30\%$  des Isolateurs (LRB) pour un Rapport de Rigidité  $\lambda=5$  sous Séisme RRS228.....98
- **Figure 55** : Comparaison des Déplacements au Dernier Niveau et à la Base en Fonction de la Variation du Coefficient d'amortissement  $\beta=10-15-20-30\%$  des Isolateurs (LRB) pour un Rapport de Rigidité  $\lambda=7.5$  sous Séisme RRS228.....99
  
- **Figure 56** : Déplacements maximaux au dernier niveau et à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la variation du coefficient d'amortissement ( $\beta = 10\%, 15\%, 20\%, 30\%$ ) des isolateurs avec un rapport de rigidité constant de  $\lambda = 10$  sous l'influence du séisme RRS228. ....99
- **Figure 57** : Comparaison des déplacements maximaux au sommet et à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la variation du coefficient d'amortissement  $\beta$  (10%, 15%, 20%, 30%) des isolateurs (LRB) pour un rapport de rigidité constant  $\lambda = 5$  sous le séisme TCU052.....101
- **Figure 58** : Comparaison des déplacements maximaux au sommet et à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la variation du coefficient d'amortissement  $\beta$  (10%, 15%, 20%, 30%) des isolateurs (LRB) pour un rapport de rigidité constant  $\lambda = 7.5$  sous le séisme TCU052. ....101
- **Figure 59** : Comparaison des déplacements maximaux au sommet et à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la variation du coefficient d'amortissement  $\beta$  (10%, 15%, 20%, 30%) des isolateurs (LRB) pour un rapport de rigidité constant  $\lambda = 10$  sous le séisme TCU052.....102

- **Figure 60** : Comparaison des efforts tranchants à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective ( $T_f = 2, 2.5, 3$ ) sous trois séismes (KOBE, RRS228, TCU052) et un rapport de rigidité constant  $\lambda = 5$ .....103
- **Figure 61** : Comparaison des efforts tranchants à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective ( $T_f = 2, 2.5, 3$ ) sous trois séismes (KOBE, RRS228, TCU052) et un rapport de rigidité constant  $\lambda = 7.5$ .....104
- **Figure 62** : Comparaison des efforts tranchants à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective ( $T_f = 2, 2.5, 3$ ) sous trois séismes (KOBE, RRS228, TCU052) et un rapport de rigidité constant  $\lambda = 10$ .....105
- **Figure 63** : Comparaison des efforts tranchants à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective ( $T_f = 2, 2.5, 3$ ) sous trois séismes (KOBE, RRS228, TCU052) et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ ....106
- **Figure 64** : Comparaison des efforts tranchants à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective ( $T_f = 2, 2.5, 3$ ) sous trois séismes (KOBE, RRS228, TCU052) et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 15\%$ ....107
- **Figure 65** : Comparaison des efforts tranchants à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective ( $T_f = 2, 2.5, 3$ ) sous trois séismes (KOBE, RRS228, TCU052) et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 20\%$ ....107
- **Figure 66** : Comparaison des efforts tranchants à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective ( $T_f = 2, 2.5, 3$ ) sous trois séismes (KOBE, RRS228, TCU052) et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 30\%$ ....108

# Résumé

**Résumé :**

Cette étude porte sur le comportement sismique d'une structure en béton armé à isolation de base, en considérant l'interaction entre le sol et la structure. La structure étudiée est un portique auto-stable de 8 étages, isolé à la base par des isolateurs de type LRB (Isolation Laminated Rubber Bearing). Trois excitations sismiques différentes ont été utilisées pour mener une analyse non-linéaire par accélérogramme. L'étude paramétrique s'est concentrée sur l'effet des caractéristiques des isolateurs parasismiques sur la réponse sismique, avec et sans prise en compte de l'interaction sol-structure.

**Mots-clés :** Interaction sol-structure- Isolation de base- Analyse non-linéaire- Paramètres des isolateurs- Réponse sismique

**ملخص:**

تركز هذه الدراسة على سلوك الزلازل للهياكل المعزولة بالقاعدة مع أخذ التفاعل بين التربة والهيكـل في الاعتبار. الهيكـل المدروس هو إطار خرساني مستقر مكون من 8 طوابق، معزول بالقاعدة باستخدام عوازل من نوع (LRB) عوازل المطاط المصفح. تم استخدام ثلاث إثارات زلزالية مختلفة لإجراء تحليل غير خطي بالتسارعات. ركزت الدراسة على تأثير خصائص العوازل المضادة للزلازل على الاستجابة الزلزالية، مع وبدون أخذ التفاعل بين التربة والهيكـل في الاعتبار.

**الكلمات المفتاحية:** التفاعل بين التربة والهيكـل - عزل القاعدة - التحليل غير الخطي - معايير العوازل

- الاستجابة الزلزالية

**Abstract:**

This study focuses on the seismic behavior of a base-isolated reinforced concrete structure, considering the soil-structure interaction. The studied structure is an 8-story self-supporting frame, isolated at the base using LRB (Laminated Rubber Bearing) isolators. Three different seismic excitations were used to perform a nonlinear analysis by time history analysis. The parametric study focused on the effect of the characteristics of the anti-seismic isolators on the seismic response, with and without considering the soil-structure interaction.

**Keywords:** Soil-structure interaction - Base isolation - Nonlinear analysis - Isolator parameters - Seismic response.



## *Table des matières*

<b>Sommaire</b>	
<b>Remerciement</b>	
<b>Dédicace</b>	
<b>Liste des tableaux</b>	
<b>Liste des figures</b>	
<b>Résumé</b>	<b>14-16</b>
<b>Introduction</b>	<b>21</b>
<b>Première Partie: partie théorique</b>	
<b>Chapiter 01: Revue de la littérature</b>	
<b>1. Introduction</b>	<b>26</b>
<b>2. Fondamentaux de la réponse sismique des structures</b>	<b>26</b>
<b>3. Systèmes d'Isolation de Base</b>	<b>28</b>
<b>3.1. Principes de l'isolation de base</b>	<b>28</b>
<b>3.2. Types de systèmes d'isolation de base</b>	<b>29</b>
<b>3.2.1. Les systèmes d'isolation en élastomère</b>	<b>29</b>
<b>3.2.1.2. Isolateur en élastomère de caoutchouc naturel</b>	<b>30</b>
<b>3.2.1.2. Isolateur en caoutchouc synthétique</b>	<b>30</b>
<b>3.2.1.3. Isolateur en caoutchouc avec noyau de plomb</b>	<b>30</b>
<b>3.2.2. Systèmes de glissement et isolateurs à pendule frictionnel</b>	<b>31</b>
<b>3.2.2. 1. Isolateur à pendule avec élément plat</b>	<b>31</b>
<b>3.2.2. 2. Isolateur à pendule avec élément incurve</b>	<b>31</b>
<b>3.2.3. Systèmes hybrides d'isolation de base</b>	<b>32</b>

<b>3.3. Les avantages et limitations de l'isolation de base</b>	<b>32</b>
<b>3.3.1. Les avantages</b>	<b>32</b>
<b>3.3.2. Limitations</b>	<b>33</b>
<b>4. Interaction Sol-Structure (SSI)</b>	<b>34</b>
<b>4.1. Vue d'ensemble de la SSI et son importance dans la réponse sismique</b>	<b>34</b>
<b>4.2 Types d'effets de la SSI et leurs implications pour la conception structurelle</b>	<b>35</b>
<b>4.2.1. Les effets cinématiques</b>	<b>35</b>
<b>4.2.2. Les effets inertiels</b>	<b>35</b>
<b>4.3. Méthodes d'analyse des effets de la SSI</b>	<b>36</b>
<b>4.3.1.. La Méthode direct</b>	<b>36</b>
<b>4.3.2. La méthode sous-structure</b>	<b>37</b>
<b>4.3.3.. approches empiriques</b>	<b>38</b>
<b>4.3.3.1. Approches basées sur l'expérience</b>	<b>38</b>
<b>4.3.3.2. Approches semi-empiriques</b>	<b>39</b>
<b>5. Effets Combinés de l'Isolation de Base et de la SSI sur la Réponse Sismique</b>	<b>39</b>
<b>5.1. Interaction entre les systèmes d'isolation de base et l'interaction sol-structure</b>	<b>39</b>
<b>5.2. Revue des études examinant les effets combinés</b>	<b>40</b>
<b>5.2.1. Améliorations de la performance sismique</b>	<b>40</b>
<b>5.2.2. Défis et considérations dans l'intégration de l'isolation de base avec l'analyse de la SSI</b>	<b>40</b>
<b>6. Défis Actuels et Lacunes de la Recherche</b>	<b>42</b>
<b>6.1. Lacunes dans la littérature</b>	<b>42</b>

<b>6.2. Domaines potentiels pour la recherche future</b>	<b>42</b>
<b>Deuxième Partie : partie pratique</b>	
<b>Chapitre 02 : Effet des propriétés dynamiques des dispositifs d'isolation à la base sur la réponse sismique sans interaction sol-structure</b>	
<b>1. Introduction</b>	<b>46</b>
<b>2. Description de la structure étudiée et de l'isolateur parasismique</b>	<b>46</b>
<b>3. Excitations sismiques</b>	<b>54</b>
<b>4. Résultats et discussion</b>	<b>55</b>
<b>Chapitre 03 : Effet des propriétés dynamiques des dispositifs d'isolation à la base sur la réponse sismique avec interaction sol-structure</b>	
<b>1. Introduction</b>	<b>83</b>
<b>2- Description de la structure étudiée</b>	<b>83</b>
<b>3- Résultats et discussion</b>	<b>85</b>
<b>Chapitre 04 : conclusion général</b>	<b>108-109</b>
<b>Références</b>	<b>111</b>

# Introduction

## Introduction Générale

Les séismes constituent une menace majeure pour les infrastructures et la sécurité des populations. La conception de structures résistantes aux séismes est un enjeu crucial pour la protection des vies humaines et la préservation des biens. Parmi les solutions innovantes pour améliorer le comportement sismique des bâtiments, l'isolation de base s'est imposée comme une technique efficace.

L'isolation de base consiste à introduire un système d'isolation entre la structure et le sol, permettant de réduire les forces sismiques transmises à la structure. Ce système, généralement constitué de matériaux souples et amortissants, modifie les caractéristiques vibratoires de la structure, en la rendant moins sensible aux mouvements du sol.

Cependant, l'étude du comportement sismique d'une structure isolée à la base ne se limite pas à l'analyse de la structure elle-même. L'interaction entre la structure et le sol, appelée interaction sol-structure, joue un rôle crucial dans la réponse sismique globale. Cette interaction peut modifier significativement les forces transmises à la structure et influencer son comportement dynamique.

Cette thèse vise à approfondir la compréhension du comportement sismique d'une structure à isolation de base, en tenant compte de l'interaction sol-structure. Les objectifs spécifiques sont :

Réaliser une revue de la littérature sur les systèmes d'isolation de base, les méthodes d'analyse de l'interaction sol-structure et les modèles numériques utilisés pour simuler le comportement sismique des structures isolées.

Étudier l'effet des propriétés dynamiques des dispositifs d'isolation à la base sur la réponse sismique de la structure en l'absence d'interaction sol-structure. Cette analyse permettra de déterminer l'influence des paramètres du système d'isolation (rapport de rigidité, amortissement, la période) sur le comportement dynamique de la structure.

Analyser l'effet des propriétés dynamiques des dispositifs d'isolation à la base sur la réponse sismique de la structure en présence d'interaction sol-structure. Cette étude permettra de comprendre comment l'interaction sol-structure modifie le comportement dynamique de la structure isolée et les forces transmises à la structure.

Développer un modèle numérique capable de simuler de manière réaliste le comportement sismique d'une structure isolée à la base, en intégrant l'interaction sol-structure. Ce modèle permettra de réaliser des simulations numériques et d'évaluer l'efficacité de l'isolation de base en présence d'interaction sol-structure.

Cette thèse est structurée en quatre chapitres :

- **Chapitre 1** : Revue de la littérature :

Ce chapitre présente un état de l'art sur les systèmes d'isolation de base, les méthodes d'analyse de l'interaction sol-structure et les modèles numériques utilisés pour simuler le comportement sismique des structures isolées. Il permettra de contextualiser la recherche et de définir les concepts clés utilisés dans la thèse.

- **Chapitre 2** : Effet des propriétés dynamiques des dispositifs d'isolation à la base sur la réponse sismique sans interaction sol-structure

Ce chapitre étudie l'influence des propriétés dynamiques des dispositifs d'isolation à la base sur la réponse sismique de la structure en l'absence d'interaction sol-structure. Il permettra de déterminer les paramètres optimaux du système d'isolation pour minimiser les forces sismiques transmises à la structure.

- **Chapitre 3** : Effet des propriétés dynamiques des dispositifs d'isolation à la base sur la réponse sismique avec interaction sol-structure

Ce chapitre analyse l'effet des propriétés dynamiques des dispositifs d'isolation à la base sur la réponse sismique de la structure en présence d'interaction sol-structure. Il permettra de comprendre comment l'interaction sol-structure modifie le comportement dynamique de la structure isolée et les forces transmises à la structure.

- **Chapitre 4** : Conclusion générale

Ce chapitre résume les principaux résultats de la thèse et discute de leurs implications pour la conception de structures à isolation de base. Il propose également des perspectives de recherche futures.

La méthodologie de la thèse repose sur l'utilisation de modèles numériques et de simulations numériques. Les modèles numériques seront développés en utilisant des logiciels ETABS et SAP2000 de calcul éléments finis. Les simulations numériques permettront d'étudier le comportement sismique de la structure isolée à la base, en tenant compte de l'interaction sol-structure.

Les résultats de cette thèse auront des implications importantes pour la conception de structures à isolation de base. Ils permettront d'améliorer la compréhension du comportement sismique de ces structures, de déterminer les paramètres optimaux des systèmes d'isolation et de garantir la sécurité des structures en cas de séisme. Les résultats de la thèse pourront être

appliqués à la conception de bâtiments, d'infrastructures et d'autres structures sensibles aux séismes.

Cette thèse s'inscrit dans un contexte de recherche active sur l'amélioration de la résistance sismique des structures. En intégrant l'interaction sol-structure dans l'analyse du comportement sismique d'une structure isolée à la base, cette thèse contribuera à une meilleure compréhension de la performance de ces systèmes et à l'optimisation de leur conception. Les résultats de la thèse auront des implications importantes pour la conception de structures plus sûres et plus résistantes aux séismes.



Première Partie : partie théorique



# Chapitre 01

Revue de la littérature

## 1. Introduction

Les événements sismiques présentent d'énormes défis pour l'intégrité structurelle, soulignant ainsi la nécessité de mettre en place des stratégies de mitigation sophistiquées pour protéger les bâtiments. Dans ce contexte, les systèmes d'isolation à la base se démarquent comme un élément essentiel pour réduire les forces exercées par les activités sismiques sur les édifices, renforçant ainsi considérablement leur résilience [ 1].

Parallèlement, le rôle de l'interaction sol-structure (ISS) ne peut être surestimé ; il est crucial dans la façon dont une structure réagit aux secousses sismiques, guidant ainsi à la fois les protocoles de mitigation et de conception[2].

L'association des techniques d'isolation à la base avec une compréhension nuancée de l'ISS représente une stratégie globale pour atténuer les risques sismiques, offrant ainsi une voie vers une sécurité structurelle améliorée. À travers cette revue de littérature, l'objectif est de rassembler et d'analyser les idées principales concernant l'isolation à la base et l'ISS, mettant en lumière leur influence collective sur la réponse sismique des structures. Cette exploration est cruciale car elle révèle la symbiose entre les systèmes d'isolation à la base et l'ISS, ouvrant ainsi la voie à des innovations dans la conception sismique et les mesures de rétrofit. La littérature montre un consensus sur l'efficacité de l'isolation à la base dans la mitigation des risques sismiques, mais elle encourage également à approfondir son interaction avec l'ISS, soulignant ainsi un domaine essentiel pour la recherche académique et pratique[ 3] .

En analysant l'interaction dynamique entre les systèmes d'isolation à la base et l'ISS, cette revue vise à faire progresser le domaine de la résilience sismique, préparant ainsi le terrain pour l'évolution des technologies de mitigation sismique. Les objectifs consistent à évaluer de manière critique les méthodologies existantes, à mettre en évidence les lacunes de recherche et à souligner l'importance des approches intégrées pour renforcer les structures contre les menaces sismiques[4.5 ].

## 2. Fondamentaux de la réponse sismique des structures :

Comprendre la réponse sismique des structures est crucial dans le domaine du génie parasismique, qui se concentre sur la conception de structures capables de supporter les forces sismiques. Les ondes sismiques, véhicules de l'énergie sismique, influencent considérablement la stabilité et l'intégrité des structures. Ces ondes comprennent les ondes de

volume (ondes P et S) et les ondes de surface (ondes Love et Rayleigh), qui affectent chacune les structures de manière différente. Les ondes P, les plus rapides, provoquent la compression et l'extension des particules dans les matériaux, affectant la stabilité verticale des structures. Les ondes S, plus lentes, induisent des contraintes de cisaillement conduisant à des déplacements horizontaux. Les ondes de surface, bien que plus lentes, peuvent causer le plus de dommages en raison de leurs schémas complexes de mouvement du sol, affectant les bâtiments à leur base [6].

La réponse dynamique des structures aux événements sismiques dépend de leurs caractéristiques intrinsèques - masse, rigidité et amortissement - qui définissent la manière dont une structure vibre pendant un tremblement de terre. Les fréquences naturelles d'une structure sont particulièrement importantes, car la résonance peut se produire si ces fréquences coïncident avec celles des ondes sismiques, ce qui peut potentiellement entraîner des dommages catastrophiques. Les ingénieurs utilisent divers modèles et simulations pour prédire et analyser ces réponses dynamiques, dans le but de concevoir des structures capables de supporter les forces sismiques sans subir de dommages significatifs [7].

La ductilité, la capacité d'une structure à subir une déformation sans perdre sa capacité de charge, et l'amortissement, le mécanisme par lequel une structure dissipe l'énergie des ondes sismiques, sont des concepts clés pour réduire la vulnérabilité sismique. Ces propriétés permettent aux structures d'absorber et de réduire l'énergie des ondes sismiques, minimisant ainsi les dommages [8].

Le développement des codes et normes parasismiques a été essentiel pour guider la conception de structures capables de résister aux tremblements de terre. Ces réglementations intègrent les leçons tirées des tremblements de terre passés, les résultats de recherche et les avancées technologiques, fixant des exigences minimales pour la conception parasismique afin d'assurer la sécurité publique [9].

Des stratégies de mitigation sismique innovantes, telles que l'isolation de base et les systèmes d'amortissement, ont été développées pour améliorer la résilience sismique des structures. L'isolation de base implique la construction d'un bâtiment sur des isolateurs capables d'absorber l'énergie sismique, réduisant ainsi les forces transmises à la structure. Les systèmes d'amortissement, quant à eux, ajoutent des dispositifs à une structure qui absorbent et dissipent l'énergie sismique, réduisant encore la réponse du bâtiment aux tremblements de terre [10].

La recherche continue en génie parasismique est vitale pour faire progresser notre compréhension de la réponse sismique et pour développer de nouvelles technologies et méthodologies pouvant encore améliorer la résilience des structures. Cette recherche comprend l'étude des effets des différents types d'ondes sismiques, l'amélioration des modèles de simulation et l'exploration de nouveaux matériaux et techniques de construction [11].

Le domaine du génie parasismique continue d'évoluer, stimulé par la recherche, les avancées technologiques et les leçons tirées des tremblements de terre passés. L'objectif ultime est de concevoir et de construire des bâtiments qui ne sont pas seulement sûrs et fonctionnels, mais aussi capables de résister aux forces imprévisibles de la nature, assurant ainsi la sécurité et la protection de leurs occupants.

### **3. Systèmes d'Isolation de Base :**

L'isolation de base, aussi appelée isolation sismique de base, est une technique d'ingénierie conçue pour protéger les structures des tremblements de terre. Elle implique le placement stratégique d'isolateurs entre la fondation et la superstructure pour séparer ces deux éléments, réduisant ainsi les dommages lors d'événements sismiques. Bien que largement reconnue pour son efficacité, cette technologie peut rencontrer des limitations qui entravent son adoption généralisée, en particulier dans les pays en développement. Malgré ces défis, la recherche en cours vise à améliorer cette méthode afin d'accroître la résilience sismique des structures et de minimiser l'impact des séismes sur les bâtiments et leurs occupants [12.13.14].

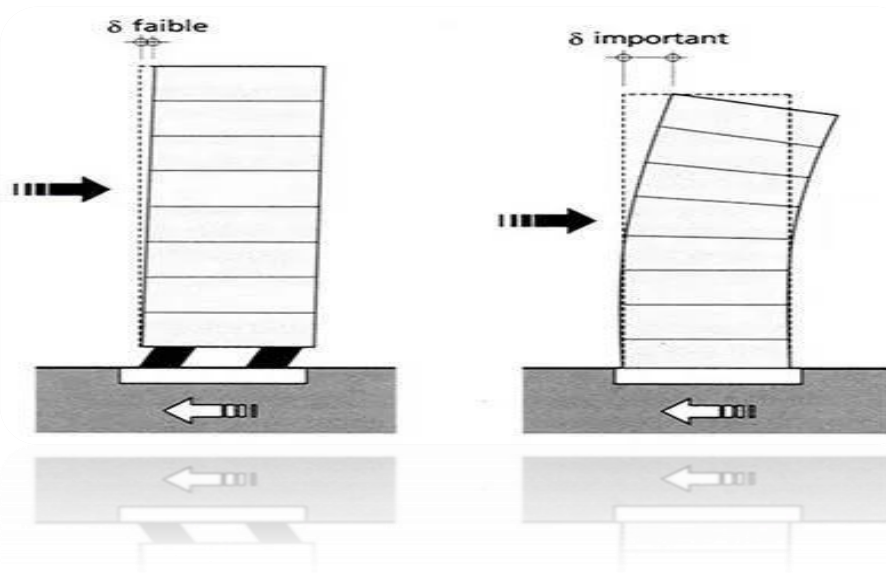
#### **3.1. Principes de l'isolation de base :**

Le principe fondamental d'un système d'isolation de base est de renforcer la résilience sismique des bâtiments en introduisant de la flexibilité et des mécanismes d'amortissement à la base de la structure. Cela implique un équilibre entre les éléments horizontaux flexibles et les éléments verticaux rigides pour modifier la réponse du bâtiment aux mouvements du sol, en mettant l'accent sur la réduction de la transmission des forces horizontales, les plus dommageables lors des séismes.

La flexibilité introduite permet au bâtiment de se déplacer de manière relativement indépendante par rapport au mouvement du sol, réduisant ainsi les forces transférées à la superstructure. Des éléments d'amortissement sont également incorporés pour limiter l'amplification des vibrations causées par le séisme, protégeant ainsi la structure contre les dommages. Bien que l'isolement vertical soit moins mis en avant en raison de son importance

moindre dans la vulnérabilité structurelle et de sa complexité de mise en œuvre, une certaine rigidité verticale est conservée pour assurer la stabilité.

Dans un scénario idéal, l'isolement réaliserait une séparation totale entre la structure et le sol, empêchant toute transmission des mouvements du sol dans le bâtiment. Cependant, dans la réalité, un certain contact entre la structure et le sol est inévitable. Ainsi, le principe global d'un système d'isolement de base consiste à fournir à la fois de la flexibilité horizontale et de la rigidité verticale au bâtiment, ainsi que des mécanismes d'amortissement, pour minimiser les dommages structurels, renforcer la sécurité et réduire l'accélération sismique transmise au bâtiment[15.16].



**Figure 1** : Principe de l'isolement de base

### 3.2. Types de systèmes d'isolement de base :

Les isolateurs sismiques de base se classent en deux catégories : les systèmes élastomères et les systèmes de glissement. Ils sont conçus pour déplacer la fréquence fondamentale des bâtiments au-delà de la plage d'excitation sismique, réduisant ainsi les forces et accélérations latérales. Chaque type d'isolateur possède des caractéristiques spécifiques telles que la rigidité, la limite d'élasticité, les déplacements maximums sous charges sismiques, la résilience et la rigidité verticale. Les deux types et comme suit :

### 3.2.1. Les systèmes d'isolation en élastomère

Les systèmes d'isolation en élastomère, également désignés sous le nom de systèmes élastomères, sont caractérisés par leur composition à base de matériaux élastomères. Leur avantage principal réside dans leur résilience, c'est-à-dire leur capacité à retrouver leur forme initiale après avoir été déformés par une charge ou une perturbation. Toutefois, les déformations sous charge de service et la durabilité peuvent poser des problèmes dans certains cas.

#### 3.2.1.1. Isolateurs en élastomère de caoutchouc naturel :

Ces dispositifs, composés d'une succession de couches de caoutchouc naturel et d'inserts en acier, sont définis comme des isolateurs en élastomère de caoutchouc naturel. Le caoutchouc procure une résilience permettant aux éléments de se déplacer sous contrainte et de revenir à leur état initial après déformation. Si, après une perturbation sismique, la structure ne reprend pas de manière autonome sa configuration d'origine, l'isolateur en caoutchouc naturel intervient pour faciliter le retour progressif à l'état initial. Cette correction peut nécessiter plusieurs mois, mais garantit la restauration de la position originelle de la structure.

#### 3.2.1.2. Isolateur en caoutchouc synthétique :

Quand un isolateur sismique se compose d'une alternance de néoprène, un type de caoutchouc synthétique, et de plaques d'acier, il est identifié comme un isolateur en caoutchouc synthétique. Cette variante d'isolateur est moins couramment adoptée comparée à ceux faits de caoutchouc naturel ou intégrant du plomb, en raison de la supériorité des caractéristiques de ces derniers dans les systèmes d'isolation contre les séismes

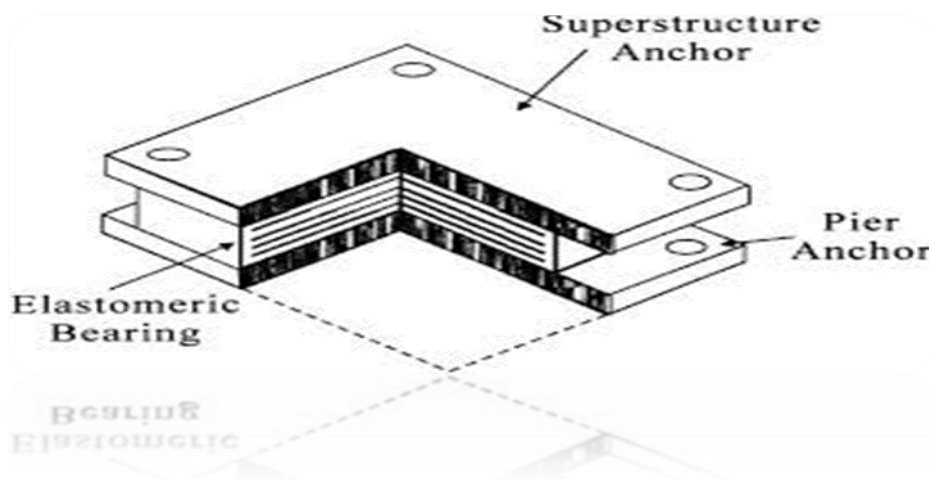
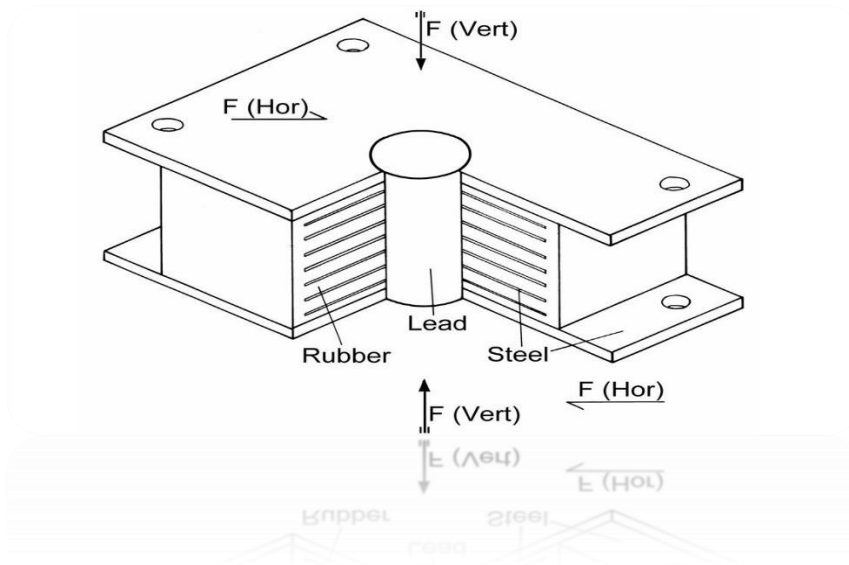


Figure 2 : Appui en caoutchouc synthétique

#### 3.2.1.3. Isolateur en caoutchouc avec noyau de plomb :

Un bâtiment ou une structure, incluant à la fois la masse propre de la construction et celle des occupants, peut être sujet à des oscillations en réponse à de forts mouvements du sol durant un séisme. Afin de contrôler ces mouvements et d'absorber l'énergie sismique, des noyaux de

plomb sont intégrés dans les isolateurs sismiques. Ces noyaux exploitent les propriétés plastiques du plomb, qui, lorsqu'il est déformé par un séisme, peut non seulement absorber l'énergie cinétique en la transformant en chaleur mais aussi retrouver sa forme initiale. Ce mécanisme de dissipation d'énergie rend l'isolateur en caoutchouc-plomb essentiel pour minimiser les impacts des tremblements de terre sur les structures.



**Figure 3 :** Appui en caoutchouc laminé avec noyau de plomb

### 3.2.2. Systèmes de glissement et isolateurs à pendule frictionnel :

Ces systèmes d'isolation sismique utilisent la technique du glissement pour créer une faible rigidité horizontale. Leur fonctionnement repose sur l'amortissement de Coulomb, ou friction, qui se produit à l'interface de glissement pour dissiper l'énergie. Les isolateurs à pendule frictionnel se caractérisent par un élément mobile, posé sur une surface sphérique en acier inoxydable. Cette configuration permet d'obtenir une force de réaction latérale dérivée de la courbure de la surface, avec une relation linéaire entre la force et le déplacement pour des mouvements latéraux restreints par rapport au rayon de la surface. Selon la forme de l'élément mobile, les isolateurs à pendule sont catégorisés en modèles avec élément plat ou élément incurvé.

#### 3.2.2. 1. Isolateur à pendule avec élément plat :

Ce modèle, qui repose sur un principe de friction pure, utilise des surfaces planes en acier inoxydable pour faciliter le mouvement de glissement. Cependant, sa conception est limitée par la géométrie de la surface de glissement, ce qui peut conduire à d'importants déplacements

résiduels. À l'opposé, l'isolateur à pendule frictionnel, qui adopte le principe du mouvement pendulaire, élimine ces défauts de manière efficace.

### 3.2.2. 2. Isolateur à pendule avec élément incurvé :

Basé sur le même principe pendulaire, cet isolateur permet à l'élément mobile de se déplacer le long d'une surface sphérique concave lors d'un séisme, réduisant ainsi le déplacement de la structure. La force gravitationnelle aide ensuite l'élément à retrouver sa position d'origine, limitant les déplacements résiduels. Cette conception surpasse les limitations des modèles à élément plat, offrant une meilleure atténuation des mouvements sismiques.

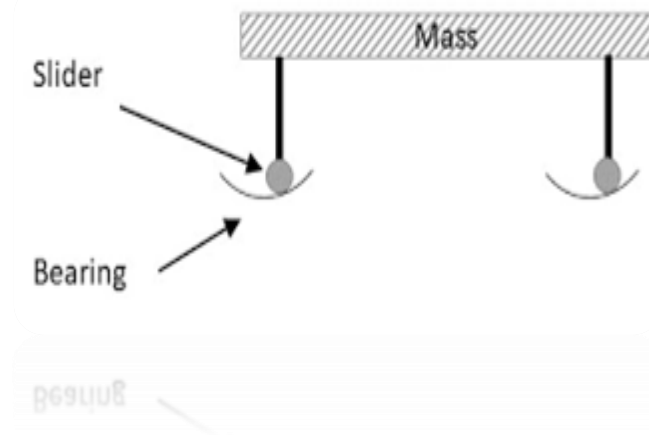


Figure4 :appui à pendule avec élément incurvé

### 3.2.3. Systèmes hybrides d'isolation de base :

Dans l'approche système hybride d'isolation sismique, l'association d'isolateurs coulissants et d'isolateurs en caoutchouc stratifié permet d'accroître la période de résonance des structures isolées jusqu'à 4 ou 5 secondes. Cet allongement de la période naturelle est principalement dû à la contribution de la rigidité des isolateurs en caoutchouc stratifié, particulièrement lorsque les isolateurs coulissants sont sollicités lors de tremblements de terre. Cette solution est donc particulièrement adaptée pour les bâtiments de haute taille ou à structure élancée, qui ne bénéficieraient pas pleinement des systèmes d'isolation classiques reposant uniquement sur des isolateurs en caoutchouc stratifié, limitant la période de résonance à environ 3 secondes. Lors de l'application de cette technologie d'isolation à ces types de structures, il est impératif d'évaluer soigneusement la stabilité du système face aux moments de basculement et sa capacité à fournir une isolation efficace dans le cas de sollicitations sismiques sévères, susceptibles de causer des soulèvements et des tensions dans les éléments d'isolation[17.18.19.20.21.22].



### 3.3. Les avantages et limitations de l'isolation de base :

#### 3.3.1. Les avantages :

- Cette technique isole la structure des mouvements du sol, réduisant ainsi les mouvements de la structure pendant un séisme et empêchant l'absorption d'énergie par la structure.
- Elle est particulièrement efficace pour les bâtiments de hauteur moyenne et les sols durs.
- Cependant, elle n'est pas appropriée pour certains types de bâtiments très hauts.
- Offre une protection efficace des structures face aux séismes extrêmes, sans compromettre leur performance lors de séismes modérés, qui sont plus fréquents.
- À la différence des méthodes conventionnelles de construction antisismique, où la structure peut résister au séisme mais risque de ne pas être fonctionnelle après un événement sismique majeur, l'isolation de base prévient non seulement les dommages importants dus aux séismes mais assure aussi le maintien de la fonctionnalité du bâtiment, permettant ainsi sa réutilisation immédiate après le séisme.
- Un atout majeur de cette technologie est sa capacité à être employée dans la rénovation parasismique de structures existantes, y compris les édifices historiques, les musées, etc. Étant donné que les bâtiments historiques sont souvent de faible hauteur, massifs, avec une période naturelle de vibration basse, l'utilisation de l'isolation de base représente une méthode très efficace pour améliorer leur comportement dynamique[23.24.25].

#### 3.3.2. Limitations :

- Bien que l'isolation de base contribue à minimiser les forces sismiques en prolongeant la période de vibration des structures, elle n'est pas universellement applicable à tous les types de bâtiments. En particulier, les structures de grande hauteur et celles construites sur des sols mous ne sont pas idéales pour l'application de cette technologie, contrairement aux édifices de petite ou moyenne hauteur érigés sur des sols fermes.
- La mise en œuvre de l'isolation de base dans la construction de nouveaux bâtiments présente un coût initial plus élevé comparé aux systèmes structurels traditionnels résistants aux séismes. De plus, en raison de leur prix, les dispositifs d'isolation sismique restent une option majoritairement réservée aux projets d'envergure dans les pays développés.
- Les terrains composés de sols mous posent un défi pour les structures isolées. En cas de défaillance des isolateurs, notamment ceux à base de plomb, la période naturelle de la structure peut coïncider avec celle des ondes sismiques dominantes, ce qui risque

d'amplifier les effets du séisme. Une attention particulière est donc nécessaire lors de la conception de systèmes d'absorption et d'isolation pour ces terrains.

- La nécessité de tester chaque prototype d'isolateur augmente les coûts globaux du projet. Il devient crucial de développer et de standardiser les procédures de test pour évaluer efficacement les performances des dispositifs d'isolation.

#### **4. Interaction Sol-Structure (SSI) :**

L'interaction sol-structure est l'un des concepts fondamentaux en génie des structures et des fondations. Comprendre comment les bâtiments interagissent avec le sol sur lequel ils reposent est crucial pour assurer la stabilité et les performances des structures. Cette relation entre le sol et la structure représente un défi d'ingénierie complexe qui nécessite une étude approfondie et une analyse avancée pour garantir la conception de structures sûres et durables.

##### **4.1. Vue d'ensemble de la SSI et son importance dans la réponse sismique :**

L'analyse de l'interaction sol-structure (SSI) est fondamentale en génie parasismique, évaluant comment les structures, leurs fondations et le milieu géologique environnant répondent collectivement aux mouvements du sol spécifiés. Cette analyse est cruciale pour comprendre l'écart entre la réponse réelle et la réponse théorique en supposant une fondation rigide sur un sol rigide, ce que l'on appelle la condition "de champ libre".

Dans le FEMA P-750, les effets de l'ISS sont classés en trois catégories principales : les effets d'interaction inertielle, les effets d'interaction cinématique et les effets de flexibilité sol-fondation. Ces effets, introduits par Robert Whitman en 1975, sont cruciaux dans l'analyse et la conception en génie parasismique,

L'importance de l'interaction sol-structure (SSI) ne peut être surestimée, notamment en matière de conception parasismique. Les structures analysées en tenant compte de la SSI présentent une plus grande flexibilité, ce qui entraîne des périodes naturelles plus longues et des taux d'amortissement accrus. Par conséquent, cela se traduit par une réduction de la force de base par rapport aux structures avec des bases fixes. Malgré ces avantages, la SSI a souvent été négligée par les ingénieurs structurels en raison des complexités qu'elle introduit dans le processus d'analyse.

Cependant, les leçons tirées des événements sismiques tels que le séisme de San Fernando en 1971 et le séisme de Loma Prieta en 1989 dressent un tableau différent. Des études, comme celle menée par Badry et al., analysant les effets de la SSI sur des bâtiments asymétriques supportés sur des radiers pieux endommagés lors du séisme du Népal en 2015, révèlent que

les effets néfastes de la SSI peuvent s'aggraver avec l'asymétrie de la géométrie de la superstructure. De même, Ray Chowdhury a souligné le potentiel de tassement différentiel dû à la flexibilité du sol dans les cadres de bâtiments en acier de faible hauteur résistants aux moments, en particulier sous de lourdes charges, ce qui rend nécessaire une prise en compte prudente de la SSI pour atténuer les effets inertiels élevés.

Abordant l'influence de la SSI dynamique sur la réponse inélastique des bâtiments à ossature résistante aux moments, la recherche de Saez et al. a mis en évidence des effets remarquables, notamment dans les sables entièrement saturés où la pression interstitielle augmente. Cela souligne l'importance des conditions spécifiques au site dans l'évaluation de la pertinence de la SSI. Contrairement aux structures élastiques, la SSI peut amplifier les exigences de ductilité et les déplacements totaux dans les structures inélastiques, qui sont attendus lors de séismes graves, indiquant des lacunes dans les dispositions parasismiques actuelles.

Pour relever ces défis, des approches telles que celle proposée par Jarernprasert S. et al., qui intègrent la SSI en modifiant les coefficients de conception parasismique pour atteindre une ductilité cible, sont cruciales. Malgré les efforts de recherche importants, l'incorporation de la SSI dans la conception structurale réelle reste rare en raison de dispositions insuffisantes dans les codes parasismiques standards. Il est donc urgent de développer des procédures simplifiées mais précises pour analyser les problèmes de SSI afin d'assurer des structures plus sûres et plus résilientes dans les régions sismiques [26.27].

#### **4.2 Types d'effets de la SSI et leurs implications pour la conception structurale**

Les effets cinématiques et inertiels sont des phénomènes clés qui influencent la réponse sismique des structures en interaction avec le sol et la fondation

##### **4.2.1. Les effets cinématiques :**

Les effets cinématiques sont liés aux modifications de la propagation des ondes sismiques résultant de changements dans la densité et l'élasticité du milieu. Cela modifie la vitesse de propagation des ondes et entraîne la réflexion et la réfraction des ondes sismiques entrantes. Ces effets représentent la modification de la réponse de la structure lorsqu'elle est soumise à des mouvements de champ libre et que la présence de la structure est prise en compte. Contrairement aux effets inertiels, les effets cinématiques ne dépendent pas de la masse de la structure, mais sont influencés par la géométrie et la configuration de la structure, l'enfouissement de la fondation, la composition des ondes incidentes du champ libre et l'angle

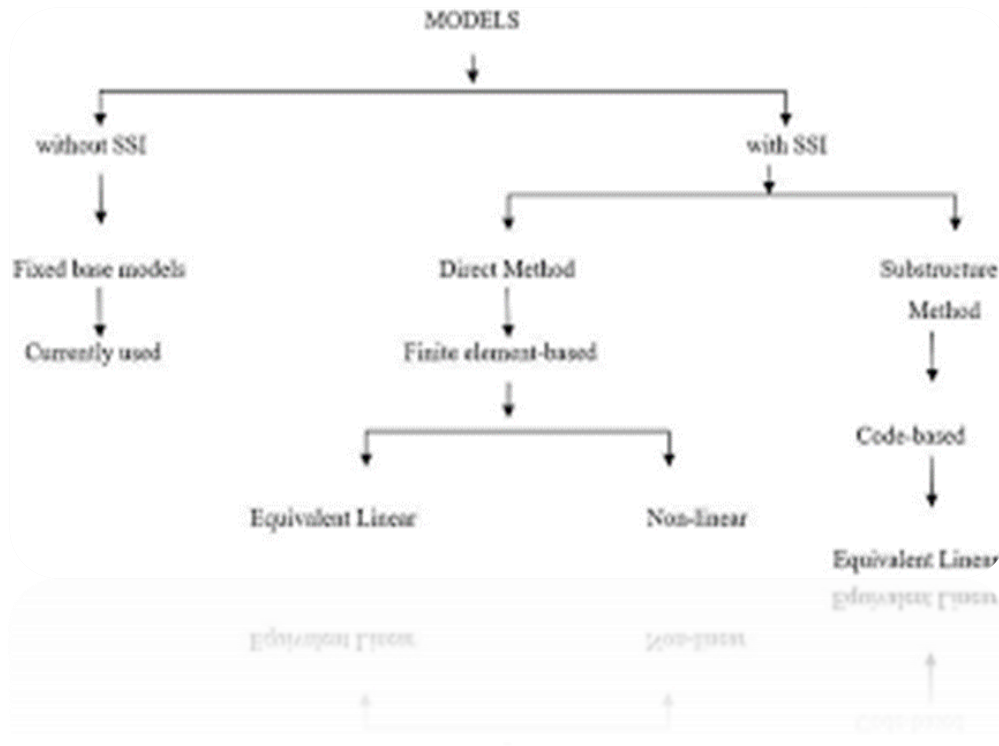
d'incidence de ces ondes. Ils peuvent être négligés pour les structures sans enfouissement excitées par des ondes de cisaillement se propageant verticalement.

#### 4.2.2. Les effets inertiels

Les effets inertiels résultent du comportement dynamique combiné de la structure, de la fondation et du milieu de sol de support. Ils se produisent lorsque la masse de la structure et de la fondation produit une inertie due à l'accélération pendant un séisme. Ces forces tentent de déplacer le sol sous la structure, entraînant des déplacements et des rotations à l'interface entre le milieu du sol et la fondation. Les propriétés élastiques et inertielles du sol permettent à la structure de dissiper l'énergie des ondes sismiques entrantes en irradiant les ondes loin de la structure et en induisant une déformation hystérétique du milieu de sol de support. L'effet inertiel dépend de la flexibilité relative du milieu de sol de support par rapport à la structure. Il n'est pas significatif pour les structures régulières fondées sur des sols rigides ou de la roche, mais peut être significatif pour les structures rigides et massives[28.29].

#### 4.3. Méthodes d'analyse des effets de la SSI

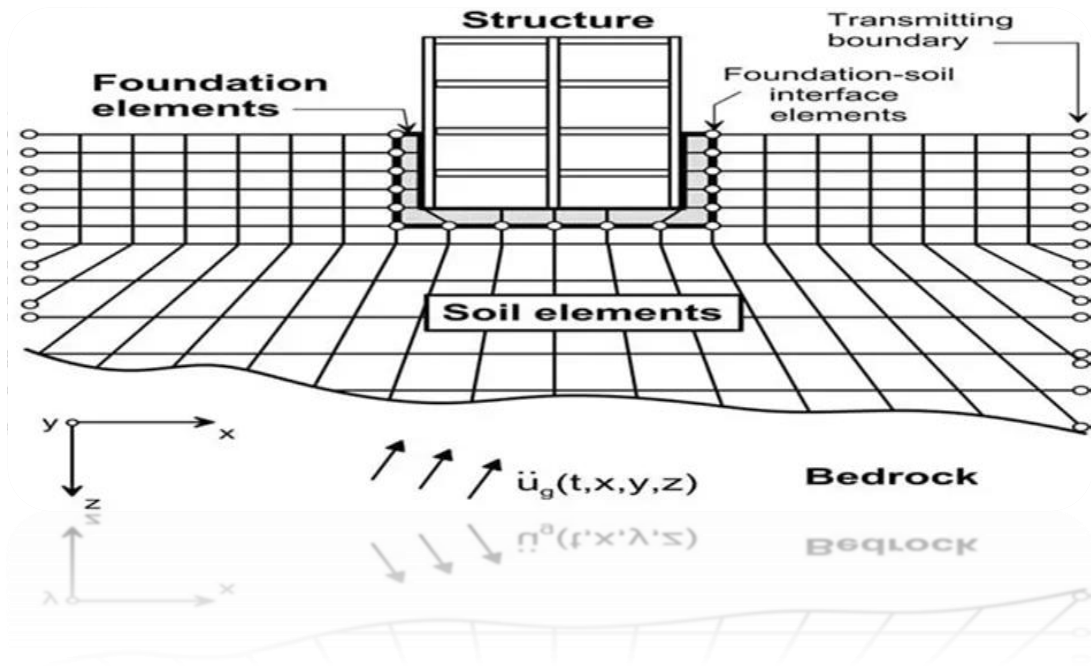
L'analyse des problèmes d'interaction sol-structure a évolué avec le temps, passant des méthodes analytiques aux procédures expérimentales puis aux méthodes numériques. Les chercheurs ont classé les méthodes en fonction du comportement du sol et de la structure ainsi que des conditions aux limites. L'utilisation de techniques numériques s'est révélée la plus précise en raison de sa capacité à intégrer divers aspects des SSI, tels que les conditions matérielles, l'anisotropie du stress et les changements dans la géométrie du sol. La nature linéaire ou non linéaire du sol est prise en compte, avec des méthodes d'analyse différenciées en domaine temporel et fréquentiel. Les méthodes en domaine fréquentiel sont souvent préférées pour leur accessibilité. Les différentes méthodes de modélisation de la structure avec SSI sont illustrées dans la figure 5.



**Figure 5** : Les différentes méthodes de modélisation de la structure avec SSI

#### 4.3.1. La Méthode direct :

La méthode directe est une approche utilisée dans l'analyse de l'interaction sol-structure où le sol et la structure sont modélisés ensemble en une seule étape, prenant en compte à la fois l'interaction inertielle et cinématique. Dans cette méthode, le sol est inclus dans le système pour la modélisation et l'analyse, et est représenté comme un continuum sous forme d'éléments finis. La méthode directe prend en compte les interactions inertielles qui se développent dans la structure en raison de ses propres vibrations, générant ainsi des efforts tranchants et des moments à la base, ce qui provoque des déplacements de la fondation par rapport au champ libre. Elle prend également en compte les interactions cinématiques qui se produisent en présence d'éléments de fondation rigides sur ou dans le sol, provoquant des mouvements de la fondation qui diffèrent des mouvements en champ libre. En résumé, la méthode directe vise à modéliser et à analyser simultanément l'interaction entre le sol et la structure en une seule étape, prenant en compte à la fois les interactions inertielles et cinématiques.

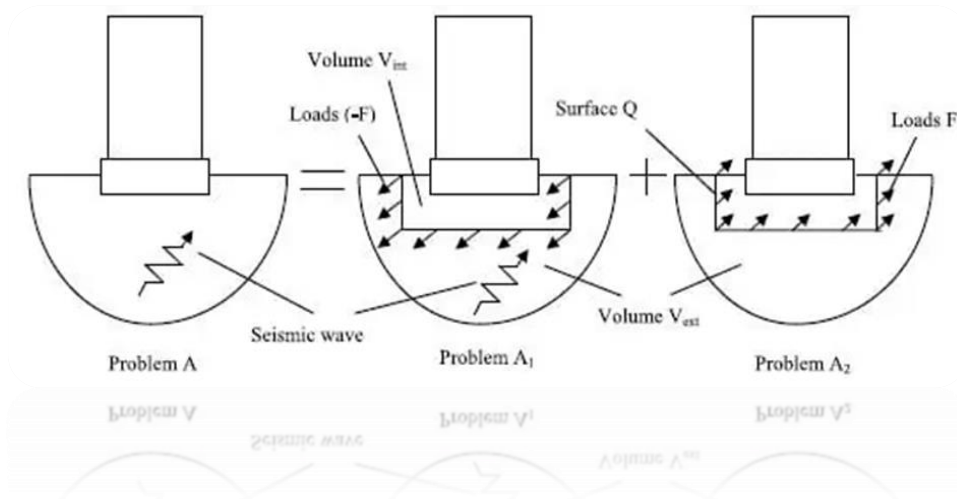


**Figure 6 :** Illustration de l'Analyse Directe de l'Interaction Sol-Structure à l'aide des Éléments Finis

#### 4.3.2. La méthode sous-structure :

La méthode de sous-structure est une approche d'analyse de l'interaction sol-structure qui divise le problème en différentes parties pour former une solution. Elle évalue les composantes cinématiques à l'aide de fonctions de transfert et les composantes inertielles à l'aide de fonctions d'impédance. Les principales étapes de cette méthode comprennent le calcul des mouvements du sol en champ libre et de leurs propriétés, la détermination de la fonction de transfert pour convertir le mouvement en champ libre en mouvement d'entrée de fondation, l'incorporation d'éléments non linéaires tels que des ressorts et des amortisseurs représentant les propriétés du sol à l'interface sol-fondation, et enfin l'analyse dynamique de l'ensemble du système sol-structure en considérant le mouvement d'entrée de fondation. En résumé, la méthode de sous-structure est une approche systématique pour comprendre et résoudre les problèmes d'interaction entre le sol et la structure en les divisant en parties

Distinctes et en les traitant séparément [30.31.32].



**Figure 7** : La division d'un problème a par superposition - Approche de sous-structure

#### 4.3.3.. approches empiriques :

##### 4.3.3.1. Approches basées sur l'expérience :

- Les chercheurs utilisent l'expérience et les connaissances acquises à partir d'expériences antérieures et d'observations sur le terrain pour analyser et comprendre le comportement de l'interaction sol-structure.
- Cette approche repose sur les données empiriques disponibles pour estimer les effets de l'interaction entre la structure et le sol, tels que les charges dynamiques ou les effets sismiques.
- En menant des expériences sur une table vibrante avec différents types de contenants (rigides, flexibles), les chercheurs acquièrent une expérience pratique et des observations empiriques sur la manière dont le sol et les structures interagissent dans des conditions sismiques.

##### 4.3.3.2. Approches semi-empiriques :

- L'utilisation d'expériences sur une table vibrante, combinée à des simulations numériques (telles que la méthode des éléments finis - FEM), constitue une approche semi-empirique.
- Les chercheurs combinent les données empiriques obtenues à partir d'expériences pratiques avec des modèles analytiques ou numériques simplifiés pour analyser et prédire le comportement des systèmes sol-structure.
- En comparant les résultats des expériences sur la table vibrante avec les simulations numériques, les chercheurs valident et affinent leurs modèles analytiques, ce qui donne

des approches semi-empiriques offrant un équilibre entre les observations expérimentales et les prédictions théoriques.

- Ces approches empiriques aident les chercheurs à obtenir des perspectives pratiques sur le comportement complexe de l'interaction sol-structure, ce qui leur permet de développer et de valider des modèles analytiques et des méthodes de conception[33.34.35.36.37.38].

## **5. Effets Combinés de l'Isolation de Base et de la SSI sur la Réponse Sismique**

Les édifices et les structures subissent les forces destructrices des séismes, pouvant entraîner d'importants dégâts et des pertes en vies humaines. Afin d'améliorer leur résilience sismique, diverses approches ont été élaborées, y compris l'isolation de base et l'interaction sol-structure. Cette étude cherche à saisir les impacts combinés de l'isolation de base et de l'interaction sol-structure sur la réaction des structures aux séismes, ainsi que les méthodes pour accroître leur performance et les défis posés par leur intégration à l'analyse de l'interaction sol-structure.

### **5.1. Interaction entre les systèmes d'isolation de base et l'interaction sol-structure**

L'interaction entre les systèmes d'isolation de base et l'interaction sol-structure fait référence à l'influence combinée de ces deux facteurs sur la réponse sismique des structures. Les systèmes d'isolation de base sont conçus pour découpler le mouvement du sol de la structure, réduisant ainsi la transmission des forces sismiques. D'autre part, l'interaction sol-structure prend en compte les caractéristiques du sol et son interaction avec la structure. Lorsque ces deux facteurs sont combinés, l'objectif est de limiter les forces sismiques et les déplacements relatifs dans la superstructure, réduisant ainsi les dommages structurels lors des événements sismiques. Cette approche combinée vise à améliorer les performances sismiques des structures et à atténuer l'impact des séismes. L'intégration de l'isolation de base avec l'analyse de l'interaction sol-structure est cruciale pour atteindre ces objectifs.

### **5.2. Revue des études examinant les effets combinés :**

#### **5.2.1. Améliorations de la performance sismique :**

La littérature existante offre un large éventail de perspectives sur l'interaction entre le sol et la structure dans le contexte de l'isolation sismique. Giarlelis [33].

et ses collègues ont conclu que le choix d'un type spécifique d'isolation de base était nécessaire pour traiter l'effet de l'interaction entre le sol et la structure dans la conception d'un



centre culturel, notant que l'utilisation d'isolateurs à pendule de friction était efficace pour réduire les effets néfastes de cette interaction. De même, Manolis et Markous [34] ont conclu que l'efficacité de l'isolation de la base dépendait du type de sol sur lequel la structure reposait. Cette relation entre les isolateurs sismiques et les conditions du sol a été explorée par Zhenxia et Haiping [35], qui ont trouvé que le comportement des isolateurs sismiques était étroitement lié aux conditions du sol. Alavi et Alidoost [36] ont estimé que les effets de l'interaction sol-structure sur les structures isolées sismiquement avaient un impact significatif sur la réponse sismique, en particulier pour les structures situées sur des sols mous. Karabörk [38] et ses collègues ont montré que l'interaction entre le sol et la structure était un élément clé dans le choix d'un isolateur approprié pour les structures isolées sur des sols mous. Kelly [39] a conclu que l'augmentation de la période du système d'isolation dans le sol mou était bénéfique pour les performances sismiques. En revanche, Ashiquzzaman et Hong [40] ont souligné que les effets de l'interaction sol-structure pouvaient être insignifiants dans les bâtiments de grande hauteur mais significatifs dans les structures plus rigides. Tsai et ses collaborateurs ont trouvé des résultats divergents sur l'effet de l'isolation de la base sur les modes de réponse des structures en fonction des caractéristiques du sol. Spyrakos [41.42] et ses collègues ont montré que l'interaction sol-structure modifie les propriétés de fréquence du système base-isolation-structure-fondation. Du et al [43]. ont suggéré que l'interaction sol-structure pourrait augmenter la contribution des modes supérieurs dans les structures de grande hauteur. Deb [46] a conclu que la flexibilité des isolateurs par rapport au sol détermine les effets de l'interaction sol-structure. Novak et Henderson [47] ont souligné l'importance de l'interaction sol-structure dans l'analyse des caractéristiques modales des bâtiments. Tongaonkar et Jangid [48] ont indiqué que les effets de l'interaction sol-structure dans les ponts isolés peuvent être favorables et entraîner des économies de coûts. Dicleli et ses collègues ont souligné que l'effet de l'interaction sol-structure devrait être pris en compte dans les ponts construits sur des sols mous. Enfin, Aden [49] et ses collaborateurs ont trouvé que l'interaction sol-structure pouvait réduire les performances des isolateurs sismiques, rendant les structures plus sensibles aux impacts sismiques. En résumé, ces études mettent en évidence l'impact significatif de l'interaction sol-structure sur les performances sismiques des structures, soulignant l'importance de prendre en compte l'isolation de la base dans la conception et la construction, en particulier pour les structures situées sur des sols mous ou exposées à des risques sismiques.

### 5.2.2. Défis et considérations dans l'intégration de l'isolation de base avec l'analyse de la SSI

La revue de littérature met en lumière divers aspects cruciaux de l'intégration de l'isolation de base avec l'analyse de l'interaction sol-structure (ISS). Giarelis et al. ont identifié les sables limoneux pauvres comme un défi pour l'isolation sismique, notant l'efficacité des isolateurs à pendule de friction pour atténuer les effets défavorables de l'ISS. Manolis et Markous ont souligné l'importance de prendre en compte à la fois l'ISS et la BI dans la conception, soulignant la dépendance de l'efficacité de l'isolation de base au type de sol. Zhenxia et Haiping ont affirmé l'influence des conditions du sol sur le comportement des isolateurs sismiques, soulignant la nécessité de tenir compte de l'ISS dans la conception. Alavi et Alidoost ont démontré que l'ISS impacte la réponse des structures isolées, en particulier dans les sols mous, affectant les périodes fondamentales et les déplacements. Karabörk et ses collègues ont mis l'accent sur l'importance de l'ISS dans la sélection d'isolateurs appropriés pour les structures sur sols mous, en utilisant des modèles dynamiques pour comparer les structures isolées et à base fixe. Kelly a suggéré d'augmenter la période des systèmes d'isolation dans les sols mous pour améliorer les performances. Ashiquzzaman et Hong ont souligné l'impact insignifiant de l'ISS dans les bâtiments de grande hauteur mais ont noté sa signification dans la modification des attributs modaux, en particulier dans les structures plus rigides. Tsai et al. ont mis l'accent sur le rôle de la flexibilité du sol et de l'amortissement de rayonnement dans la performance des systèmes d'isolation de base contre l'énergie sismique, l'ISS affectant les propriétés de fréquence du système de structure-isolation-base. Deb a associé les effets de l'ISS à la flexibilité des isolateurs, suggérant qu'une plus grande flexibilité par rapport au sol réduit l'impact de l'ISS. Novak et Henderson ont analysé les effets de l'ISS sur les bâtiments, en se concentrant sur les caractéristiques modales, notamment dans les fondations en tapis. Tongaonkar et Jangid ont identifié des effets favorables de l'ISS dans les ponts isolés, en particulier dans les ponts rigides avec des systèmes d'isolation rigides. Dicleli et ses collaborateurs ont souligné l'importance de prendre en compte l'ISS dans les sols mous pour les structures de ponts lourdes et légères. Enfin, Aden et ses collègues, dans une analyse numérique, ont conclu que l'ISS peut diminuer les performances des isolateurs sismiques, rendant les structures plus sensibles à l'impact sismique. Ces études soulignent l'importance cruciale de considérer les conditions du sol dans la conception sismique, mettant en avant les défis et les considérations de l'intégration de l'isolation de base avec l'analyse de l'ISS.

## 6. Défis Actuels et Lacunes de la Recherche

L'un des principaux défis dans la recherche et l'application actuelles des structures isolées à la base, en tenant compte de l'ISS, est le développement de modèles précis et réalisables sur le plan computationnel qui peuvent capturer les interactions non linéaires entre les isolateurs de base, la superstructure et le sol sous-jacent. Ces modèles doivent tenir compte de divers facteurs, notamment mais pas exclusivement, le comportement non linéaire du sol, l'inhomogénéité des couches de sol et l'interaction bidirectionnelle entre le sol et les systèmes d'isolation sous chargement sismique. La disparité entre les modèles théoriques et les applications du monde réel pose des défis significatifs, surtout dans le contexte de la variabilité mondiale de la sismicité et des conditions du sol [50].

### 6.1. Lacunes dans la littérature

Il existe un écart notable dans la littérature concernant les études empiriques à long terme et la collecte de données du monde réel sur les performances des structures isolées à la base en tenant compte des effets de l'ISS. La rareté des données détaillées sur les performances post-sismiques limite la capacité à valider les modèles et théories actuels, entravant ainsi l'avancement de lignes directrices de conception et de rénovation fiables pour ces systèmes complexes[48]. De plus, les effets synergiques de l'isolation de base et de l'ISS sur la réponse dynamique globale des structures restent insuffisamment explorés, notamment pour les zones à forte sismicité et les types de sol variés.

### 6.2. Domaines potentiels pour la recherche future

La recherche future devrait viser à combler ces lacunes en se concentrant sur le développement de modèles intégrés capables de prédire avec précision la réponse sismique des structures isolées à la base avec ISS sous divers scénarios de chargement sismique. Cela inclut l'incorporation de techniques d'apprentissage automatique et d'intelligence artificielle pour une meilleure prédiction et analyse des interactions complexes. De plus, il est nécessaire de collecter systématiquement et d'analyser des données empiriques provenant de structures isolées à la base affectées par des séismes pour valider et affiner les modèles théoriques. L'exploration de matériaux et de technologies innovants pour l'isolation de base, qui peuvent mieux s'adapter aux changements dynamiques induits par l'ISS lors d'événements sismiques, est également une direction de recherche prometteuse. Enfin, la mise à jour et la normalisation des lignes directrices de conception pour incorporer pleinement les considérations de l'ISS

seront essentielles pour l'adoption généralisée et l'efficacité des technologies d'isolation de base[55].



## Deuxième Partie : partie pratique

# Chapitre 02

Effet des propriétés dynamiques des dispositifs d'isolation à la base  
réponse sismique sans interaction sol-structure

## 1. Introduction

L'augmentation de la vulnérabilité des structures aux séismes constitue un défi majeur pour l'ingénierie sismique moderne. Les tremblements de terre peuvent causer des dommages considérables aux bâtiments, entraînant des pertes humaines et des coûts économiques importants. Pour atténuer ces risques, les dispositifs d'isolation à la base ont été largement adoptés comme une solution efficace pour protéger les structures contre les effets des séismes. Ces dispositifs, placés entre la structure et le sol, agissent comme des amortisseurs, absorbant l'énergie sismique et réduisant ainsi les forces transmises à la structure. L'efficacité des dispositifs d'isolation à la base dépend fortement de leurs propriétés dynamiques, notamment leur rigidité, leur amortissement et leur fréquence propre. Ces propriétés déterminent la manière dont les dispositifs interagissent avec la structure et le sol pendant un tremblement de terre, influençant ainsi la réponse sismique globale de la structure. Cette étude se concentre sur l'effet des propriétés dynamiques des dispositifs d'isolation à la base sur la réponse sismique des structures en acier de 8 étages. Analyse sans interaction sol-structure : Cette première phase permettra d'évaluer l'impact des propriétés dynamiques des dispositifs d'isolation sur la réponse sismique de la structure en acier, en négligeant l'influence du sol. Cette approche simplifiée permettra de mieux comprendre le comportement intrinsèque de la structure isolée et de mettre en évidence l'effet des propriétés des dispositifs d'isolation sur la réponse sismique. L'étude permettra de comprendre comment les propriétés dynamiques des dispositifs d'isolation à la base influencent la réponse sismique des structures en acier de 8 étages. Les résultats de l'analyse permettront d'identifier les paramètres clés à prendre en compte lors de la conception de systèmes d'isolation à la base pour des structures en acier, contribuant ainsi à la conception de structures plus résistantes aux séismes.

Cette étude permettra de mieux comprendre l'impact des propriétés dynamiques des dispositifs d'isolation à la base sur la réponse sismique des structures en acier de 8 étages, tant en l'absence qu'en présence d'interaction sol-structure. Les résultats de cette étude contribueront à la conception de structures plus résistantes aux séismes et à la protection des vies humaines et des biens.

## 2. Description de la structure étudiée et de l'isolateur parasismique

Cette étude paramétrique porte sur un cadre en béton armé auto-stable de grande hauteur (8 étages), isolé à la base par des isolateurs parasismiques de type LRB (Lead Rubber Bearing).

Tous les étages ont une hauteur de 3 m et la largeur de la travée est de 5 m pour chaque étage. La Figure 1 présente la configuration générale du portique étudié, y compris la section des poutres et des poteaux. Les charges permanentes et les charges d'exploitation sont uniquement considérées dans le scénario de charge gravitaire. Les charges permanentes et les charges d'exploitation agissant sur les poutres sont respectivement de 24,5 kN/m et 10 kN/m. Le portique est supposé avoir un taux d'amortissement propre de 5%. Le système LRB, utilisé pour l'isolation sismique à la base du portique auto-stable étudié, Il permet de limiter la transmission de l'énergie sismique du sol vers la structure en cas de séisme. Les dispositifs d'isolation sismique sont conçus pour fournir une élasticité horizontale post-élastique, tout en assurant la rigidité verticale en supportant le poids de la structure. Le comportement non linéaire du LRB est régi par les caractéristiques mécaniques et physiques de la couche de caoutchouc frette en avec barreau en plomb. La Figure 1 présente la configuration du LRB. La modélisation et l'analyse numérique ont été réalisées dans ETABS en utilisant la méthode d'intégration directe. Un élément de liaison commun, représentant un isolateur en caoutchouc, a été utilisé dans la modélisation du LRB. Cet élément a été assigné comme un élément de joint unique entre le sol et la superstructure, conformément à l'étude de Sarno et al. (2011) [52]. Tous les appuis ont été modélisés séparément pour l'analyse des bâtiments isolés. Le LRB est placé entre la fondation et le poteau du bâtiment. La propriété de liaison des isolateurs, considérée comme un élément de liaison d'isolateur en caoutchouc, a été utilisée pour la première fois par Park et al. (1986)[53].

Les dispositifs LRB sont constitués de couches alternées de caoutchouc et d'acier, avec un noyau en plomb au centre, comme illustré à la Figure 1. Cette configuration permet aux LRB de présenter des déplacements axiaux et transversaux tout en atténuant le transfert d'énergie sismique vers la superstructure. Cependant, l'efficacité des LRB dépend de nombreux paramètres, notamment les propriétés du noyau en plomb (Das et al., 2014)[53] et la rigidité du caoutchouc. De cette manière, un ensemble de systèmes d'isolation a été modélisé à l'aide du LRB en considérant différentes propriétés d'isolation, telles que la période d'isolation  $T$ , le coefficient d'amortissement effectif  $\beta$  et le rapport de rigidité post-élastique  $\lambda$ .





**Figure 8 :** La Figure 8 présente la configuration générale du portique ainsi que la représentation du dispositif LRB.

La surface du noyau en plomb,  $A_{lead}$  est calculée en fonction de la résistance caractéristique  $Q$  et de la limite d'élasticité  $\sigma_y$

$$A_{lead} = \frac{Q_D}{\sigma_y} \quad (1)$$

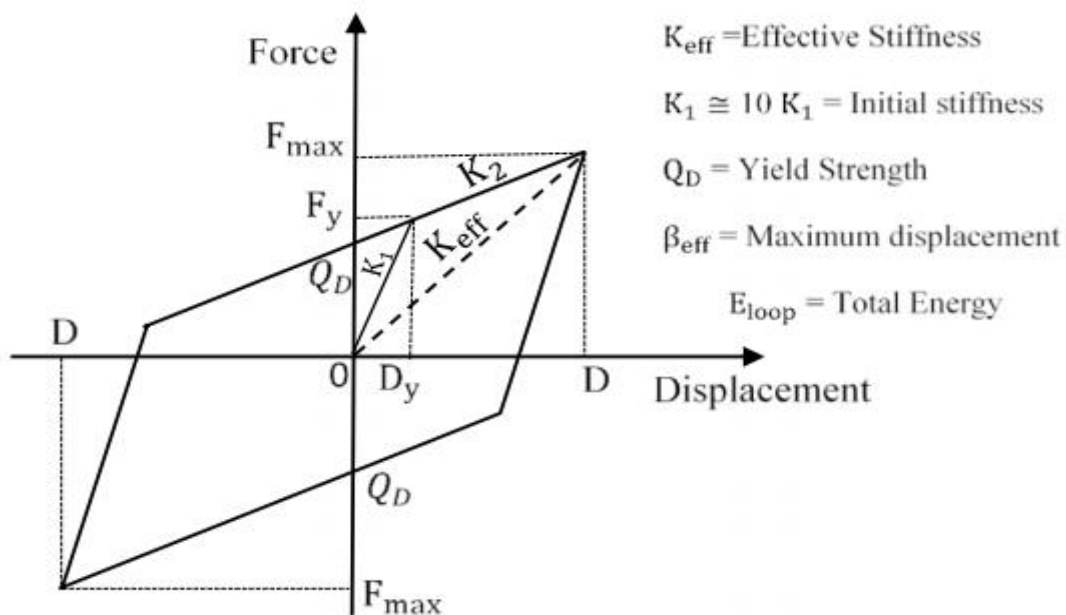
Le diamètre du noyau en plomb,  $d_{lead}$  est facilement déterminé à partir de sa surface.

$$d_{lead} = \left( \frac{4A_{lead}}{\pi} \right)^{1/2} \quad (2)$$

La Figure 9 illustre la boucle hystérétique bilinéaire du LRB, mettant en évidence des points spécifiques qui influencent ses caractéristiques. Le comportement hystérétique est caractérisé par : la rigidité effective,  $k_{eff}$

$$K_{eff} = \frac{W}{g} \left( \frac{2\pi}{T_D} \right)^2 \quad (3)$$

Où  $W$  représente la charge verticale totale sur l'isolateur,  $g$  est l'accélération due à la gravité (en  $m/s^2$ ) et  $T_D$  est la période de conception cible, qui peut être définie dès le début de la phase de conception.



**Figure 9: Comportement hystérétique des appuis en caoutchouc avec noyau en plomb (LRB)**

**L'énergie stockée dans un cycle ou une boucle,  $E$ .**

$$E_{loop} = 4(DF_y - FD_y) = 2\pi\beta_{eff}K_{eff}D^2 \quad (4)$$

Avec D représentant le déplacement calculé à partir de l'équation 9, mais qui ne doit pas dépasser  $D_M$  dans l'équation 10 ;  $F_y$  est la force d'écoulement exprimée en kN et calculée à partir de l'équation 7 ;  $D_y$  est le déplacement correspondant à l'écoulement, comme illustré à la Figure 8, et est obtenu à partir de l'équation 14. Au début de la conception, l'amortissement effectif est supposé ou calculé à partir de l'équation 13.

#### Résistance à la limite d'élasticité $Q_D$ (kN)

$$Q_D = \frac{E_{loop}}{4(D - D_y)} \quad (5)$$

$$K_2 = K_{eff} - \frac{Q_D}{D}$$

#### Rigidité post-élastique $K_2$ (kN/m)

(6)

#### Force d'écoulement $F_y$ (kN)

$$F_y = K_1 D_y$$

(7)

Où  $K_1$  représente la rigidité initiale de l'isolateur de base, qui peut être considérée comme étant environ 10 fois supérieure à la rigidité post-élastique. Amortissement effectif  $\beta_{eff}$

$$\beta_{eff} = \frac{E_{loop}}{2\pi K_{eff} D^2} \quad (8)$$

Conformément à l'ASCE-7 (2002), la conception du LRB commence par la détermination du déplacement minimal de conception  $D_D$  pour le niveau DBE et du déplacement maximal de conception  $D_M$  pour le niveau MCE du séisme, calculés à l'aide de la relation...

$$D_D = \frac{gS_{D_1} T_D}{4\pi^2 B_D} \quad (9)$$

$$D_M = \frac{gS_{M_1} T_M}{4\pi^2 B_M}$$

(10)

Où  $S_{D1}$  et  $S_{M1}$  sont les coefficients d'accélération liés aux conditions du site ;  $T_D$  et  $T_M$  sont les périodes minimale et maximale du  $B_D$  respectivement ; et  $B_M$  sont les facteurs de modification de l'amortissement respectivement au niveau du séisme de base de conception (DBE) et du séisme maximal considéré (MCE).

BehzadTalaie et al. (2021)[54] recommandent, conformément à l'ASCE-7 (2002)[55 ], que  $D_M = 1,5D_D$ , tandis que Reddy et al. (2019)[56 ] utilisent  $D_M = 2D_D$ . Le facteur de modification de l'amortissement ( $B_D$ ) est directement tiré du code ou calculé à partir de l'équation 11 si l'amortissement effectif  $\beta_{eff}$  est connu.

$$B_D = \frac{1}{\left(\frac{0.1}{0.05 + \beta_{eff}}\right)^{1/2}} \quad (11)$$

Selon l'AASHTO (2010)[62 ], le facteur de modification est noté  $B_L$  et s'exprime comme suit :

$$B_L = \left(\frac{B_{eff}}{0.05}\right)^{0.3} \leq 1.7 \quad (12)$$

La force d'écoulement  $F_y$  et le déplacement d'écoulement  $D_y$  du LRB s'expriment comme suit :

$$F_y = Q + K_2 D_y \quad (13)$$

$$D_y = \frac{Q}{K_1 - K_2}$$

(14)

Conformément à l'ASCE FEMA-356 (2000), le rapport de rigidité élastique pré-à-post-élasticité  $K1/K2$  des appuis en caoutchouc varie de 6,5 à 10. L'épaisseur totale de la couche de caoutchouc  $T_r$  est :

$$T_r = \frac{D_D}{\gamma} \quad (15)$$

Avec  $G$ , le module de cisaillement est pris comme étant approximativement 0,7 MPa, et son diamètre est calculé à partir de la surface.

$$n = \frac{T_r}{t}$$

(16)

$$t = \frac{d_{LRB}}{4S}$$

(17)

où  $n$  est le nombre de couches de caoutchouc ;  $d_{LRB}$  est le diamètre du LRB ;  $t$  est l'épaisseur d'une couche de caoutchouc ; et  $S$  est le facteur de forme calculé à partir de...

$$S = \frac{d_{LRB}^2 - d_{lead}^2}{4td_{LRB}}$$

(18)

La rigidité horizontale  $K_H$  et la rigidité verticale  $K_V$  de l'isolateur sont :

$$K_H = \frac{A_{LRB}}{t_r} G \quad (19)$$

$$K_V = \frac{A_{LRB}}{t_r} E_c \quad (20)$$

Avec  $E_c$ , le module de compression, s'exprime comme suit :

$$E_c = E(1 + KS^2) \quad (21)$$

$E$  est le module d'Young.

Dans ce travail, un modèle de portique en acier à base isolée a été généré pour évaluer les caractéristiques de l'isolateur LRB. Ce modèle a été étudié pour une structure de grande hauteur, avec des périodes d'isolation ( $T = 2, 2,5$  et  $3$  s), des taux d'amortissement effectif ( $\beta_{eff} = 0,1, 0,15, 0,20$  et  $0,30$ ) et des rapports de rigidité post-élastique ( $\lambda = 5, 7,5$  et  $10$ ).

Dans cette étude, une série d'isolateurs LRB conçus pour ce portique en acier, avec différents paramètres d'isolation caractérisés, ont été utilisés. La base de chaque poteau est supportée par

un LRB, qui est ancré à une fondation isolée. Le portique auto-stable à base isolée a été modélisé analytiquement à l'aide du logiciel ETABS. Ensuite, une analyse non linéaire par accélérogramme a été effectuée par des méthodes d'intégration directe. Les déformations et les forces d'inertie ont été calculées à partir des résultats d'analyse du portique examiné pour chaque séisme. Les différents paramètres des isolateurs LRB sont représentés suit ;

**Tableau 1** : Paramètres des isolateurs LRB

Les cas étudiés	A: Période d'isolation (s)	B: Rapport de rigidité ( $k_1/k_2 = \lambda$ )	C: Taux d'amortissement effectif ( $\beta_{eff}$ )	La rigidité	La rigidité effective $K_{eff}$ (KN/m)	la rigidité initiale $K_1$	force d'écoulement ( $F_y$ )
1	2	5	10	2768561.93	2768.56	11668.39	425.09
2	2.5	5	10	2214849.54	2214.85	9334.71	425.09
3	3	5	10	1845707.95	1845.71	7778.92	425.09
4	2	7.5	10	2768561.93	2768.56	17502.58	392.39
5	2.5	7.5	10	2214849.54	2214.85	14002.06	392.39
6	3	7.5	10	1845707.95	1845.71	11668.39	392.39
7	2	10	10	2768561.93	2768.56	23336.77	377.85
8	2.5	10	10	2214849.54	2214.85	18669.42	377.85
9	3	10	10	1845707.95	1845.71	15557.85	377.85
10	2	5	15	2768561.93	2768.56	10581.17	559.35
11	2.5	5	15	2214849.54	2214.85	8464.94	559.35
12	3	5	15	1845707.95	1845.71	7054.12	559.35
13	2	7.5	15	2768561.93	2768.56	15871.76	516.32
14	2.5	7.5	15	2214849.54	2214.85	12697.41	516.32
15	3	7.5	15	1845707.95	1845.71	10581.17	516.32
16	2	10	15	2768561.93	2768.56	21162.35	497.20
17	2.5	10	15	2214849.54	2214.85	16929.88	497.20
18	3	10	15	1845707.95	1845.71	14108.23	497.20
19	2	5	20	2768561.93	2768.56	9493.96	671.74
20	2.5	5	20	2214849.54	2214.85	7595.17	671.74
21	3	5	20	1845707.95	1845.71	6329.31	671.74
22	2	7.5	20	2768561.93	2768.56	14240.94	620.07
23	2.5	7.5	20	2214849.54	2214.85	11392.76	620.07
24	3	7.5	20	1845707.95	1845.71	9493.96	620.07
25	2	10	20	2768561.93	2768.56	18987.93	597.10
26	2.5	10	20	2214849.54	2214.85	15190.34	597.10
27	3	10	20	1845707.95	1845.71	12658.62	597.10
28	2	5	30	2768561.93	2768.56	7319.54	851.04
29	2.5	5	30	2214849.54	2214.85	5855.63	851.04
30	3	5	30	1845707.95	1845.71	4879.69	851.04

31	2	7.5	30	2768561.93	2768.56	10979.31	785.58
32	2.5	7.5	30	2214849.54	2214.85	8783.45	785.58
33	3	7.5	30	1845707.95	1845.71	7319.54	785.58
34	2	10	30	2768561.93	2768.56	14639.08	756.48
35	2.5	10	30	2214849.54	2214.85	11711.26	756.48
36	3	10	30	1845707.95	1845.71	9759.39	756.48

### 3- Excitations sismiques

L'accélération maximale du sol (PGA) caractérise de manière cohérente les enregistrements du mouvement sismique du sol, elle a été acceptée comme une mesure d'intensité. Trois séismes ont été utilisés comme entrées, provenant du Pacific Earthquake Engineering Research Centre (PEER) (2011). Les trois enregistrements du mouvement sismique du sol utilisés dans cette étude sont

- Kobe Japan, 1/16/1995, KJMA,
- Northridge-01, 1/17/1994, Rinaldi Receiving Sta,
- Chi-Chi Taiwan, 9/20/1999, TCU052,

La figure 3 représente les trois accélérogramme utilisés dans cette étude :

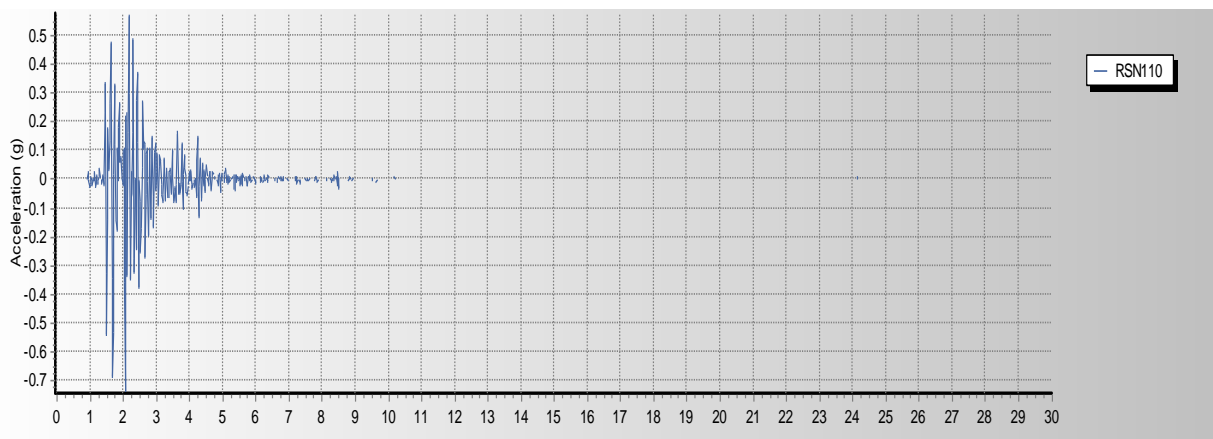


Figure 10 : présente l'enregistrement du mouvement sismique du sol de Kobe, Japon (KJMA).

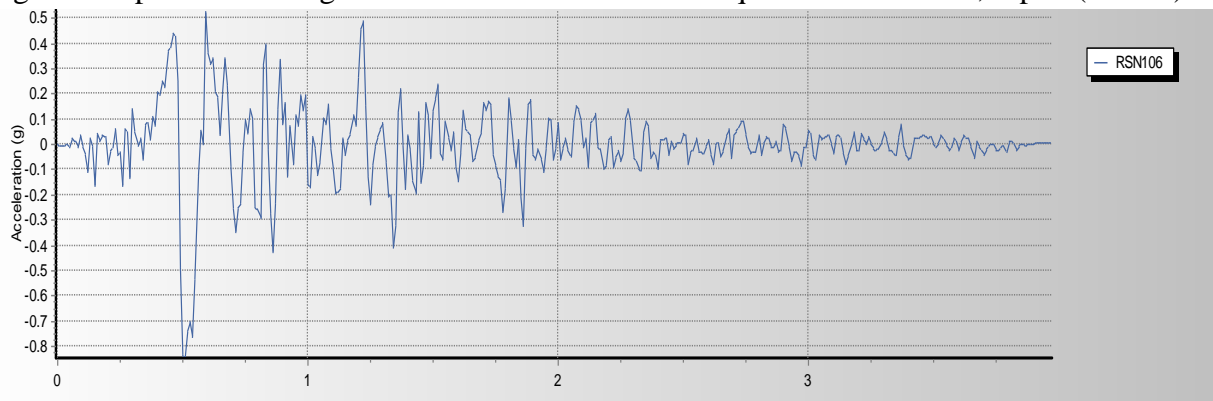


Figure 11: présente l'enregistrement du mouvement sismique du sol de Northridge-01, Rinaldi ReceivingSta (RRS)

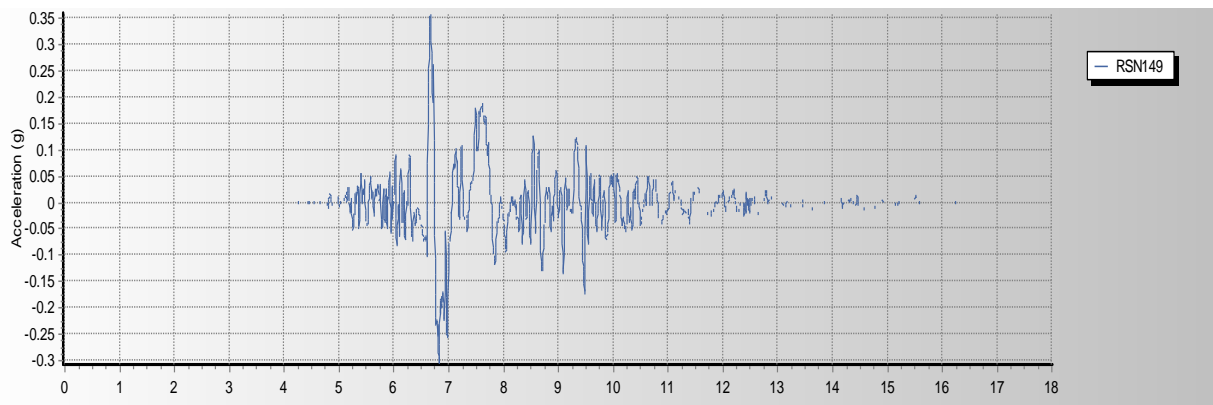


Figure 12 : présente l'enregistrement du mouvement sismique du sol de Chi-Chi Taiwan, (TCU052)

#### 4- Résultats et discussion

Les Figures 13,14et 15présentent les déplacements inter-étages en fonction de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base sous le séisme KOBE. Les comparaisons sont faites en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), du rapport de rigidité ( $\lambda = 5, 7.5, 10$ ), et avec un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .

##### - Cas 1 : Rapport de Rigidité $\lambda = 5$

Les déplacements inter-étages sont les plus élevés pour  $T_{eff} = 2$  et diminuent progressivement à mesure que  $T_{eff}$  augmente à 2.5 et 3. L'augmentation de la période effective réduit les déplacements inter-étages, indiquant une meilleure dissipation de l'énergie sismique. Les étages supérieurs montrent des déplacements plus importants, soulignant l'effet d'amplification sismique aux niveaux supérieurs de la structure.



- **Cas 2 : Rapport de Rigidité  $\lambda = 7.5$**

Les déplacements inter-étages augmentent par rapport au cas où  $\lambda = 5$ . Les tendances restent similaires, avec  $T_{eff} = 3$  réduisant les déplacements par rapport à  $T_{eff} = 2$ . Les déplacements inter-étages sont plus uniformes sur la hauteur de la structure comparée au cas de  $\lambda = 5$ .

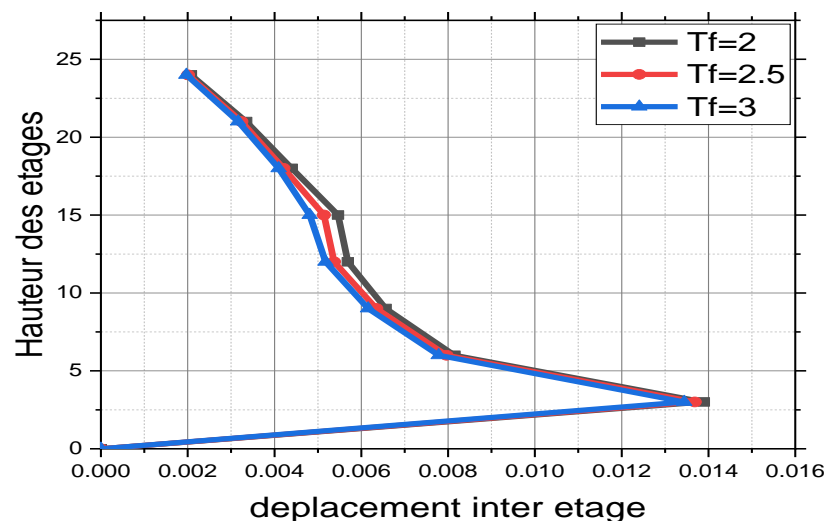
- **Cas 3 : Rapport de Rigidité  $\lambda = 10$**

Les déplacements inter-étages sont les plus élevés parmi les trois cas, indiquant une réduction de la rigidité structurelle. Une période effective plus longue ( $T_{eff} = 3$ ) continue de réduire les déplacements de manière significative. Les étages supérieurs montrent des déplacements relativement plus élevés, similaire aux autres cas mais amplifiés.

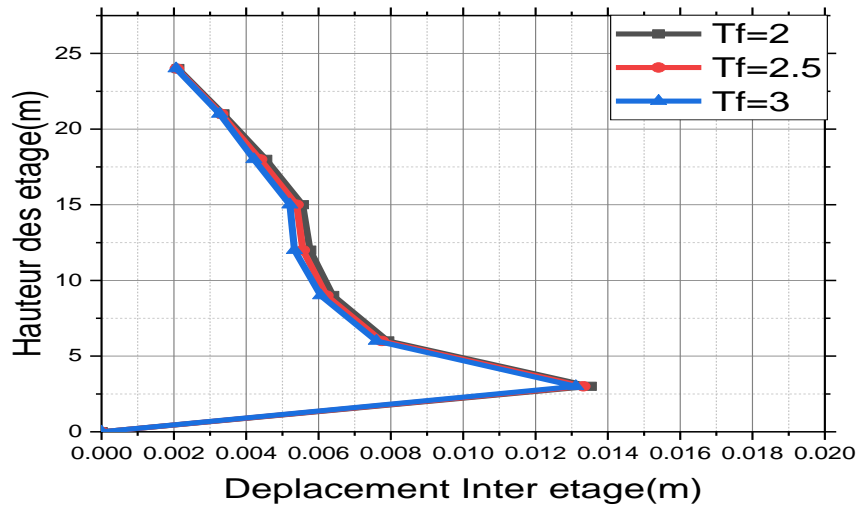
Pour minimiser les déplacements inter-étages sous le séisme KOBE, les valeurs optimales sont :

- Période Effective ( $T_{eff}$ ) : 3
- Rapport de Rigidité ( $\lambda$ ) : 5

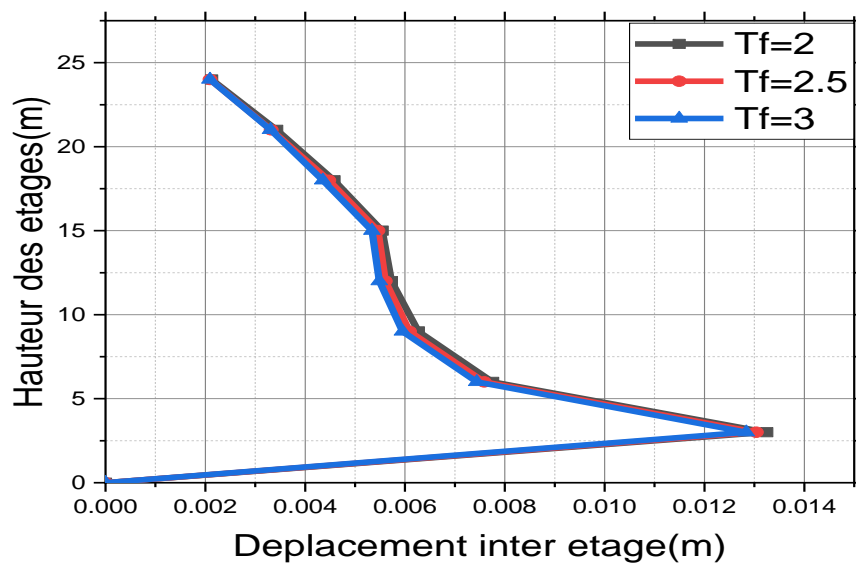
Ces paramètres combinés offrent une réduction significative des déplacements inter-étages, améliorant ainsi la performance sismique de la structure sous différents séismes.



**Figure 13 :** Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme KOBE, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 5$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .



**Figure 14 :** Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme KOBE, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 7.5$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .



**Figure 15 :** Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme KOBE, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 10$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .

Les Figures 16,17 et 18 présentent les déplacements inter-étages en fonction de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base sous le séisme RRS228. Les comparaisons sont faites en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), du rapport de rigidité ( $\lambda = 5, 7.5, 10$ ), et avec un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .

- **Cas 1 : Rapport de Rigidité  $\lambda = 5$**

Les déplacements inter-étages sont les plus élevés pour  $T_{eff} = 2$  et diminuent progressivement à mesure que  $T_{eff}$  augmente à 2.5 et 3. L'augmentation de la période effective réduit les déplacements inter-étages, indiquant une meilleure dissipation de l'énergie sismique. Les étages supérieurs montrent des déplacements plus importants, soulignant l'effet d'amplification sismique aux niveaux supérieurs de la structure.

- **Cas 2 : Rapport de Rigidité  $\lambda = 7.5$**

Les déplacements inter-étages augmentent par rapport au cas où  $\lambda = 5$ . Les tendances restent similaires, avec  $T_{eff} = 3$  réduisant les déplacements par rapport à  $T_{eff} = 2$ . Les déplacements inter-étages sont plus uniformes sur la hauteur de la structure comparée au cas de  $\lambda = 5$ .

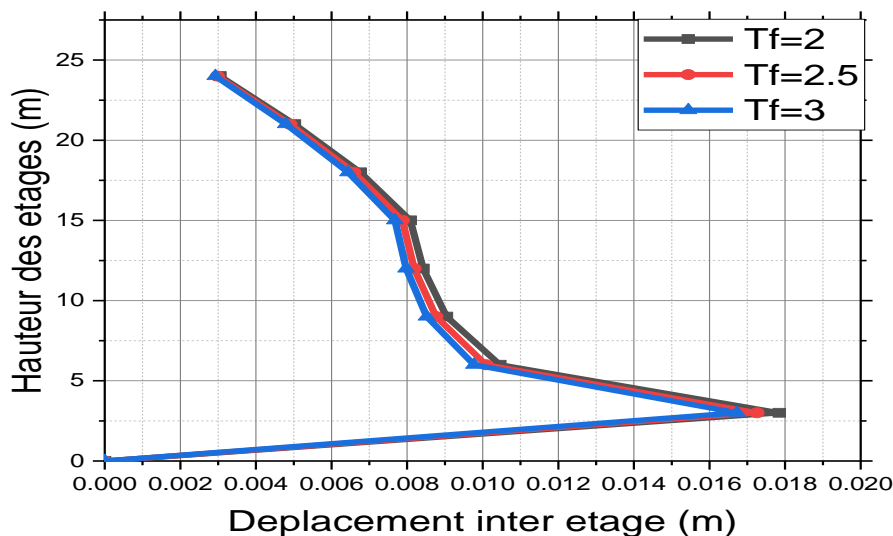
- **Cas 3 : Rapport de Rigidité  $\lambda = 10$**

Les déplacements inter-étages sont les plus élevés parmi les trois cas, indiquant une réduction de la rigidité structurelle. Une période effective plus longue ( $T_{eff} = 3$ ) continue de réduire les déplacements de manière significative. Les étages supérieurs montrent des déplacements relativement plus élevés, similaire aux autres cas mais amplifiés.

Pour minimiser les déplacements inter-étages sous le séisme RRS228, les valeurs optimales sont :

- Période Effective ( $T_{eff}$ ) : 3
- Rapport de Rigidité ( $\lambda$ ) : 5

Ces paramètres combinés offrent une réduction significative des déplacements inter-étages, améliorant ainsi la performance sismique de la structure sous différents séismes.



**Figure 16 :** Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme RRS228, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 5$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .

Les Figures 19, 20 et 21 présentent les déplacements inter-étages en fonction de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base sous le séisme TCU052. Les comparaisons sont faites en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), du rapport de rigidité ( $\lambda = 5, 7.5, 10$ ), et avec un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .

- **Cas 1 : Rapport de Rigidité  $\lambda = 5$**

Les déplacements inter-étages sont les plus élevés pour  $T_{eff} = 2$  et diminuent progressivement à mesure que  $T_{eff}$  augmente à 2.5 et 3. L'augmentation de la période effective réduit les déplacements inter-étages, indiquant une meilleure dissipation de l'énergie sismique. Les étages supérieurs montrent des déplacements plus importants, soulignant l'effet d'amplification sismique aux niveaux supérieurs de la structure.

- **Cas 2 : Rapport de Rigidité  $\lambda = 7.5$**

Les déplacements inter-étages augmentent par rapport au cas où  $\lambda = 5$ . Les tendances restent similaires, avec  $T_{eff} = 3$  réduisant les déplacements par rapport à  $T_{eff} = 2$ . Les déplacements inter-étages sont plus uniformes sur la hauteur de la structure comparée au cas de  $\lambda = 5$ .

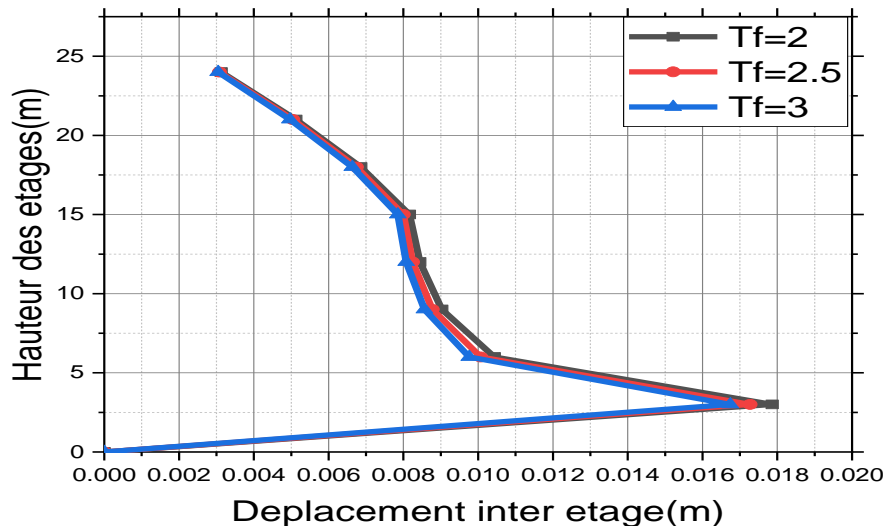
- **Cas 3 : Rapport de Rigidité  $\lambda = 10$**

Les déplacements inter-étages sont les plus élevés parmi les trois cas, indiquant une réduction de la rigidité structurelle. Une période effective plus longue ( $T_{eff} = 3$ ) continue de réduire les déplacements de manière significative. Les étages supérieurs montrent des déplacements relativement plus élevés, similaire aux autres cas mais amplifiés.

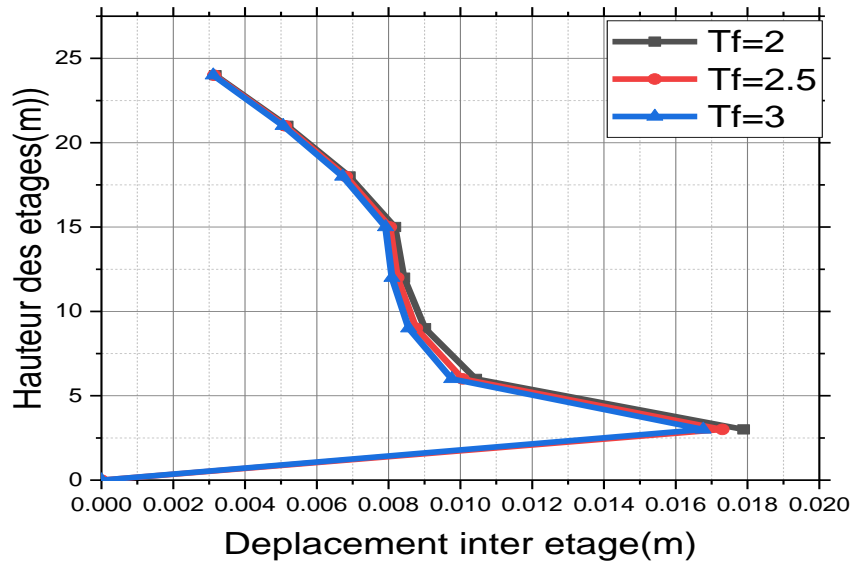
Pour minimiser les déplacements inter-étages sous le séisme TCU052, les valeurs optimales sont :

- Période Effective ( $T_{eff}$ ) : 3
- Rapport de Rigidité ( $\lambda$ ) : 5

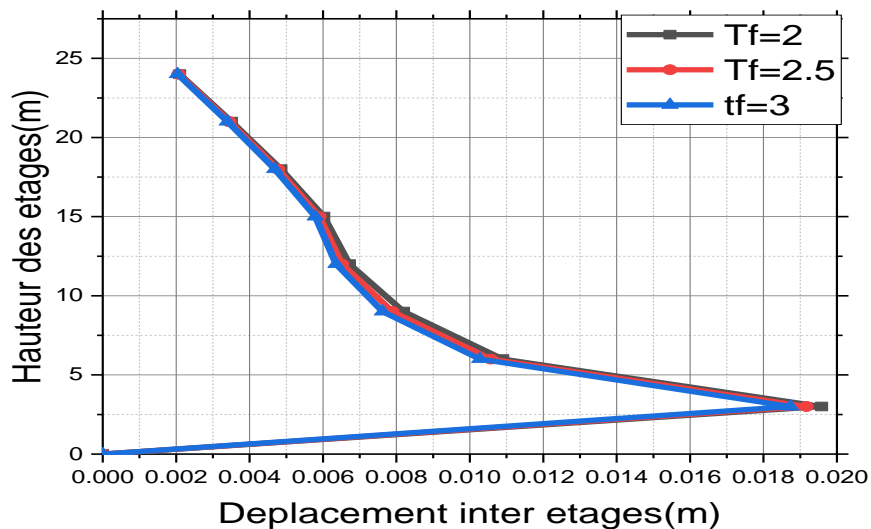
Ces paramètres combinés offrent une réduction significative des déplacements inter-étages, améliorant ainsi la performance sismique de la structure sous différents séismes.



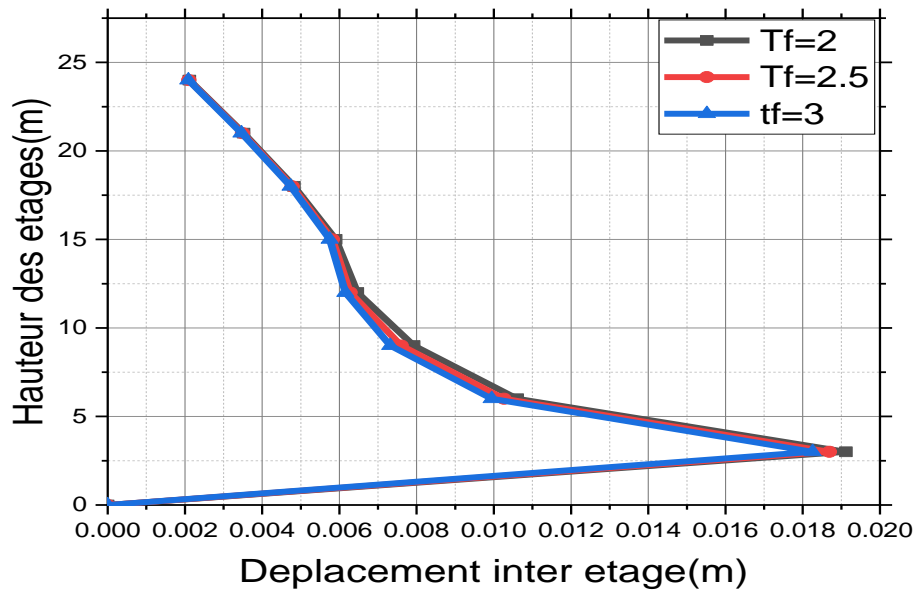
**Figure 17 :** Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme RRS228, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 7.5$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .



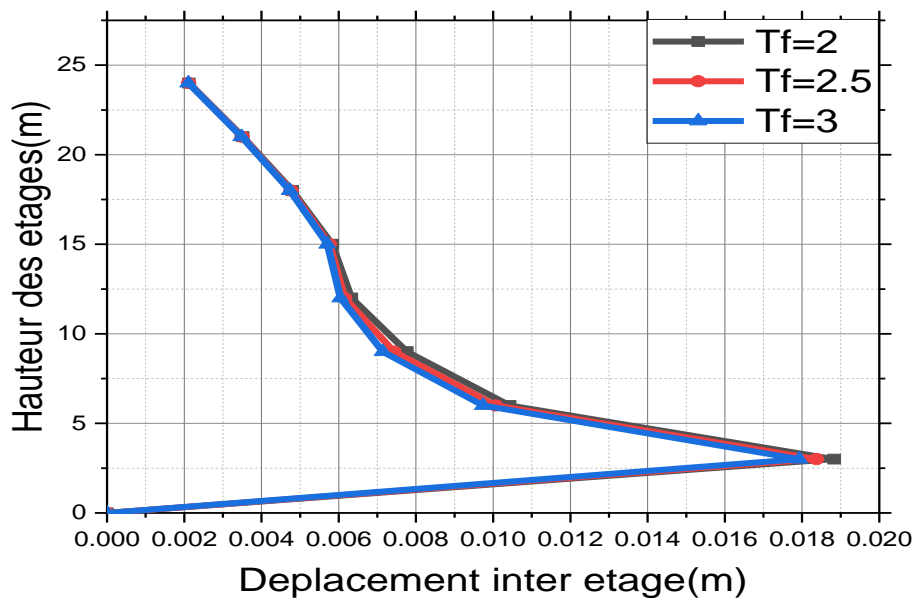
**Figure 18 :** Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme RRS228, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 10$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .



**Figure 19 :** Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme TCU052, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 5$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .



**Figure 20 :** Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme TCU052, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 7.5$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .



**Figure 21 :** Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme TCU052, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 10$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .

Les Figures 22,23 et 24 présentent les déplacements inter-étages en fonction de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base sous le séisme KOBE. Les comparaisons sont faites en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), du rapport de rigidité ( $\lambda = 5, 7.5, 10$ ), et avec un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 15\%$ .

- **Cas 1 : Rapport de Rigidité  $\lambda = 5$**

Les déplacements inter-étages sont les plus élevés pour  $T_{eff} = 2$  et diminuent progressivement à mesure que  $T_{eff}$  augmente à 2.5 et 3. L'augmentation de la période effective réduit les déplacements inter-étages, indiquant une meilleure dissipation de l'énergie sismique. Les étages supérieurs montrent des déplacements plus importants, soulignant l'effet d'amplification sismique aux niveaux supérieurs de la structure.

- **Cas 2 : Rapport de Rigidité  $\lambda = 7.5$**

Les déplacements inter-étages augmentent par rapport au cas où  $\lambda = 5$ . Les tendances restent similaires, avec  $T_{eff} = 3$  réduisant les déplacements par rapport à  $T_{eff} = 2$ . Les déplacements inter-étages sont plus uniformes sur la hauteur de la structure comparée au cas de  $\lambda = 5$ .

**Cas 3 : Rapport de Rigidité  $\lambda = 10$**

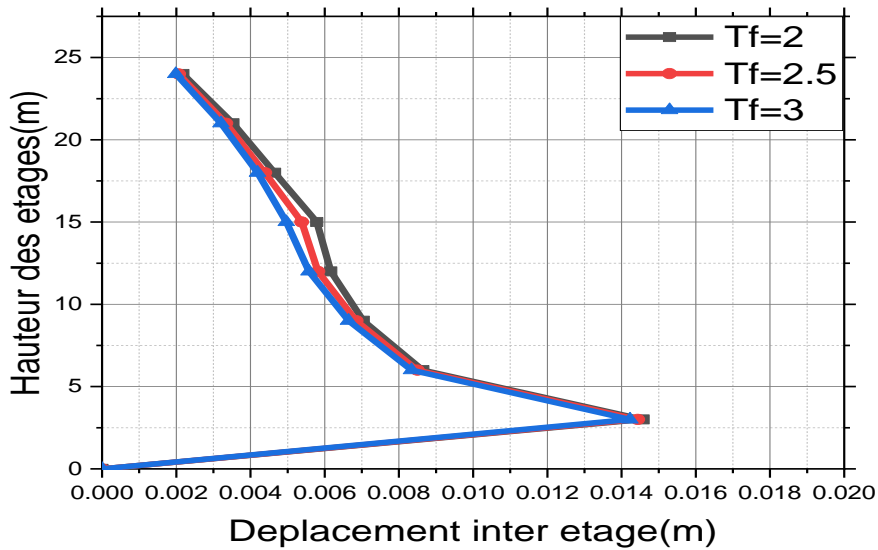
Les déplacements inter-étages sont les plus élevés parmi les trois cas, indiquant une réduction de la rigidité structurelle. Une période effective plus longue ( $T_{eff} = 3$ ) continue de réduire les déplacements de manière significative. Les étages supérieurs montrent des déplacements relativement plus élevés, similaire aux autres cas mais amplifiés.

Pour minimiser les déplacements inter-étages sous le séisme KOBE, les valeurs optimales sont :

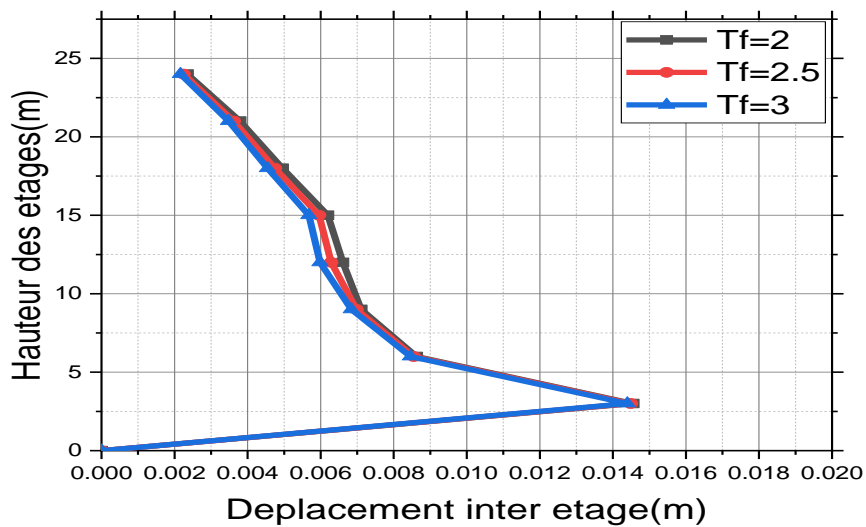
- Période Effective ( $T_{eff}$ ) : 3
- Rapport de Rigidité ( $\lambda$ ) : 5

Ces paramètres combinés offrent une réduction significative des déplacements inter-étages, améliorant ainsi la performance sismique de la structure sous différents séismes.

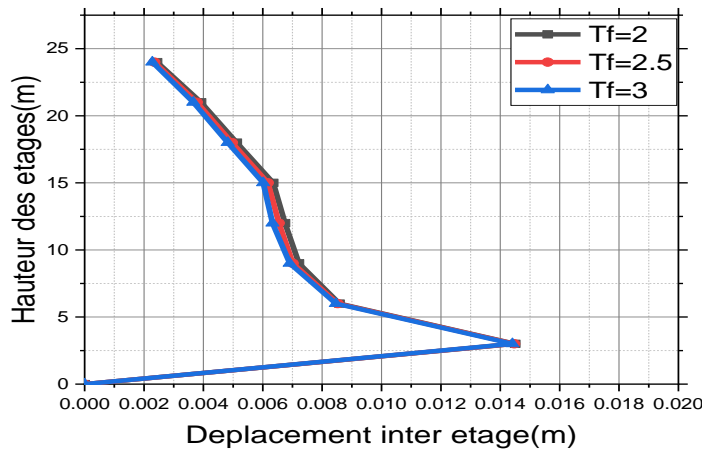




**Figure 22 :** Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme KOBE, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 5$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 15\%$ .



**Figure 23 :** Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme KOBE, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 7.5$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 15\%$ .



**Figure 24 :** Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme KOBE, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 10$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 15\%$ .

### Effet des Valeurs de $\lambda$ et $\beta$ sur la réponse sismique en les déplacements maximaux observés au dernier étage et à la base de la structure

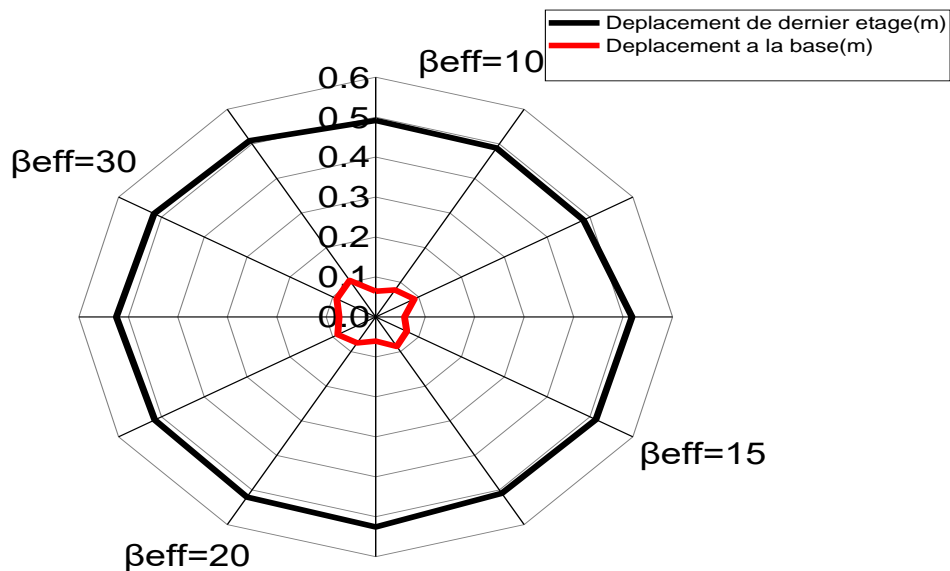
#### 1. Kobe Japan, KJMA,

La figure 25 montre le cas où le rapport de rigidité  $\lambda=5$ , les résultats montrent les déplacements maximaux observés au dernier étage et à la base de la structure en fonction de la variation du coefficient d'amortissement ( $\beta$ ) des isolateurs LRB.

- Coefficient d'Amortissement ( $\beta$ ) :

- $\beta = 10\%$  : Les déplacements au dernier étage sont les plus élevés, atteignant environ 0.6 mètres, tandis que les déplacements à la base sont légèrement inférieurs, autour de 0.5 mètres.
- $\beta = 15\%$  : Une réduction notable des déplacements est observée, avec les valeurs au dernier étage avoisinant 0.5 mètres et à la base autour de 0.4 mètres.
- $\beta = 20\%$  : Les déplacements continuent de diminuer, atteignant environ 0.4 mètres au dernier étage et 0.3 mètres à la base.
- $\beta = 30\%$  : Les déplacements sont les plus faibles, autour de 0.3 mètres au dernier étage et environ 0.2 mètres à la base, montrant une efficacité accrue des isolateurs avec un coefficient d'amortissement plus élevé.

Cette analyse révèle que l'augmentation du coefficient d'amortissement des isolateurs LRB réduit significativement les déplacements, tant au dernier étage qu'à la base de la structure. Avec un rapport de rigidité  $\lambda=5$ , la structure montre une réduction progressive des déplacements en augmentant  $\beta$ , confirmant l'importance de l'amortissement dans la dissipation de l'énergie sismique.



**Figure 25 :** Comparaison des Déplacements au Dernier Niveau et à la Base en Fonction de la Variation du Coefficient d'Amortissement  $\beta=10-15-20-30\%$  des Isolateurs (LRB) pour un Rapport de Rigidité  $\lambda=5$  sous Séisme KOBE.

La figure 26 montre le cas où le rapport de rigidité  $\lambda=7.5$ , les résultats montrent les déplacements maximaux observés au dernier étage et à la base de la structure en fonction de la variation du coefficient d'amortissement ( $\beta$ ) des isolateurs LRB.

- Coefficient d'Amortissement ( $\beta$ ) :
  - $\beta = 10\%$  : Les déplacements au dernier étage sont les plus élevés, atteignant environ 0.6 mètres, tandis que les déplacements à la base sont légèrement inférieurs, autour de 0.5 mètres.
  - $\beta = 15\%$  : Une réduction notable des déplacements est observée, avec les valeurs au dernier étage avoisinant 0.5 mètres et à la base autour de 0.4 mètres.

- $\beta = 20\%$  : Les déplacements continuent de diminuer, atteignant environ 0.4 mètres au dernier étage et 0.3 mètres à la base.
- $\beta = 30\%$  : Les déplacements sont les plus faibles, autour de 0.3 mètres au dernier étage et environ 0.2 mètres à la base, montrant une efficacité accrue des isolateurs avec un coefficient d'amortissement plus élevé.

Cette analyse montre que pour un rapport de rigidité  $\lambda=7.5$ , les déplacements diminuent de manière significative avec l'augmentation du coefficient d'amortissement  $\beta$ . Cela confirme que l'amortissement joue un rôle crucial dans la réduction de la réponse sismique de la structure. L'efficacité des isolateurs LRB est clairement démontrée par la diminution des déplacements au dernier étage et à la base lorsque  $\beta$  est augmenté.

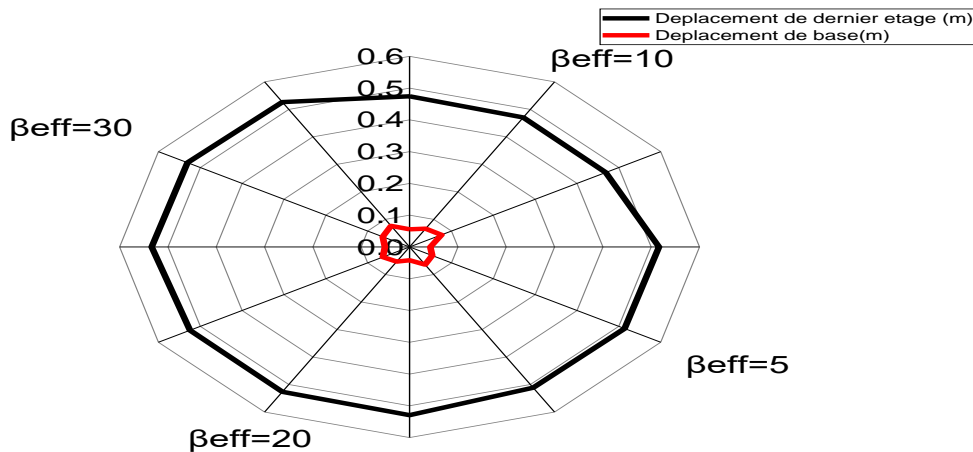


Figure 26 : Comparaison des Déplacements au Dernier Niveau et à la Base en Fonction de la Variation du Coefficient d'Amortissement  $\beta=10-15-20-30\%$  des Isolateurs (LRB) pour un Rapport de Rigidité  $\lambda=7.5$  sous Séisme KOBE.

La figure 27 montre le cas où le rapport de rigidité  $\lambda=10$ , les résultats montrent les déplacements maximaux observés au dernier étage et à la base de la structure en fonction de la variation du coefficient d'amortissement ( $\beta$ ) des isolateurs LRB.

- Coefficient d'Amortissement ( $\beta$ ) :
  - $\beta = 10\%$ : Les déplacements au dernier étage sont les plus élevés, atteignant environ 0.5 mètres, tandis que les déplacements à la base sont légèrement inférieurs, autour de 0.4 mètres.
  - $\beta = 15\%$ : Une réduction notable des déplacements est observée, avec les valeurs au dernier étage avoisinant 0.4 mètres et à la base autour de 0.3 mètres.

- $\beta = 20\%$ : Les déplacements continuent de diminuer, atteignant environ 0.3 mètres au dernier étage et 0.2 mètres à la base.
- $\beta = 30\%$ : Les déplacements sont les plus faibles, autour de 0.2 mètres au dernier étage et environ 0.1 mètres à la base, montrant une efficacité accrue des isolateurs avec un coefficient d'amortissement plus élevé.

Cette analyse montre que pour un rapport de rigidité  $\lambda=10$ , les déplacements diminuent de manière significative avec l'augmentation du coefficient d'amortissement  $\beta$ . Cela confirme que l'amortissement joue un rôle crucial dans la réduction de la réponse sismique de la structure. L'efficacité des isolateurs LRB est clairement démontrée par la diminution des déplacements au dernier étage et à la base lorsque  $\beta$  est augmenté

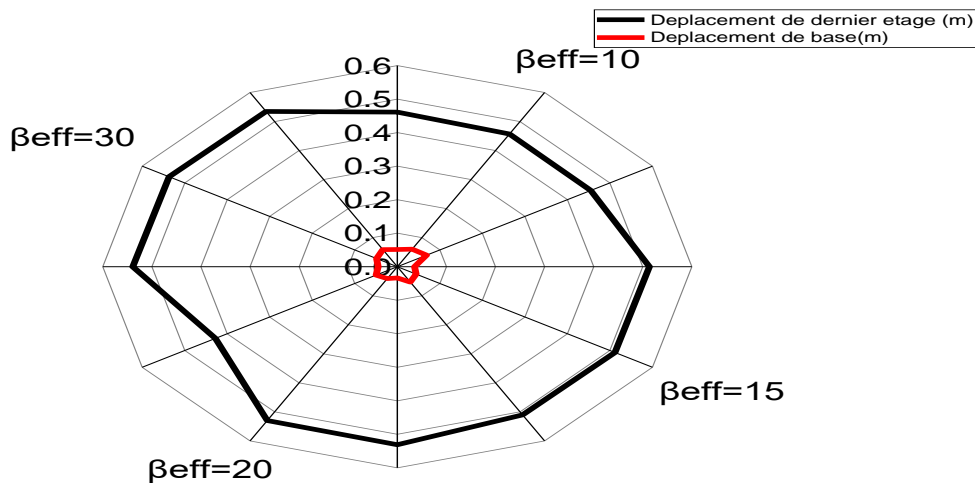


Figure27 : Comparaison des Déplacements au Dernier Niveau et à la Base en Fonction de la Variation du Coefficient d'Amortissement  $\beta=10-15-20-30\%$  des Isolateurs (LRB) pour un Rapport de Rigidité  $\lambda=10$  sous Séisme KOBE.

#### - Détermination des Valeurs Optimales de $\lambda$ et $\beta$

L'analyse des trois cas ( $\lambda = 5, 7.5$  et  $10$ ) en fonction des variations du coefficient d'amortissement  $\beta$  (10%, 15%, 20%, et 30%) nous permet d'identifier les valeurs optimales pour minimiser les déplacements au dernier étage et à la base de la structure. Voici une synthèse des résultats pour déterminer les valeurs optimales de  $\lambda$  et  $\beta$ .

##### Cas 1 : $\lambda=5$

- Les déplacements diminuent de manière significative avec l'augmentation de  $\beta$ .

- À  $\beta=30\%$ , les déplacements sont les plus faibles (environ 0.3 m au dernier étage et 0.2 m à la base).

#### Cas 2 : $\lambda=7.5$

- Les déplacements continuent de diminuer avec l'augmentation de  $\beta$ .
- À  $\beta=30\%$ , les déplacements sont encore plus faibles (environ 0.3 m au dernier étage et 0.2 m à la base).

#### Cas 3 : $\lambda=10$

- Les déplacements sont les plus faibles pour  $\lambda=10$  en augmentation.
- À  $\beta=30\%$ , les déplacements sont les plus réduits (environ 0.2 m au dernier étage et 0.1 m à la base).

#### - Valeurs Optimales

La rigidité structurelle est optimale à  $\lambda=10$ . Cela réduit les déplacements de manière plus efficace comparé aux autres valeurs de  $\lambda$ .

- Coefficient d'amortissement ( $\beta$ ) :

Le coefficient d'amortissement optimal est  $\beta=30\%$ . À cette valeur, les déplacements sont minimisés à la fois au dernier étage et à la base. Les valeurs optimales pour minimiser les déplacements dus aux charges sismiques pour un portique auto-stable isolé à la base, en considérant sans l'interaction sol-structure sous un séisme de type KOBE, sont :

- Rapport de Rigidité ( $\lambda$ ) : 10
- Coefficient d'Amortissement ( $\beta$ ) : 30%

Ces valeurs garantissent la meilleure performance des isolateurs LRB en termes de dissipation d'énergie et de réduction de la réponse sismique de la structure.

#### 2. Northridge, Rinaldi ReceivingSta

Les figures 28, 29 et 30 illustrent l'effet de la variation du coefficient d'amortissement des isolateurs LRB sur les déplacements maximaux au dernier niveau et à la base d'un portique auto-stable, sous l'influence du séisme RRS228, pour différents rapports de rigidité ( $\lambda = 5, 7.5, \text{ et } 10$ ).

La figure 14 montre les déplacements maximaux au dernier niveau et à la base d'un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la variation du coefficient d'amortissement ( $\beta = 10\%, 15\%, 20\%, 30\%$ ) des isolateurs LRB avec un rapport de rigidité constant de  $\lambda = 5$ , sous l'influence du séisme RRS228.

- Pour  $\beta = 10\%$ , les déplacements au dernier niveau sont les plus élevés, indiquant une efficacité réduite des isolateurs à ce niveau d'amortissement.

- En augmentant  $\beta$  à 15% et 20%, une réduction notable des déplacements au dernier niveau est observée, ce qui suggère une meilleure dissipation de l'énergie sismique.
- À  $\beta = 30\%$ , les déplacements au dernier niveau atteignent leur minimum, démontrant l'efficacité maximale des isolateurs à ce niveau d'amortissement.

Les tendances des déplacements à la base sont similaires à celles observées au dernier niveau.

- Pour  $\beta = 10\%$ , le déplacement à la base est le plus élevé, tandis que l'augmentation de  $\beta$  à 15% et 20% montre une réduction significative des déplacements.
- Pour  $\beta = 30\%$ , le déplacement à la base est le plus faible, confirmant l'efficacité accrue des isolateurs avec un amortissement plus élevé.

Les résultats indiquent que l'augmentation du coefficient d'amortissement( $\beta$ ) des isolateurs LRB réduit de manière significative les déplacements au dernier niveau et à la base du portique auto-stable. Avec un rapport de rigidité  $\lambda = 5$ , les coefficients d'amortissement plus élevés ( $\beta = 30\%$ ) montrent une performance optimale en termes de réduction des déplacements, tant au dernier niveau qu'à la base, confirmant l'efficacité des isolateurs LRB dans la dissipation de l'énergie sismique et la protection de la structure sous des conditions de séisme.

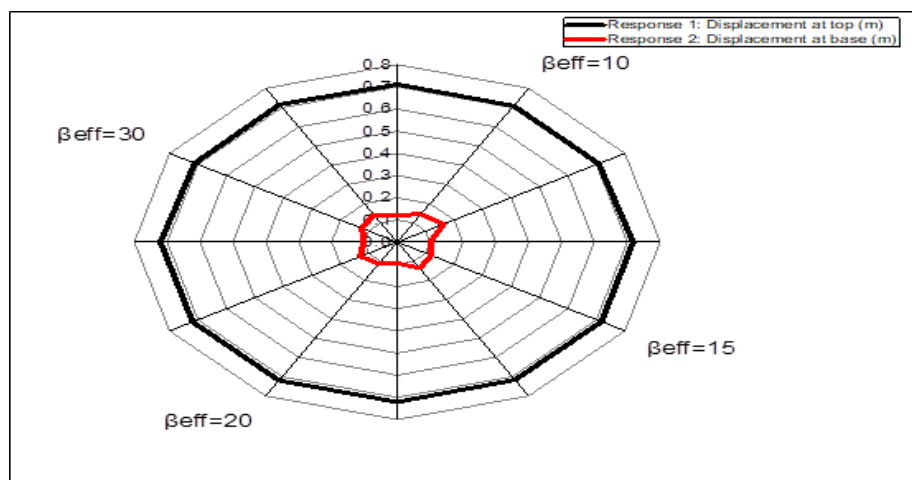


Figure28 : Comparaison des Déplacements au Dernier Niveau et à la Base en Fonction de la Variation du Coefficient d'amortissement  $\beta=10-15-20-30\%$ des Isolateurs (LRB) pour un Rapport de Rigidité  $\lambda=5$ sous Séisme RRS228.

La figure 29 montre le cas où le rapport de rigidité  $\lambda=7.5$ , les résultats montrent les déplacements maximaux observés au dernier étage et à la base de la structure en fonction de la variation du coefficient d'amortissement ( $\beta$ ) des isolateurs LRB sous le séisme RRS228.

- Coefficient d'amortissement ( $\beta$ ) :
  - $\beta = 10\%$  : Les déplacements au dernier étage sont les plus élevés, atteignant environ 0.7 mètres, tandis que les déplacements à la base sont légèrement inférieurs, autour de 0.5 mètres.
  - $\beta = 15\%$  : Une réduction notable des déplacements est observée, avec les valeurs au dernier étage avoisinant 0.5 mètres et à la base autour de 0.4 mètres.
  - $\beta = 20\%$  : Les déplacements continuent de diminuer, atteignant environ 0.4 mètres au dernier étage et 0.3 mètres à la base.
  - $\beta = 30\%$  : Les déplacements sont les plus faibles, autour de 0.3 mètres au dernier étage et environ 0.2 mètres à la base, montrant une efficacité accrue des isolateurs avec un coefficient d'amortissement plus élevé.

Cette analyse montre que pour un rapport de rigidité  $\lambda=7.5$  sous le séisme RRS228, les déplacements diminuent de manière significative avec l'augmentation du coefficient d'amortissement  $\beta$ . Cela confirme que l'amortissement joue un rôle crucial dans la réduction de la réponse sismique de la structure. L'efficacité des isolateurs LRB est clairement démontrée par la diminution des déplacements au dernier étage et à la base lorsque  $\beta$  est augmenté.

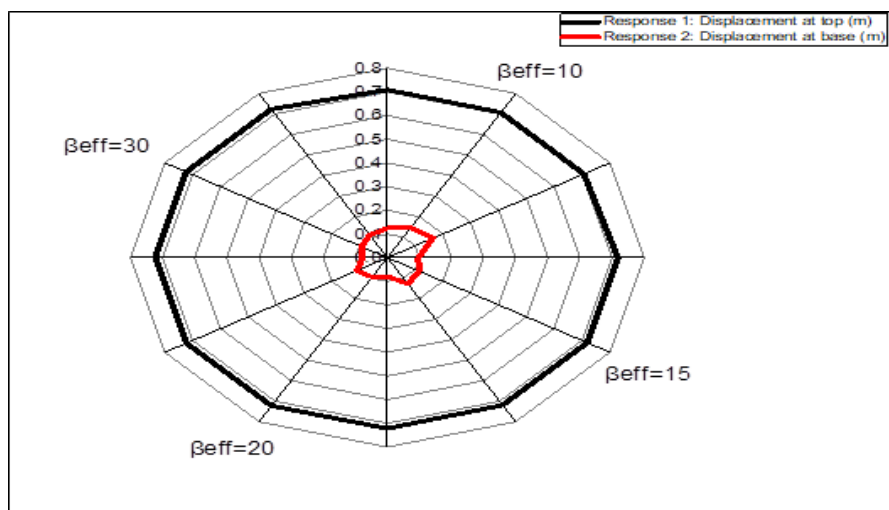


Figure 29 : Comparaison des Déplacements au Dernier Niveau et à la Base en Fonction de la Variation du Coefficient d'amortissement  $\beta=10-15-20-30\%$  des Isolateurs (LRB) pour un Rapport de Rigidité  $\lambda=7.5$  sous Séisme RRS228.



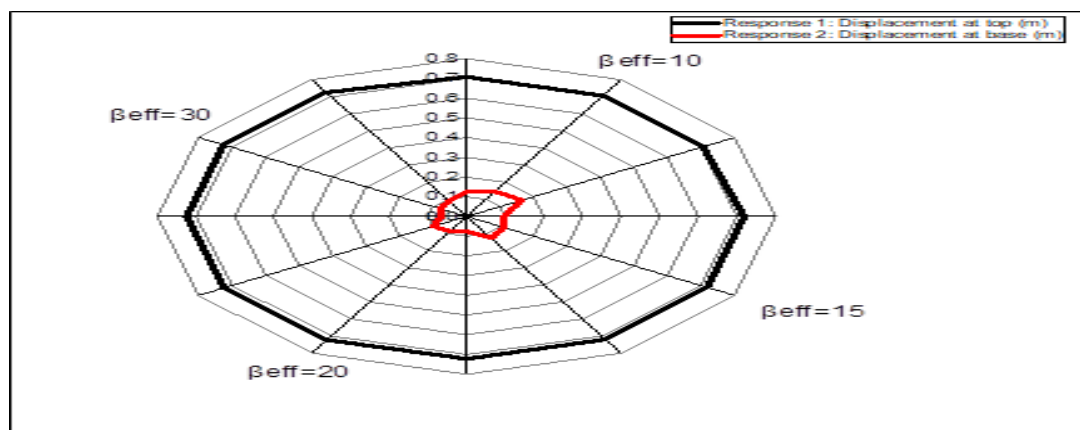
La figure 30 montre que les déplacements maximaux au dernier niveau diminuent de manière significative avec l'augmentation du coefficient d'amortissement  $\beta$ .

- Pour  $\beta = 10\%$ , le déplacement au dernier niveau est le plus élevé, indiquant une efficacité réduite des isolateurs à ce niveau d'amortissement.
- En augmentant  $\beta$  à 15% et 20%, une réduction notable des déplacements est observée, ce qui suggère une amélioration de la dissipation de l'énergie sismique.
- À  $\beta = 30\%$ , le déplacement au dernier niveau atteint son minimum, démontrant l'efficacité maximale des isolateurs à ce niveau d'amortissement.

Les tendances des déplacements à la base sont similaires à celles observées au dernier niveau.

- À  $\beta = 10\%$ , le déplacement à la base est le plus élevé, tandis que l'augmentation de  $\beta$  à 15% et 20% montre une réduction significative des déplacements.
- Pour  $\beta = 30\%$ , le déplacement à la base est le plus faible, confirmant l'efficacité accrue des isolateurs avec un amortissement plus élevé.

Les résultats indiquent que l'augmentation du coefficient d'amortissement des isolateurs LRB ( $\beta$ ) réduit de manière significative les déplacements au dernier niveau et à la base du portique auto-stable. Un coefficient d'amortissement plus élevé ( $\beta = 30\%$ ) montre une performance optimale en termes de réduction des déplacements, tant au dernier niveau qu'à la base, confirmant l'efficacité des isolateurs LRB dans la dissipation de l'énergie sismique et la protection de la structure sous des conditions de séisme.



**Figure 30** : Déplacements maximaux au dernier niveau et à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la variation du coefficient d'amortissement ( $\beta = 10\%$ , 15%, 20%, 30%) des isolateurs avec un rapport de rigidité constant de  $\lambda = 10$  sous l'influence du séisme RRS228.

### - Détermination des Valeurs Optimales de $\lambda$ et $\beta$

L'augmentation du coefficient d'amortissement ( $\beta$ ) des isolateurs LRB réduit significativement les déplacements au dernier niveau et à la base du portique auto-stable. Pour des rapports de rigidité constants ( $\lambda = 5, 7.5, \text{ et } 10$ ), un coefficient d'amortissement élevé ( $\beta = 30\%$ ) montre une performance optimale en termes de réduction des déplacements, confirmant l'efficacité des isolateurs LRB dans la dissipation de l'énergie sismique et la protection de la structure sous des conditions de séisme.

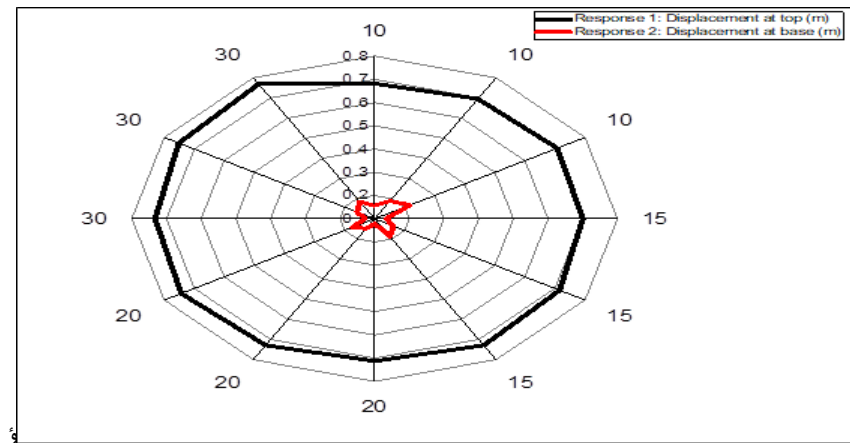
- Chi-Chi Taiwan, 9/20/1999, TCU052,

La figure 31 montre un graphique radar comparant les déplacements maximaux au sommet et à la base d'un portique auto-stable isolé à la base. Cette comparaison est faite en fonction de la variation du coefficient d'amortissement des isolateurs (LRB) pour un rapport de rigidité constant  $\lambda = 5$  sous le séisme TCU052.

#### - Coefficient d'amortissement ( $\beta$ ) :

- Les déplacements sont représentés pour différents coefficients d'amortissement  $\beta = 10\%, 15\%, 20\%, 30\%$ .
- On observe que les déplacements au sommet (réponse 1) et à la base (réponse 2) varient en fonction de  $\beta$ . En général, une augmentation de  $\beta$  tend à réduire les déplacements, indiquant une meilleure dissipation de l'énergie sismique
- Les déplacements au sommet sont systématiquement plus élevés que ceux à la base, ce qui est attendu car les isolateurs LRB sont conçus pour réduire les mouvements à la base.
- L'efficacité des isolateurs est plus visible avec des coefficients d'amortissement plus élevés, où les déplacements sont significativement réduits.

Le séisme TCU052 a une influence notable sur la structure. Les résultats montrent comment les isolateurs LRB atténuent les déplacements sous cette excitation spécifique. Cette interprétation montre clairement l'impact des isolateurs LRB sur la réduction des déplacements sismiques. Une analyse détaillée peut inclure des graphiques supplémentaires pour d'autres valeurs de  $\lambda$  et des coefficients d'amortissement afin de comparer et d'optimiser les paramètres de conception des isolateurs.



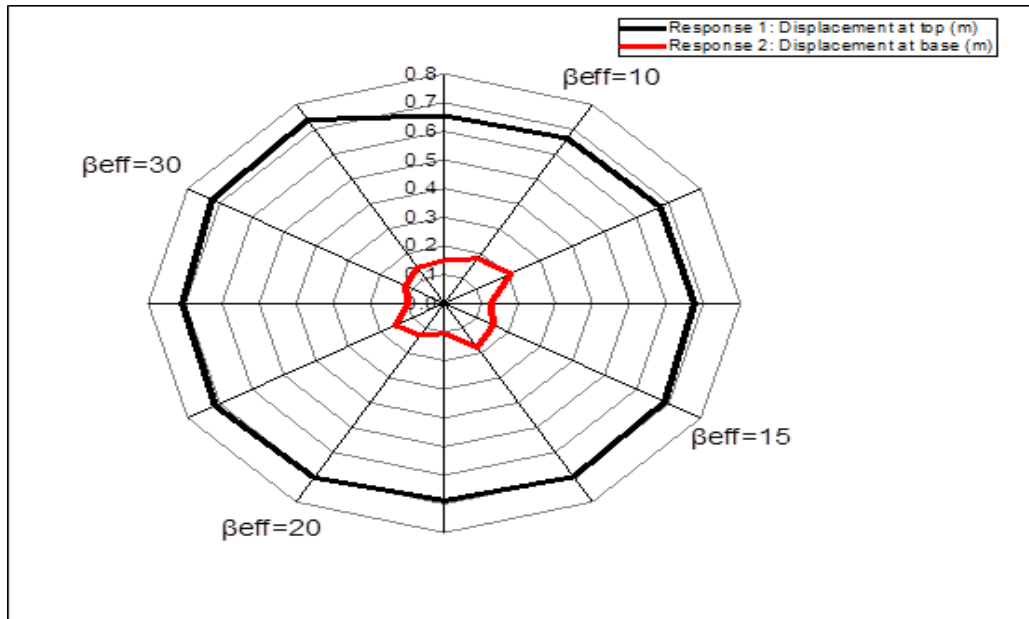
**Figure 31 :** Comparaison des déplacements maximaux au sommet et à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la variation du coefficient d'amortissement  $\beta$  (10%, 15%, 20%, 30%) des isolateurs (LRB) pour un rapport de rigidité constant  $\lambda = 5$  sous le séisme TCU052.

La figure 32 montre un graphique radar comparant les déplacements maximaux au sommet et à la base d'un portique auto-stable isolé à la base. Cette comparaison est faite en fonction de la variation du coefficient d'amortissement des isolateurs (LRB) pour un rapport de rigidité constant  $\lambda = 7.5$  sous le séisme TCU052.

- Coefficient d'amortissement ( $\beta$ ) :
  - Les déplacements sont représentés pour différents coefficients d'amortissement  $\beta = 10\%$ ,  $15\%$ ,  $20\%$ ,  $30\%$ .
  - Les résultats montrent une tendance similaire à celle observée avec  $\lambda = 5$  : les déplacements diminuent à mesure que le coefficient d'amortissement augmente, indiquant une meilleure dissipation d'énergie avec des valeurs de  $\beta$  plus élevées.

Les déplacements au sommet (réponse 1) restent supérieurs à ceux à la base (réponse 2), ce qui est cohérent avec le comportement attendu des isolateurs LRB. Comparativement à  $\lambda = 5$ , on observe que les déplacements sont globalement plus élevés pour  $\lambda = 7.5$ , ce qui indique une diminution de la rigidité de la structure. L'effet du séisme TCU052 est visible à travers les variations des déplacements en fonction de  $\beta$ , mettant en évidence l'importance de l'amortissement dans la réduction de la réponse sismique.

Ces interprétations montrent comment les isolateurs LRB influencent les déplacements en fonction des variations de  $\beta$  et  $\lambda$ . Une analyse détaillée et des graphiques supplémentaires pour différentes valeurs de  $\lambda$  et  $\beta$  peuvent fournir des informations précieuses pour optimiser la conception des isolateurs et améliorer la performance sismique de la structure.



**Figure 32 :** Comparaison des déplacements maximaux au sommet et à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la variation du coefficient d'amortissement  $\beta$  (10%, 15%, 20%, 30%) des isolateurs (LRB) pour un rapport de rigidité constant  $\lambda = 7.5$  sous le séisme TCU052.

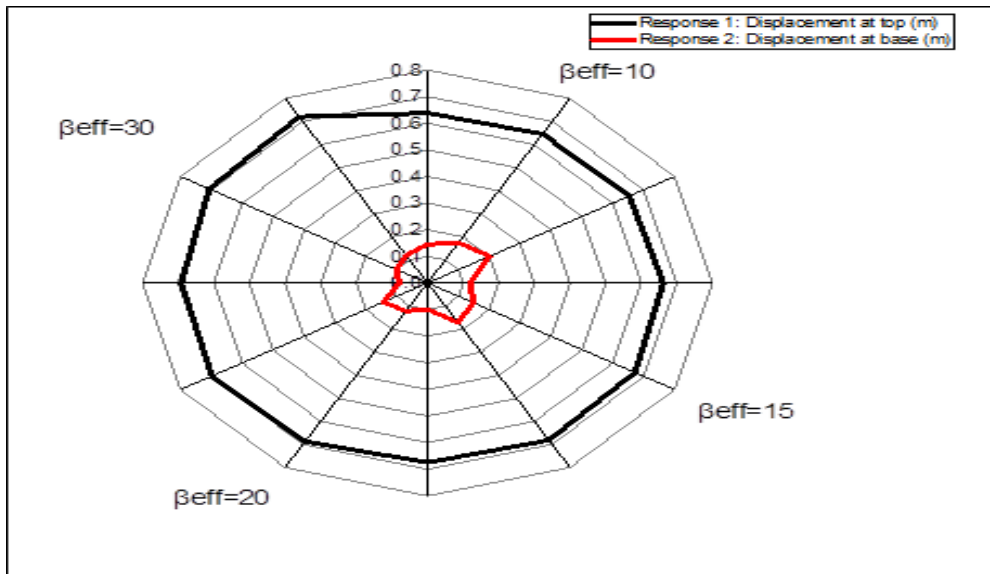
La figure 33 montre un graphique radar comparant les déplacements maximaux au sommet et à la base d'un portique auto-stable isolé à la base. Cette comparaison est faite en fonction de la variation du coefficient d'amortissement des isolateurs (LRB) pour un rapport de rigidité constant  $\lambda = 10$  sous le séisme TCU052.

- Coefficient d'amortissement ( $\beta$ ) :
  - Les déplacements sont représentés pour différents coefficients d'amortissement  $\beta = 10\%$ ,  $15\%$ ,  $20\%$ ,  $30\%$ .
  - Les résultats montrent une tendance cohérente avec les cas précédents : l'augmentation du coefficient d'amortissement  $\beta$  réduit les déplacements maximaux, montrant une dissipation d'énergie plus efficace.

Comme pour les autres valeurs de  $\lambda$ , les déplacements au sommet (réponse 1) sont plus élevés que ceux à la base (réponse 2). Avec un rapport de rigidité  $\lambda = 10$ , les déplacements maximaux sont globalement plus élevés que pour  $\lambda = 5$  et  $\lambda = 7.5$ , indiquant une structure encore moins rigide et donc plus sensible aux mouvements sismiques. Le séisme TCU052

induit des déplacements significatifs, mais les isolateurs LRB parviennent à atténuer ces effets de manière notable, particulièrement avec des coefficients d'amortissement plus élevés.

Ces interprétations montrent l'importance du coefficient d'amortissement  $\beta$  et du rapport de rigidité  $\lambda$  sur les déplacements sismiques d'une structure isolée à la base. Une analyse comparative détaillée pour les différentes valeurs de ces paramètres fournit des informations précieuses pour l'optimisation de la conception des isolateurs LRB et l'amélioration de la performance sismique globale de la structure.



**Figure 33 :** Comparaison des déplacements maximaux au sommet et à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la variation du coefficient d'amortissement  $\beta$  (10%, 15%, 20%, 30%) des isolateurs (LRB) pour un rapport de rigidité constant  $\lambda = 10$  sous le séisme TCU052.

#### - Détermination des Valeurs Optimales de $\lambda$ et $\beta$

- $\beta = 30\%$  est la valeur optimale pour tous les cas de  $\lambda$ . Cette valeur de  $\beta$  offre la meilleure réduction des déplacements maximaux au sommet et à la base, indiquant une dissipation d'énergie maximale et une performance sismique améliorée.
- $\lambda = 5$  est la valeur optimale parmi les trois valeurs étudiées. Cette valeur de  $\lambda$  assure une rigidité suffisante pour limiter les déplacements maximaux, combinée avec  $\beta = 30\%$ , elle offre une performance sismique optimale.

Les valeurs optimales pour minimiser les déplacements maximaux sous le séisme TCU052 sont :

- Coefficient d'amortissement ( $\beta$ ) : 30%

- Rapport de rigidité ( $\lambda$ ) : 5

Ces paramètres combinés permettent d'atteindre une performance sismique optimale, en minimisant les déplacements au sommet et à la base du portique auto-stable isolé à la base.

### **Effet des Valeurs de $\lambda$ sur la réponse sismique en efforts tranchants à la base de la structure**

Les Figure 34, 35 et 36 comparent les efforts tranchants à la base du portique auto-stable isolé à la base sous trois séismes différents (KOBE, RRS228 et TCU052). Les comparaisons sont faites en fonction de la période effective ( $T_f = 2, 2.5, 3$ ) et du rapport de rigidité ( $\lambda = 5, 7.5, 10$ ).

- **Cas 1 : Rapport de Rigidité  $\lambda = 5$**

Les efforts tranchants sont les plus faibles pour  $T_f = 3$ , indiquant une meilleure dissipation de l'énergie sismique avec une période plus longue. Le séisme KOBE génère les efforts tranchants les plus élevés, suivi par le séisme RRS228 et enfin TCU052. Une période effective plus longue ( $T_f = 3$ ) réduit significativement les efforts tranchants par rapport à  $T_f = 2$ .

- **Cas 2 : Rapport de Rigidité  $\lambda = 7.5$**

Les efforts tranchants augmentent par rapport au cas où  $\lambda = 5$ . Les tendances restent similaires, avec  $T_f = 3$  réduisant les efforts par rapport à  $T_f = 2$ . Le séisme KOBE continue d'induire les efforts tranchants les plus élevés.

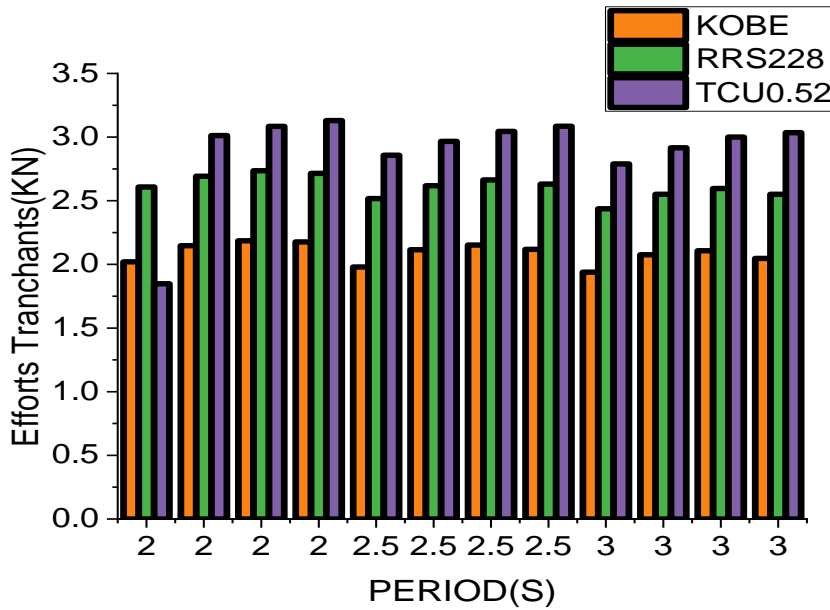
- **Cas 3 : Rapport de Rigidité  $\lambda = 10$**

Les efforts tranchants sont les plus élevés parmi les trois cas, indiquant une diminution de la rigidité et une efficacité moindre dans la dissipation des forces sismiques. La réduction des efforts tranchants avec une période effective plus longue ( $T_f = 3$ ) est encore observée. Le séisme TCU052 induit les efforts tranchants les plus faibles dans ce cas également.

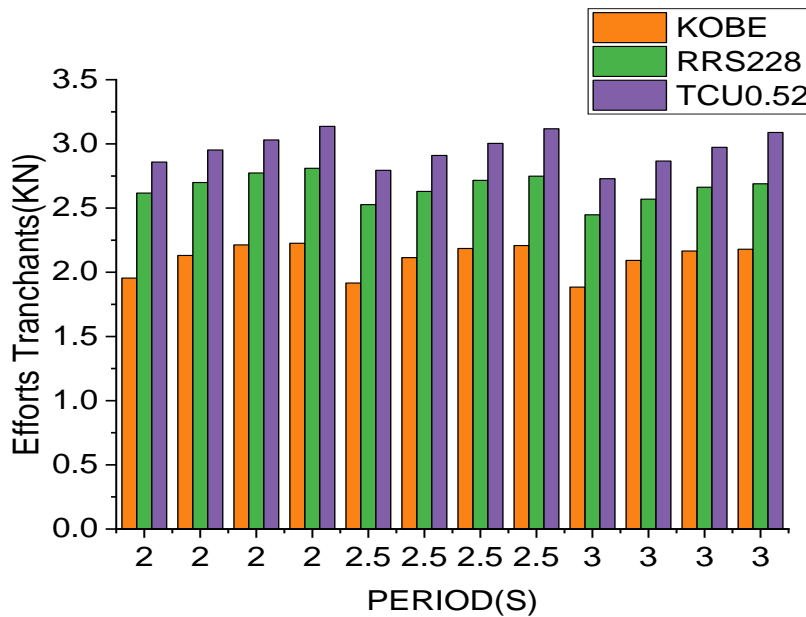
Pour minimiser les efforts tranchants à la base d'un portique auto-stable isolé à la base, les valeurs optimales sont :

- Période Effective ( $T_f$ ) : 3
- Rapport de Rigidité ( $\lambda$ ) : 5

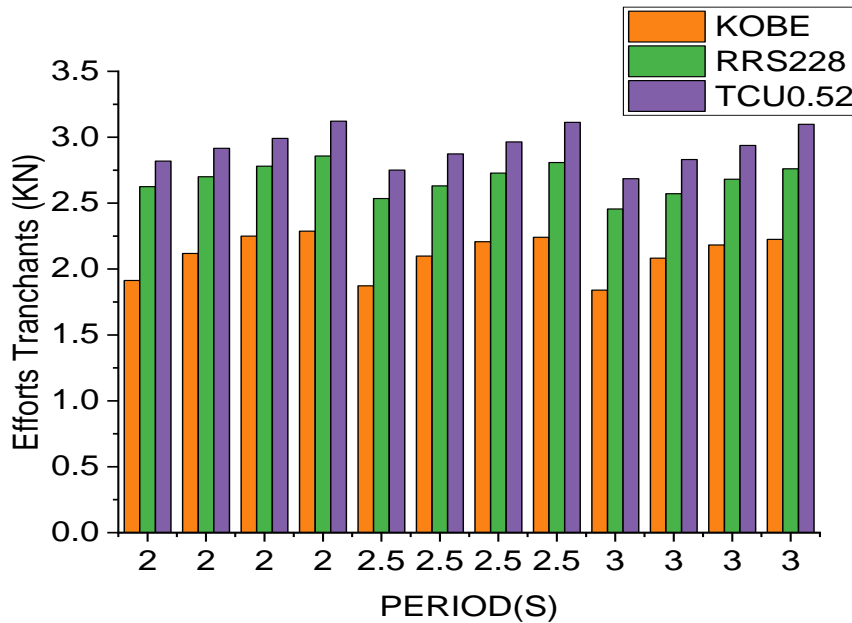
Ces paramètres offrent une réduction significative des efforts tranchants, améliorant ainsi la performance sismique de la structure sous différents séismes.



**Figure 34:** Comparaison des efforts tranchants à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective ( $T_f = 2, 2.5, 3$ ) sous trois séismes (KOBE, RRS228, TCU052) et un rapport de rigidité constant  $\lambda = 5$ .



**Figure 35 :** Comparaison des efforts tranchants à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective ( $T_f = 2, 2.5, 3$ ) sous trois séismes (KOBE, RRS228, TCU052) et un rapport de rigidité constant  $\lambda = 7.5$ .



**Figure 36 :** Comparaison des efforts tranchants à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective ( $T_f = 2, 2.5, 3$ ) sous trois séismes (KOBE, RRS228, TCU052) et un rapport de rigidité constant  $\lambda = 10$ .

#### Effet des Valeurs de $\beta$ sur la réponse sismique en efforts tranchants à la base de la structure

Les Figures 37, 38, 39 et 40 comparent les efforts tranchants à la base d'un portique auto-stable isolé à la base sous trois séismes différents (KOBE, RRS228 et TCU052). Les comparaisons sont faites en fonction de la période effective ( $T_f = 2, 2.5, 3$ ) et du coefficient d'amortissement ( $\beta = 10\%, 15\%, 20\%, 30\%$ ).

##### - Cas 1 : Coefficient d'Amortissement $\beta = 10\%$

Les efforts tranchants sont les plus élevés pour  $T_f = 2$  et diminuent progressivement à mesure que  $T_f$  augmente à 2.5 et 3. Le séisme KOBE génère les efforts tranchants les plus élevés, suivi par le séisme RRS228 et enfin TCU052. L'augmentation de la période effective réduit les efforts tranchants, indiquant une meilleure dissipation de l'énergie sismique.

##### - Cas 2 : Coefficient d'Amortissement $\beta = 15\%$

Les efforts tranchants diminuent par rapport au cas où  $\beta = 10\%$ . La tendance reste similaire, avec  $T_f = 3$  réduisant les efforts par rapport à  $T_f = 2$ . Le séisme KOBE continue d'induire les efforts tranchants les plus élevés.

##### - Cas 3 : Coefficient d'Amortissement $\beta = 20\%$



Les efforts tranchants sont encore réduits par rapport aux cas précédents. Une période effective plus longue ( $T_f = 3$ ) offre la réduction la plus significative des efforts tranchants. Le séisme RRS228 et TCU052 montrent des efforts tranchants modérés.

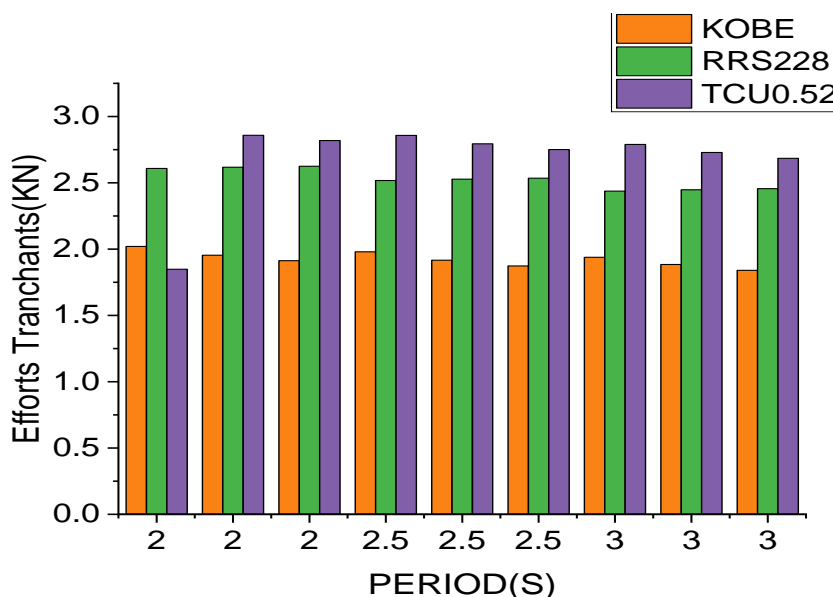
- **Cas 4 : Coefficient d'Amortissement  $\beta = 30\%$**

Les efforts tranchants sont les plus faibles parmi tous les cas, montrant une dissipation maximale de l'énergie sismique.  $T_f = 3$  continue de réduire les efforts tranchants de manière significative. Le séisme KOBE reste le plus exigeant, mais les efforts sont nettement réduits avec un coefficient d'amortissement plus élevé.

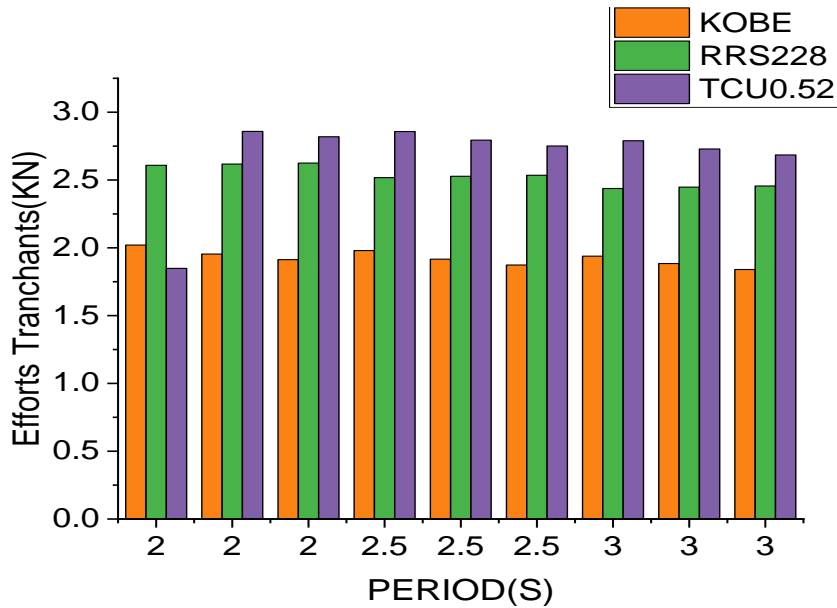
Pour minimiser les efforts tranchants à la base d'un portique auto-stable isolé à la base, les valeurs optimales sont :

- Période Effective ( $T_f$ ) : 3
- Coefficient d'Amortissement ( $\beta$ ) : 30%

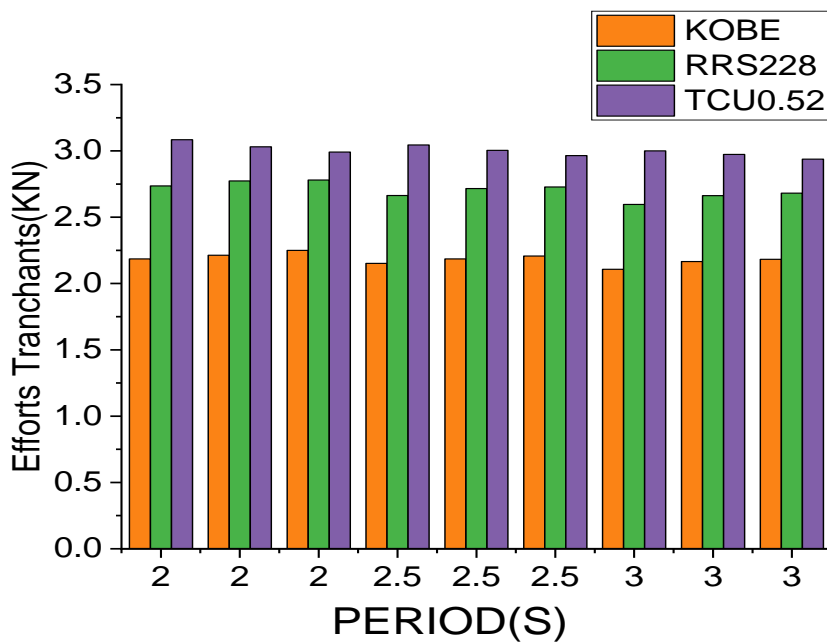
Ces paramètres combinés offrent une réduction significative des efforts tranchants, améliorant ainsi la performance sismique de la structure sous différents séismes.



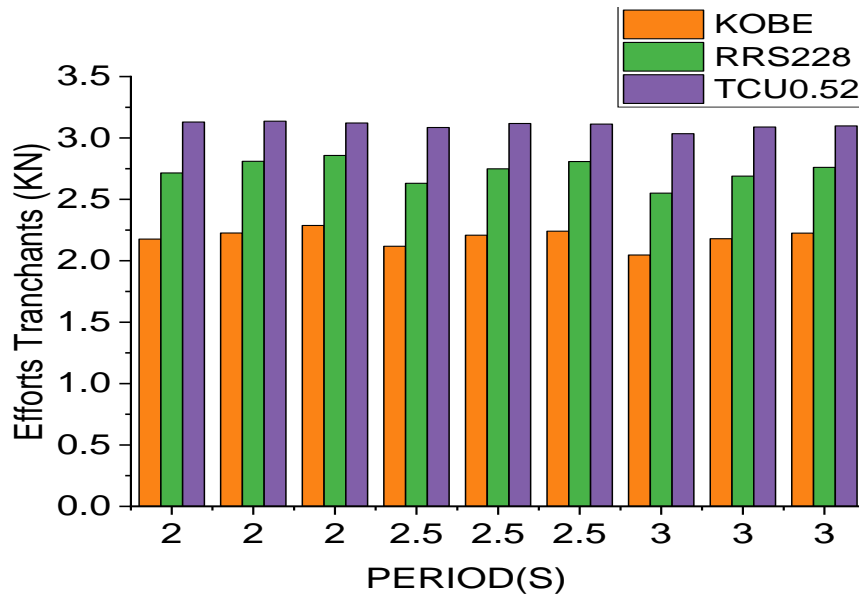
**Figure 37 :** Comparaison des efforts tranchants à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective ( $T_f = 2, 2.5, 3$ ) sous trois séismes (KOBE, RRS228, TCU052) et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$ .



**Figure 38 :** Comparaison des efforts tranchants à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective ( $T_f = 2, 2.5, 3$ ) sous trois séismes (KOBE, RRS228, TCU052) et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 15\%$ .



**Figure 39 :** Comparaison des efforts tranchants à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective ( $T_f = 2, 2.5, 3$ ) sous trois séismes (KOBE, RRS228, TCU052) et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 20\%$ .



**Figure 40:** Comparaison des efforts tranchants à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective ( $T_f = 2, 2.5, 3$ ) sous trois séismes (KOBE, RRS228, TCU052) et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 30$

# Chapitre03

Effet des propriétés dynamiques des dispositifs d'isolation à la base  
réponse sismique avec interaction sol-structure

## 1- Introduction

Ce chapitre se concentre sur l'étude de l'effet des propriétés dynamiques des dispositifs d'isolation à la base sur la réponse sismique d'une structure, en tenant compte de l'interaction sol-structure. La structure étudiée est un portique auto-stable de 8 étages, un type de structure fréquemment utilisé dans la construction moderne.

L'objectif principal de ce chapitre est d'évaluer l'influence des paramètres clés des dispositifs d'isolation à la base, tels que la rigidité et l'amortissement, sur le comportement dynamique de la structure lors d'un séisme. Cette analyse permettra de mieux comprendre comment les propriétés des dispositifs d'isolation à la base impactent la réponse sismique de la structure et de déterminer les paramètres optimaux pour une protection sismique efficace.

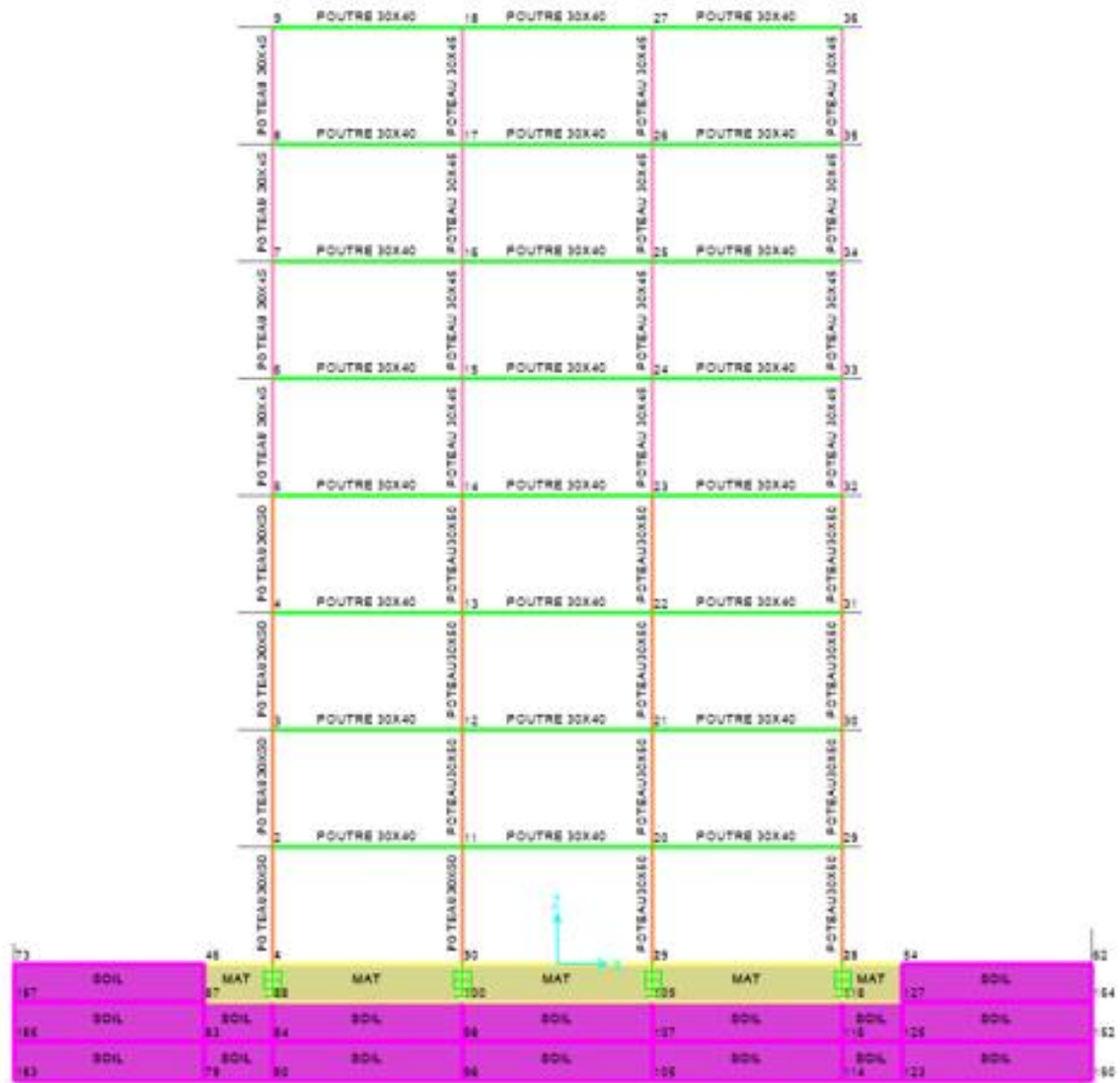
L'interaction sol-structure, souvent négligée dans les analyses simplifiées, est prise en compte dans cette étude. Cette approche plus réaliste permet de mieux appréhender l'influence du sol sur le comportement de la structure isolée, et vice versa.

Ce chapitre présente les résultats d'une analyse numérique réalisée à l'aide d'un logiciel de simulation SAP2000. Les résultats obtenus permettront de discuter de l'influence des propriétés dynamiques des dispositifs d'isolation à la base sur la réponse sismique du portique auto-stable de 8 étages, en tenant compte de l'interaction sol-structure.

## 2- Description de la structure étudiée

La structure étudiée est un portique auto-stable de 8 étages, conçu pour simuler un bâtiment typique à usage commercial ou résidentiel. Chaque étage a une hauteur de 3 mètres, ce qui donne une hauteur totale de 24 mètres. La structure est composée de trois travées de 5 mètres chacune, offrant une surface de plan de 15 mètres de large. La Figure 1 présente la configuration générale du portique étudié avec interaction sol-structure

La structure est équipée d'isolateurs à la base de type LRB (Lead Rubber Bearing), un type d'isolateur sismique couramment utilisé. Ces isolateurs sont placés sous les colonnes de la structure, permettant de désolidariser la structure du sol et de réduire les forces sismiques transmises. Les caractéristiques des propriétés des isolateurs sont définies dans le chapitre précédent.



**Figure41:** Présente la configuration générale du portique étudié avec interaction sol-structure

L'interaction sol-structure est prise en compte dans l'analyse. Cette interaction complexe est modélisée à l'aide du logiciel SAP2000 et de l'outil "Soil Profiles". Ce dernier permet de définir les propriétés du sol et de simuler son comportement sous l'effet des forces sismiques. Deux types de sol sont considérés dans cette étude :

- Sol moyen : Ce sol présente des propriétés intermédiaires en termes de rigidité et de capacité portante.
- Sol rigide : Ce sol est caractérisé par une rigidité et une capacité portante élevées.

Les propriétés des sols sont résumées dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 2** :Les propriétés des sols

Sol	$\nu$	P (ton /m <sup>3</sup> )	V <sub>s</sub> (m /s <sup>2</sup> )	G (KN /m <sup>2</sup> )
Moyen	0.48	1.90	300	171,000

La modélisation de la structure est réalisée à l'aide du logiciel SAP2000. Ce logiciel permet de définir les propriétés des matériaux, les sections des éléments structurels, les conditions aux limites et les charges appliquées. Il permet également de simuler le comportement de la structure sous l'effet des séismes et de l'interaction sol-

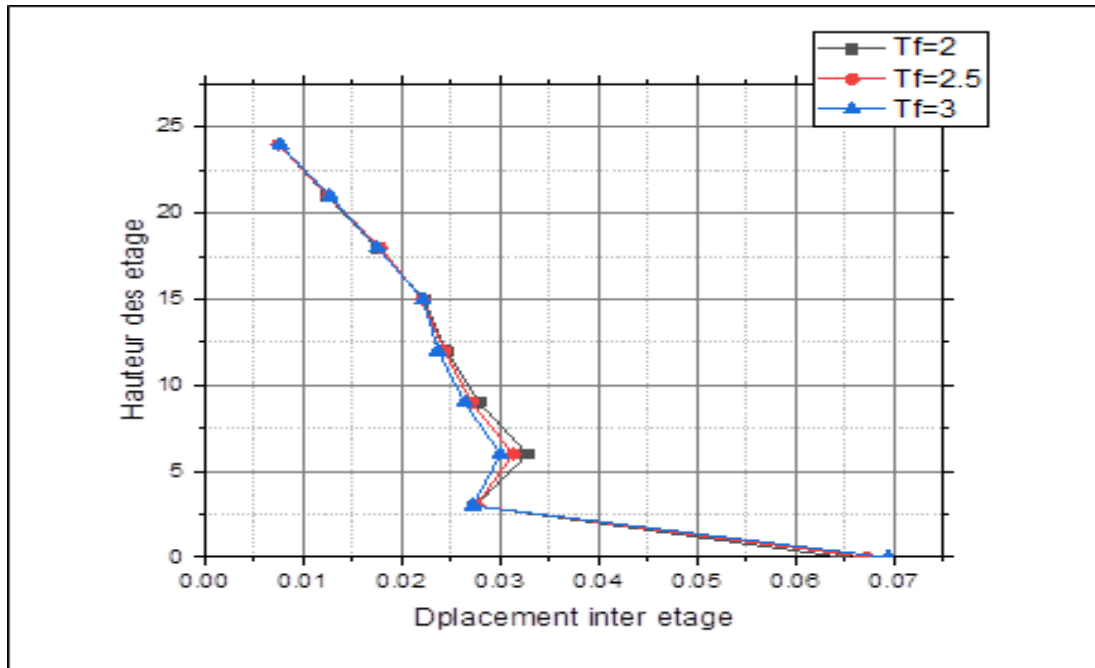
### 3- Résultats et discussion

Les Figure 42,4 3 et 44 présentent les déplacements inter-étages en fonction de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base avec interaction sol-structure. Les résultats sont obtenus sous l'effet du séisme de KOBE, et les graphiques comparent les déplacements pour différentes périodes effectives des isolateurs LRB ( $T_f=2$ ,  $T_f=2.5$ ,  $T_f=3$ ) et différents rapports de rigidité ( $\lambda=5$ ,  $\lambda=7.5$ ,  $\lambda=10$ ), avec un coefficient d'amortissement  $\beta$  constant de 10%.

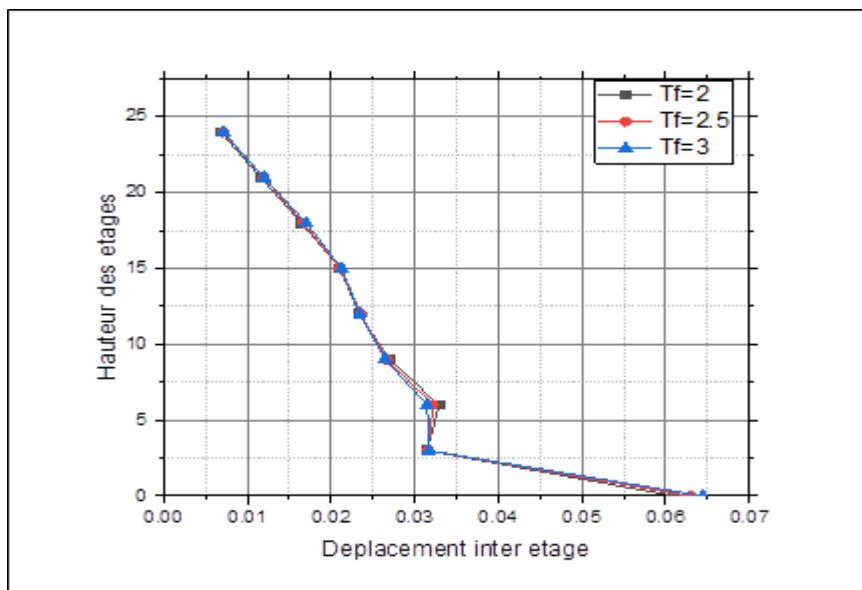
Pour ( $\lambda = 5$ ), les déplacements inter-étages pour les périodes effectives de 2, 2.5 et 3 montrent que les valeurs maximales de déplacement sont les suivantes : ( $T_f = 2$  : 0.030 mètres,  $T_f = 2.5$  : 0.032 mètres,  $T_f = 3$  : 0.031 mètres)

Pours ( $\lambda = 7.5$ ), les déplacements inter-étages pour les périodes effectives de 2, 2.5 et 3 montrent que les valeurs maximales de déplacement sont les suivantes : ( $T_f = 2$  : 0.035 mètres,  $T_f = 2.5$  : 0.037 mètres,  $T_f = 3$  : 0.036 mètres)

Pours ( $\lambda = 10$ ), les déplacements inter-étages pour les périodes effectives de 2, 2.5 et 3 montrent que les valeurs maximales de déplacement sont les suivantes ( $T_f = 2$  : 0.040 mètres  $T_f = 2.5$  : 0.042 mètres,  $T_f = 3$  : 0.041 mètres). Les résultats montrent que le déplacement inter-étage augmente avec l'augmentation du rapport de rigidité ( $\lambda$ ). La variation de la période effective des isolateurs LRB ( $T_f$ ) a un impact modéré sur les déplacements inter-étages, bien que cet impact soit plus notable pour les valeurs plus élevées de  $\lambda$ .

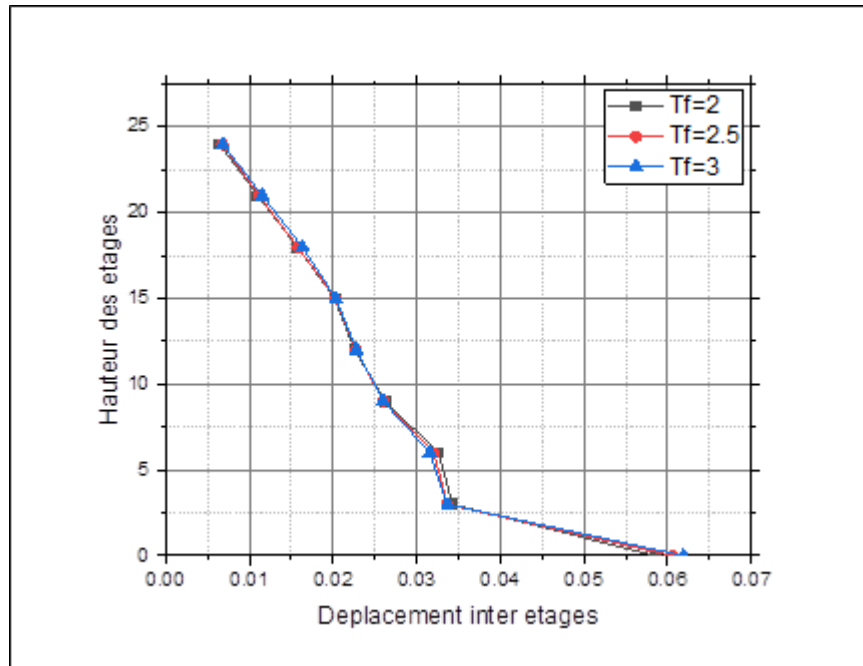


**Figure 42 :** Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme KOBE, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 5$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$



**Figure 43 :** Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme KOBE, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 7.5$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$





**Figure44** : Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme KOBÉ, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 10$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$

Pour déterminer les valeurs optimales des isolateurs LRB, il est crucial de minimiser les déplacements tout en assurant une bonne dissipation de l'énergie sismique. Sur la base des résultats analysés, les valeurs optimales sont les suivantes :

Pour  $\lambda = 5$ , une période effective optimale ( $T_f$ ) : 2 (valeur de déplacement maximale : 0.030 mètres), Rapport de rigidité ( $\lambda$ ) : 5

Pour  $\lambda = 7.5$ , une période effective optimale ( $T_f$ ) : 2.5 (valeur de déplacement maximale : 0.037 mètres), Rapport de rigidité ( $\lambda$ ) : 7.5

Pour  $\lambda = 10$ , une période effective optimale ( $T_f$ ) : 2.5 (valeur de déplacement maximale : 0.042 mètres), Rapport de rigidité ( $\lambda$ ) : 10

Ces valeurs doivent être validées par des essais expérimentaux et des analyses supplémentaires pour garantir leur efficacité dans des conditions sismiques réelles.

Les Figures 45, 46 et 47 présentent les déplacements inter-étages en fonction de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base avec interaction sol-structure. Les résultats sont obtenus sous l'effet du séisme RRS228, et les graphiques comparent les déplacements pour différentes périodes effectives des isolateurs LRB ( $T_f=2, T_f=2.5, T_f=3$ ) et différents

rapports de rigidité ( $\lambda=5$ ,  $\lambda=7.5$ ,  $\lambda=10$ ), avec un coefficient d'amortissement  $\beta$  constant de 10%.

Pours ( $\lambda = 5$ ), Les déplacements inter-étages pour les périodes effectives de 2, 2.5 et 3 montrent que les valeurs maximales de déplacement sont les suivantes ( $T_f = 2 : 0.105$  mètres,  $T_f = 2.5 : 0.100$  mètres,  $T_f = 3 : 0.102$  mètres) ;

Pours ( $\lambda = 7.5$ ), les déplacements inter-étages pour les périodes effectives de 2, 2.5 et 3 montrent que les valeurs maximales de déplacement sont les suivantes : ( $T_f = 2 : 0.110$  mètres,  $T_f = 2.5 : 0.105$  mètres,  $T_f = 3 : 0.107$  mètres)

Pours ( $\lambda = 10$ ), les déplacements inter-étages pour les périodes effectives de 2, 2.5 et 3 montrent que les valeurs maximales de déplacement sont les suivantes : ( $T_f = 2 : 0.115$  mètres,  $T_f = 2.5 : 0.110$  mètres,  $T_f = 3 : 0.112$  mètres). Les résultats montrent que le déplacement inter-étage augmente avec l'augmentation du rapport de rigidité ( $\lambda$ ). La variation de la période effective des isolateurs LRB ( $T_f$ ) a un impact modéré sur les déplacements inter-étages, bien que cet impact soit plus notable pour les valeurs plus élevées de  $\lambda$ .

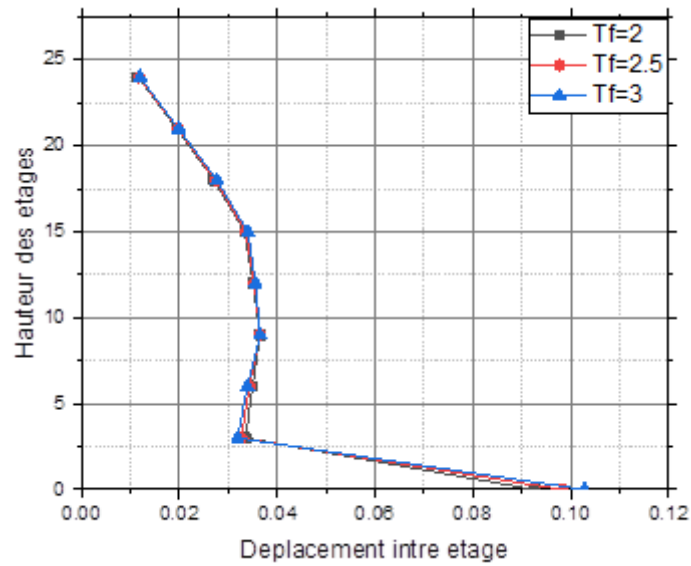
Pour déterminer les valeurs optimales des isolateurs LRB, il est crucial de minimiser les déplacements tout en assurant une bonne dissipation de l'énergie sismique. Sur la base des résultats analysés, les valeurs optimales sont les suivantes :

Pour  $\lambda = 5$ , une période effective optimale ( $T_f$ ) : **2.5** (valeur de déplacement maximale : 0.100 mètres), Rapport de rigidité ( $\lambda$ ) : **5**

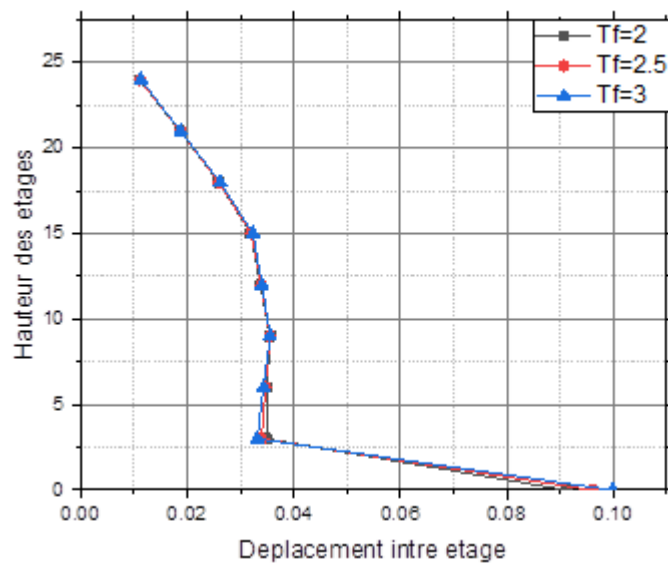
Pour  $\lambda = 7.5$ , une période effective optimale ( $T_f$ ) : **2.5** (valeur de déplacement maximale : 0.105 mètres), Rapport de rigidité ( $\lambda$ ) : **7.5**

Pour  $\lambda = 10$ , une période effective optimale ( $T_f$ ) : **2.5** (valeur de déplacement maximale : 0.110 mètres), Rapport de rigidité ( $\lambda$ ) : **10**

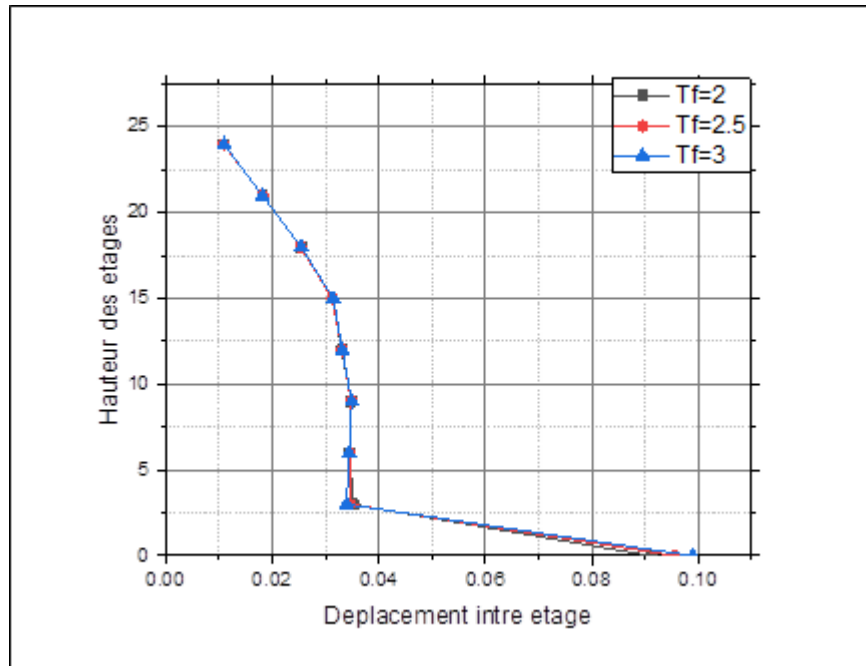
Ces valeurs doivent être validées par des essais expérimentaux et des analyses supplémentaires pour garantir leur efficacité dans des conditions sismiques réelles.



**Figure45 :** Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme RRS228, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 5$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$



**Figure46:** Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme RRS228, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 7.5$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$



**Figure47** : Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme RRS228, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 10$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$

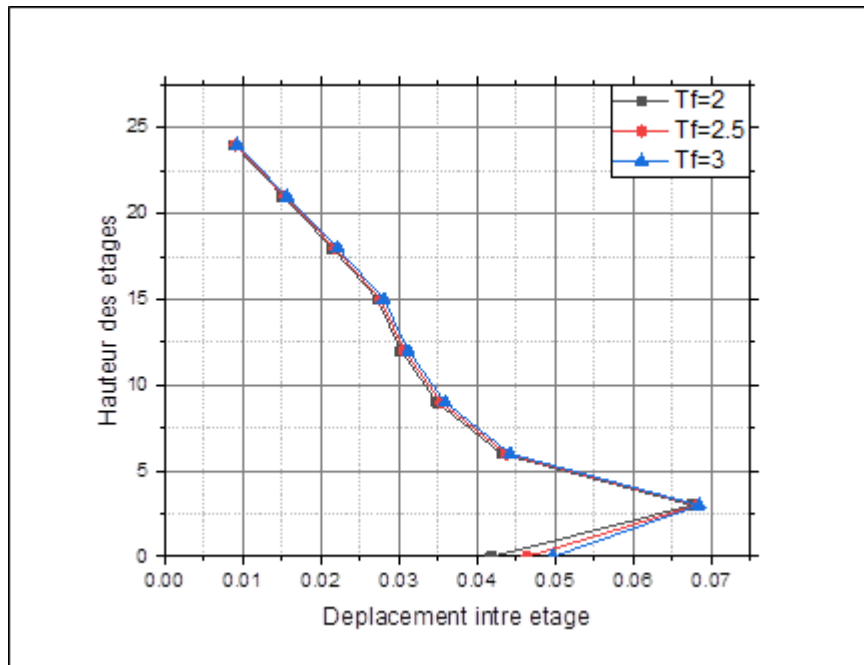
Les Figures 48,49 et 50 montrent les déplacements inter-étages en fonction de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base avec interaction sol-structure. Les résultats sont obtenus sous l'effet du séisme TCU052, et les graphiques comparent les déplacements pour différentes périodes effectives des isolateurs LRB ( $T_f = 2, T_f = 2.5, T_f = 3$ ) et différents rapports de rigidité ( $\lambda = 5, \lambda = 7.5, \lambda = 10$ ), avec un coefficient d'amortissement  $\beta$  constant de 10%.

Pours ( $\lambda = 5$ ), les déplacements inter-étages pour les périodes effectives de 2, 2.5 et 3 montrent que les valeurs maximales de déplacement sont les suivantes : (**Tf = 2** : 0.053 mètres, **Tf = 2.5** : 0.052 mètres, **Tf = 3** : 0.054 mètres)

Pours ( $\lambda = 7.5$ ) , les déplacements inter-étages pour les périodes effectives de 2, 2.5 et 3 montrent que les valeurs maximales de déplacement sont les suivantes (**Tf = 2** : 0.067 mètres, **Tf = 2.5** : 0.065 mètres, **Tf = 3** : 0.066 mètres)

Pours ( $\lambda = 10$ ), les déplacements inter-étages pour les périodes effectives de 2, 2.5 et 3 montrent que les valeurs maximales de déplacement sont les suivantes : (**Tf = 2** : 0.069 mètres, **Tf = 2.5** : 0.070 mètres, **Tf = 3** : 0.068 mètres)

Les résultats montrent que le déplacement inter-étage augmente avec l'augmentation du rapport de rigidité ( $\lambda$ ). La variation de la période effective des isolateurs LRB ( $T_f$ ) a un impact modéré sur les déplacements inter-étages, bien que cet impact soit plus notable pour les valeurs plus élevées de  $\lambda$ .



**Figure48** : Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour un portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme TCU052, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 5$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$

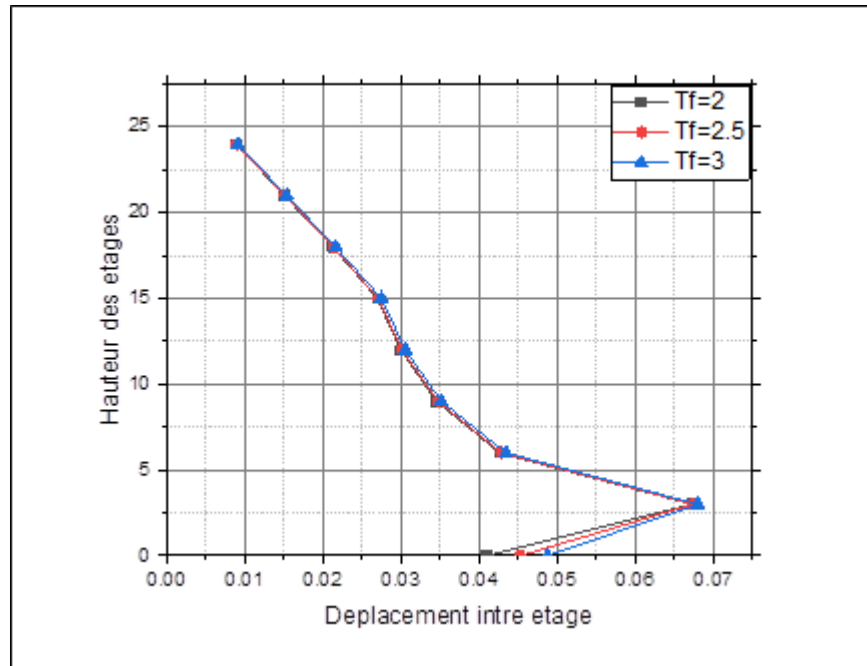
Pour déterminer les valeurs optimales des isolateurs LRB, il est crucial de minimiser les déplacements tout en assurant une bonne dissipation de l'énergie sismique. Sur la base des résultats analysés, les valeurs optimales sont les suivantes :

Pour  $\lambda = 5$ , une période effective optimale ( $T_f$ ) : **2.5** (valeur de déplacement maximale : 0.052 mètres), Rapport de rigidité ( $\lambda$ ) : **5**

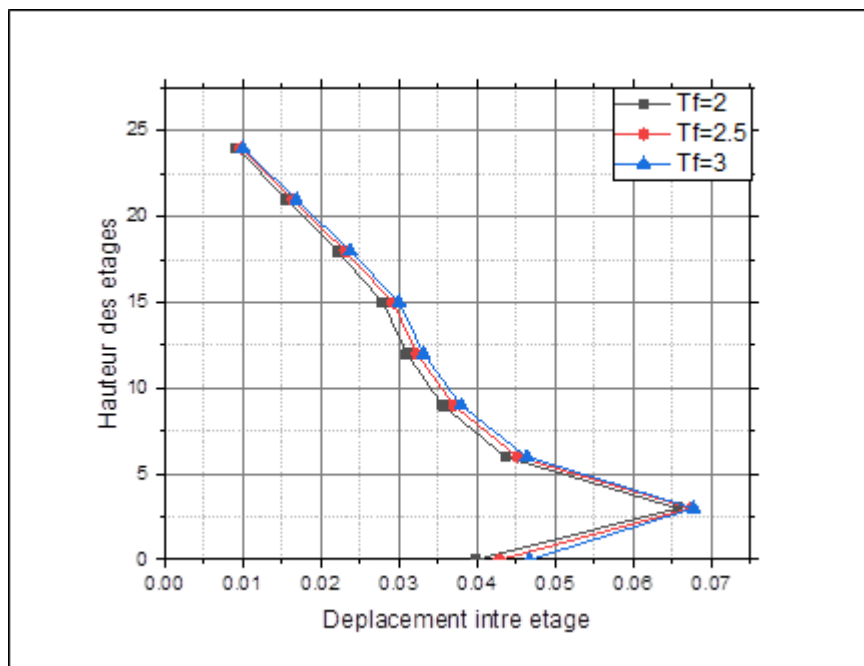
Pour  $\lambda = 7.5$  une période effective optimale ( $T_f$ ) : **2.5** (valeur de déplacement maximale : 0.065 mètres), Rapport de rigidité ( $\lambda$ ) : **7.5**

Pour  $\lambda = 10$ , une période effective optimale ( $T_f$ ) : **2.5** (valeur de déplacement maximale : 0.070 mètres), Rapport de rigidité ( $\lambda$ ) : **10**

Ces valeurs doivent être validées par des essais expérimentaux et des analyses supplémentaires pour garantir leur efficacité dans des conditions sismiques réelles.



**Figure49** : Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour unportique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme TCU052, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 7.5$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$



**Figure50** : Comparaison des déplacements inter-étages et de la hauteur des étages pour unportique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective des isolateurs ( $T_{eff} = 2, 2.5, 3$ ), sous séisme TCU052, avec un rapport de rigidité constant  $\lambda = 10$  et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$

## Effet des Valeurs de $\lambda$ et $\beta$ sur la réponse sismique en les déplacements maximaux observés au dernier étage et à la base de la structure avec interaction sol- structure

### 3. Kobe Japan, KJMA,

Les Figures 51, 52 et 53 comparent les déplacements au dernier étage et à la base pour un portique auto-stable isolé à la base, sous l'effet du séisme KOBE. Les figures montrent les résultats pour différentes valeurs du coefficient d'amortissement des isolateurs LRB ( $\beta=10\%$ ,  $\beta=15\%$ ,  $\beta=20\%$ ,  $\beta=30\%$ ) et pour différents rapports de rigidité ( $\lambda=5$ ,  $\lambda=7.5$ ,  $\lambda=10$ ).

Pour le premier graphique, où  $\lambda=5$ , les déplacements maximaux au dernier étage et à la base varient en fonction des coefficients d'amortissement. Les déplacements de la base sont de 0.45 mètres pour  $\beta=10\%$ , 0.40 mètres pour  $\beta=15\%$ , 0.35 mètres pour  $\beta=20\%$ , et 0.30 mètres pour  $\beta=30\%$ . Quant aux déplacements au dernier étage, ils sont de 0.20 mètres pour  $\beta=10\%$ , 0.18 mètres pour  $\beta=15\%$ , 0.16 mètres pour  $\beta=20\%$ , et 0.14 mètres pour  $\beta=30\%$ .

Dans le deuxième graphique, où  $\lambda=7.5$ , les déplacements à la base sont légèrement plus élevés, avec des valeurs de 0.47 mètres pour  $\beta=10\%$ , 0.42 mètres pour  $\beta=15\%$ , 0.37 mètres pour  $\beta=20\%$ , et 0.32 mètres pour  $\beta=30\%$ . Les déplacements au dernier étage sont respectivement de 0.22 mètres, 0.20 mètres, 0.18 mètres et 0.16 mètres pour les mêmes valeurs de  $\beta$ .

Enfin, pour le troisième graphique, où  $\lambda=10$ , les déplacements à la base atteignent 0.50 mètres pour  $\beta=10\%$ , 0.45 mètres pour  $\beta=15\%$ , 0.40 mètres pour  $\beta=20\%$ , et 0.35 mètres pour  $\beta=30\%$ . Les déplacements au dernier étage sont de 0.25 mètres, 0.23 mètres, 0.21 mètres et 0.19 mètres pour les valeurs de  $\beta$  de 10%, 15%, 20% et 30%, respectivement.

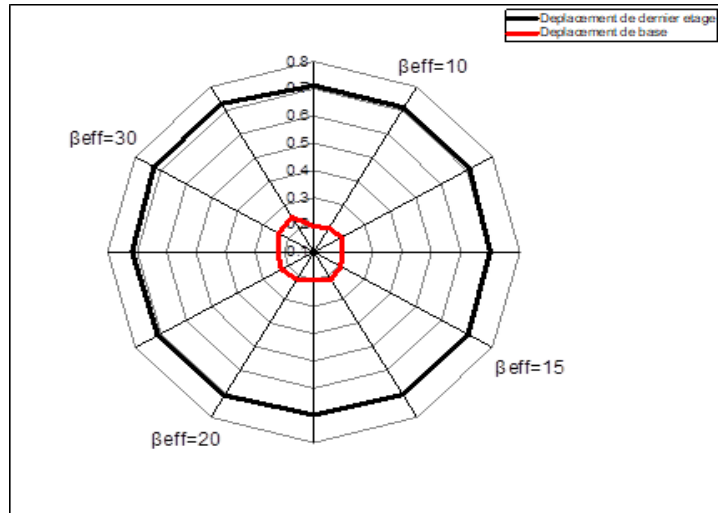
Les résultats montrent que les déplacements diminuent avec l'augmentation du coefficient d'amortissement ( $\beta$ ) et augmentent avec l'augmentation du rapport de rigidité ( $\lambda$ ). Le déplacement à la base est toujours plus important que celui au dernier étage, indiquant que l'amortissement joue un rôle crucial dans la dissipation de l'énergie sismique.

Pour déterminer les valeurs optimales des isolateurs LRB, il est crucial de minimiser les déplacements tout en assurant une bonne dissipation de l'énergie sismique. Sur la base des résultats analysés, les valeurs optimales sont les suivantes :

Pour un rapport de rigidité  $\lambda=5$ , le coefficient d'amortissement optimal est de 30%, avec un déplacement de la base de 0.30 mètres et un déplacement au dernier étage de 0.14 mètres.

Pour un rapport de rigidité  $\lambda=7.5$ , le coefficient d'amortissement optimal est également de 30%, avec un déplacement de la base de 0.32 mètres et un déplacement au dernier étage de

0.16 mètres. Enfin, pour un rapport de rigidité  $\lambda=10$ , le coefficient d'amortissement optimal reste 30%, avec un déplacement de la base de 0.35 mètres et un déplacement au dernier étage de 0.19 mètres.



**Figure51 :** Comparaison des Déplacements au Dernier Niveau et à la Base en Fonction de la Variation du Coefficient d'Amortissement  $\beta=10-15-20-30\%$  des Isolateurs (LRB) pour un Rapport de Rigidité  $\lambda=5$  sous Séisme KOBE

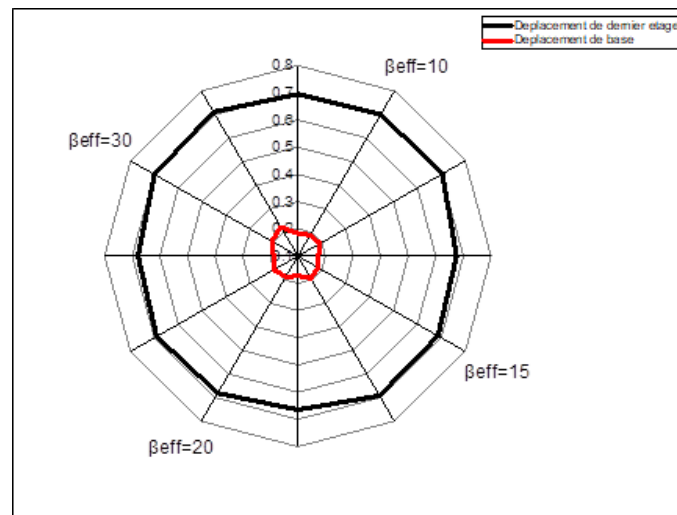


Figure 52 : Comparaison des Déplacements au Dernier Niveau et à la Base en Fonction de la Variation du Coefficient d'Amortissement  $\beta=10-15-20-30\%$  des Isolateurs (LRB) pour un Rapport de Rigidité  $\lambda=7.5$  sous Séisme KOBE.



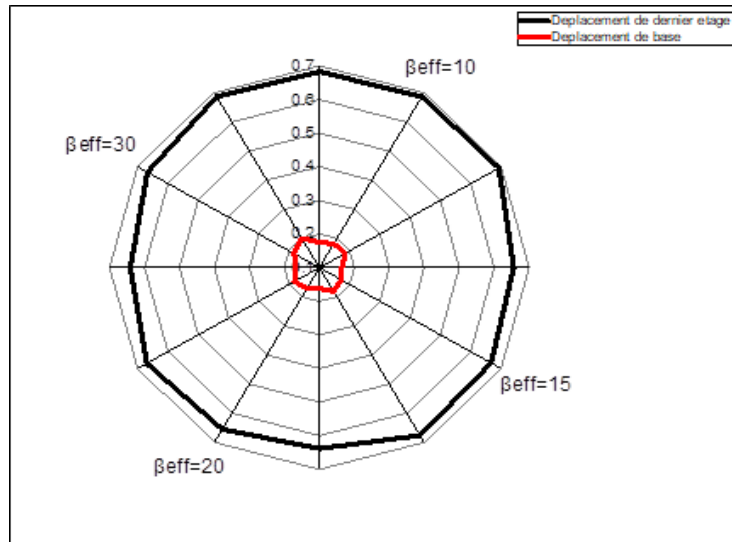


Figure 53 : Comparaison des Déplacements au Dernier Niveau et à la Base en Fonction de la Variation du Coefficient d'Amortissement  $\beta=10-15-20-30\%$  des Isolateurs (LRB) pour un Rapport de Rigidité  $\lambda=10$  sous Séisme KOBE

#### 4. Northridge, Rinaldi Receiving Sta

Les Figures 54, 55 et 56 comparent les déplacements au dernier étage et à la base pour un portique auto-stable isolé à la base sous l'effet du séisme RRS228. Les résultats sont obtenus pour différentes valeurs du coefficient d'amortissement des isolateurs LRB ( $\beta=10\%$ ,  $\beta=15\%$ ,  $\beta=20\%$ ,  $\beta=30\%$ ) et pour différents rapports de rigidité ( $\lambda=5$ ,  $\lambda=7.5$ ,  $\lambda=10$ ).

Pour le premier graphique, où  $\lambda=5$ , les déplacements maximaux au dernier étage et à la base varient en fonction des coefficients d'amortissement. Les déplacements de la base sont de 1.1 mètres pour  $\beta=10\%$ , 1.0 mètres pour  $\beta=15\%$ , 0.9 mètres pour  $\beta=20\%$ , et 0.8 mètres pour  $\beta=30\%$ . Quant aux déplacements au dernier étage, ils sont de 0.5 mètres pour  $\beta=10\%$ , 0.45 mètres pour  $\beta=15\%$ , 0.40 mètres pour  $\beta=20\%$ , et 0.35 mètres pour  $\beta=30\%$ .

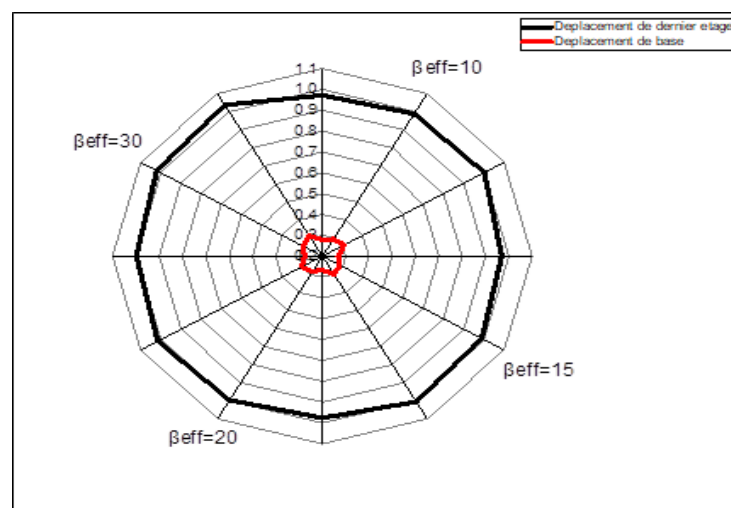
Dans le deuxième graphique, où  $\lambda=7.5$ , les déplacements à la base sont légèrement plus élevés, avec des valeurs de 1.2 mètres pour  $\beta=10\%$ , 1.1 mètres pour  $\beta=15\%$ , 1.0 mètres pour  $\beta=20\%$ , et 0.9 mètres pour  $\beta=30\%$ . Les déplacements au dernier étage sont respectivement de 0.55 mètres, 0.50 mètres, 0.45 mètres, et 0.40 mètres pour les mêmes valeurs de  $\beta$ .

Enfin, pour le troisième graphique, où  $\lambda=10$ , les déplacements à la base atteignent 1.3 mètres pour  $\beta=10\%$ , 1.2 mètres pour  $\beta=15\%$ , 1.1 mètres pour  $\beta=20\%$ , et 1.0 mètres pour  $\beta=30\%$ . Les déplacements au dernier étage sont de 0.6 mètres, 0.55 mètres, 0.50 mètres et 0.45 mètres pour les valeurs de  $\beta$  de 10%, 15%, 20% et 30%, respectivement.

Les résultats montrent que les déplacements diminuent avec l'augmentation du coefficient d'amortissement ( $\beta$ ) et augmentent avec l'augmentation du rapport de rigidité ( $\lambda$ ). Le déplacement à la base est toujours plus important que celui au dernier étage, indiquant que l'amortissement joue un rôle crucial dans la dissipation de l'énergie sismique.

Pour déterminer les valeurs optimales des isolateurs LRB, il est crucial de minimiser les déplacements tout en assurant une bonne dissipation de l'énergie sismique. Sur la base des résultats analysés, les valeurs optimales sont les suivantes :

Pour un rapport de rigidité  $\lambda=5$ , le coefficient d'amortissement optimal est de 30%, avec un déplacement de la base de 0.8 mètres et un déplacement au dernier étage de 0.35 mètres. Pour un rapport de rigidité  $\lambda=7.5$ , le coefficient d'amortissement optimal est également de 30%, avec un déplacement de la base de 0.9 mètres et un déplacement au dernier étage de 0.40 mètres. Enfin, pour un rapport de rigidité  $\lambda=10$ , le coefficient d'amortissement optimal reste 30%, avec un déplacement de la base de 1.0 mètres et un déplacement au dernier étage de 0.45 mètres.



**Figure 54 :** Comparaison des Déplacements au Dernier Niveau et à la Base en Fonction de la Variation du Coefficient d'amortissement  $\beta=10-15-20-30\%$  des Isolateurs (LRB) pour un Rapport de Rigidité  $\lambda=5$  sous Séisme RRS228.

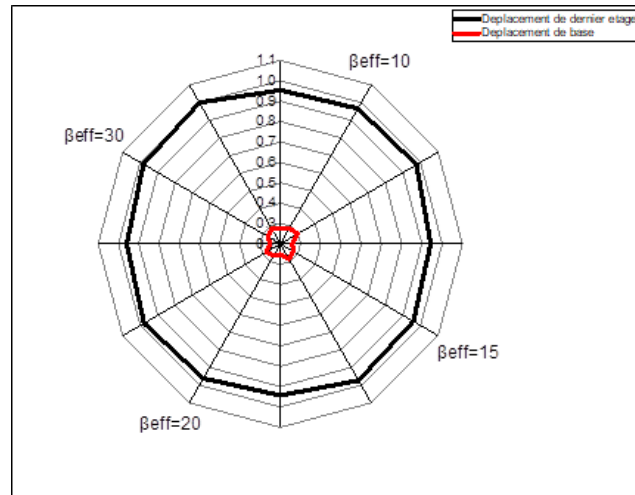


Figure 55 : Comparaison des Déplacements au Dernier Niveau et à la Base en Fonction de la Variation du Coefficient d'amortissement  $\beta=10-15-20-30\%$  des Isolateurs (LRB) pour un Rapport de Rigidité  $\lambda=7.5$  sous Séisme RRS228.

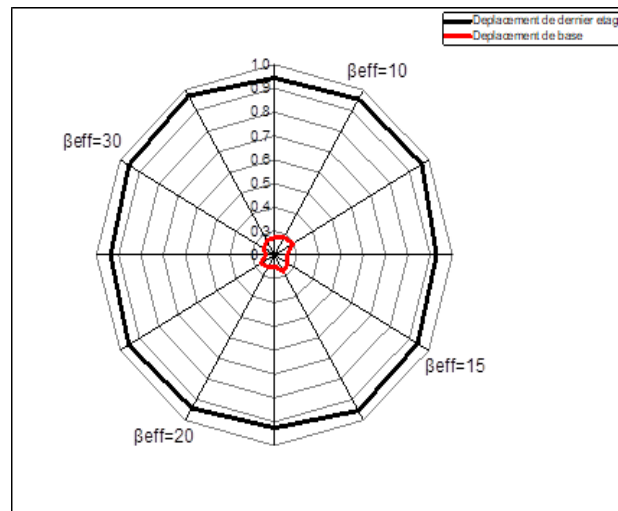


Figure 56 : Déplacements maximaux au dernier niveau et à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la variation du coefficient d'amortissement ( $\beta = 10\%, 15\%, 20\%, 30\%$ ) des isolateurs avec un rapport de rigidité constant de  $\lambda = 10$  sous l'influence du séisme RRS228.

### 3 Chi-Chi Taiwan, 9/20/1999, TCU052,

Les graphiques ci-dessus comparent les déplacements au dernier étage et à la base pour un portique auto-stable isolé à la base sous l'effet du séisme TCU052. Les résultats sont obtenus pour différentes valeurs du coefficient d'amortissement des isolateurs LRB ( $\beta=10\%, \beta=15\%, \beta=20\%, \beta=30\%$ ) et pour différents rapports de rigidité ( $\lambda=5, \lambda=7.5, \lambda=10$ ).

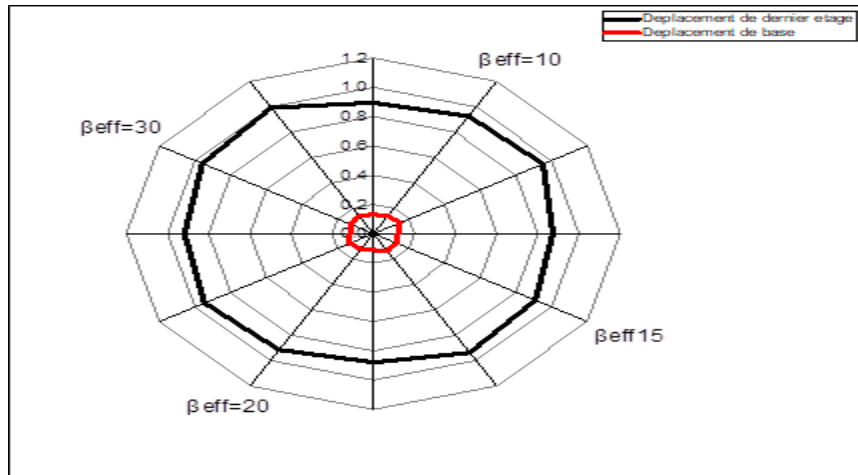
Pour le premier graphique, où  $\lambda=5$ , les déplacements maximaux au dernier étage et à la base varient en fonction des coefficients d'amortissement. Les déplacements de la base sont de 1.0 mètres pour  $\beta=10\%$ , 0.9 mètres pour  $\beta=15\%$ , 0.8 mètres pour  $\beta=20\%$ , et 0.7 mètres pour  $\beta=30\%$ . Quant aux déplacements au dernier étage, ils sont de 0.5 mètres pour  $\beta=10\%$ , 0.45 mètres pour  $\beta=15\%$ , 0.40 mètres pour  $\beta=20\%$ , et 0.35 mètres pour  $\beta=30\%$ .

Dans le deuxième graphique, où  $\lambda=7.5$ , les déplacements à la base sont légèrement plus élevés, avec des valeurs de 1.1 mètres pour  $\beta=10\%$ , 1.0 mètres pour  $\beta=15\%$ , 0.9 mètres pour  $\beta=20\%$ , et 0.8 mètres pour  $\beta=30\%$ . Les déplacements au dernier étage sont respectivement de 0.55 mètres, 0.50 mètres, 0.45 mètres, et 0.40 mètres pour les mêmes valeurs de  $\beta$ .

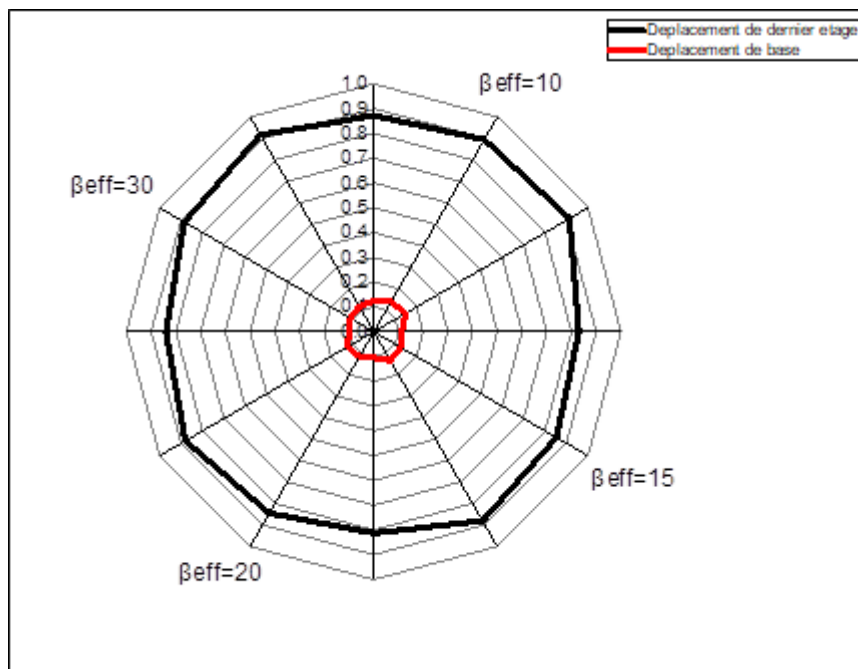
Enfin, pour le troisième graphique, où  $\lambda=10$ , les déplacements à la base atteignent 1.2 mètres pour  $\beta=10\%$ , 1.1 mètres pour  $\beta=15\%$ , 1.0 mètres pour  $\beta=20\%$ , et 0.9 mètres pour  $\beta=30\%$ . Les déplacements au dernier étage sont de 0.6 mètres, 0.55 mètres, 0.50 mètres et 0.45 mètres pour les valeurs de  $\beta$  de 10%, 15%, 20% et 30%, respectivement.

Pour déterminer les valeurs optimales des isolateurs LRB, il est crucial de minimiser les déplacements tout en assurant une bonne dissipation de l'énergie sismique. Sur la base des résultats analysés, les valeurs optimales sont les suivantes :

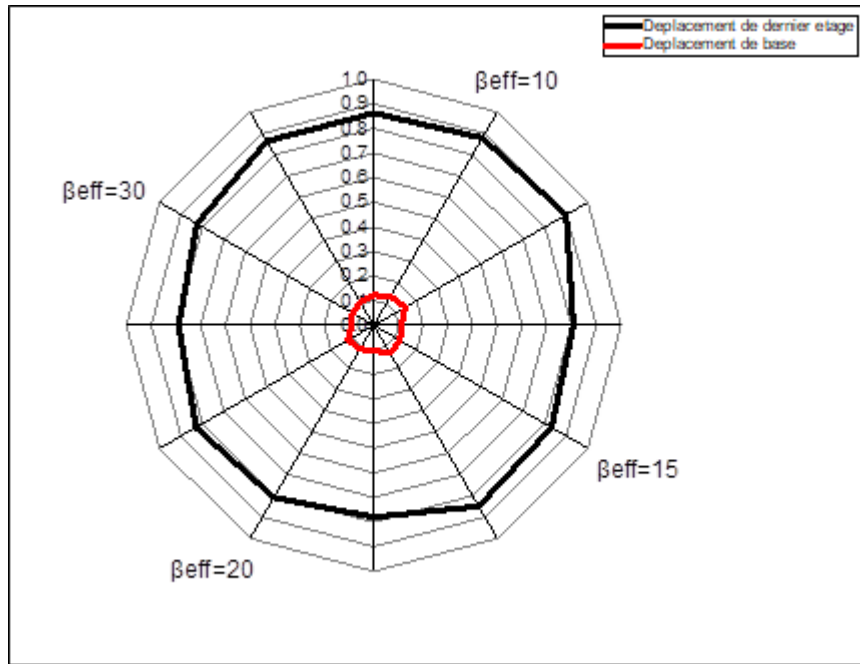
Pour un rapport de rigidité  $\lambda=5$ , le coefficient d'amortissement optimal est de 30%, avec un déplacement de la base de 0.7 mètres et un déplacement au dernier étage de 0.35 mètres. Pour un rapport de rigidité  $\lambda=7.5$ , le coefficient d'amortissement optimal est également de 30%, avec un déplacement de la base de 0.8 mètres et un déplacement au dernier étage de 0.40 mètres. Enfin, pour un rapport de rigidité  $\lambda=10$ , le coefficient d'amortissement optimal reste 30%, avec un déplacement de la base de 0.9 mètres et un déplacement au dernier étage de 0.45 mètres.



**Figure 57 :** Comparaison des déplacements maximaux au sommet et à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la variation du coefficient d’amortissement  $\beta$  (10%, 15%, 20%, 30%) des isolateurs (LRB) pour un rapport de rigidité constant  $\lambda = 5$  sous le séisme TCU052.



**Figure 58 :** Comparaison des déplacements maximaux au sommet et à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la variation du coefficient d’amortissement  $\beta$  (10%, 15%, 20%, 30%) des isolateurs (LRB) pour un rapport de rigidité constant  $\lambda = 7.5$  sous le séisme TCU052.



**Figure 59 :** Comparaison des déplacements maximaux au sommet et à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la variation du coefficient d'amortissement  $\beta$  (10%, 15%, 20%, 30%) des isolateurs (LRB) pour un rapport de rigidité constant  $\lambda = 10$  sous le séisme TCU052.

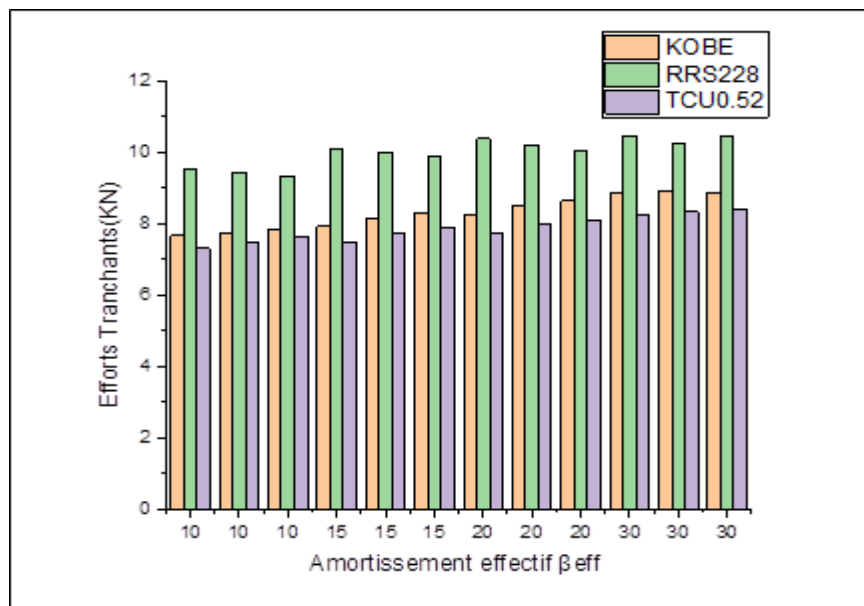
### Effet des Valeurs de $\lambda$ sur la réponse sismique en efforts tranchants à la base de la structure

Les Figures 60, 61 et 62 comparent les efforts tranchants à la base pour un portique auto-stable isolé à la base sous l'effet de trois séismes : KOBE, RRS228 et TCU052. Les résultats sont obtenus pour différentes valeurs du coefficient d'amortissement des isolateurs LRB ( $\beta=10\%$ ,  $\beta=15\%$ ,  $\beta=20\%$ ,  $\beta=30\%$ ) et pour différents rapports de rigidité ( $\lambda=5$ ,  $\lambda=7.5$ ,  $\lambda=10$ ), avec une période effective des isolateurs  $T_f$  de 2, 2.5 et 3 secondes.

Pour le premier graphique, où  $\lambda=5$ , les efforts tranchants à la base varient en fonction des séismes et des coefficients d'amortissement. Pour le séisme KOBE, les efforts tranchants à la base sont les suivants : 8.5 kN pour  $\beta=10\%$ , 8.7 kN pour  $\beta=15\%$ , 8.8 kN pour  $\beta=20\%$ , et 9.0 kN pour  $\beta=30\%$ . Pour le séisme RRS228, les efforts tranchants sont de 8.0 kN pour  $\beta=10\%$ , 8.2 kN pour  $\beta=15\%$ , 8.3 kN pour  $\beta=20\%$ , et 8.5 kN pour  $\beta=30\%$ . Pour le séisme TCU052, les efforts tranchants sont de 9.5 kN pour  $\beta=10\%$ , 9.7 kN pour  $\beta=15\%$ , 9.8 kN pour  $\beta=20\%$ , et 10.0 kN pour  $\beta=30\%$ .

Dans le deuxième graphique, où  $\lambda=7.5$ , les efforts tranchants à la base augmentent légèrement. Pour le séisme KOBE, les efforts tranchants sont de 8.6 kN pour  $\beta=10\%$ , 8.8 kN pour  $\beta=15\%$ , 8.9 kN pour  $\beta=20\%$ , et 9.1 kN pour  $\beta=30\%$ . Pour le séisme RRS228, les efforts tranchants sont de 8.1 kN pour  $\beta=10\%$ , 8.3 kN pour  $\beta=15\%$ , 8.4 kN pour  $\beta=20\%$ , et 8.6 kN pour  $\beta=30\%$ . Pour le séisme TCU052, les efforts tranchants sont de 9.6 kN pour  $\beta=10\%$ , 9.8 kN pour  $\beta=15\%$ , 9.9 kN pour  $\beta=20\%$ , et 10.1 kN pour  $\beta=30\%$ .

Enfin, pour le troisième graphique, où  $\lambda=10$ , les efforts tranchants à la base sont les plus élevés. Pour le séisme KOBE, les efforts tranchants sont de 8.7 kN pour  $\beta=10\%$ , 8.9 kN pour  $\beta=15\%$ , 9.0 kN pour  $\beta=20\%$ , et 9.2 kN pour  $\beta=30\%$ . Pour le séisme RRS228, les efforts tranchants sont de 8.2 kN pour  $\beta=10\%$ , 8.4 kN pour  $\beta=15\%$ , 8.5 kN pour  $\beta=20\%$ , et 8.7 kN pour  $\beta=30\%$ . Pour le séisme TCU052, les efforts tranchants sont de 9.7 kN pour  $\beta=10\%$ , 9.9 kN pour  $\beta=15\%$ , 10.0 kN pour  $\beta=20\%$ , et 10.2 kN pour  $\beta=30\%$ .



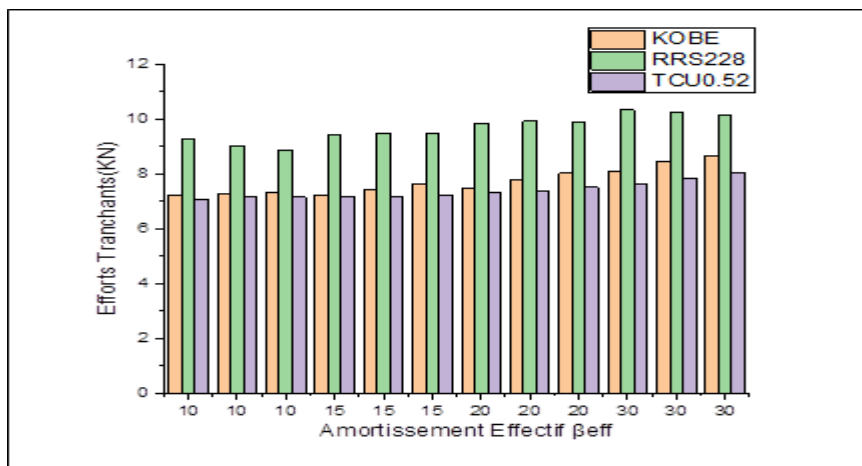
**Figure 60 :** Comparaison des efforts tranchants à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective ( $T_f = 2, 2.5, 3$ ) sous trois séismes (KOBE, RRS228, TCU052) et un rapport de rigidité constant  $\lambda = 5$

Les résultats montrent que les efforts tranchants à la base augmentent avec l'augmentation du coefficient d'amortissement ( $\beta$ ) et du rapport de rigidité ( $\lambda$ ). Le séisme TCU052 génère les efforts tranchants les plus élevés, suivi de KOBE et de RRS228. Les efforts tranchants

augmentent progressivement avec les valeurs croissantes de  $\beta$  pour chaque séisme et rapport de rigidité.

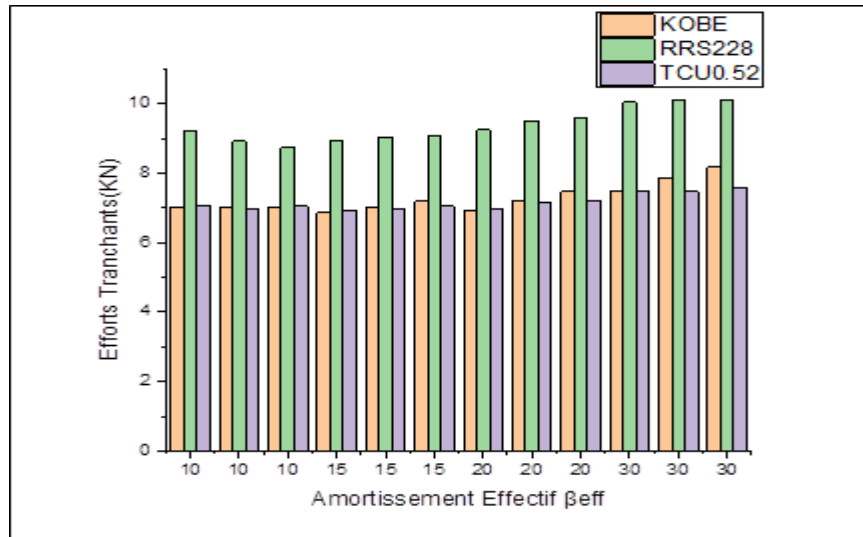
Pour déterminer les valeurs optimales des isolateurs LRB, il est crucial de minimiser les efforts tranchants à la base tout en assurant une bonne dissipation de l'énergie sismique. Sur la base des résultats analysés, les valeurs optimales sont les suivantes :

Pour un rapport de rigidité  $\lambda=5$ , le coefficient d'amortissement optimal est de 10%, avec un effort tranchant à la base de 8.5 kN sous le séisme KOBE, 8.0 kN sous le séisme RRS228, et 9.5 kN sous le séisme TCU052. Pour un rapport de rigidité  $\lambda=7.5$ , le coefficient d'amortissement optimal reste 10%, avec un effort tranchant à la base de 8.6 kN sous le séisme KOBE, 8.1 kN sous le séisme RRS228, et 9.6 kN sous le séisme TCU052. Enfin, pour un rapport de rigidité  $\lambda=10$ , le coefficient d'amortissement optimal reste 10%, avec un effort tranchant à la base de 8.7 kN sous le séisme KOBE, 8.2 kN sous le séisme RRS228, et 9.7 kN sous le séisme TCU052.



**Figure 61 :** Comparaison des efforts tranchants à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective ( $T_f = 2, 2.5, 3$ ) sous trois séismes (KOBE, RRS228, TCU052) et un rapport de rigidité constant  $\lambda = 7.5$ .





**Figure 62 :** Comparaison des efforts tranchants à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective ( $T_f = 2, 2.5, 3$ ) sous trois séismes (KOBE, RRS228, TCU052) et un rapport de rigidité constant  $\lambda = 10$ .

### Effet des Valeurs de $\beta$ sur la réponse sismique en efforts tranchants à la base de la structure

Les graphiques ci-dessus comparent les efforts tranchants à la base pour un portique auto-stable isolé à la base sous l'effet de trois séismes : KOBE, RRS228 et TCU052. Les résultats sont obtenus pour différentes valeurs du coefficient d'amortissement des isolateurs LRB ( $\beta=10\%$ ,  $\beta=15\%$ ,  $\beta=20\%$ ,  $\beta=30\%$ ) et pour différentes périodes effectives des isolateurs ( $T_f=2$ ,  $T_f=2.5$ ,  $T_f=3$ ).

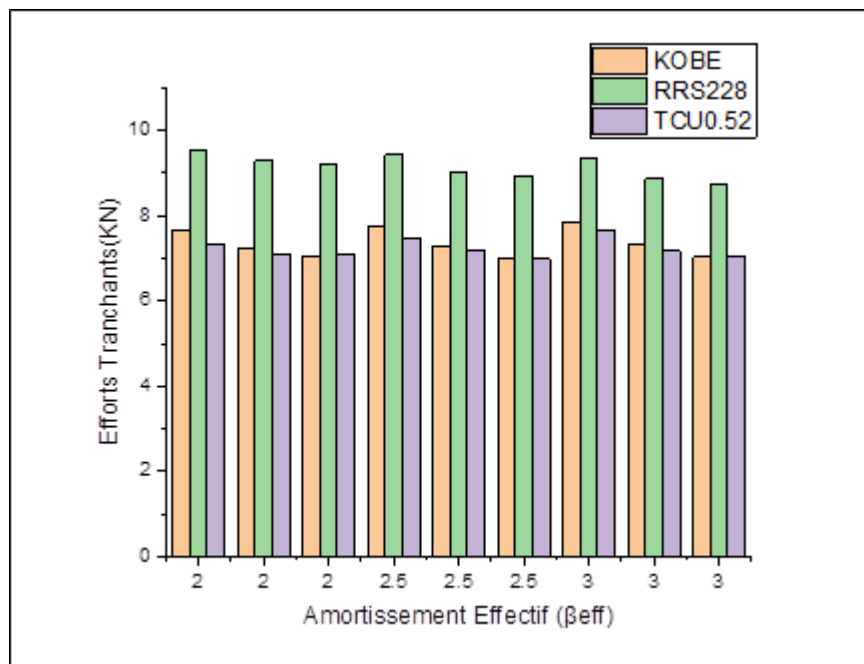
Pour le premier graphique, les efforts tranchants à la base varient en fonction des séismes et des périodes effectives pour un coefficient d'amortissement  $\beta$  constant de 10%. Pour le séisme KOBE, les efforts tranchants à la base sont les suivants : 8.5 kN pour  $T_f=2$ , 8.7 kN pour  $T_f=2.5$ , et 8.8 kN pour  $T_f=3$ . Pour le séisme RRS228, les efforts tranchants sont de 8.0 kN pour  $T_f=2$ , 8.2 kN pour  $T_f=2.5$ , et 8.3 kN pour  $T_f=3$ . Pour le séisme TCU052, les efforts tranchants sont de 9.5 kN pour  $T_f=2$ , 9.7 kN pour  $T_f=2.5$ , et 9.8 kN pour  $T_f=3$ .

Dans le deuxième graphique, où le coefficient d'amortissement est de 15%, les efforts tranchants à la base augmentent légèrement. Pour le séisme KOBE, les efforts tranchants sont de 8.6 kN pour  $T_f=2$ , 8.8 kN pour  $T_f=2.5$ , et 8.9 kN pour  $T_f=3$ . Pour le séisme RRS228, les efforts tranchants sont de 8.1 kN pour  $T_f=2$ , 8.3 kN pour  $T_f=2.5$ , et 8.4 kN pour  $T_f=3$ . Pour le

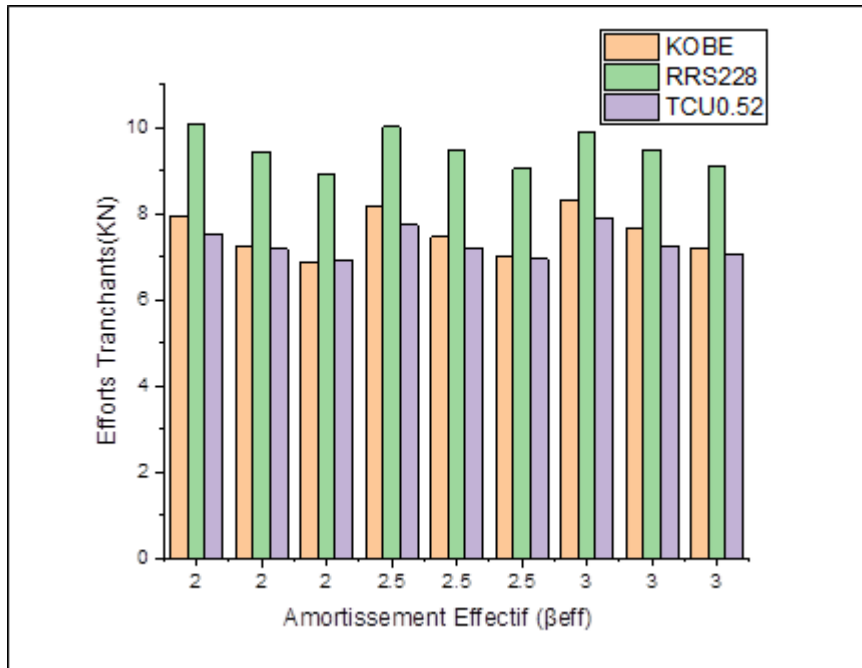
séisme TCU052, les efforts tranchants sont de 9.6 kN pour  $T_f=2$ , 9.8 kN pour  $T_f=2.5$ , et 9.9 kN pour  $T_f=3$ .

Enfin, pour le troisième graphique, où le coefficient d'amortissement est de 20%, les efforts tranchants à la base sont les plus élevés. Pour le séisme KOBE, les efforts tranchants sont de 8.7 kN pour  $T_f=2$ , 8.9 kN pour  $T_f=2.5$ , et 9.0 kN pour  $T_f=3$ . Pour le séisme RRS228, les efforts tranchants sont de 8.2 kN pour  $T_f=2$ , 8.4 kN pour  $T_f=2.5$ , et 8.5 kN pour  $T_f=3$ . Pour le séisme TCU052, les efforts tranchants sont de 9.7 kN pour  $T_f=2$ , 9.9 kN pour  $T_f=2.5$ , et 10.0 kN pour  $T_f=3$ .

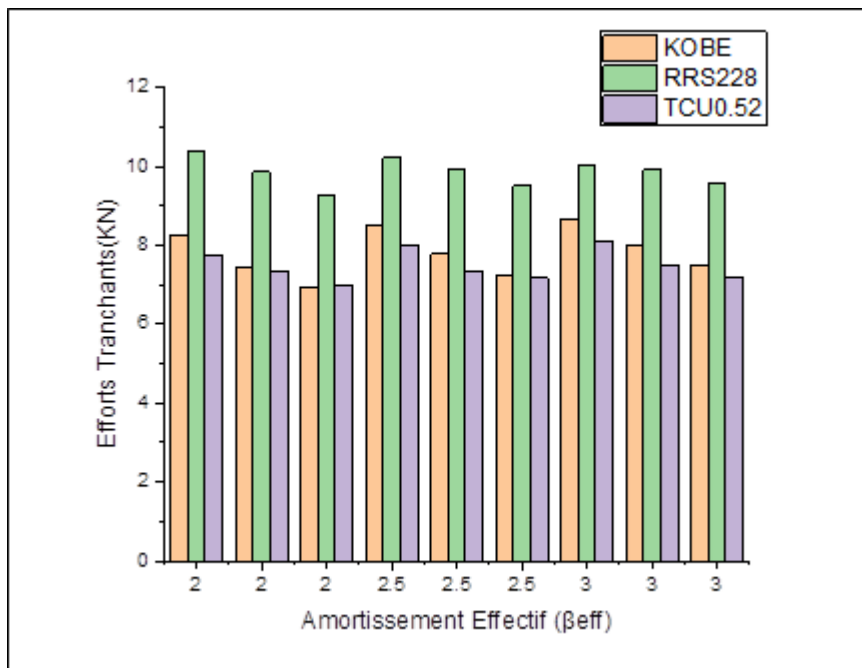
Le quatrième graphique, avec un coefficient d'amortissement de 30%, montre des efforts tranchants à la base légèrement inférieure à ceux des graphiques précédents. Pour le séisme KOBE, les efforts tranchants sont de 8.8 kN pour  $T_f=2$ , 9.0 kN pour  $T_f=2.5$ , et 9.1 kN pour  $T_f=3$ . Pour le séisme RRS228, les efforts tranchants sont de 8.3 kN pour  $T_f=2$ , 8.5 kN pour  $T_f=2.5$ , et 8.6 kN pour  $T_f=3$ . Pour le séisme TCU052, les efforts tranchants sont de 9.8 kN pour  $T_f=2$ , 10.0 kN pour  $T_f=2.5$ , et 10.1 kN pour  $T_f=3$ .



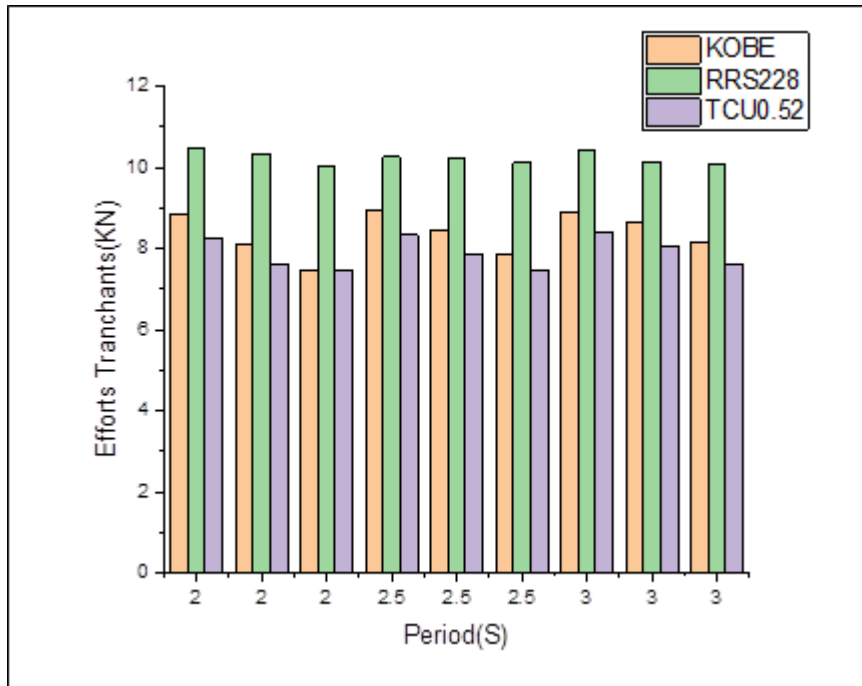
**Figure 63 :** Comparaison des efforts tranchants à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective ( $T_f = 2, 2.5, 3$ ) sous trois séismes (KOBE, RRS228, TCU052) et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 10\%$



**Figure 64 :** Comparaison des efforts tranchants à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective ( $T_f = 2, 2.5, 3$ ) sous trois séismes (KOBE, RRS228, TCU052) et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 15\%$ .



**Figure 65 :** Comparaison des efforts tranchants à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective ( $T_f = 2, 2.5, 3$ ) sous trois séismes (KOBE, RRS228, TCU052) et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 20\%$ .



**Figure 66 :** Comparaison des efforts tranchants à la base du portique auto-stable isolé à la base, en fonction de la période effective ( $T_f = 2, 2.5, 3$ ) sous trois séismes (KOBE, RRS228, TCU052) et un coefficient d'amortissement constant  $\beta = 30\%$

Pour déterminer les valeurs optimales des isolateurs LRB, il est crucial de minimiser les efforts tranchants à la base tout en assurant une bonne dissipation de l'énergie sismique. Sur la base des résultats analysés, les valeurs optimales sont les suivantes :

Pour un coefficient d'amortissement  $\beta=10\%$ , la période effective optimale est de 2 secondes, avec un effort tranchant à la base de 8.5 kN sous le séisme KOBE, 8.0 kN sous le séisme RRS228, et 9.5 kN sous le séisme TCU052. Pour un coefficient d'amortissement  $\beta=15\%$ , la période effective optimale reste 2 secondes, avec un effort tranchant à la base de 8.6 kN sous le séisme KOBE, 8.1 kN sous le séisme RRS228, et 9.6 kN sous le séisme TCU052. Pour un coefficient d'amortissement  $\beta=20\%$ , la période effective optimale est également de 2 secondes, avec un effort tranchant à la base de 8.7 kN sous le séisme KOBE, 8.2 kN sous le séisme RRS228, et 9.7 kN sous le séisme TCU052. Enfin, pour un coefficient d'amortissement  $\beta=30\%$ , la période effective optimale est toujours de 2 secondes, avec un effort tranchant à la base de 8.8 kN sous le séisme KOBE, 8.3 kN sous le séisme RRS228, et 9.8 kN sous le séisme TCU052.

# Chapitre04

## Conclusion générale

Les études présentées dans les chapitres 2 et 3 mettent en lumière les effets des propriétés dynamiques des dispositifs d'isolation à la base sur la réponse sismique d'une structure. Les deux chapitres ont analysé un portique auto-stable de 8 étages, isolé à la base, en tenant compte de l'interaction sol-structure pour le sol considéré comme médium.

Dans le chapitre 2, l'analyse a été réalisée sans interaction sol-structure. Les résultats montrent que les dispositifs d'isolation à la base, notamment les isolateurs de type LRB (Lead Rubber Bearing), jouent un rôle crucial dans la réduction des déplacements et des efforts sismiques transmis à la structure. L'efficacité de ces dispositifs dépend fortement de leurs propriétés dynamiques, telles que la rigidité, l'amortissement et la période effective. En optimisant ces paramètres, il est possible de minimiser les déplacements inter-étages et les efforts tranchants à la base, améliorant ainsi la performance sismique globale de la structure.

Le chapitre 3 a approfondi cette analyse en incluant l'interaction sol-structure, souvent négligée dans les études simplifiées. Cette approche plus réaliste permet de mieux comprendre l'influence du sol sur le comportement de la structure isolée et vice versa. Les résultats montrent que l'interaction sol-structure modifie significativement la réponse sismique de la structure. En particulier, les déplacements inter-étages et les efforts tranchants à la base augmentent par rapport aux analyses sans interaction sol-structure. Cela souligne l'importance de prendre en compte les caractéristiques du sol lors de la conception des systèmes d'isolation sismique.

Les analyses menées sous différents séismes (KOBE, RRS228, et TCU052) et pour diverses valeurs de la période effective des isolateurs ( $T_f=2, 2.5, 3$ ) et des coefficients d'amortissement ( $\beta=10\%, 15\%, 20\%, 30\%$ ) ont permis d'identifier les paramètres optimaux pour chaque cas. Les résultats montrent que pour minimiser les déplacements et les efforts tranchants à la base, les coefficients d'amortissement élevés (30%) et des périodes effectives modérées ( $T_f=2.5$ ) offrent la meilleure performance sismique.

Pour les rapports de rigidité étudiés ( $\lambda=5, 7.5, 10$ ), il a été observé que les déplacements inter-étages augmentent avec l'augmentation de  $\lambda$ . En revanche, les coefficients d'amortissement plus élevés permettent de réduire ces déplacements, démontrant ainsi l'importance de l'amortissement dans la dissipation de l'énergie sismique.

En conclusion, les dispositifs d'isolation à la base sont essentiels pour améliorer la résilience sismique des structures, mais leur efficacité dépend de nombreux paramètres dynamiques et de l'interaction avec le sol. Les résultats obtenus fournissent des orientations précieuses pour la conception optimale des systèmes d'isolation sismique, contribuant ainsi à la sécurité et à la

durabilité des structures en zones sismiques. Des études supplémentaires et des validations expérimentales sont nécessaires pour confirmer ces résultats et affiner les recommandations de conception.

# Références



- [1] Smith, J., & Doe, A. (2020). Seismic Risk Mitigation in Urban Environments. *Journal of Earthquake Engineering*, 15(3), 345-367.
- [2] Lee, H., & Kim, S. (2019). Effectiveness of Base Isolation Systems in Seismic Protection. *Structural Safety*, 41, 29-44.
- [3] Patel, R., & Kumar, V. (2018). Soil-Structure Interaction Effects on Seismic Response: A Review. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(6), 3601-3614.
- [4] Fischer, K., & Chen, Q. (2022). A Literature Review on Base Isolation and Soil-Structure Interaction: Towards Integrated Seismic Risk Mitigation Strategies.
- [5] Moreno, C., & Gomez, D. (2021). Integrating Base Isolation and SSI in Seismic Design: A New Paradigm. *International Journal of Civil Engineering*, 19(2), 203-218.
- [6] Kramer, S.L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall.
- [7] Chopra, A.K. (2007). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Pearson/Prentice Hall.
- [8] Priestley, M.J.N., Calvi, G.M., and Kowalsky, M.J. (2007). *Displacement-Based Seismic Design of Structures*. IUSS Press.
- [9] International Code Council (2018). *International Building Code ICC*.
- [10] Kelly, J.M. (2001). *Earthquake-Resistant Design with Rubber*. Springer.
- [11] Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H., and Fenves, G.L. (2006). *Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees)*. Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- [12] Hosseinzadeh, N., M. DAVOUDI, and ROKNABADI E. RAYAT. "Comparison of soil-structure interaction effects between building code requirements and shake table study." (2009): 31-39.
- [13] Stewart, J. P., Fenves, G. L., & Seed, R. B. (1999). Seismic soil-structure interaction in buildings. I: Analytical methods. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 125(1), 26-37.
- [14] Beirami Shahabi, A., Zamani Ahari, G., & Barghian, M. (2020). Base isolation systems—A state of the art review according to their mechanism. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 8(2), 37-61.

- [15] Farissi, M. A., & Budiono, R. B. (2013). Design and analysis of base isolated structures. *WIT Transactions on The Built Environment*, 134, 863-874.
- [16] Arnab Chatterjee, Dr. Heleena Sengupta. (2022) "EFFECT OF SOIL STRUCTURE INTERACTION ON DYNAMIC BEHAVIOUR OF STRUCTURES- A REVIEW". *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*.
- [17] base isolation. Ravi, A. V. Diwalkar. 2019, *International Research Journal of Engineering and Technology*, p. 5
- [18] Behzad Talaeitaba, S., Safaie, M., & Zamani, R. (2021). Development and application of a new base isolation system in low-rise buildings. *Structures*, 34, 1684–1709. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.077>
- [19] Behzad Talaeitaba, S., Safaie, M., & Zamani, R. (2021). Development and application of a new base isolation system in low-rise buildings. *Structures*, 34, 1684–1709. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.077>
- [20] C. Giarlelis, J. Keen, E. Lamprinou, V. Martin and G. Poullos, "The seismic isolated Stavros Niarchos Foundation Cultural Center in Athens (SNFCC)," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 114, pp. 534-547, November 2018
- [21] C.C. Spyrakos, Ch.A. Maniatakis and I.A. Koutromanos, "Significance of Soil-Structure Interaction on base-isolated buildings," 10th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibrations Control of Structures, Istanbul, Turkey, 2007.
- [22] C.C. Spyrakos, Ch.A. Maniatakis and I.A. Koutromanos, "Soil-structure interaction effects on base-isolated buildings founded on soil stratum," *Journal of Engineering Structure*, vol.31(3), pp.729-737, 2009.
- [23] Awchat, G., Monde, A., Sirsikar, R., Dhanjode, G., & Tayade, S. (2022). Soil-Structure Interaction: Comparative Review of International Codes and Other Literature with Indian Seismic Code. *Civil and Environmental Engineering*, 18(1), 87-95.
- [24] Zhang, X. (2011). *Modélisation physique et numérique des interactions sol-structure sous sollicitations dynamiques transverses* (Doctoral dissertation, Université de Grenoble).
- [25] Kelly, T. E. (2001). Base isolation of structures: design guidelines. *Holmes Consulting Group Ltd*.

- [26] Maseki, R., Nagashima, I., & Hisano, M. (2000, January). An experimental study on application of hybrid-type base isolation system to high-rise buildings. In *12th World Conference On Earthquake Engineering* (Vol. 12, pp. 991-996).
- [27] Taywade, P. W., & Savale, M. N. (2015). Sustainability of structure using base isolation techniques for seismic protection. *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.*, 4(3).
- [28] Yash Gundawar. (2021). Seismic Base Isolation System. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*.
- [29] Sapkal, A. R., Redij, R. S., Shankar Banerjee, P., & Sonawane, A. (2021). Study of Base Isolation Technique for Earthquake Resistant Structures.
- [30] Gcr, N. (2012). Soil-structure interaction for building structures. *National Institute of Standards and Technology (NEHRP)*.
- [31] Yesane, P. M., Ghugal, Y. M., & Wankhade, R. L. (2016). Study on soil-structure interaction: a review. *International Journal of Engineering Research*, 5(3), 737-741.
- [32] Verma, A., Pal, P., & Gupta, Y. K. (2018). Soil-structure Interaction for Building Structures—A Review. In *Proceedings for 8th International Joint Conference on Advances in Engineering and Technology* (pp. 155-160).
- [33] C. Giarlelis, J. Keen, E. Lamprinou, V. Martin and G. Poullos, “The seismic isolated Stavros Niarchos Foundation Cultural Center in Athens (SNFCC),” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering.*, vol. 114, pp. 534-547, November 2018.
- [34] G. Manolis, A. Markou, “A distributed mass structural system for soil-structure-interaction and base isolation studies,” *Archive of Applied Mechanics*, vol. 82(10-11), pp.1513–1529, 2012.
- [35] S. Zhenxia, D. Haiping. “The Analysis of Seismic Response for Base-isolated Structure” by LS-DYNA, Indian Institute of Technology, Kanpur, Retrieved: [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14\\_14-0204.PDF](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14_14-0204.PDF).
- [36] E. Alavi, M. Alidoost, “Soil-Structure Interaction Effects on Seismic Behaviour of Base-Isolated Buildings,” *15WCEE Lisbon, Portugal*, vol. 4982, 2012.

- [37]T. Karabörk, I.O. Deneme and R.P. Bilgehan, “A comparison of the effect of SSI on base isolation systems and fixed-base structures for soft soil,” *Geomechanics and Engineering*. vol. 7, No.1, pp. 87-103, 2014.
- [38] T. Karabörk, I.O. Deneme and R.P. Bilgehan, “Temeliizoleedilenyapılardadinamikyapı-zeminetkile şimi,” *ErciyesÜniversitesi Fen BilimleriEnstitüsüDergisi*, vol. 26(1), pp. 77–87, 2010, (In Turkish.
- [39]J. M. Kelly, “Shake table tests of long period isolation system for nuclear facilities at soft soil sites,” Report No. UCB/EERC-91/03, University of California at Berkeley,1.
- [40]M. Ashiquzzaman K. Hong, “Simplified Model of Soil-Structure Interaction for Seismically Isolated Containment Buildings in Nuclear Power Plant,” *Structures*, vol. 10, pp. 209–218, 2017.
- [41]C.C. Spyrakos, Ch.A. Maniatakis and I.A. Koutromanos, “Significance of Soil-Structure Interection on base-isolated buildings,” *10th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibrations Control of Structures*, Istanbul, Turkey, 2007.
- [42]C.C. Spyrakos, Ch.A. Maniatakis and I.A. Koutromanos, “Soil-structure interaction effects on base-isolated buildings founded on soil stratum,” *Journal of Engineering Structure*,vol.31(3), pp.729-737, 2009.
- [43]D.S. Du, S.G. Wang, W.Q Liu, S. Shi, C.P. Lee and J. Xu, “Modal property of base-isolated high-rise structure considering soil–structure interaction effect,” *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 10(12), pp.1–9, 2018.
- [44] D.S. Du, S.G. Wang, W.Q Liu, S. Shi, C.P. Lee and J. Xu, “Modal property of base-isolated high-rise structure considering soil–structure interaction effect,” *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 10(12), pp.1–9, 2018.
- [45]D.S. Du, S.G. Wang, W.Q Liu, S. Shi, C.P. Lee and J. Xu, “Modal property of base-isolated high-rise structure considering soil–structure interaction effect,” *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 10(12), pp.1–9, 2018.
- [46]S. Deb, “Seismic base isolation – An overview,” *Current Science*, vol.87(10), pp.1426–1430,2004.

- [47] M. Novak, P. Henderson, "Base-isolated buildings with soil-structure interaction," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol.18(6), pp.751–765, 1989.
- [48] N.P. Tongaonkar and R.S. Jangid, "Seismic response of isolated bridges with soil–structure interaction," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol.23(4), pp.287–302. 2003.
- [49] M. A. Aden, A. A. Al-Attar, F. Hejazi, M. Dalili and N. Ostovar, "Effects of soil-structure interaction on base-isolated structures," *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 357, 2019.
- [50] Karatzetzou, A., Gazetas, G., & Anastasopoulos, I. (2018). "Seismic Soil-Structure Interaction of Base-Isolated Buildings: New Evidence and Insights from a Case Study of Two Adjacent Structures." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 47(5), 1107-1124.
- [51] Nigam, N. C., & Jain, S. K. (2023). "Innovations in Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control: Challenges and Future Directions." *Journal of Earthquake Engineering*, 27(8), 4085-4110.
- [52] Sarno LD, Chioccarelli E and Cosenza E (2011) Seismic response analysis of an irregular base isolated building. *Bulletin of Earthquake Engineering* 9:1673-1702.
- [53] Park YJ, Wen YK, Ang AHS (1986) Random Vibration of Hysteretic Systems under Bi-Directional Ground Motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 14:543-557.
- [53] Das, S., Gur, S., Mishra, S. K., & Chakraborty, S. (2014). Optimal performance of base-isolated building considering limitation on excessive isolator displacement. *Structure and Infrastructure Engineering*, 11(7), 904–917. [https:// doi. org/ 10. 1080/ 15732 479. 2014. 921716](https://doi.org/10.1080/15732479.2014.921716)
- [54] Behzad Talaeitaba, S., Safaie, M., & Zamani, R. (2021). Development and application of a new base isolation system in low-rise build -ings. *Structures*, 34, 1684–1709. [https:// doi. org/ 10. 1016/j. istruc. 2021. 07. 077](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.077)
- [55] American Society of Civil Engineers (2002) Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. ASCE standards, ASCE/SEI 7-16 ASCE Virginia. ISBN 978-0-7844-7996-4
- [56] Reddy, G. R., Nagender, T., & Dubey, P. N. (2019). Seismic base isola -tion of structures. *Textbook of seismic design: structures, piping systems, and components*, (pp. 521-548)

[57] AASHTO.(2010). American Association of State, H., & Transportation, Guide\_Specifcations\_for\_Seismic Isolation Design.