

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie civil et hydraulique
Ref :



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

Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de
Doctorat en sciences en : Génie civil
Spécialité (Option) : Interaction sol-structure

**CONCEPTION PARASISMIQUE DES PONTS EQUIPES
DE SYSTEMES D'ISOLATION AVEC PRISE EN COMPTE
DE L'INTERACTION SOL-STRUCTURE**

Présentée par :
KAAB Mohamed Zohair

Soutenue publiquement le **06/12/2018**

Devant le jury composé de :

Dr. HAMADI Djamel	Professeur	Président	Université de Biskra
Dr. OUNIS Abdelhafid	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Dr. BAHEDDI Mohamed	Professeur	Examineur	Université de Batna
Dr. KARECH Toufik	Professeur	Examineur	Université de Batna

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REMERCIEMENTS

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

Je tiens à remercier vivement et sincèrement mon encadreur Pr. OUNIS Abdelhafid qui a contribué et a assuré la direction de ce travail, pour tout le soutien, les orientations et la patience qu'il a manifesté durant son encadrement tout le long de la réalisation de cette thèse.

Je remercie vivement les membres du jury qui ont accepté de juger et d'y apporter leurs cautions.

Mes remerciements vont aussi à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette thèse.

Résumé :

Les isolations parasismiques peuvent être considérées comme un moyen important pouvant offrir une solution technique efficace pour la protection des ponts contre les risques sismiques. Elles consistent à découpler le mouvement de la pile et des isolateurs du mouvement du tablier et à réduire la force sismique induite lors d'un séisme avant qu'elle soit transférée à ce dernier.

Dans le but de mieux comprendre l'effet de ces dispositifs d'isolation avec prise en compte de l'effet de l'interaction sol-structure sur les réponses sismiques des ponts, trois études comparatives ont été effectuées dans ce travail. La première illustre l'influence des systèmes d'isolation parasismique sur la réponse dynamique des ponts isolés, alors que la deuxième et la troisième étude illustrent l'effet du système combiné isolateur FPS (Friction Pendulum System) avec amortisseur à fluide visqueux et l'influence de l'interaction sol-structure sur les réponses sismiques des ponts isolés, dont les résultats ont été analysés à l'aide du programme numérique d'analyse dynamique des structures SAP2000. Ces études consistent à comparer les réponses du pont en termes d'effort tranchant, déplacement, d'accélération, d'énergie absorbée et de fréquence fondamentale.

Mots clés : Pont, Isolation parasismique, Amortisseur à fluide visqueux, Interaction sol-structure, Réponse dynamique.

Abstract :

Seismic isolation can be considered as important means of providing an effective technical solution for the protection of seismic risk for bridges; they are to decouple the movement of the pier and isolation of the deck movement in order to dissipate induced energy during an earthquake and reduce the seismic forces transmitted to it.

In order to better understand the effect of these isolation devices with taking account the effect of the soil-structure interaction on the seismic responses of the bridges, three comparative studies were carried out in this work. The first one illustrates the influence of seismic isolation systems on the dynamic response of isolated bridges, while the second and third studies illustrate the effect of the FPS isolator (Friction Pendulum System) combined system with viscous fluid damper and the influence of the interaction soil-structure on the seismic responses of isolated bridges, the results of which have been analyzed using the SAP2000 structural analysis program. These studies compare the bridge's responses in terms of shear force, displacement, acceleration, absorbed energy and fundamental frequency.

Keywords: Bridge, Seismic isolation, Viscous fluid damper, Soil-structure interaction, Dynamic response.

ملخص :

العزل الزلزالي يعتبر وسيلة مهمة من أجل إعطاء حل تقني فعال لحماية الجسور ضد الخطر الزلزالي حيث يعمل على عزل بلاطة الجسر عن الأعمدة الحاملة لها مما يؤدي إلى تقليل الأحمال الزلزالية على مستوى بلاطة الجسر. من أجل معرفة تأثير العزل الزلزالي مع الأخذ بعين الاعتبار التأثير البيئي تربة-هيكل على الاستجابة الزلزالية للجسور، تم في هذا العمل عرض إنجاز ثلاثة دراسات مقارنة ، الدراسة الأولى تطرقت إلى تأثير وسائل العزل الزلزالي على الاستجابة الديناميكية للجسور المعزولة، أما الدراسة الثانية و الثالثة تطرقت على التوالي إلى تأثير النظام المؤلف من عازل زلزالي FPS (نظام الاحتكاك البندولي) مع مخمد ذو سائل لزج و إلى أثر التأثير البيئي تربة-هيكل على الاستجابة الديناميكية للجسور المعزولة ، حيث تم التحليل بواسطة برنامج رقمي للتحليل الديناميكي للهياكل SAP2000. هذه الدراسات تضمنت مقارنة استجابة الجسر من خلال قوى القص ، الانتقال، التسارع، الطاقة المخمدة و كذا التواتر الأساسي.

كلمات مفتاحية : جسر ، العزل الزلزالي، المخمد ذو السائل اللزج، التأثير البيئي تربة-هيكل، الاستجابة الديناميكية.

Liste des tableaux

Chapitre IV : INFLUENCE DES SYSTEMES D'ISOLATION PARASISMIQUE SUR LA REPONSE DYNAMIQUE DES PONTS ISOLES

Tableau 01 : Les caractéristiques du système d'isolation LRB.....	60
Tableau 02 : Les caractéristiques du système d'isolation FPS.....	60
Tableau 03 : Comparaison des efforts tranchants à la base du pont sans isolation parasismique et avec isolation parasismique (LRB ou FPS).....	65
Tableau 04 : Comparaison des déplacements maximaux du tablier au niveau de la pile 01 pour les trois cas de pont (sans isolation parasismique, avec isolateur LRB et avec isolateur FPS).....	70
Tableau 05 : Comparaison des accélérations maximales du tablier au niveau de la pile 01 pour les trois cas de pont (sans isolation parasismique, avec isolateur LRB et avec isolateur FPS).....	71
Tableau 06 : Comparaison des énergies absorbées par les deux systèmes d'isolation (LRB, FPS).....	78

Chapitre V : EFFET DU SYSTEME COMBINE ISOLATEUR FPS AVEC AMORTISSEUR A FLUIDE VISQUEUX

Tableau 07 : Comparaison des efforts tranchants à la base pour les trois cas de pont (sans isolation parasismique, avec isolateur FPS et avec isolateur FPS+amortisseur à fluide visqueux).....	84
Tableau 08 : Comparaison des déplacements maximaux du tablier au niveau de la pile 01 pour les trois cas de pont.....	89
Tableau 09: Comparaison des accélérations maximales du tablier au niveau de la pile 01 pour les trois cas de pont.....	89
Tableau 10: Comparaison des énergies absorbées par le système d'isolation FPS.....	95
Tableau 11: Comparaison des énergies absorbées par le système combiné FPS+amortisseur visqueux.....	95

Chapitre VI : INFLUENCE DE L'INTERACTION SOL-STRUCTURE SUR LA REPONSE DYNAMIQUE DES PONTS ISOLES

Tableau 12: Rigidité du ressort du sol par les expressions de Zhang et Wolf	98
---	----

Liste des figures

Chapitre I : SYSTEMES DE CONTROLE DES VIBRATIONS

Figure 01 : Les différents types des systèmes de contrôle	6
Figure 02 : Le diagramme de système de contrôle passif.....	7
Figure 03 : Appui en caoutchouc fretté	8
Figure 04 : Appui en caoutchouc fretté avec barre de plomb.....	8
Figure 05 : Appui à friction.....	9
Figure 06 : Appuis à pendule glissant.....	9
Figure 07 : Appui utilisé par l'EDF	10
Figure 08 : Le système d'appui TASS	10
Figure 09 : Appui proposé par N. Mostaghel.	11
Figure 10 : Appui à billes	11
Figure 11 : Amortisseurs métalliques proposés par Skinner et al.	12
Figure 12 : Amortisseurs métalliques	12
Figure 13 : Le système d'appui MRSD	13
Figure 14 : Emplacement du système d'appui MRSD dans un pont	13
Figure 15 : Amortisseurs à frottement.....	14
Figure 16 : Dispositifs des amortisseurs viscoélastiques VE	15
Figure 17 : Amortisseurs à fluide visqueux	17
Figure 18 : Diagramme de système de contrôle actif.....	18
Figure 19 : Amortisseur de masse actif (AMD) et amortisseur de masse accordée (TMD).....	19
Figure 20 : Système de câble actif.....	19
Figure 21 : Système de contreventement actif avec actionneur hydraulique	19
Figure 22 : Le TMD Semi actif.....	20
Figure 23: Amortisseurs semi actifs à frottement avec actionneur piézoélectriques	21
Figure 24: Amortisseur semi actif de vibration.....	21
Figure 25: Amortisseur semi actif à rigidité variable.....	21
Figure 26 : Amortisseur magnéto- rhéologiques.....	22
Figure 27 : Amortisseur semi-actif de fluide visqueux.....	22

Chapitre II : CONCEPTS THEORIQUES DES SYSTEMES D'ISOLATION ET DE L'AMORTISSEUR A FLUIDE VISQUEUX

Figure 28 : Détails de l'appui en caoutchouc fretté avec barreau de plomb.....	24
Figure 29 : Approximation bilinéaire d'une loi de comportement hystérétique exprimée en force-déplacement.....	25
Figure 30 : Modèle mathématique pour un système d'isolation en caoutchouc fretté avec barreau de plomb.....	26
Figure 31 : Détails de l'appui à pendule glissant.....	26
Figure 32 : Comportement frottant exprimée en force-déplacement.	27
Figure 33: Modèle mathématique pour un système d'isolation en pendule glissante (FPS).....	28
Figure 34: Détails de l'amortisseur à fluide visqueux.	29
Figure 35 : Comportement visqueux exprimé en force-déplacement.	29
Figure 36 : Pourcentage d'amortissement des systèmes avec amortisseur à fluide visqueux non linéaire en fonction de l'amplitude du mouvement.	32
Figure 37: Système à un seul degré de liberté avec amortisseur à fluide visqueux	33
Figure 38: Modèle mathématique pour un système combiné LRB + amortisseur à fluide visqueux	34
Figure 39: Modèle mathématique pour un système combiné FPS + amortisseur à fluide visqueux	35

Chapitre III : INTERACTION SOL-STRUCTURE

Figure 40 : Illustration de l'interaction sol-structure sur la réponse d'un ouvrage.....	37
Figure 41 : Modèle idéalisé pour illustrer l'effet de l'interaction sol-structure.....	38
Figure 42 : Illustration de l'influence de l'interaction sol-structure.....	43
Figure 43 : Théorème de superposition	44
Figure 44 : Les trois étapes de solution pour le théorème de superposition	45
Figure 45 : Modèle analogique à quatre degrés de liberté pour un pont isolé y compris les impédances du sol.....	46
Figure 46 : Système équivalent à deux degrés de liberté pour un pont isolé et fixe à la base.....	52
Figure 47 : Facteur de participation modale pour les deux modes.....	56

Chapitre IV : INFLUENCE DES SYSTEMES D'ISOLATION PARASISMIQUE SUR LA REPOSE DYNAMIQUE DES PONTS ISOLES

Figure 48 : Pont équipé d'un système d'isolation	61
Figure 49 : Vue en 3D du pont avec système d'isolation parasismique.....	62
Figure 50 : La composante de Hollister du séisme de Loma Prieta (1989).....	63
Figure 51 : La composante de Petrolia du séisme de Petrolia (1992).....	63
Figure 52 : La composante Newhall Fire du séisme de Northridge (1994).....	64
Figure 53 : La composante de CHY080 du séisme de Chi-Chi (1999).....	64
Figure 54 : Les efforts tranchants pour les trois ponts avec isolation (LRB ou FPS) et sans isolation parasismique pour les quatre chargements sismiques utilisés.....	65
Figure 55 : Comparaison des déplacements du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont (sans isolation parasismique, avec isolateur LRB et avec isolateur FPS) soumis à la composante de Hollister du séisme de Loma Prieta.....	66
Figure 56 : Comparaison des déplacements du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont (sans isolation parasismique, avec isolateur LRB et avec isolateur FPS) soumis à la composante de Petrolia du séisme de Petrolia.....	67
Figure 57 : Comparaison des déplacements du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont (sans isolation parasismique, avec isolateur LRB et avec isolateur FPS) soumis à la composante de Newhall Fire du séisme de Northridge.....	67
Figure 58 : Comparaison des déplacements du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont (sans isolation parasismique, avec isolateur LRB et avec isolateur FPS) soumis à la composante de CHY080 du séisme de Chi-Chi.....	68
Figure 59 : Comparaison des accélérations du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont (sans isolation parasismique, avec isolateur LRB et avec isolateur FPS) soumis à la composante de Hollister du séisme de Loma Prieta.....	68
Figure 60 : Comparaison des accélérations du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont (sans isolation parasismique, avec isolateur LRB et avec isolateur FPS) soumis à la composante de Petrolia du séisme de Petrolia.....	69
Figure 61 : Comparaison des accélérations du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont (sans isolation parasismique, avec isolateur LRB et avec isolateur FPS) soumis à la composante de Newhall Fire du séisme de Northridge.....	69
Figure 62 : Comparaison des accélérations du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont (sans isolation parasismique, avec isolateur LRB et avec isolateur FPS) soumis à la composante de CHY080 du séisme de Chi-Chi.....	70

Figure 63 : Diagrammes des énergies absorbées par le pont sans isolation parasismique soumis à la composante de Hollister du séisme de Loma Prieta.....	72
Figure 64 : Diagrammes des énergies absorbées par le pont sans isolation parasismique soumis à la composante de de Petrolia du séisme de Petrolia.....	72
Figure 65 : Diagrammes des énergies absorbées par le pont sans isolation parasismique soumis à la composante de Newhall Fire du séisme de Northridge.....	73
Figure 66 : Diagrammes des énergies absorbées par le pont sans isolation parasismique soumis à la composante de CHY080 du séisme de Chi-Chi.....	73
Figure 67 : Diagrammes des énergies absorbées par l'isolateur LRB et l'amortissement modal soumis à la composante de Hollister du séisme de Loma Prieta.....	74
Figure 68 : Diagrammes des énergies absorbées par l'isolateur LRB et l'amortissement modal soumis à la composante de Petrolia du séisme de Petrolia.....	74
Figure 69 : Diagrammes des énergies absorbées par l'isolateur LRB et l'amortissement modal soumis à la composante de Newhall Fire du séisme de Northridge.....	75
Figure 70 : Diagrammes des énergies absorbées par l'isolateur LRB et l'amortissement modal soumis à la composante de CHY080 du séisme de Chi-Chi.....	75
Figure 71 : Diagrammes des énergies absorbées par l'isolateur FPS et l'amortissement modal soumis à la composante de Hollister du séisme de Loma Prieta.....	76
Figure 72 : Diagrammes des énergies absorbées par l'isolateur FPS et l'amortissement modal soumis à la composante de Petrolia du séisme de Petrolia.....	76
Figure 73 : Diagrammes des énergies absorbées par l'isolateur FPS et l'amortissement modal soumis à la composante de Newhall Fire du séisme de Northridge.....	77
Figure 74 : Diagrammes des énergies absorbées par l'isolateur FPS et l'amortissement modal soumis à la composante de CHY080 du séisme de Chi-Chi.....	77
Figure 75 : Distribution des contraintes dans le tablier pour les trois cas étudiés de ponts.....	79

Chapitre V : EFFET DU SYSTEME COMBINE ISOLATEUR FPS AVEC AMORTISSEUR A FLUIDE VISQUEUX

Figure 76 : Pont équipé d'un système combiné isolateur FPS avec amortisseur à fluide visqueux.....	82
Figure 77 : Les efforts tranchants à la base pour les trois cas étudiés de ponts.....	83
Figure 78 : Comparaison des déplacements du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont soumis à la composante de Hollister du séisme de Loma Prieta...	85

Figure 79 : Comparaison des déplacements du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont soumis à la composante de Petrolia du séisme de Petrolia.....	85
Figure 80 : Comparaison des déplacements du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont soumis à la composante de de Newhall Fire du séisme de de Northridge.....	86
Figure 81 : Comparaison des déplacements du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont soumis à la composante de CHY080 du séisme de Chi-Chi.....	86
Figure 82 : Comparaison des accélérations du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont soumis à la composante de Hollister du séisme de Loma Prieta...	87
Figure 83 : Comparaison des accélérations du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont soumis à la composante de Petrolia du séisme de Petrolia.....	87
Figure 84 : Comparaison des accélérations du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont soumis à la composante de Newhall Fire du séisme de Northridge.....	88
Figure 85 : Comparaison des accélérations du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont soumis à la composante de CHY080 du séisme de Chi-Chi.....	88
Figure 86 : Diagrammes des énergies absorbées par l'isolateur FPS soumis à la composante de Hollister du séisme de Loma Prieta.....	91
Figure 87 : Diagrammes des énergies absorbées par l'isolateur FPS et l'amortisseur visqueux soumis à la composante de Hollister du séisme de Loma Prieta.....	91
Figure 88 : Diagrammes des énergies absorbées par l'isolateur FPS soumis à la composante de Petrolia du séisme de Petrolia.....	92
Figure 89 : Diagrammes des énergies absorbées par l'isolateur FPS et l'amortisseur visqueux soumis à la composante de Petrolia du séisme de Petrolia.....	92
Figure 90 : Diagrammes des énergies absorbées par l'isolateur FPS soumis à la composante de Newhall Fire du séisme de Northridge.....	93
Figure 91 : Diagrammes des énergies absorbées par l'isolateur FPS et l'amortisseur visqueux soumis à la composante de Newhall Fire du séisme de Northridge.....	93
Figure 92 : Diagrammes des énergies absorbées par l'isolateur FPS soumis à la composante de CHY080 du séisme de Chi-Chi.....	94
Figure 93 : Diagrammes des énergies absorbées par l'isolateur FPS et l'amortisseur visqueux soumis à la composante de CHY080 du séisme de Chi-Chi.....	94

Chapitre VI : INFLUENCE DE L'INTERACTION SOL-STRUCTURE SUR LA REPOSE DYNAMIQUE DES PONTS ISOLES

Figure 94 : Modèle analogique d'interaction sol-structure.....	98
Figure 95 : Variation de la fréquence fondamentale en fonction du module de cisaillement du sol G pour le pont sans isolation parasismique.....	100
Figure 96 : Variation de la fréquence fondamentale en fonction du module de cisaillement du sol G pour le pont équipé de système isolation parasismique.....	100
Figure 97 : Les efforts tranchants à la base pour le pont sans isolation parasismique en fonction du module de cisaillement du sol G sous les quatre excitations sismiques utilisées.....	101
Figure 98 : Les efforts tranchants à la base pour le pont avec isolation parasismique en fonction du module de cisaillement du sol G sous les quatre excitations sismiques utilisées.....	102
Figure 99 : Déplacements maximaux absolus du tablier au niveau de la pile 01 pour le pont sans isolation parasismique en fonction du module de cisaillement du sol G sous les quatre excitations sismiques utilisées.....	103
Figure 100 : Déplacements maximaux absolus du tablier au niveau de la pile 01 pour le pont avec isolation parasismique en fonction du module de cisaillement du sol G sous les quatre excitations sismiques utilisées.....	103
Figure 101 : Accélérations maximales du tablier au niveau de la pile 01 pour le pont sans isolation parasismique en fonction du module de cisaillement du sol G sous les quatre excitations sismiques utilisées.....	104
Figure 102 : Accélérations maximales du tablier au niveau de la pile 01 pour le pont avec isolation parasismique en fonction du module de cisaillement du sol G sous les quatre excitations sismiques utilisées.....	105

Liste des symboles

k : La rigidité du système élastique.

c : Le coefficient d'amortissement visqueux.

m : La masse de la structure.

D : Déplacement de calcul ou de conception de l'isolateur.

D_y : Déplacement à la limite d'élasticité.

W_D : Energie dissipée par cycle.

F_y : La force d'écoulement dans un chargement monotone.

Q : La force correspondant au déplacement nul lors d'un chargement cyclique.

F_{\max} : La force maximale de cisaillement.

K_1 : La rigidité élastique pour un chargement monotone.

K_2 : La rigidité post-élastique.

K_{eff} : La rigidité effective de l'isolateur.

β_{eff} : Le pourcentage d'amortissement effectif du système d'isolation.

C_{eq} : Le coefficient d'amortissement équivalent.

m_b : La masse de la base au-dessus du système d'isolation.

x_b : Le déplacement de la base au-dessus du système d'isolation.

\ddot{u}_g : L'accélération du sol.

W : Charge verticale transmise par l'isolateur.

R : Rayon de la surface de glissement sphérique.

μ : Coefficient de frottement de la surface de glissement.

F : La force latérale développée dans le système d'isolation FPS.

F_D : La force induite à la structure par l'amortisseur à fluide visqueux

C_D : Le coefficient d'amortissement de l'amortisseur à fluide visqueux.

α : L'exposant caractéristique de la viscosité du fluide.

I_D : Le vecteur d'influence de l'emplacement de l'amortisseur.

ξ : Le pourcentage d'amortissement de la structure.

u : Le déplacement horizontal de la masse.

u_0 : Le déplacement horizontal de la fondation.

θ, φ : Les rotations de la fondation.
 u_g : Le déplacement horizontal du sol.
 h : La hauteur de structure équivalente ou la hauteur de la pile.
 u^t : Le déplacement absolu de la masse.
 T : L'énergie cinétique du système.
 V : L'énergie potentielle du système.
 k_h : La rigidité horizontale du sol.
 c_h : Le coefficient d'amortissement horizontal du sol.
 k_r : La rigidité rotationnelle du sol.
 c_r : Le coefficient d'amortissement rotationnel du sol.
 ξ_h : Le pourcentage d'amortissement horizontal du sol.
 ξ_r : Le pourcentage d'amortissement rotationnel du sol.
 ω : La fréquence angulaire d'excitation.
 ω_s : La fréquence angulaire de la structure.
 ω_h : La fréquence angulaire horizontale du sol.
 ω_r : La fréquence angulaire rotationnelle du sol.
 $\tilde{\omega}$: La fréquence propre pour un système équivalent sans ISS.
 $\tilde{\xi}$: Le pourcentage d'amortissement pour un système équivalent sans ISS.
 \tilde{u}_g : Le déplacement à la base pour un système équivalent.
 $\bar{h}, \bar{s}, \bar{m}$: Paramètres adimensionnels.
 r : Le rayon de la fondation circulaire équivalente.
 γ_0 : Le coefficient adimensionnel d'amortissement.
 μ_0 : Le coefficient adimensionnel de masse.
 V_s : La vitesse des ondes de cisaillement.
 ρ : La masse volumique.
 ν : Le coefficient de Poisson
 G : Le module de cisaillement
 M : La matrice de masse du système.
 C : La matrice d'amortissement du système.
 K : La matrice de rigidité du système.

U : Le vecteur de déplacement absolu.
 Y : Le vecteur de déplacement relatif.
 U_g : Le vecteur de mouvement du sol.
 k_b : La rigidité du système d'isolation.
 c_b : Le coefficient d'amortissement du système d'isolation.
 k_s : La rigidité du pont.
 c_s : Le coefficient d'amortissement du pont.
 u_b : Le déplacement relatif de la masse du tablier au-dessus du système d'isolation.
 u_s : Le déplacement relatif de la masse en tête des piles.
 u'_b : Le déplacement absolu de la masse du tablier au-dessus du système d'isolation.
 u'_s : Le déplacement absolu de la masse en tête des piles.
 ξ_b : Le pourcentage d'amortissement du système d'isolation.
 ξ_s : Le pourcentage d'amortissement du pont.
 m_s : La masse en tête des piles.
 $\tilde{\omega}_b$: La fréquence propre du système d'isolation pour un système équivalent sans ISS.
 $\tilde{\omega}_s$: La fréquence propre du pont pour un système équivalent sans ISS.
 \tilde{k}_b : La rigidité du système d'isolation pour un système équivalent sans ISS.
 \tilde{k}_s : La rigidité du pont pour un système équivalent sans ISS.
 \tilde{c}_b : Le coefficient d'amortissement de l'isolation pour un système équivalent sans ISS.
 \tilde{c}_s : Le coefficient d'amortissement du pont pour un système équivalent sans ISS.
 $\tilde{\xi}_b$: Le pourcentage d'amortissement de l'isolation pour un système équivalent sans ISS.
 $\tilde{\xi}_s$: Le pourcentage d'amortissement du pont pour un système équivalent sans ISS.
 \tilde{R}_s : Le pourcentage de rigidité du système équivalent.
 $\tilde{\psi}$: Le facteur de participation modale pour un système équivalent.

SOMMAIRE

Introduction générale	01
Chapitre I : SYSTEMES DE CONTROLE DES VIBRATIONS	
I-1- Introduction.....	04
I-2- Historique de contrôle des vibrations.....	04
I-3- Système de contrôle passif.....	07
I-3-1- Les isolateurs à la base.....	07
I-3-1-1- Appuis à déformation.....	07
I-3-1-1-1- Appuis en caoutchouc fretté.....	07
I-3-1-1-2- Appuis en caoutchouc fretté avec barreau de plomb (LRB)	08
I-3-1-2- Appuis à glissement.....	08
I-3-1-2-1- Appuis à frottement pur	09
I-3-1-2-2- Appuis à pendule glissant.....	09
I-3-1-3- Appuis à déformation et glissement.....	09
I-3-1-3-1- Appui utilisé par l'EDF (Electricité de France)	10
I-3-1-3-2- Le système d'appui TASS.....	10
I-3-1-3-3- Appui proposé par N. Mostaghel.....	11
I-3-1-4- Appuis à roulement.....	11
I-3-2- Contrôle passif avec dissipateurs d'énergie.....	11
I-3-2-1- Amortisseurs métalliques.....	12
I-3-2-2- Amortisseurs à frottement	14
I-3-2-3- Amortisseurs viscoélastiques (VE)	15
I-3-2-4- Amortisseurs à fluide visqueux.....	16
I-3-3- Contrôle passif avec systèmes inertiels couplés.....	17
I-4- Système de contrôle actif	17
I-5- Système de contrôle semi-actif.....	20
I-6- Système de contrôle hybride	22
Chapitre II : CONCEPTS THEORIQUES DES SYSTEMES D'ISOLATION ET DE L'AMORTISSEUR A FLUIDE VISQUEUX	
II -1 Introduction	23
II-2- Système d'isolation LRB.....	24
II-2-1- Comportement du système d'isolation LRB.....	24

II-2-2-Modèle mathématique du système LRB	26
II-3- Système d'isolation FPS.....	26
II-3-1- Comportement du système d'isolation FPS.....	27
II-2-2-Modèle mathématique du système FPS.....	28
II-4- Amortisseur à fluide visqueux.....	29
II-4-1-Comportement de l'amortisseur à fluide visqueux.....	29
II-4-2- Dissipation d'énergie avec amortisseur à fluide visqueux non linéaire	30
II-4-3- Système à un seul degré de liberté avec amortisseur à fluide visqueux.....	33
II-5- Système combiné LRB + Amortisseur à fluide visqueux.....	34
II-6- Système combiné FPS + Amortisseur à fluide visqueux	35

Chapitre III : INTERACTION SOL-STRUCTURE

III -1- Introduction	36
III-2- Principes de base de l'interaction sol-structure	36
III-2-1- Effet de l'interaction sol-structure sur un modèle analogique simple	38
III-3- Théorème de superposition pour l'interaction sol-structure	44
III-4- Influence de l'interaction sol-structure sur la réponse dynamique d'un pont équipé d'un système d'isolation.	46
III-4-1- Equations de mouvement pour un modèle analogique à quatre degrés de liberté	47
III-4-2- Formulation des équations du mouvement pour un système équivalent à deux degrés de liberté	51
III-4-2-1- Equations de mouvement	52
III-4-2-2- Calcul des fréquences propres	53
III-4-2-3- Détermination des modes propres	54
III-4-2-4- Facteur de Participation modale	55
III-4-2-5- Fréquences du système équivalent	56
III-4-2-6- Pourcentage d'amortissement du système équivalent	57

Chapitre IV : INFLUENCE DES SYSTEMES D'ISOLATION PARASISMIQUE SUR LA REPONSE DYNAMIQUE DES PONTS ISOLES

IV-1- Introduction.....	59
IV-2- Présentation de l'ouvrage	60
IV-3- Excitation sismique	62

IV-4- Comparaison des résultats.....	65
IV-4-1- Les efforts tranchants	65
IV-4-2- Déplacements et accélérations	66
IV-4-3-Energie absorbée.....	71
IV-5- Conclusion	79

**Chapitre V : EFFET DU SYSTEME COMBINE ISOLATEUR FPS AVEC
AMORTISSEUR A FLUIDE VISQUEUX**

V-1- Introduction.....	81
V-2- Présentation de l’ouvrage et de l'excitation sismique	81
V-3- Résultats et Analyse	83
V-3-1- Les efforts tranchants	83
V-3-2- Déplacements et accélérations	84
V-3-3-Energie absorbée.....	90
V-4- Conclusion	96

**Chapitre VI : INFLUENCE DE L’INTERACTION SOL-STRUCTURE SUR LA
REPONSE DYNAMIQUE DES PONTS ISOLES**

VI-1- Introduction.....	97
VI-2- - Modèle du sol	97
VI-3- Présentation de l’ouvrage et de l'excitation sismique	99
VI-4- Comparaison des résultats.....	99
VI-4-1- Fréquence fondamentale	99
VI-4-2- Les efforts tranchants	101
VI-4-3- Les déplacements	102
VI-4-4- Les accélérations	104
VI-5- Conclusion	105

Conclusion générale107

Bibliographie 109

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

L'expérience a montré que les ponts construits dans les régions à forte sismicité subissent des dégâts parfois énormes malgré les révisions, les modifications et les améliorations apportées dans les règles des conceptions parasismiques. Du coup, repenser à une manière plus efficace, pour mieux protéger les ponts contre les risques sismiques s'est avérée nécessaire. Cela est réalisé grâce à l'exploitation des règles des conceptions basées sur des technologies innovatrices nommées l'isolation parasismique et la prise en compte de l'effet de l'interaction sol-structure.

La prise en considération de l'effet de l'interaction sol-structure devient extrêmement importante lorsque le sol ou le milieu de la fondation est très meuble. Pendant l'excitation sismique en présence d'une structure, le déplacement des supports ou de la zone d'interface du sol et de la structure sont différents de celui du mouvement du sol en champ libre. Ces interactions modifient sensiblement la réponse de la structure. Pour un sol très ferme, ce changement est extrêmement faible et peut être négligé. Par conséquent, l'hypothèse de l'encastrement parfait à la base valide pour les structures construites sur un sol ferme. Pour bien comprendre le problème d'interaction sol-structure, il est nécessaire d'avoir une connaissance des caractéristiques du milieu du sol due à la propagation des ondes pour la détermination des fonctions d'impédance du sol. Ce problème d'interaction a été bien étudié dans les années 80 et les années 90 grâce à l'élaboration des méthodes numériques basées sur la méthode des éléments finis qui offre une plus grande flexibilité et permet, en outre, la prise en considération du comportement non linéaire.

Les systèmes d'isolation parasismique sont connus déjà depuis un certain temps, ils sont utilisés de plus en plus durant les trois dernières décennies pour améliorer la résistance des constructions aux séismes. Ils consistent à mettre entre les piles et le tablier, des dispositifs qui captent les déformations inélastiques et filtrent les accélérations de hautes fréquences de sorte que le pont isolé se déplace essentiellement selon un mode rigide subissant de faibles accélérations et presque sans déformations.

Cette technique est applicable non seulement à tous les types des ponts mais aussi aux bâtiments et aux structures industrielles tels que les bacs de stockage de produits pétroliers et autres produits dangereux. Elle convient aussi à l'amélioration des capacités de résistance des structures existantes. Cette technologie est intégrée surtout dans des projets capitaux

tels que les hôpitaux, les centres de gestion des catastrophes et les musées, ainsi que les structures destinées aux logements.

L'isolation à la base repose sur le principe suivant : si la période de vibration est augmentée suffisamment pour s'éloigner de la période d'excitation prédominante du séisme, les accélérations transmises au pont sont considérablement réduites. En revanche, l'augmentation de la période engendre des déplacements plus importants concentrés au niveau de l'isolateur.

L'incorporation d'un dispositif d'amortissement à l'isolateur permet de contrôler les déformations localisées au niveau de ce dernier avec une amélioration de réduction des accélérations maximales du tablier, aussi de réaliser un compromis satisfaisant entre la réduction des forces sismiques et l'accroissement des déformations dans l'isolateur parasismique.

Dans le cadre de ce travail, on s'intéresse à la réduction de l'effet sismique des ponts par l'incorporation d'un système d'isolation parasismique avec prise en compte de l'interaction sol-structure. Des analyses dynamiques sont effectuées afin de déterminer les réponses sismiques des systèmes en termes d'effort tranchant à la base, de déplacement, d'accélération et d'énergie absorbée pour évaluer l'influence du système d'isolation parasismique et l'influence de l'interaction sol-structure sur la réponse dynamique des ponts isolés.

Le travail est subdivisé en six chapitres :

Le premier chapitre présente les systèmes de contrôle pour l'isolation parasismique passif, actif, semi-actif, et le système de contrôle hybride.

Le deuxième chapitre décrit les concepts théoriques des systèmes d'isolation parasismique et de l'amortisseur à fluide visqueux tels que les modèles mathématiques simples et la formulation des équations du mouvement.

Le troisième chapitre représente la formulation du problème d'interaction sol-structure.

Le quatrième chapitre présente une étude comparative pour illustrer l'influence des systèmes d'isolation parasismique sur les réponses sismiques des ponts isolés.

Le cinquième chapitre consiste une étude comparative pour illustrer l'effet du système combiné isolateur FPS avec amortisseur à fluide visqueux sur les réponses sismiques des ponts isolés.

Le sixième chapitre dénote une étude qui illustre l'influence de l'interaction sol-structure sur la réponse dynamique des ponts isolés par la variation du module de cisaillement du sol variant du sol très ferme au sol très meuble.

Le travail s'achève par une conclusion générale consistant à synthétiser le travail.

Chapitre I

SYSTEMES DE CONTROLE DES VIBRATIONS

CHAPITRE I

SYSTEMES DE CONTROLE DES VIBRATIONS

I-1- Introduction

Les concepts de base du contrôle des vibrations des structures ne sont pas nouveaux. Ils ont été appliqués avec succès dans une variété de disciplines, telles que l'aéronautique et le génie mécanique. Ces concepts sont basés essentiellement sur la modification des propriétés d'une structure, tel un bâtiment ou un pont, afin d'obtenir une réponse souhaitable structurellement à une charge extérieure donnée. La modification des propriétés de la structure comprend la variation de l'amortissement et de la rigidité de la structure, de sorte qu'elle puisse répondre de manière plus favorable au chargement externe. Le contrôle des vibrations est le plus souvent utilisé dans les cas impliquant des charges dynamiques de sorte qu'il soit capable de modifier les propriétés de la structure afin de permettre une réduction au niveau de l'excitation transmise à la structure. Toutefois, les méthodes innovantes de contrôle des vibrations des structures de génie civil sont devenues dans les dernières années d'actualité importante, et présentent une foule de nouveaux défis, particulièrement pour réduire les réponses structurelles lors d'une secousse sismique. Des recherches avancées ont découvert des matériaux naturels et artificiels avec des propriétés inhabituelles, des matériaux dits *intelligents* et les systèmes qui peuvent automatiquement s'adapter aux changements extérieurs, appelés systèmes adaptatifs. Ces découvertes ont conduit au concept innovant de structures intelligentes [01] avec des systèmes adaptatifs et/ou des matériaux intelligents et les dispositifs ajoutés à la structure, qui devient intelligente, car elle peut se contrôler et s'adapter au chargement extérieur.

I-2- Historique de contrôle des vibrations

L'utilisation des dispositifs pour la réduction des chocs et des vibrations est bien connue depuis un siècle. Des amortisseurs passifs sont apparus au début des années 1900 dans les structures des tours et dans les réservoirs d'eau élevés. Dans les années 70, des amortisseurs passifs ont été largement appliqués pour le contrôle des vibrations dans l'industrie automobiles et dans les structures de génie civil.

Le concept de contrôle des vibrations est né dans les années 50 avec des chercheurs japonais, où c'était une tâche très difficile à l'époque de développer des dispositifs de contrôle et des systèmes adaptatifs pour les grandes structures. Ce concept a été fondé sur le postulat disant

que tant que les caractéristiques précises de séisme vis-à-vis d'une structure ne peuvent pas être prédites, la réponse sismique doit être contrôlée au niveau du récepteur qui présente la structure elle-même. Dans les années 70, des chercheurs ont marqué une importante contribution à la recherche de contrôle des vibrations aux États-Unis. Ils proposent un système structural contrôlé non seulement par des éléments de structure, mais aussi par une force de contrôle externe [02].

Dans les années 80, des progrès remarquables ont succédé à ces concepts initiaux dans le contrôle de la réponse sismique des structures. Le Japon a pris les devants dans l'application pratique des systèmes de contrôle des structures. En 1989, et pendant une session thématique spéciale intitulée « *Seismic response control of structural systems* », a eu lieu à la neuvième Conférence mondiale sur le génie parasismique (9thWCEE) ; le contrôle actif des vibrations des bâtiments et d'autres structures en génie civil ont suscité un intérêt croissant dans le monde entier comme une technologie innovatrice en génie parasismique. En 1989, un système de contrôle actif appelé amortisseur de masse actif (AMD) a été installé dans un bâtiment pour la réduction de la réponse sismique.

Aux États-Unis, sous la direction de la *National Foundation Science* (NSF), après un appui important de divers projets de recherche sur le contrôle des vibrations en génie parasismique, le groupe des États-Unis sur la recherche de contrôle structural a été officiellement créé en 1990 sous les auspices de la NSF. Les objectifs du comité sont:

- Faciliter la transmission d'informations concernant l'évolution de l'état de l'art dans le domaine de contrôle des vibrations;
- Identifier et prioriser la recherche et le développement nécessaires;
- Élaborer des plans préliminaires pour l'avancement analytique et expérimentale dans le domaine de contrôle des vibrations;
- Élaborer des plans pour l'exécution des essais à grande échelle et de démonstration;
- Collaborer avec les organisations internationales.

Grâce à ces programmes NSF, des progrès significatifs ont été et continuent d'être réalisés aux États-Unis. L'intérêt pour le contrôle structural se développe, la coopération internationale depuis la (9thWCEE) entre les États-Unis et le Japon favorise la recherche et le développement de systèmes de contrôle de la réponse sismique.

Afin de promouvoir la coopération mondiale, l'Association Internationale pour le Contrôle des Structures (IASC) a été créé en 1992 à la dixième Conférence mondiale sur le génie parasismique. L'IASC a parrainé l'atelier international sur le contrôle structural en 1993, la première Conférence mondiale sur le contrôle structural à Los Angeles en 1994, la deuxième

Conférence mondiale sur le contrôle structural à Kyoto, au Japon en 1998, la troisième Conférence mondiale sur le contrôle structural à Como, Italie 2002, la quatrième Conférence mondiale sur le contrôle structural à San Diego, en Californie en 2006, la cinquième Conférence mondiale sur le contrôle structural à Tokyo, Japon en 2010 et la sixième à Barcelone, Espagne en 2014.

En outre, de nombreux ateliers bilatéraux et trilatéraux sur les structures intelligentes ont eu lieu en Asie, en Europe et aux États-Unis, comme l'atelier des États-Unis et la Corée sur les systèmes structuraux intelligents [03]. Aujourd'hui, de nombreux systèmes de contrôle à grande échelle ont été installés dans des structures réelles et se sont bien comportés pour la réduction de la réponse sismique. Les projets conjoints de recherche sont menés par des chercheurs des États-Unis, le Japon, la Chine, la Corée du Sud, et d'ailleurs. Ces efforts de collaboration contribuent grandement au développement du contrôle de la réponse sismique des structures. Parmi ces méthodes innovantes de contrôle, on peut distinguer quatre approches différentes : le contrôle passif, le contrôle actif, le contrôle semi-actif et le contrôle hybride (Figure 01).

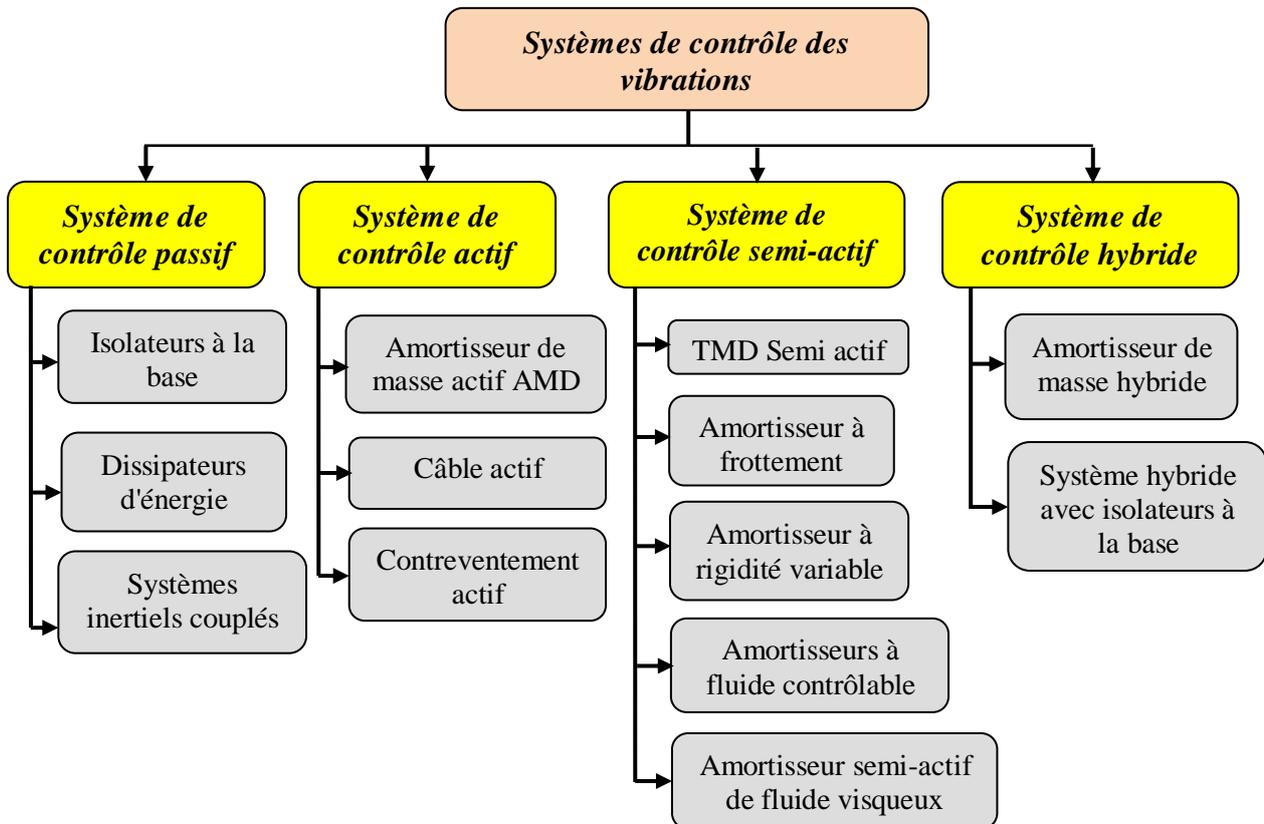


Figure 01 : Les différents types des systèmes de contrôle

I-3- Système de contrôle passif

Les systèmes de contrôle passif découplent le mouvement du sol du mouvement de la structure ou dissipent l'énergie induite par une excitation sismique grâce à leurs propriétés dynamiques et mécaniques intrinsèques seulement et isolent la structure de telle façon que les vibrations soient amorties passivement. Ces systèmes sont en général peu coûteux relativement aux autres systèmes de contrôle, le coût additionnel est de 5 à 10% par rapport au prix de l'ouvrage pour les systèmes de contrôle passif ; ils sont faciles à utiliser et permettent de réduire considérablement la réponse de la structure aux sollicitations extérieures. Le type d'isolation passif ne nécessite aucune intervention extérieure énergétique lorsque la structure est sollicitée [04,05], comme le montre le diagramme de contrôle passif montré en figure 02.

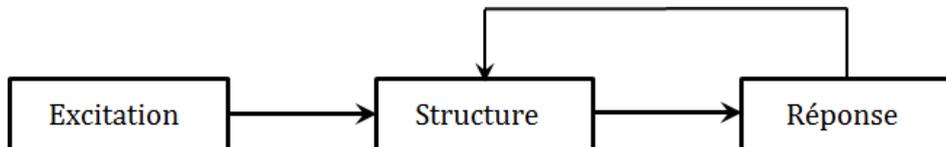


Figure 02 : Le diagramme de système de contrôle passif

I-3-1-Les isolateurs à la base

Les isolateurs à la base sont des dispositifs caractérisés par une grande souplesse horizontale et une rigidité verticale, ils sont placés entre les piles et le tablier pour capter les déformations inélastiques de telle sorte que le pont isolé se déplace selon un mode rigide et presque sans déformations.

Il existe plusieurs types d'isolateurs à la base. Certains ont été déjà utilisés, d'autres sont restés au stade d'études théoriques ou d'essais. Parmi ces catégories et selon leur mode de fonctionnement on peut citer [06,04] :

I-3-1-1- Appuis à déformation

Les appuis à déformation sont en général constitués de couches d'élastomère (caoutchouc) alternées et séparées par des frettes en acier. Les frettes métalliques confèrent aux appuis une grande rigidité verticale et permettent de supporter la charge verticale tandis que l'élastomère se déforme en cisaillement horizontal et assure l'isolation de pont. Parmi ces appuis, on peut citer :

I-3-1-1-1-Appuis en caoutchouc fretté

Ce type d'isolateur est composé de couches alternées de caoutchouc et d'acier liées les unes aux autres pour la flexibilité horizontale et la rigidité verticale. Il est flexible et permet

d'obtenir une grande souplesse vis-à-vis des efforts horizontaux agissant sur le pont car le comportement est viscoélastique.

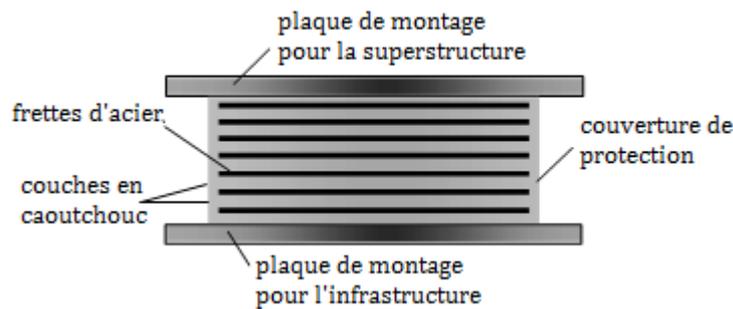


Figure 03 : Appui en caoutchouc fretté

I-3-1-1-2-Appuis en caoutchouc fretté avec barre de plomb(LRB)

Ce type d'isolateur se compose de couches alternées de caoutchouc et d'acier liées les unes aux autres autour d'un cylindre de plomb pur, inséré au centre de ces couches d'acier et de caoutchouc (figure 04). Le cylindre en plomb contrôle les déplacements latéraux de la structure sous des surcharges de service et absorbe une partie de l'énergie sismique.

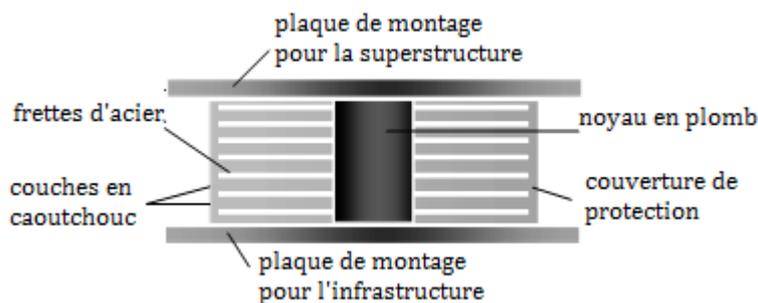


Figure 04 : Appui en caoutchouc fretté avec barre de plomb

I-3-1-2- Appuis à glissement

Le système d'appuis à glissement est constitué d'une part de plaques solidaires du tablier et d'autre part de plaques fixées aux piles. Leur interface constitue le plan de glissement et le matériau des deux séries de plaques n'est pas nécessairement le même.

Ces systèmes permettent le découplage des mouvements horizontaux et verticaux du tablier de ceux des éléments de fondations qui sont dus à la différence importante des fréquences d'oscillation dans les deux directions. La réponse à l'excitation sismique d'une structure reposant sur des plaques de glissement ne dépend que de sa masse et du coefficient de frottement entre les plaques. Parmi ces appuis, on peut citer :

I-3-1-2-1- Appuis à frottement pur

Cet appui montré en figure 05 est le dispositif le plus simple parce qu'il assure l'isolation par un frottement au glissement. Il est constitué d'une interface en acier inoxydable superposé sur le téflon. Tant que l'excitation horizontale reste inférieure à la force de frottement, les sollicitations sismiques transmises au tablier du pont sont identiques à celles qui auraient été transmises sans isolation. Dans le cas contraire, il y a du glissement entre le tablier et le support. Aucune force de rappel n'est assurée.

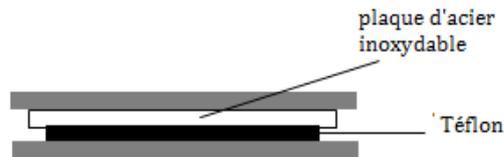


Figure 05 : Appui à friction

I-3-1-2-2- Appuis à pendule glissant

Cet appui (figure 06) est constitué de rotule glissante, il se déplace le long de la surface sphérique concave (portion d'une sphère) en acier inoxydable. Une réduction sensible des sollicitations sismiques est assurée par glissement des interfaces. Cet isolateur confère au pont un mouvement global similaire à un pendule et la rotule développe une force de résistance latérale qui est égale à l'effet combiné d'une force de frottement dynamique et d'une force de rappel de la gravité. Ce système d'isolation a été développé à l'université de Berkeley et l'université de Buffalo [07].

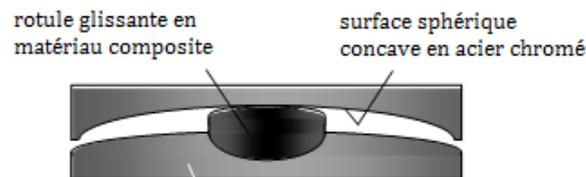


Figure 06 : Appuis à pendule glissant

I-3-1-3- Appuis à déformation et glissement

Ce système d'appuis résulte de l'association de plaques de glissement et des appuis à déformation. Cette association supprime l'inconvénient pour ces derniers en cas de sols mous. Dans un premier temps, le système se déforme latéralement grâce à la distorsion de l'élastomère. Lorsque la force nécessaire à l'accroissement de la distorsion devient supérieure à la force de frottement entre les plaques, ce qui ne se produit que lors des séismes de très forte intensité, le glissement commence. Pendant un séisme violent ce système de protection

sismique est très efficace, il peut produire plusieurs glissements. Ce système entraîne une réduction à la fois des accélérations et des déplacements en superstructure et conduit ainsi à une diminution importante des efforts tranchants à la base. Parmi ces appuis, on peut citer:

I-3-1-3-1- Appui utilisé par l'EDF (Electricité de France)

L'appui EDF est combiné d'un appui en caoutchouc fretté et d'un appui à frottement pur, comme représenté à la figure 07. Pour une excitation sismique modérée, le système se comporte comme un appui en caoutchouc fretté.

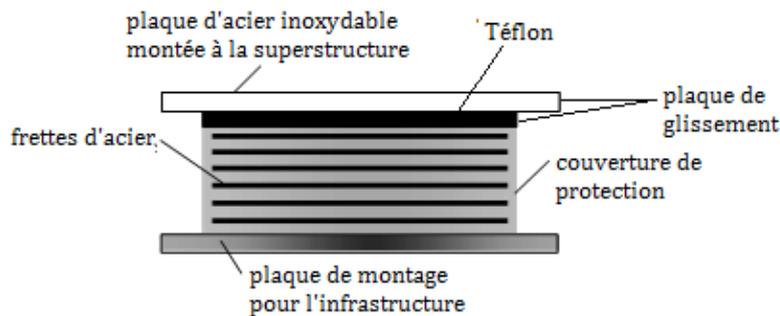


Figure 07: Appui utilisé par l'EDF

I-3-1-3-2- Le système d'appui TASS

Le système d'appui TASS présenté à la figure 08 a été développé par *Taisei Corporation*. Il a été appliqué sur trois structures au Japon. Ce sont le bâtiment de *Taisei Technology Research Center* à Yokohama, le bâtiment de *JAPCO Atagawa* à Shizuoka et le *Toho Gas Center* à Mie. Ce système est composé d'une combinaison d'un appui en élastomère monté en série sur une interface de glissement d'acier inoxydable-PTFE pour supporter le poids de la structure avec un appui en néoprène pour fournir la force de recentrage pendant une excitation sismique modérée [08].

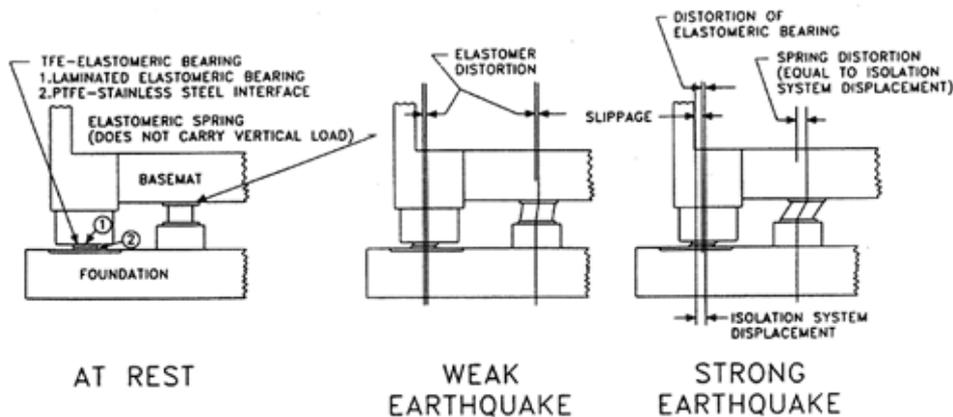


Figure 08 : Le système d'appui TASS

I-3-1-3-3- Appui proposé par N. Mostaghel

Cet appui présenté en figure 09 est composé de disques en acier inoxydable superposés, pouvant glisser les uns sur les autres. Les disques sont recouverts de Téflon afin de diminuer le coefficient de frottement et reliés par un noyau central ou plusieurs noyaux en caoutchouc. Les noyaux sont librement insérés dans l'appui. Leur seul rôle est de distribuer les glissements sur la hauteur de l'isolateur et ils ne portent donc aucune charge verticale [06].

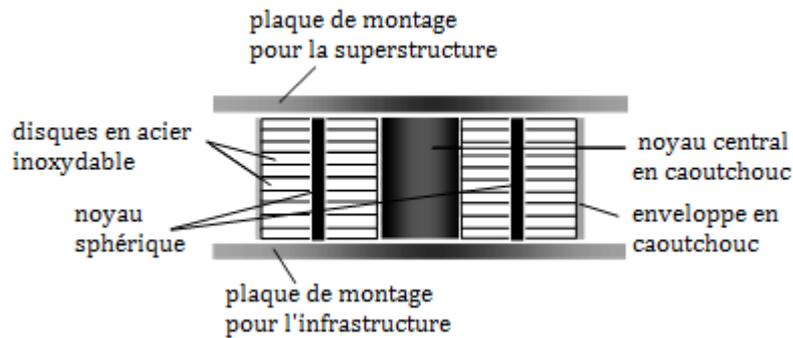


Figure 09 : Appui proposé par N. Mostaghel.

I-3-1-4- Appuis à roulement

Plusieurs systèmes d'appuis à roulement ont été proposés, il n'existe que très peu de réalisations de ce type en raison des inconvénients qu'ils présentent.

Lors de chaque déplacement, les ovoïdes entraînent un léger soulèvement du tablier qui a alors tendance à revenir à sa position initiale (figure 10).

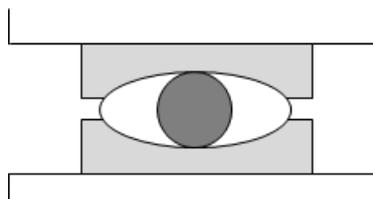


Figure 10 : Appui à billes

I-3-2- Contrôle passif avec dissipateurs d'énergie

Les systèmes de contrôle passif avec dissipateurs d'énergie ont le même principe de base que les isolateurs sismiques lorsqu'ils sont incorporés dans la structure. Ils peuvent absorber une partie de l'énergie d'excitation extérieure. En plus, ils peuvent réduire substantiellement le mouvement différentiel entre les éléments de la structure et par conséquent, réduire les dégâts de cette dernière. En général, ils sont caractérisés par leur capacité de dissiper l'énergie de

vibration de la structure ou de la convertir en un autre mode de vibration ou en une autre forme d'énergie [09], [03] et [10]. Les principaux systèmes sont :

I-3-2-1- Amortisseurs métalliques

C'est l'un des mécanismes les plus efficaces disponibles pour la dissipation de l'énergie entrée à une structure pendant un séisme. En structures métalliques traditionnelles, la conception parasismique dépend de la ductilité des pièces de charpente pour absorber l'énergie sismique. L'idée d'employer les amortisseurs hystérétiques métalliques dans une structure pour absorber une grande partie de l'énergie sismique a commencé par le travail conceptuel et expérimental de Kelly et al.(1972) [11] et Skinner et al. (1975) [12]. Plusieurs dispositifs d'amortisseurs hystérétiques métalliques considérés par ces chercheurs sont montrés en figure 11. Ce sont des pièces réalisées en matériaux très ductiles tels que l'acier doux, plomb, alliage malléable, etc.

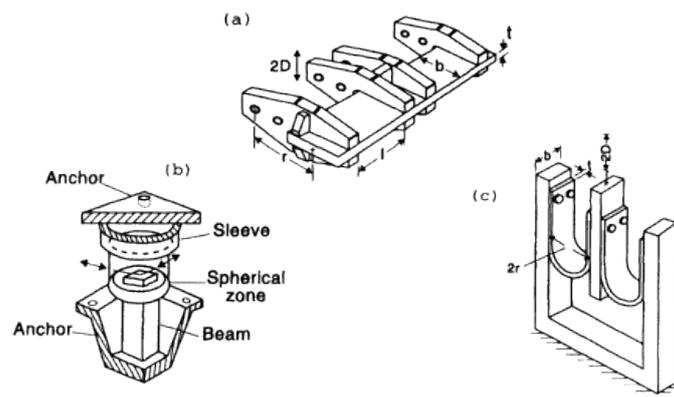
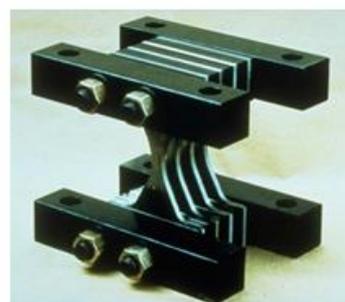


Figure 11 : Amortisseurs métalliques proposés par Skinner et al. (1975)
 a) poutre de torsion, b) poutre de flexion, c) la bande-U

Des progrès considérables ont été accomplis dans le développement des amortisseurs métalliques, tels que les amortisseurs de type(ADAS) et (TADAS) montrés en figure 12.



Amortisseur ADAS
 (forme X)



Amortisseur TADAS
 (plaque triangulaire)

Figure 12 : Amortisseurs métalliques

De nombreuses investigations expérimentales ont été conduites pour déterminer les caractéristiques de fonctionnement de différentes structures de dispositifs. En raison de ce programme de recherche continu, plusieurs produits ont été développés et mis en application tel que le système d'appui MRSD (*Multi-directional Torsional Hysteretic Damper*) [13].

Le Système MRSD est un amortisseur hystérétique récemment mis au point avec des performances améliorées par rapport aux systèmes d'isolation disponibles. Le système est composé de deux parties principales : le système de rails au-dessus et le dispositif de base en dessous (figure 13). Le système de rails, qui est essentiellement un système de guidage sera fixé au tablier, et le dispositif de base sera attaché aux piles de pont (figure14). Tout mouvement relatif entre les deux, à la suite d'une activité sismique, va induire des déplacements dans le dispositif et provoque l'engagement des dissipateurs d'énergie qui sont huit sections cylindriques en acier.

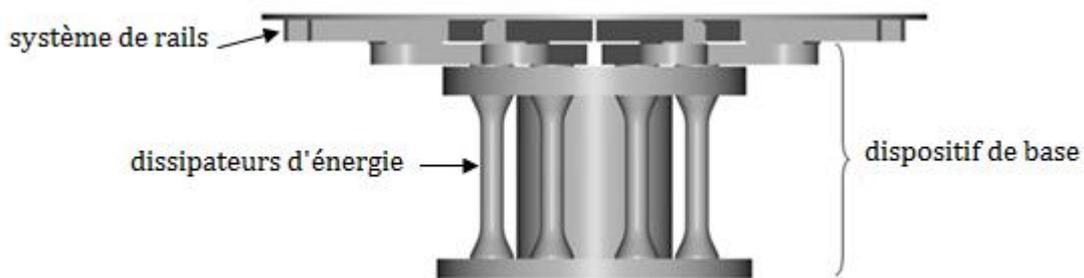


Figure 13 : Le système d'appui MRSD

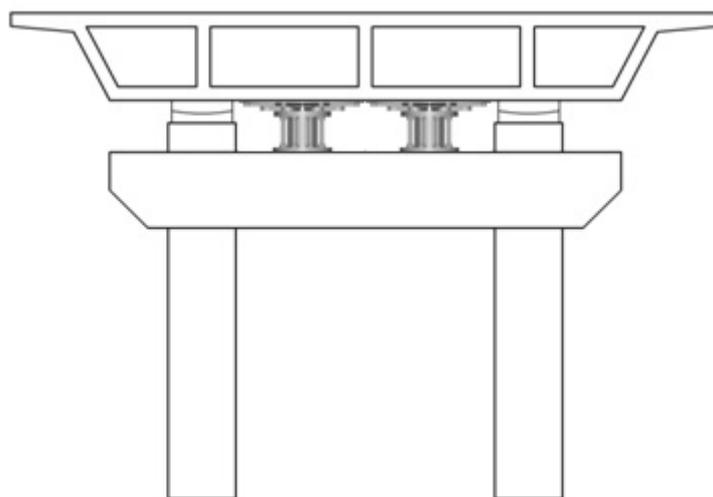
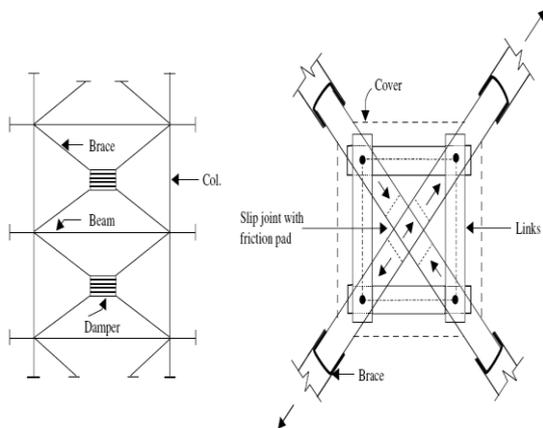


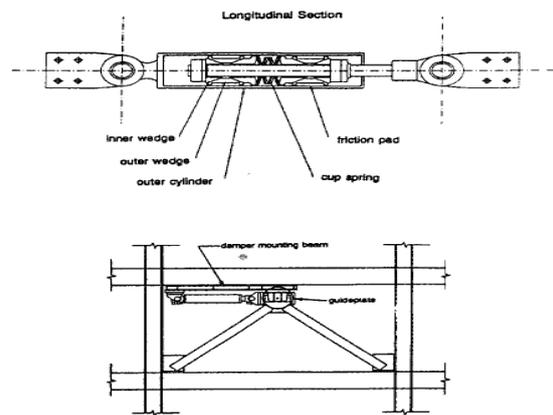
Figure 14 : Emplacement du système d'appui MRSD dans un pont.

I-3-2-2- Amortisseurs à frottement

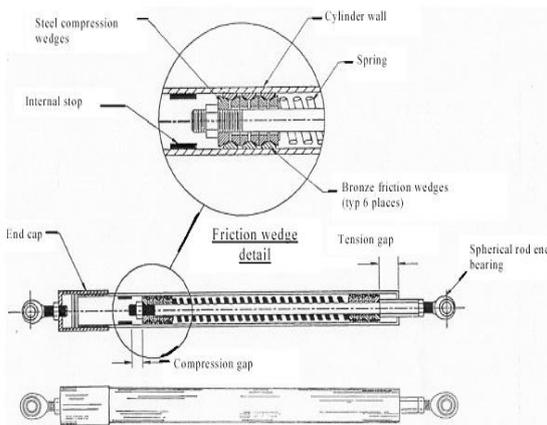
Le frottement est un mécanisme efficace, fiable, économique, et largement appliqué, le principe de ces amortisseurs repose sur le phénomène de dissipation de l'énergie par friction qui apparaît sur les boucles d'hystérésis du diagramme efforts-déformations, qui peuvent être rectangulaires. Pour réaliser ce mécanisme de frottement, l'amortisseur comprend une série de plaques fixées les unes aux autres par des boulons en acier à haute résistance et spécialement traitées pour produire un degré de friction maximal. Au début des années 80, Pall et Marsh ont commencé le développement des amortisseurs de friction passifs pour améliorer la réaction sismique des structures sur la base du modèle des freins à friction. Depuis ces années, des progrès considérables ont été accomplis dans les dispositifs de frottement, et leur comportement a été étudié analytiquement et expérimentalement. La figure 15 montre plusieurs types de dispositifs de frottement développés à travers le monde.



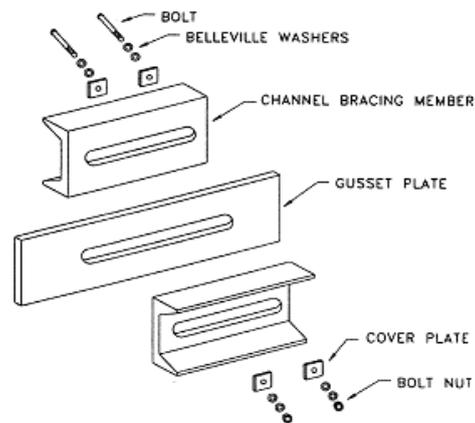
amortisseur à frottement proposé par Pall et Marsh (1982) [14].



amortisseur à frottement de Sumitomo Aiken (1993) [15].



amortisseur de EDR, Nims & al. (1993) [16].



amortisseur de SBC, Fitzgerald & al. (1989) [17].

Figure 15 : Amortisseurs à frottement.

I-3-2-3- Amortisseurs viscoélastiques (VE)

Les amortisseurs viscoélastiques se composent des matériaux viscoélastiques VE de grands amortissements tels que le caoutchouc, les polymères et les substances vitreuses pour dissiper et absorber l'énergie par la déformation de cisaillement. Un amortisseur VE typique contient des couches de matériaux VE sur des plaques métalliques suivant les indications de la figure 16a. Des composants d'amortisseurs VE sont montés sur une structure comme une partie de la membrure (figure 16b) et sur un système des diagonales de contreventement (figure 16c). La déformation de cisaillement se produit et l'énergie est absorbée quand la vibration structurale induit le mouvement relatif entre les ailes horizontales des plaques métalliques externes et la plaque centrale [03].

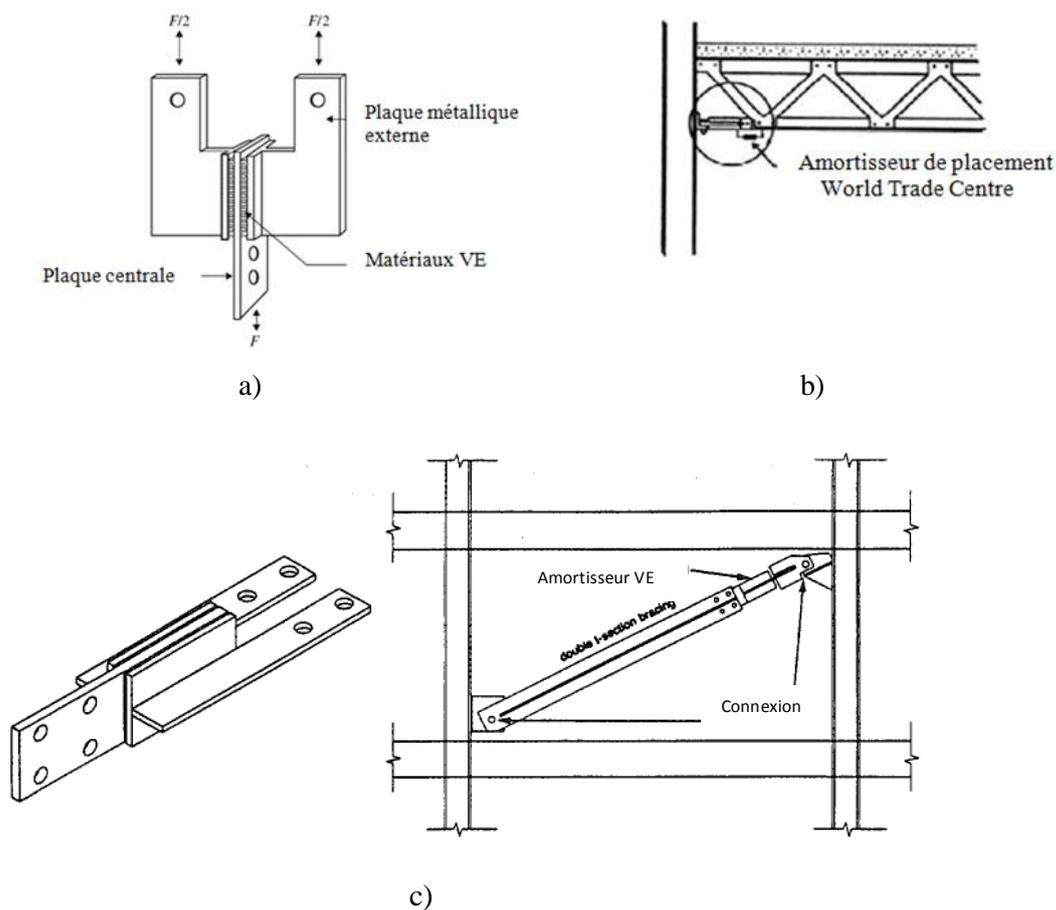


Figure 16 : Dispositifs des amortisseurs viscoélastiques VE :

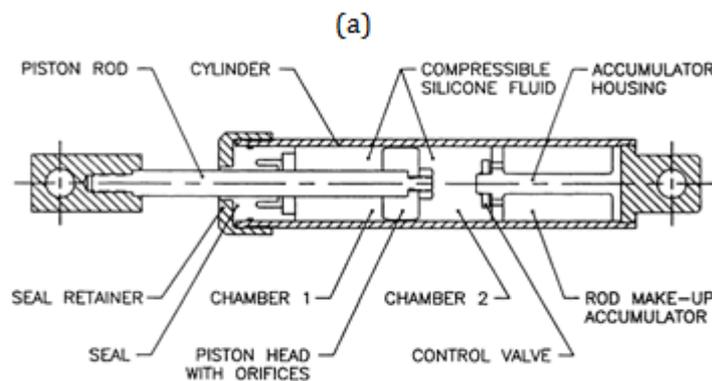
- a) détail d'un amortisseur VE.
- b) la connexion de l'amortisseur VE à la membrure.
- c) la connexion de l'amortisseur VE à la diagonale de contreventement.

I-3-2-4- Amortisseurs à fluide visqueux

Les amortisseurs métalliques, à frottement et amortisseurs VE utilisent l'action des solides pour améliorer la performance des structures soumises aux excitations environnementales. L'utilisation du fluide visqueux pour la réduction de choc et de vibration est bien connue dans l'industrie lourde et militaire.

Dans les années 70, la première mise en place complète des amortisseurs à fluide visqueux a été faite pour des ponts en Italie [10]. Dans les années 80, des efforts importants ont été faits pour développer cette technologie industrielle pour les structures de génie civil. Ces efforts ont mené au développement, l'analyse et la modélisation, le test et la mise en place complète des amortisseurs à fluide visqueux (figure 17a).

Le concept des amortisseurs à fluide visqueux est montré en figure 17. Une conception simple est réalisée avec *dashpot* classique, et la dissipation se produit en convertissant l'énergie cinétique en chaleur pendant que le piston se déplace et déforme un fluide épais et très visqueux. Cet amortisseur à liquide visqueux (figure 17b) a été fabriqué pour la première fois par le contrôle de vibration de GERB et utilisé comme composant des systèmes sismiques avec isolateurs à la base [18]. Le mouvement relatif d'un amortisseur piston dans l'amortisseur du boîtier provoque le fluide visqueux pour entrer et sortir dans les deux sens à travers l'orifice, et l'énergie est absorbée par le frottement entre le fluide visqueux et l'orifice.



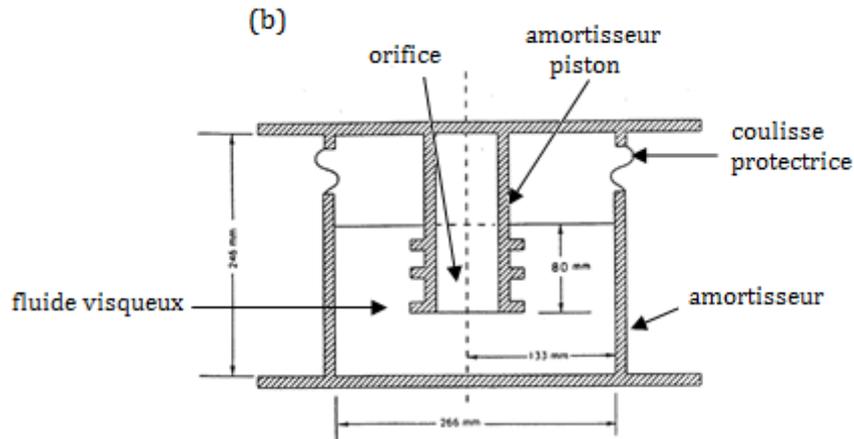


Figure 17 : Amortisseurs à fluide visqueux :
 a) amortisseur à fluide visqueux. b) amortisseur à fluide visqueux de GERB.

I-3-3- Contrôle passif avec systèmes inertiels couplés

Un contrôle passif avec des systèmes inertiels couplés consiste en une masse solide ou liquide située à l'un des étages les plus élevés du bâtiment et lié à celui-ci via un ressort et un mécanisme d'amortissement (visqueux ou viscoélastique). L'inertie créée par le mouvement de cette masse est couplée avec l'inertie de la structure pour réduire les vibrations induites par le séisme. Le mouvement de la masse s'effectue dans le sens opposé à celui de la structure et avec la même fréquence. Ainsi, situé au plus haut de la construction, le mouvement pendulaire amortit la déformation et limite les dommages sur la structure.

On distingue deux types de contrôle passif avec systèmes inertiels couplés, l'amortisseur de masse accordée TMD (*Tuned Mass Damper*) et l'amortisseur de liquide accordé TLD (*Tuned Liquid Damper*) [05,19,20,21].

I-4- Système de contrôle actif

Un contrôle passif est fondamentalement conçu pour réduire seulement un mode de vibration particulier de la structure. En revanche, un contrôle actif peut amortir une large bande de fréquences. L'étude du contrôle actif des structures est une extension logique de technologie de contrôle passif. Un système de contrôle est actif si un ou plusieurs actionneurs appliquent des forces sur une structure en utilisant une source d'énergie externe. Ces forces peuvent être utilisées pour ajouter ou dissiper l'énergie de la structure à contrôler. Afin de construire un tel système, il existe deux approches qui sont radicalement différentes : la première consiste à identifier la perturbation qui crée les vibrations pour l'annuler en lui superposant une excitation inverse. Cette stratégie de contrôle actif est appelée contrôle par anticipation (*feed-forward*). La deuxième consiste à identifier la réponse de la structure plutôt que l'excitation

qui la fait vibrer. Elle nécessite, donc, la modélisation du comportement dynamique de la structure. Le travail de contrôle des vibrations qui porte sur ce type de stratégie est appelé contrôle par boucle de rétroaction (*feedback*).

Un système de contrôle actif des structures a la configuration de base comme indiquée dans la figure 18.

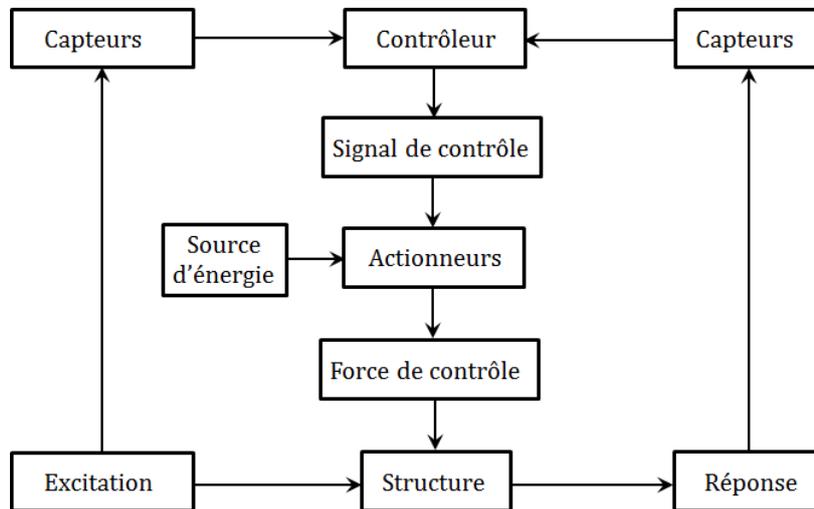


Figure 18 : Diagramme de système de contrôle actif

Un système de contrôle actif consiste, premièrement, à placer les capteurs sur la structure pour identifier, à chaque instant, la réponse ou l'excitation. Seulement, lorsque la réponse de la structure est mesurée, la configuration de contrôle est connue sous le nom de contrôle à boucle fermée : la réponse est mesurée à chaque instant et cette information est utilisée pour la correction de la force de contrôle appliquée instantanément. Mais, seulement lorsque l'excitation est mesurée, le contrôle prend le nom de boucle ouverte. Par contre, si la réponse et l'excitation sont mesurées ensemble, le terme utilisé dans la littérature est le contrôle à boucle fermée-ouverte. En deuxième étape, il consiste à choisir un système de contrôle convenable qui permet à l'actionneur, à chaque instant, de produire une force de contrôle en apportant de l'énergie de l'extérieur. Le système de contrôle actif des réponses sismiques a suscité une attention considérable ces dernières années dû à ses avantages importants [09,03, 22,08,23,24].

Les chercheurs ont développé plusieurs dispositifs de contrôle actif, tels que le système d'amortisseur de masse actif AMD, le système de câble actif et les système de contreventement actif comme illustrés sur les figures 19,20 et 21.

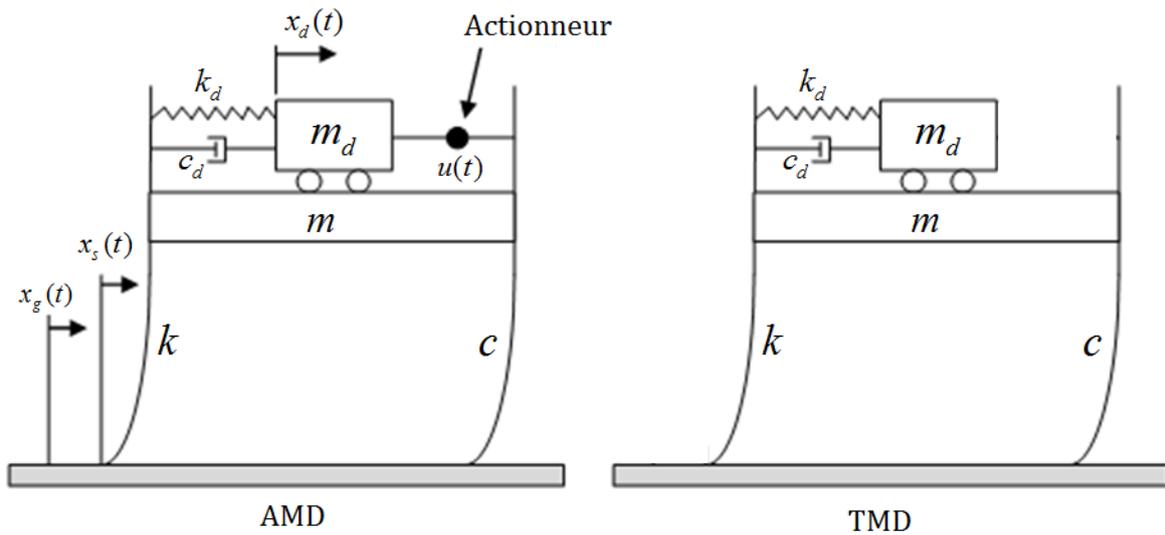


Figure 19 : Amortisseur de masse actif (AMD) et amortisseur de masse accordée (TMD).

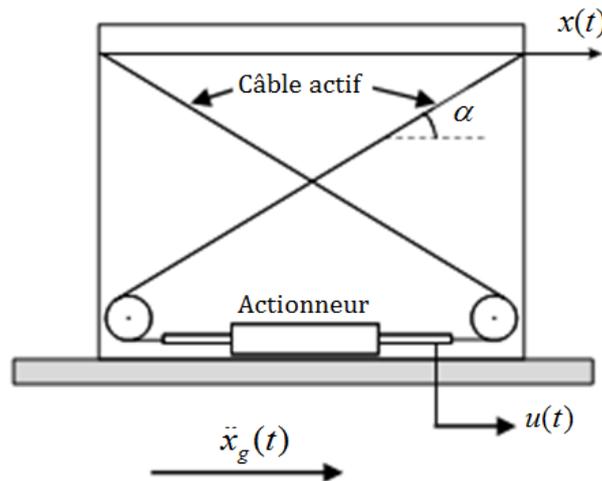


Figure 20 : Système de câble actif

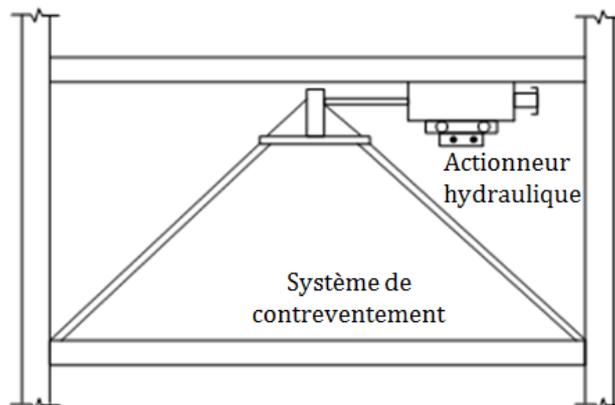


Figure 21 : Système de contreventement actif avec actionneur hydraulique

I-5- Système de contrôle semi-actif

L'idée principale du système de contrôle semi-actif consiste à changer les caractéristiques des dispositifs passifs de dissipateurs d'énergie et systèmes inertiels couplés. Ce changement ne nécessite qu'une source minimale d'énergie.

L'action de contrôle pour une approche de système semi-actif se réalise à travers le réglage des paramètres mécaniques de dissipation qui réagit passivement avec le reste de la structure. La modalité de réglage de ces paramètres est déterminée, selon la base d'un choix d'algorithme de contrôle, en fonction de l'excitation et/ou la réponse de la structure. Par conséquent, comme pour le contrôle actif, le système de contrôle semi-actif nécessite des capteurs, un ordinateur de contrôle ou système de contrôle et actionneurs. Mais l'énergie demandée de l'extérieur est minimale (une petite source d'énergie) par rapport à un système de contrôle actif, il sert seulement à modifier les caractéristiques mécaniques des dispositifs de contrôle, et peut fonctionner, par exemple, avec une simple batterie. C'est un grand avantage parce que la source d'énergie principale de la structure peut échouer pendant les événements sismiques, et l'actionneur n'a aucun potentiel nocif qui peut déstabiliser la structure. Bien que les amortisseurs semi-actifs soient un peu plus complexes que les amortisseurs passifs, ils sont faciles à fabriquer, fiables à fonctionner, et avec un meilleur amortissement [05,25,26,27,28,29,30].

Il existe différents types d'amortissements semi-actifs proposés pour contrôler les structures en génie civil. Dans les figures 22,23,24,25,26 et 27 nous présentons quelques exemples.

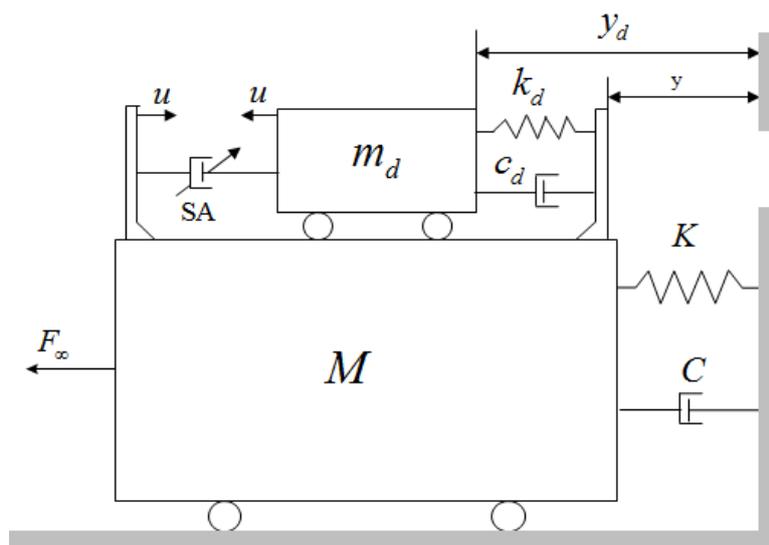


Figure22 : Le TMD Semi actif

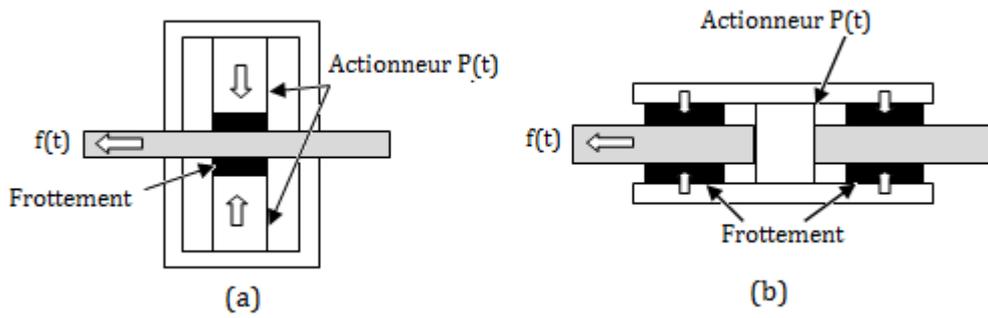


Figure 23: Amortisseurs semi actifs à frottement avec actionneur piézoélectriques.

- a) mode holding : le frottement augmente avec la tension appliquée.
- b) mode releasing : le frottement décroît avec la tension.

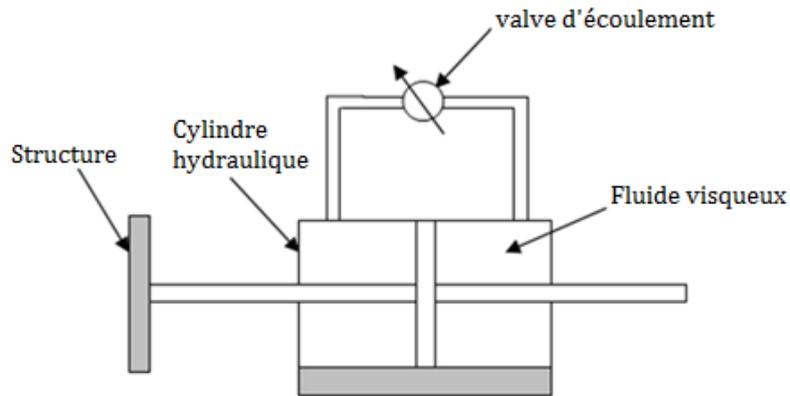


Figure 24: Amortisseur semi actif de vibration

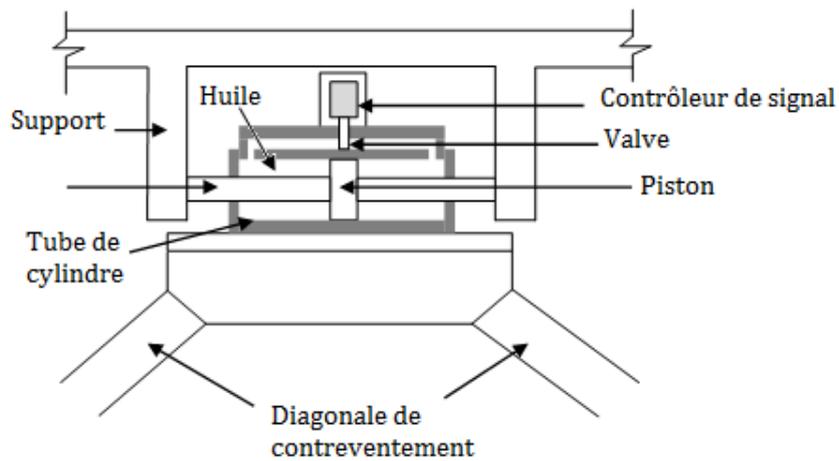


Figure 25: Amortisseur semi actif à rigidité variable

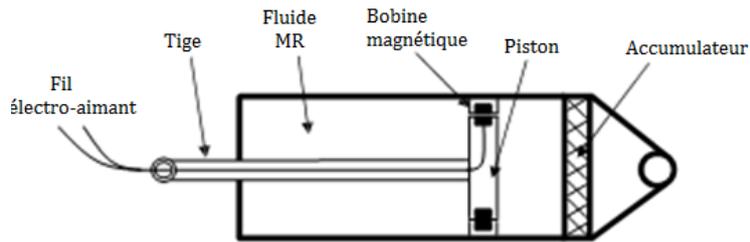


Figure 26 : Amortisseur magnéto- rhéologiques.

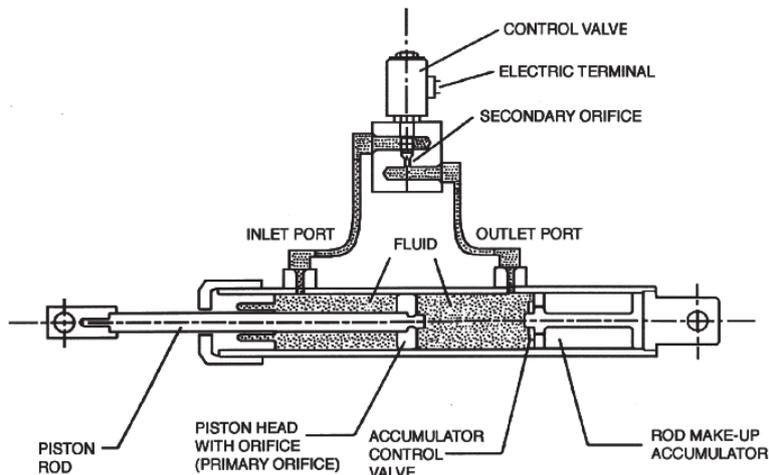


Figure 27 : Amortisseur semi-actif de fluide visqueux

I-6- Système de contrôle hybride

Il est remarquable que les systèmes de contrôle actifs sont introduits pour améliorer la capacité et l'intelligence limitées des amortisseurs passifs et semi actifs, mais le contrôle actif a toujours deux inconvénients. Le premier est son fonctionnement qui dépend d'une source d'énergie externe et il exige un système compliqué pour détecter les réponses et les excitations et pour le traitement de signal. Cette complexité limite son application et réduit la fiabilité de contrôle. Le deuxième, pour l'application de contrôle actif aux structures de génie civil, nécessite des grands équipements pour produire la force de contrôle, c-à-d, des grands actionneurs sont exigés. La technologie industrielle actuelle est capable de fabriquer ces grands actionneurs mais son coût limite sévèrement son application. Les systèmes innovateurs de contrôle hybride sont réalisés en combinant les techniques de contrôle passif et actif. Quand ces techniques fonctionnent ensemble, la fiabilité est assurée par le contrôle passif et la capacité est fournie par le contrôle actif, le système hybride rassemble les avantages des deux techniques dans une seule technique ; donc ce système est meilleur que les systèmes passifs, actifs et semi actifs [31,32,33].

Chapitre II

CONCEPTS THEORIQUES DES
SYSTEMES D'ISOLATION ET DE
L'AMORTISSEUR A FLUIDE
VISQUEUX

CHAPITRE II

CONCEPTS THEORIQUES DES SYSTEMES D'ISOLATION ET DE L'AMORTISSEUR FLUIDE VISQUEUX

II -1-Introduction

Après les tremblements de terre de Loma Prieta 1989, Northridge 1994 et Kobe 1995, les règles parasismiques des ponts ont été améliorées, surtout dans les régions à forte sismicité à cause des effondrements des structures des ponts malgré leur conformité aux normes de conception.

Les systèmes d'isolation parasismique sont utilisés de plus en plus durant les trois dernières décennies pour améliorer la résistance des constructions aux séismes (Kelly, 1986; Al-Hussaini et al.1994; Jangid et Datta, 1995; Kelly 1997; Naeim et Kelly,1999) [34, 07, 35, 36, 37]. Ils consistent à mettre, entre les piles et le tablier, des dispositifs qui captent les déformations inélastiques et filtrent les accélérations de hautes fréquences de sorte que le pont isolé se déplace essentiellement selon un mode rigide subissant de faibles accélérations et presque sans déformations [38].

Plusieurs études ont été effectuées pour évaluer l'effet des systèmes d'isolation sur la réponse dynamique des structures et des ponts à l'instar des études analytiques réalisées par (Tan et Huang, 2000) qui montrent l'influence du système d'isolation LRB sur la réduction de la réponse sismique des ponts isolés[39]. Kunde et Jangid, (2003) ont présenté un état de l'art sur le comportement des ponts isolés sous une excitation sismique et un bref examen des dispositifs d'isolation parasismique antérieurs et actuels, proposés ou mis en œuvre, et les aspects de la recherche future dans le domaine de l'isolation des ponts [40].

L'étude réalisée par Jangid (2005) montre l'effet des systèmes d'isolation FPS sur le comportement des structures isolées suite à un séisme [41]. Il montre également qu'il existe une valeur particulière du coefficient de frottement pour lequel les accélérations atteignent une valeur minimale sous une excitation sismique de source proche. Jangid (2007) a réalisé une étude analytique sur la réponse sismique des structures isolées avec le système d'isolation LRB [42].

L'utilisation du fluide visqueux pour la réduction de chocs et de vibrations est bien connue dans l'industrie lourde et militaire. Dans les années 70, la première mise en place complète des amortisseurs à fluide visqueux a été faite pour des ponts en Italie (Soong et Constantinou, 1994)[08]. Dans les années 80, des efforts importants ont été fournis pour développer cette

technologie industrielle dans des structures de génie civil. Ces efforts ont mené au développement, l'analyse et la modélisation, le test et la mise en place complète des amortisseurs à fluide visqueux (Taylor et Constantinou, 1995 ;Soong et Dargush, 1997;Soong et Spencer, 2002) [43,10,27]. Ces études démontrent une amélioration significative de la capacité de dissipation d'énergie des structures auxquelles les dispositifs d'amortissement sont attachés. Ceci a entraîné des réductions importantes des déplacements et des forces d'inertie. Cependant, cette technologie s'est avérée très utile, en particulier dans les applications de rénovation où il est difficile de changer les configurations statiques de charge de service et où il ya un équivalent pour un amortissement supplémentaire. Donc plusieurs études ont été effectuées pour évaluer l'effet des amortisseurs à fluide visqueux sur la réponse dynamique des ponts à l'instar des études réalisées par Infanti et *al.*(2004), Saha et Jangid, (2009), WU Fangwen et *al.* (2016) [44, 45, 46].

II-2- Système d'isolation LRB

Ce type d'isolateur est constitué de couches de caoutchouc alternées et séparées par des frettes en acier autour d'un cylindre de plomb pur (figure 28).Les frettes métalliques confèrent à l'isolateur une grande rigidité verticale et permettent de supporter la charge verticale tandis que le cylindre en plomb contrôle les déplacements latéraux du pont et dissipe une partie de l'énergie sismique.



Figure 28 : Détails de l'appui en caoutchouc fretté avec barre de plomb

II-2-1-Comportement du système d'isolation LRB

La plastification du noyau en plomb confère à ce dispositif un comportement hystérétique important [37,47,48]. Ce comportement hystérétique peut être représenté par l'approximation bilinéaire illustrée par la figure 29.

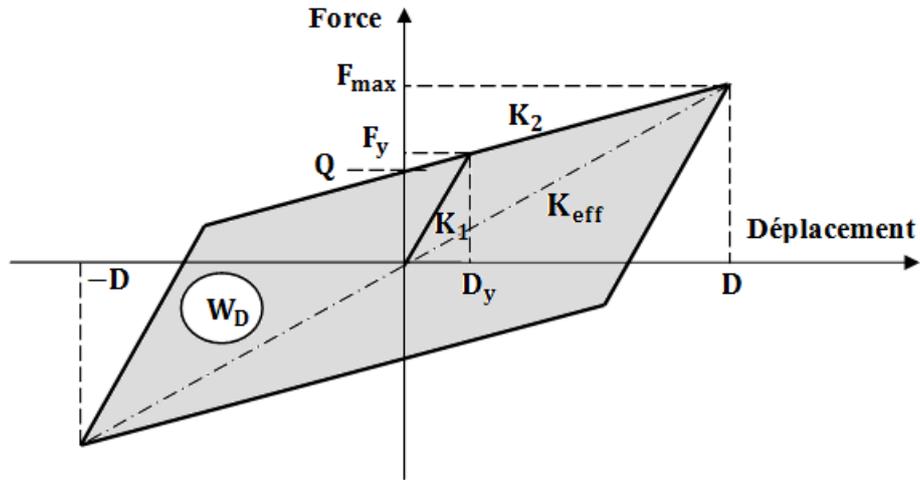


Figure 29 : Approximation bilinéaire d'une loi de comportement hystérétique exprimée en force-déplacement.

Les paramètres de l'approximation bilinéaire exprimant la loi de comportement hystérétique sont les suivants :

$$D_y : \text{Déplacement à la limite d'élasticité ; avec } D_y = Q / (K_1 - K_2) \quad (01)$$

D : Déplacement de calcul ou de conception de l'isolateur.

W_D : Energie dissipée par cycle correspondant au déplacement de conception D , égale à l'aire de la boucle d'hystérésis réelle, elle est donnée par la formule suivante :

$$W_D = 4Q(D - D_y) \quad (02)$$

F_y : La force d'écoulement dans un chargement monotone.

Q : La force correspondant au déplacement nul lors d'un chargement cyclique; elle représente aussi la force de résistance et la limite élastique du barreau de plomb pour l'isolateur LRB.

$$Q = F_y - K_2 D_y \quad (03)$$

F_{\max} : La force maximale de cisaillement correspondant au déplacement de conception D .

K_1 : La rigidité élastique pour un chargement monotone, égale aussi à la rigidité de

déchargement en chargement cyclique. Avec $K_1 = \frac{F_y}{D_y}$ (04)

K_2 : La rigidité post-élastique ; avec $K_2 = (F_{\max} - F_y) / (D - D_y)$ (05)

K_{eff} : La rigidité effective de l'isolateur, elle est donnée par la formule suivante:

$$K_{\text{eff}} = K_2 + \frac{Q}{D} \quad D \geq D_y \quad (06)$$

β_{eff} : Le pourcentage d'amortissement effectif du système d'isolation, il est exprimé comme suit:

$$\beta_{eff} = \frac{4Q(D - D_y)}{2\pi K_{eff} D^2} \quad (07)$$

II-2-2-Modèle mathématique du système LRB

Le système LRB se comporte comme un amortisseur hystérétique et le modèle mathématique est donné par la figure 30.

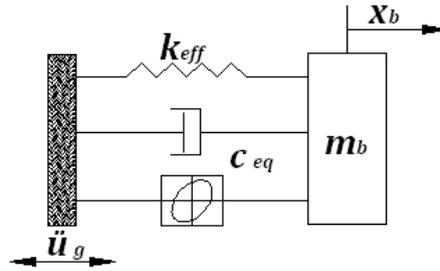


Figure 30 : Modèle mathématique pour un système d'isolation en caoutchouc fretté avec barreau de plomb.

Pour déterminer les propriétés du système LRB (la rigidité effective et l'amortissement équivalent), on utilise le modèle bilinéaire de la courbe caractéristique.

L'équation du mouvement du système LRB est donnée comme suit :

$$\begin{aligned} m_b (\ddot{x}_b + \ddot{u}_g) + C_{eq} \dot{x}_b + K_{eff} x_b &= 0 \\ m_b \ddot{x}_b + C_{eq} \dot{x}_b + K_{eff} x_b &= -m_b \ddot{u}_g \end{aligned} \quad (08)$$

II-3- Système d'isolation FPS

Ce système d'isolation constitué de rotule glissante qui se déplace à travers la surface sphérique concave en acier inoxydable. La dissipation d'énergie sismique est assurée par le glissement des interfaces. Une force de recentrage est activée grâce à la concavité de la surface de glissement (figure 31).

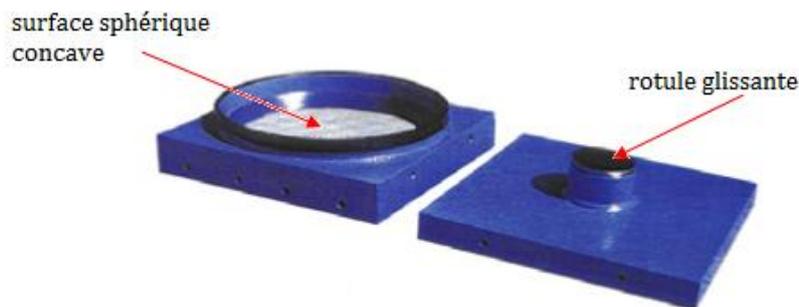


Figure 31 : Détails de l'appui à pendule glissant

II-3-1- Comportement du système d'isolation FPS

Le glissement des interfaces confère à ce dispositif un comportement frottant important [37,47,48]. Ce comportement frottant peut être représenté par l'approximation bilinéaire illustrée à la Figure 32.

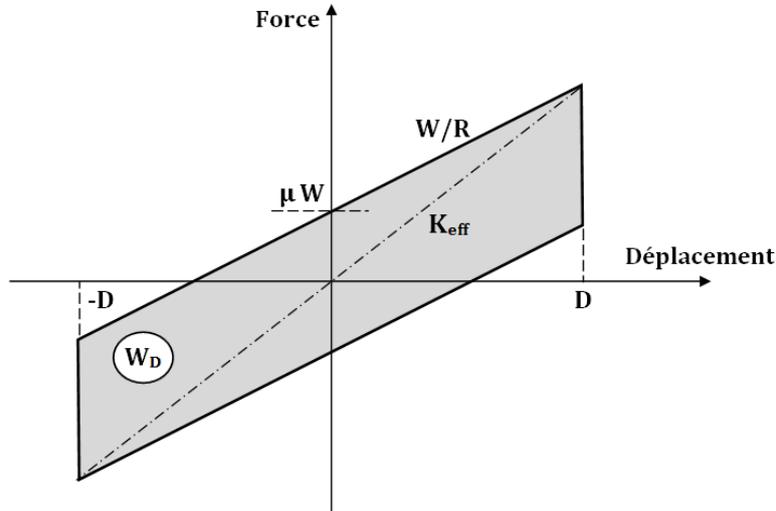


Figure 32 : Comportement frottant exprimé en force-déplacement.

Les paramètres de l'approximation bilinéaire exprimant le comportement frottant sont les suivants :

W : Charge verticale transmise par l'isolateur.

R : Rayon de la surface de glissement sphérique.

μ : Coefficient de frottement de la surface de glissement.

La rigidité effective de l'isolateur K_{eff} est donnée par la formule suivante:

$$K_{eff} = \frac{W}{R} + \frac{\mu W}{D} \quad (09)$$

L'énergie dissipée par cycle W_D correspondant au déplacement de conception D , elle est donnée par la formule suivante:

$$W_D = 4\mu WD \quad (10)$$

Le pourcentage d'amortissement effectif du système d'isolation est exprimé comme suit:

$$\beta_{eff} = \frac{W_D}{2\pi K_{eff} D^2} \quad (11)$$

II-3-2-Modèle mathématique du système FPS

La rotule développe une force de résistance latérale qui est égale à l'effet combiné d'une force de frottement dynamique et d'une force de rappel de la gravité. Cela assure l'amortissement nécessaire à l'absorption de l'énergie sismique. Le modèle mathématique est donné par la figure 33.

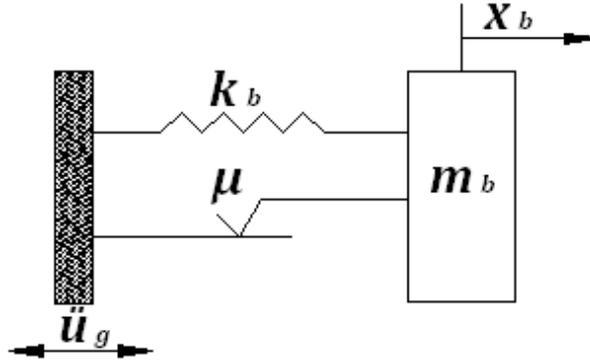


Figure 33: Modèle mathématique pour un système d'isolation en pendule glissante (FPS).

La force latérale développée dans le système d'isolation est donnée comme suit :

$$F = \frac{W}{R} x_b + \mu.W \operatorname{sgn}(\dot{x}_b) \quad (12)$$

x_b : déplacement de la base.

où la fonction $\operatorname{sgn}(\dot{x}_b)$ représente le signe de la direction de la vitesse du système d'isolation en fonction de \dot{x}_b , tel que :

$$\begin{cases} \text{si } \dot{x}_b > 0, \operatorname{sgn}(\dot{x}_b) = +1 \\ \text{si } \dot{x}_b < 0, \operatorname{sgn}(\dot{x}_b) = -1 \\ \text{si } \dot{x}_b = 0, \operatorname{sgn}(\dot{x}_b) = 0 \end{cases}$$

Le système sous l'accélération du sol \ddot{u}_g est représenté par l'équation de mouvement suivante :

$$m_b(\ddot{x}_b + \ddot{u}_g) + F = 0 \quad (13)$$

En remplaçant l'équation (12) dans l'équation (13), on aura :

$$m_b\ddot{x}_b + \left(\frac{W}{R}\right)x_b + \mu.W \operatorname{sgn}(\dot{x}_b) = -m_b\ddot{u}_g \quad (14)$$

II-4- Amortisseur à fluide visqueux

L'amortisseur à fluide visqueux consiste en un cylindre creux rempli d'un fluide visqueux (figure 34). Lorsque la tige et la tête du piston sont déplacées, le fluide est forcé de s'écouler à travers les orifices autour ou à travers la tête du piston. Le fluide s'écoule entraînant le développement du frottement et donc de la chaleur. La chaleur est dissipée sans danger pour l'environnement. Donc, ces amortisseurs peuvent dissiper l'énergie des vibrations par une force de résistance proportionnelle à la vitesse appliquée ; cette force est générée par la conversion de l'énergie cinétique en chaleur pendant que le piston se déplace et déforme le fluide visqueux. Cette force est nulle quand le déplacement est maximal [08].

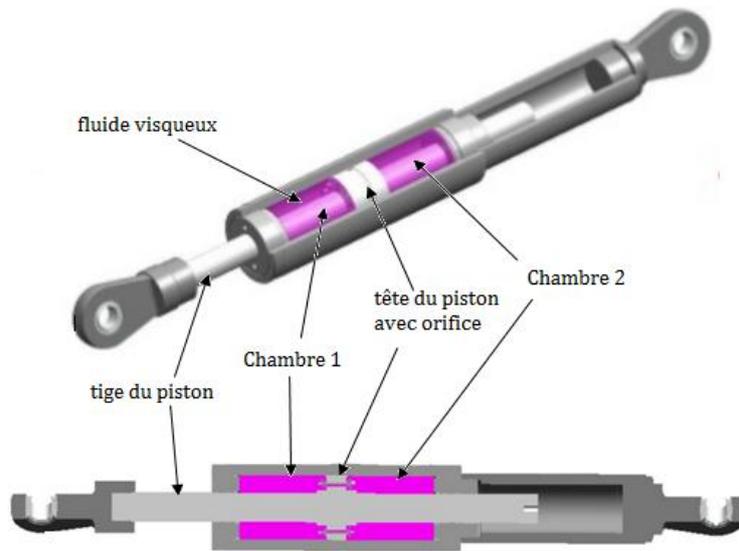


Figure 34: Détails de l'amortisseur à fluide visqueux.

II-4-1- Comportement de l'amortisseur à fluide visqueux

Ce comportement visqueux peut être représenté par la relation force-déplacement d'un amortisseur à fluide visqueux comme le montre la Figure 35.

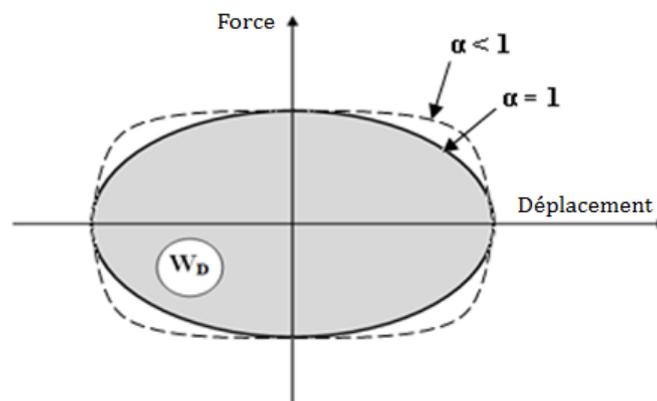


Figure 35 : Comportement visqueux exprimé en force-déplacement.

La force induite à la structure par l'amortisseur visqueux est donnée par l'équation suivante :

$$F_D = C_D \cdot |\dot{u}|^\alpha \operatorname{sgn}(\dot{u}) \quad (15)$$

L'énergie dissipée par l'amortisseur due à la force F_D est donnée par l'équation suivante :

$$W_D = \int F_D du \quad (16)$$

F_D est la force de résistance, C_D est le coefficient d'amortissement, \dot{u} est la vitesse appliquée, α est l'exposant caractéristique de la viscosité du fluide variant entre 0,5 à 2,0 et la fonction $\operatorname{sgn}(\dot{u})$ représente le signe de la direction de la vitesse du système d'amortissement, où la forme linéaire considérée comme la forme la plus simple de l'amortisseur à fluide visqueux correspond à $\alpha = 1,0$ (Soong et Costantinou). [08]

II-4-2- Dissipation d'énergie avec amortisseur à fluide visqueux non linéaire

Considérons l'amortisseur à fluide visqueux dont la relation constitutive est exprimée par l'équation (15). L'énergie dissipée donnée par l'équation (16) est engendrée par un cycle de mouvement sinusoïdal exprimé comme suit :

$$u = u_0 \sin \omega_0 t \quad (17)$$

Par l'intégration des équations (15) à (17) on déduit la formule suivante:

$$W_D = 4 \cdot 2^\alpha \frac{\Gamma^2\left(1 + \frac{\alpha}{2}\right)}{\Gamma(2 + \alpha)} \cdot C_D u_0^{1+\alpha} \omega_0^\alpha \quad (18)$$

Où Γ est la fonction gamma, l'énergie dissipée peut être également exprimée en termes de la valeur maximale de la force d'amortissement $F_{D_{\max}} = C_D u_0^\alpha \omega_0^\alpha$; dans ce cas, l'énergie dissipée par l'amortisseur est donnée par la formule suivante :

$$W_D = 4 \cdot 2^\alpha \frac{\Gamma^2\left(1 + \frac{\alpha}{2}\right)}{\Gamma(2 + \alpha)} \cdot F_{D_{\max}} u_0 \quad (19)$$

L'équation (19) peut être utilisée pour démontrer les avantages des amortisseurs visqueux non linéaires avec les petites valeurs du paramètre α . Deux cas sont à observer : premièrement on considère $\alpha = 0,5$ (une conception technologiquement avancée) et deuxièmement avec $\alpha = 2$ (une conception typique avec des orifices Bernouliens ou cylindriques).

Pour le cas de $\alpha=0,5$, l'énergie dissipée est $W_D = 3,496 F_{D_{\max}} u_0$, alors que pour le cas de $\alpha=2$, $W_D = 2,667 F_{D_{\max}} u_0$. Ainsi, pour les mêmes forces maximales d'amortissement et les mêmes amplitudes du mouvement, l'amortisseur à $\alpha = 0,5$ dissipe 31% plus d'énergie que l'amortisseur à $\alpha = 2$.

L'importance de cette différence dans la capacité de dissipation d'énergie est plus commodément démontrée par l'étude du comportement d'un système à un seul degré de liberté avec amortisseur. Admettant que la masse du système soit M et la rigidité (linéaire et élastique) soit K , un amortisseur dont les caractéristiques décrites par l'équation (18) est intégré dans le système. Le pourcentage d'amortissement est défini par l'expression:

$$\xi = \frac{W_D}{2\pi K u_0^2} \quad (20)$$

Dans laquelle u_0 est l'amplitude de mouvement harmonique à la fréquence naturelle non amortie $\omega_0 = \sqrt{K/M}$. En vertu de l'équation (18), le pourcentage d'amortissement est donné par la formule suivante :

$$\xi = \frac{2^{1+\alpha} C_D u_0^{\alpha-1} \omega_0^{\alpha-2} \Gamma^2\left(1 + \frac{\alpha}{2}\right)}{\pi M \Gamma(2 + \alpha)} \quad (21)$$

Plus précisément, pour $\alpha = 0,5$

$$\xi = 0.55641 \cdot \frac{C_D}{M u_0^{1/2} \omega_0^{3/2}} \quad (22)$$

Pour $\alpha = 1.0$

$$\xi = \frac{C_D}{2M \omega_0} \quad (23)$$

et pour $\alpha = 2.0$

$$\xi = \frac{4C_D u_0}{2\pi M} \quad (24)$$

Comme prévu, le pourcentage d'amortissement dépend de l'amplitude du mouvement. Pour des amortisseurs avec $\alpha < 1$, le pourcentage d'amortissement diminue avec l'augmentation de l'amplitude du mouvement. Dans ce cas, l'opposé est vrai pour des amortisseurs avec $\alpha > 1$. Alors que pour les amortisseurs linéaires ($\alpha = 1$), le pourcentage d'amortissement est indépendant de l'amplitude du mouvement. Pour illustrer ce comportement, la figure 36 montre le pourcentage d'amortissement d'un système à un seul degré de liberté avec le poids $W = 7000 \text{ kN}$ à une fréquence naturelle non amortie $\omega_0 = \pi \text{ rad/s}$. Trois cas différents d'amortisseurs sont considérés, où chacun produit une force maximale égale à 704 kN ($0,1 W$) à la vitesse de 785 mm/s .

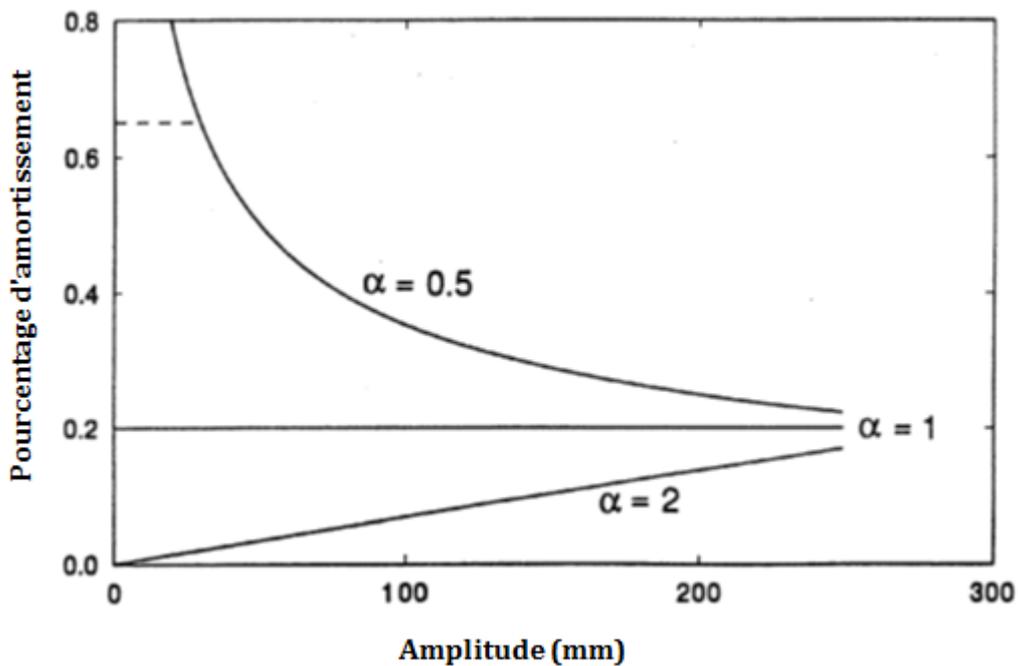


Figure 36 : Pourcentage d'amortissement des systèmes avec amortisseur à fluide visqueux non linéaire en fonction de l'amplitude du mouvement.

II-4-3- Système à un degré de liberté avec amortisseur à fluide visqueux

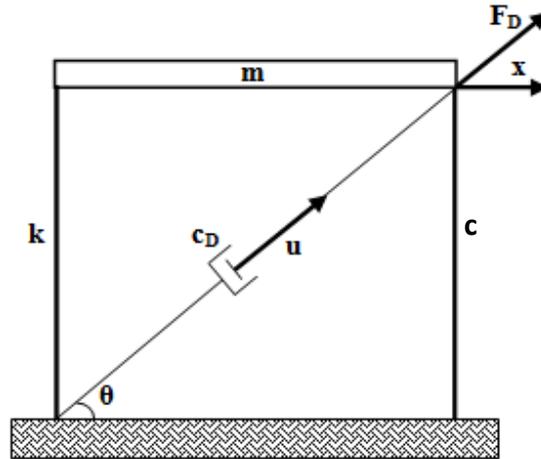


Figure 37: Système à un degré de liberté avec amortisseur à fluide visqueux.

Pour un système à un degré de liberté muni d'un amortisseur à fluide visqueux (figure 37) soumis à une excitation sismique, l'équation de mouvement est donnée comme suit :

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + I_D F_D = -m\ddot{u}_g \quad (25)$$

Où I_D est le vecteur d'influence de l'emplacement de l'amortisseur dans la structure et F_D la force de résistance d'amortisseur à fluide visqueux linéaire donnée par l'équation :

$$F_D = c_D \dot{u} \quad (26)$$

En faisant la projection, on obtient :

$$\dot{u} = \dot{x} \cos \theta \quad (27)$$

En remplaçant l'équation (27) dans (26), on aura:

$$F_D = c_D \dot{x} \cos \theta \quad (28)$$

Sachant que dans ce cas :

$$I_D = \cos \theta \quad (29)$$

L'équation (25) peut s'écrire comme suit:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + \cos \theta c_D \dot{x} \cos \theta &= -m\ddot{u}_g \\ m\ddot{x} + (c + c_D \cos^2 \theta) \dot{x} + kx &= -m\ddot{u}_g \end{aligned} \quad (30)$$

On suppose :

$$c^* = c + c_D \cos^2 \theta \quad (31)$$

Donc l'équation (30) devient :

$$m\ddot{x} + c^* \dot{x} + kx = -m\ddot{u}_g \quad (32)$$

II-5- Système combiné LRB + Amortisseur à fluide visqueux :

Ce système d'isolation combiné d'un système LRB et d'un amortisseur à fluide visqueux montés en parallèle est représenté par le modèle mathématique de la figure 38.

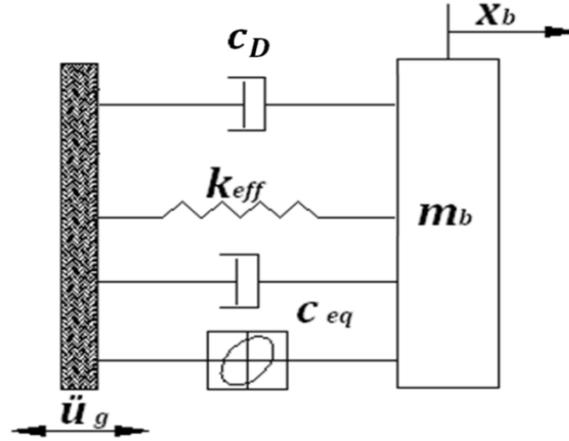


Figure 38: Modèle mathématique pour un système combiné LRB + amortisseur à fluide visqueux.

L'équation du mouvement du système combiné LRB + amortisseur à fluide visqueux est donnée comme suit:

$$m_b (\ddot{x}_b + \ddot{u}_g) + c_{eq} \dot{x}_b + k_{eff} x_b + F_D = 0 \quad (33)$$

En remplaçant l'équation (26) dans (33), on aura:

$$m_b \ddot{x}_b + c_{eq} \dot{x}_b + k_{eff} x_b + c_D \dot{x}_b = -m_b \ddot{u}_g \quad (34)$$

On suppose :

$$c^* = c_{eq} + c_D \quad (35)$$

Donc l'équation (35) devient :

$$m_b \ddot{x}_b + c^* \dot{x}_b + k_{eff} x_b = -m_b \ddot{u}_g \quad (36)$$

II-6-Système combiné FPS + amortisseur à fluide visqueux :

Ce système d'isolation combiné d'un système FPS et d'un amortisseur à fluide visqueux montés en parallèle est représenté par le modèle mathématique de la figure 39.

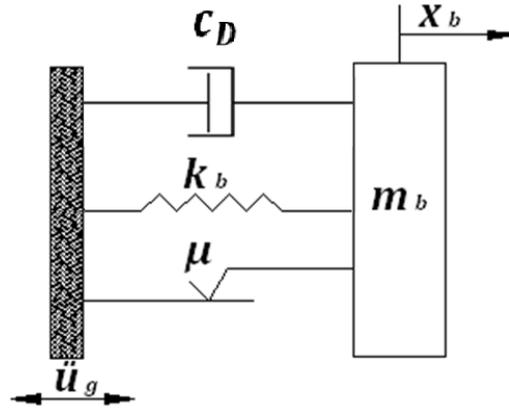


Figure 39: Modèle mathématique pour un système combiné FPS + amortisseur à fluide visqueux.

L'équation de mouvement du système combiné FPS + Amortisseur à fluide visqueux sous l'accélération du sol \ddot{u}_g est donnée par :

$$m_b(\ddot{x}_b + \ddot{u}_g) + F + F_D = 0 \quad (37)$$

En remplaçant les équations (12) et (26) dans l'équation (37), on aura :

$$m_b\ddot{x}_b + \frac{W}{R}x_b + \mu W \operatorname{sgn}(\dot{x}_b) + c_D\dot{x}_b = -m_b\ddot{u}_g \quad (38)$$

Chapitre III

INTERACTION SOL-STRUCTURE

CHAPITRE III

INTERACTION SOL-STRUCTURE

III -1-Introduction

L'effet de l'interaction sol-structure sur la réponse dynamique des structures a été bien étudié dans les années 80 et les années 90 grâce à l'élaboration de méthodes numériques basées sur la méthode des éléments finis qui présente la plus grande flexibilité et permet en outre la prise en considération du comportement non linéaire (Kausel *et al.*, 1978; Pecker, 1984 ; Wolf, 1985)[49, 50, 51].

Des études ont été effectuées pour évaluer l'effet du phénomène de l'interaction sol-structure sur la réponse sismique des ponts isolés comme les études analytiques réalisées par Vlassis et Spyarakos, (2001)[52,53,54]. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet de l'interaction sol-structure sur la réponse du pilier sismiquement isolé du tablier du pont fondé sur une couche de sol superficielle recouvrant un substratum et de développer une méthode qui tient compte de l'effet de l'interaction sol-structure et pour être facilement appliquée à la conception préliminaire des ponts, l'étude réalisée par Tongaonkar et Jangid, (2003) qui a évalué les effets de l'interaction de sol-structure sur les réponses maximales du pont à tablier continu installé sur un système d'isolation en caoutchouc, l'étude réalisée par Spyarakos *et al.*, (2009) qui montre l'effet de l'interaction sol-structure sur la réponse des bâtiments isolés à la base et l'étude réalisée par Olmos *et al.*, (2011)[55,56,57,58,59]. L'objectif de cette étude était d'étudier l'effet de l'isolateur LRB sur la réponse sismique de ponts conçus selon les codes actuels pour deux sols différents: les sols de type dur et moyen afin d'évaluer leur applicabilité à la conception de nouveaux ponts ou modernisation des installations existantes.

III-2-Principes de base de l'interaction sol-structure

Les charges sismiques appliquées à la fondation proviennent des forces d'inertie développées dans la superstructure et des déformations du sol, causées par le passage des ondes sismiques, imposées aux fondations. L'étude de ces phénomènes est nommée dans la littérature sous le nom « Interaction sol-structure »(ISS).

L'aspect principal du phénomène de l'interaction sol structure est présenté dans ce chapitre par la figure 40, qui représente une structure brochette avec une fondation sur pieux. Loin de la fondation et dans le champ libre (*free field*), la secousse sismique se propage à

travers les couches de sol sous forme des ondes de volume (P et S) et des ondes de surface (R et L) [50,60,51,61].

On distingue dans l'analyse dynamique sol structure deux phénomènes qui apparaissent simultanément :

1. Les déformations sismiques du sol vont forcer les pieux et la fondation fondée partiellement dans le sol à se déplacer. Même sans la superstructure, le mouvement de la fondation diffère du mouvement du champ libre en raison des différences de rigidité entre le sol d'une part, et les pieux et les fondations d'autre part; les ondes incidentes sont réfléchies et diffractés par la fondation et les pieux qui modifient à leur tour le mouvement du sol au voisinage de la fondation. Ce phénomène s'appelle l'interaction cinématique.
2. Le mouvement, induit au niveau de la fondation, génère des oscillations dans la superstructure qui développent des forces d'inertie qui sont transmises à la fondation, aux pieux et au sol de contact sous forme de forces et de déplacements dynamiques supplémentaires. Ce phénomène s'appelle l'interaction inertielle.

Cependant, le plus souvent, les ingénieurs de conception se réfèrent à l'interaction inertielle comme l'ISS et ignorent la composante cinématique.

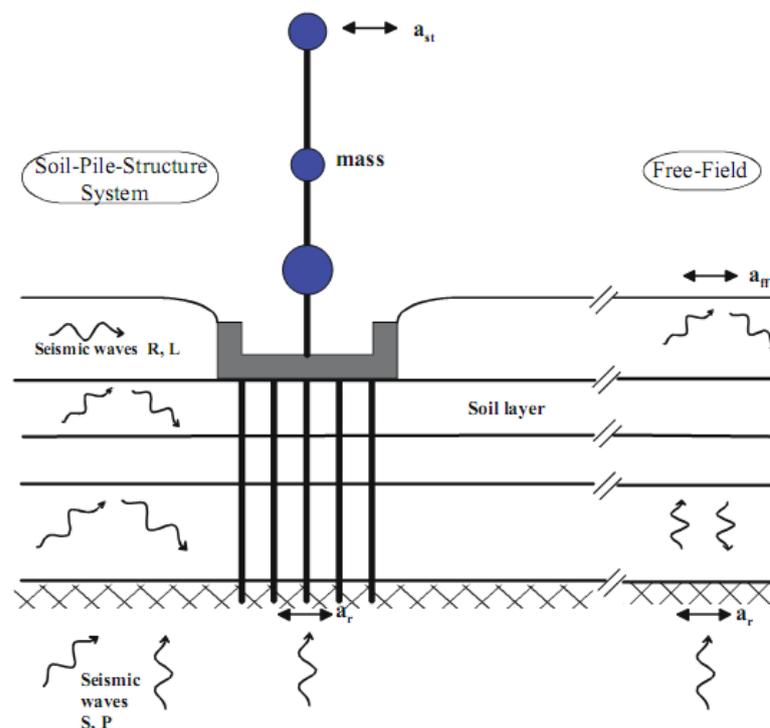


Figure 40 : Illustration de l'interaction sol-structure sur la réponse d'un ouvrage [60].

III-2-1- Effet de l'interaction sol-structure sur un modèle analogique simple

La structure est modélisée par une masse, un ressort et un amortisseur placé à une altitude h au-dessus de la fondation. La liaison entre la structure et la fondation est assurée par une barre rigide. La fondation repose sur un massif de sol, le ressort représente la raideur moyenne de support et l'amortisseur reflète la dissipation de l'énergie provenant du sol lui-même (amortissement matériel) et du rayonnement des ondes sismiques (amortissement radiatif). Pour des raisons simplificatrices l'amortissement matériel est négligé par rapport à l'amortissement radiatif.

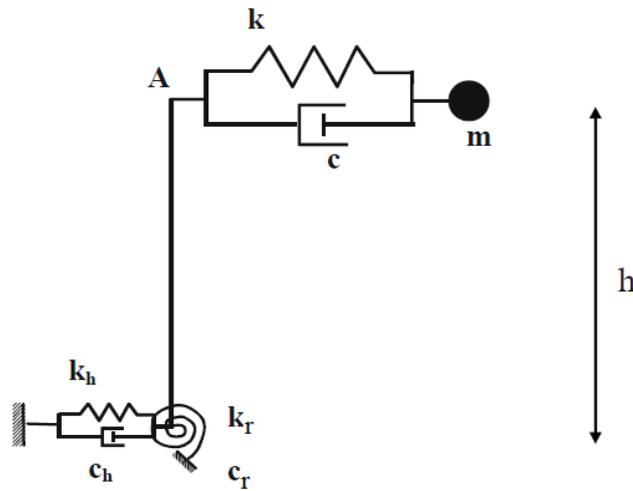


Figure 41 : Modèle idéalisé pour illustrer l'effet de l'interaction sol-structure [60].

Le système représenté sur la figure 41 possède 3 degrés de liberté:

- Le déplacement horizontal de la masse u
- Le déplacement horizontal de la fondation u_0
- La rotation de la fondation θ

Il est soumis à un déplacement horizontal harmonique du support avec une fréquence ω et une amplitude u_g . Les équations d'équilibre dynamique du système peuvent être établies à partir des équations de Lagrange avec les coordonnées généralisées suivantes :

- $q_1 = u$, le déplacement relatif de la masse par rapport à A ;
- $q_2 = u_0$, le déplacement horizontal de la fondation ;
- $q_3 = \theta$, la rotation de la fondation.

Le déplacement absolu de la masse u^t est lié aux paramètres précédents par :

$$u^t = u_g + u_0 + u + h\theta \quad (01)$$

L'énergie cinétique du système est donnée par :

$$T = \frac{1}{2} m (\dot{u}_g + \dot{u}_0 + \dot{u} + h\dot{\theta})^2 \quad (02)$$

et l'énergie potentielle par :

$$V = \frac{1}{2} (ku^2 + k_h u_0^2 + k_r \theta^2) \quad (03)$$

Le travail des forces non conservatrices provenant des amortisseurs:

$$\delta W = -(c\dot{u}\delta u + c_h \dot{u}_0 \delta u_0 + c_r \dot{\theta} \delta \theta) \quad (04)$$

Les équations de Lagrange sont données par :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \left(\frac{\partial T}{\partial q_i} \right) + \left(\frac{\partial V}{\partial q_i} \right) = \left(\frac{\delta W}{\delta q_i} \right) \quad (05)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial \dot{u}} = \frac{1}{2} m (2\dot{u} + 2\dot{u}_g + 2\dot{u}_0 + 2h\dot{\theta}) \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{u}_0} = \frac{1}{2} m (2\dot{u}_0 + 2\dot{u}_g + 2\dot{u} + 2h\dot{\theta}) \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} = \frac{h}{2} m (2\dot{u}_g + 2\dot{u}_0 + 2\dot{u} + 2h\dot{\theta}) \end{cases} \quad (06)$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{u}} \right) = \frac{1}{2} m (2\ddot{u}_g + 2\ddot{u}_0 + 2\ddot{u} + 2h\ddot{\theta}) \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{u}_0} \right) = \frac{1}{2} m (2\ddot{u}_g + 2\ddot{u}_0 + 2\ddot{u} + 2h\ddot{\theta}) \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} \right) = \frac{h}{2} m (2\ddot{u}_g + 2\ddot{u}_0 + 2\ddot{u} + 2h\ddot{\theta}) \end{cases} \quad (07)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial V}{\partial u} = ku \\ \frac{\partial V}{\partial u_0} = k_h u_0 \\ \frac{\partial V}{\partial \theta} = k_r \theta \end{cases} \quad (08)$$

$$\begin{cases} \frac{\delta W}{\delta u} = -c\dot{u} \\ \frac{\delta W}{\delta u_0} = -c_h \dot{u}_0 \\ \frac{\delta W}{\delta \theta} = -c_r \dot{\theta} \end{cases} \quad (09)$$

En tenant compte des relations entre accélération, vitesse et déplacement, on obtient :

$$\dot{x} = i \omega x ; \quad \ddot{x} = -\omega^2 x \quad (10)$$

En remplaçant les équations (06) à (10) dans Les équations de Lagrange (05) pour les trois variables généralisées, on aura :

$$\begin{cases} -\omega^2 m (u_g + u_0 + u + h\theta) + ku + i\omega c u = 0 \\ -\omega^2 m (u_g + u_0 + u + h\theta) + k_h u_0 + i\omega c_h u_0 = 0 \\ -\omega^2 h m (u_g + u_0 + u + h\theta) + k_r \theta + i\omega c_r \theta = 0 \end{cases} \quad (11)$$

Présentation des pourcentages d'amortissement critique :

$$\xi = \frac{\omega c}{2k}; \quad \xi_h = \frac{\omega c_h}{2k_h}; \quad \xi_r = \frac{\omega c_r}{2k_r} \quad (12)$$

Les équations d'équilibre dynamique sont:

$$\begin{cases} -m\omega^2 (u_0 + u + h\theta) + k(1 + 2i\xi)u = m\omega^2 u_g \\ -m\omega^2 (u_0 + u + h\theta) + k_h(1 + 2i\xi_h)u_0 = m\omega^2 u_g \\ -mh\omega^2 (u_0 + u + h\theta) + k_r(1 + 2i\xi_r)\theta = mh\omega^2 u_g \end{cases} \quad (13)$$

En éliminant les variables u_0 et θ entre les trois équations (13), et en introduisant les notations $m\omega_s^2 = k$, $m\omega_h^2 = k_h$, $mh^2\omega_r^2 = k_r$, étant donné que $\xi, \xi_h, \xi_r \ll 1$, le déplacement relatif de la masse est obtenu comme suit :

$$\left[1 + 2i\xi - \frac{\omega^2}{\omega_s^2} - \frac{\omega^2}{\omega_h^2}(1 + 2i\xi - 2i\xi_h) - \frac{\omega^2}{\omega_r^2}(1 + 2i\xi - 2i\xi_r) \right] u = \frac{\omega^2}{\omega_s^2} u_g \quad (14)$$

La réponse d'un oscillateur à un degré de liberté avec la même masse m , de fréquence propre $\tilde{\omega}$ et de pourcentage d'amortissement $\tilde{\xi}$ soumis à un déplacement harmonique d'amplitude \tilde{u}_g et de fréquence ω au niveau de sa base est égale à:

$$\left[1 + 2i\tilde{\xi} - \frac{\omega^2}{\tilde{\omega}^2} \right] u = \frac{\omega^2}{\tilde{\omega}^2} \tilde{u}_g \quad (15)$$

L'oscillateur équivalent à un degré de liberté aura la même réponse que le système avec ISS à condition de maintenir les relations suivantes:

$$\begin{cases} \frac{1}{\tilde{\omega}^2} = \frac{1}{\omega_s^2} + \frac{1}{\omega_h^2} + \frac{1}{\omega_r^2} \\ \tilde{\xi} = \frac{\tilde{\omega}^2}{\omega_s^2} \xi + \frac{\tilde{\omega}^2}{\omega_h^2} \xi_h + \frac{\tilde{\omega}^2}{\omega_r^2} \xi_r \\ \tilde{u}_g = \frac{\tilde{\omega}^2}{\omega_s^2} u_g \end{cases} \quad (16)$$

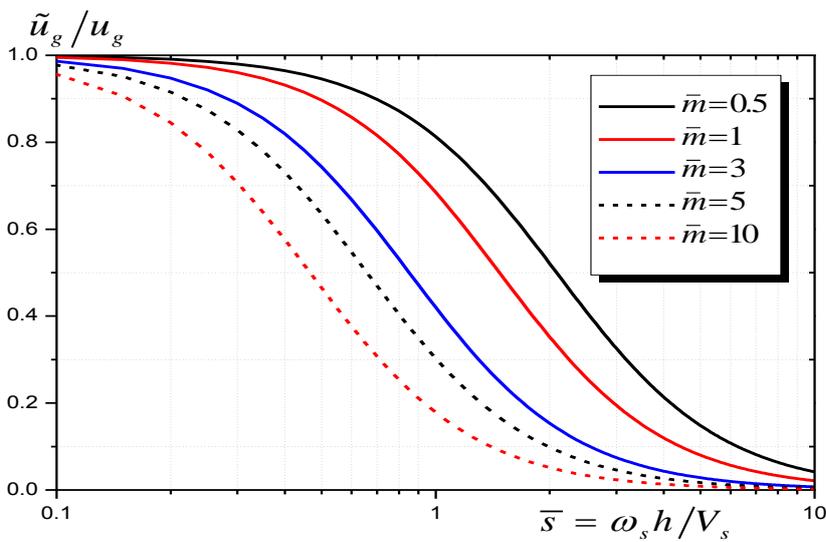
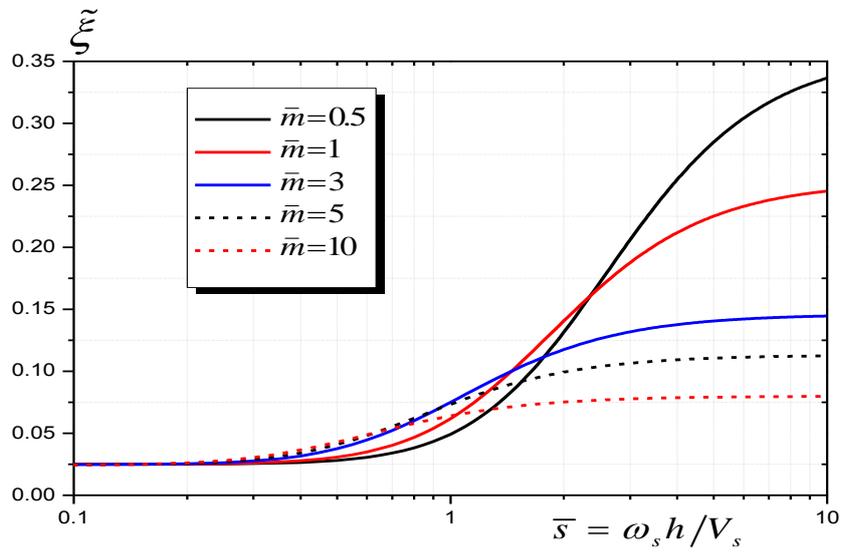
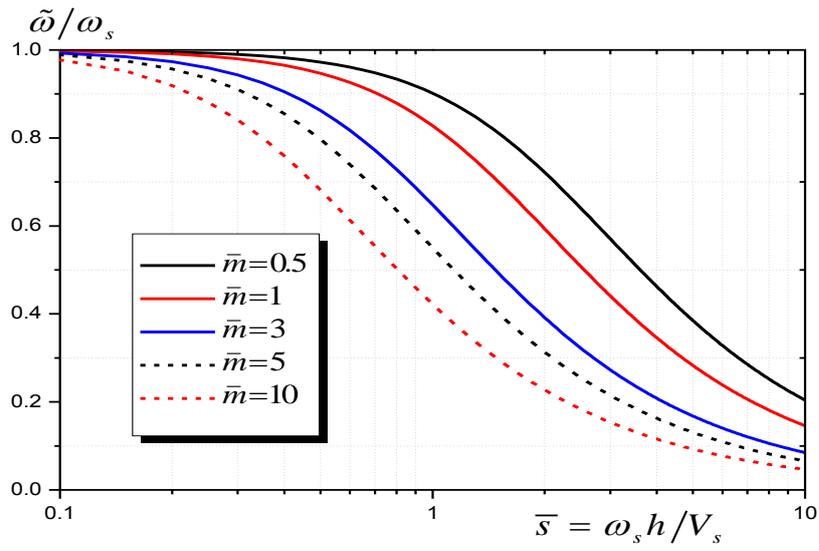
Les équations (16) montrent que l'interaction sol-structure a pour effet :

- de diminuer la fréquence propre de la structure encastree à la base $\tilde{\omega} < \omega_s$;
- d'augmenter le pourcentage d'amortissement du système $\tilde{\xi} > \xi$ par rapport à la structure encastree à la base;
- de diminuer l'amplitude du mouvement incidente effectif à la base de la structure $\tilde{u}_g < u_g$.

Les conclusions précédentes sont illustrées par la figure 42 qui présente pour une base circulaire reposant sur un demi-espace élastique homogène, les variations des grandeurs $\tilde{\omega} / \omega_s, \tilde{\xi}, \tilde{u}_g / u_g$ en fonction des paramètres adimensionnels.

$$\bar{h} = \frac{h}{r}, \quad \bar{s} = \frac{\omega_s h}{V_s}, \quad \bar{m} = \frac{m}{\rho r^3} \quad (17)$$

Où r est le rayon de la fondation, V_s et ρ la vitesse des ondes de cisaillement et la masse volumique du demi-espace. La figure 42 montre clairement que l'effet de l'interaction sol-structure est très significatif pour le sol flexible et pour les structures lourdes de faible ou moyenne hauteur [51].



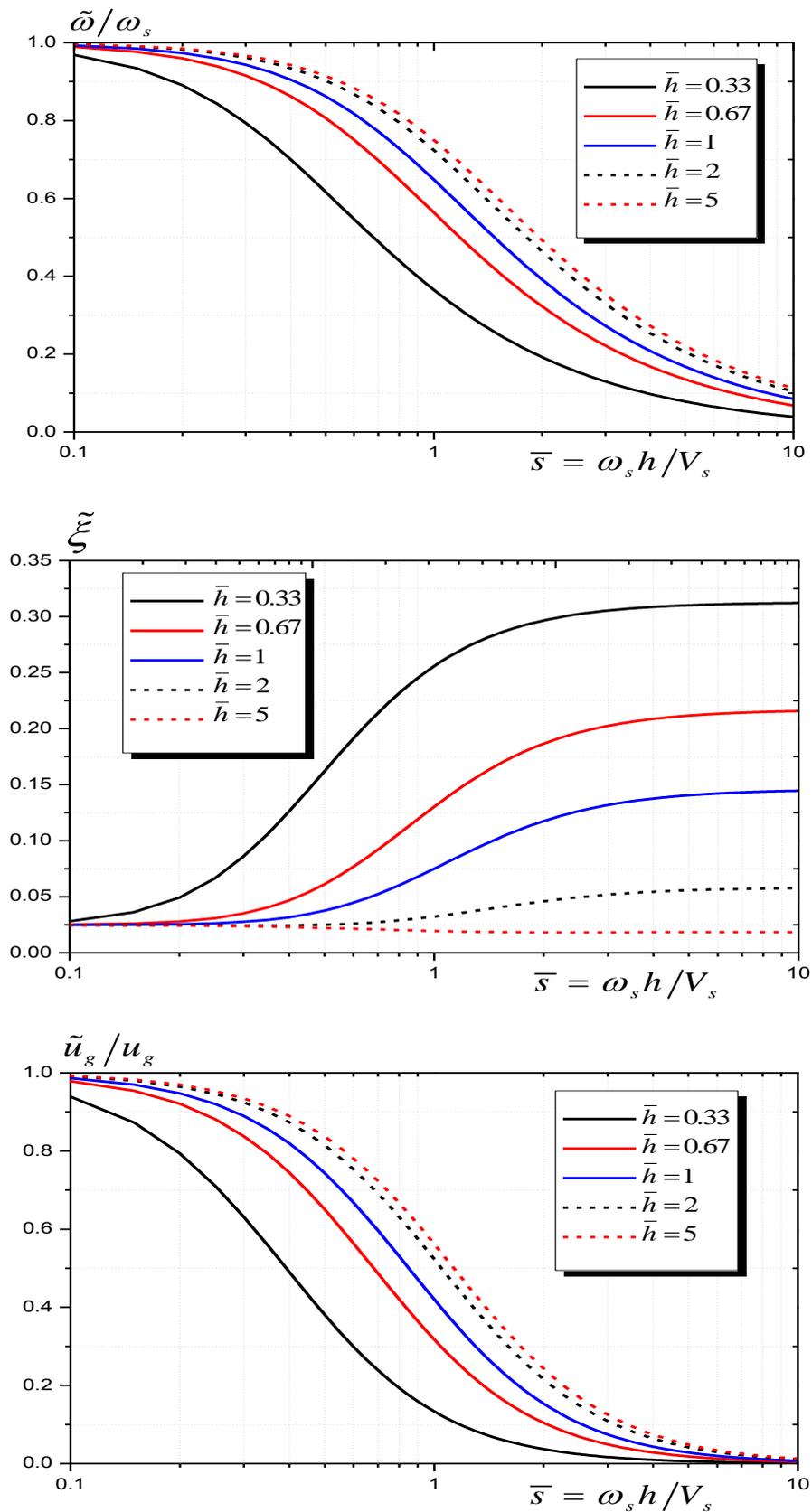


Figure 42 : Illustration de l'influence de l'interaction sol-structure.

III-3-Théorème de superposition pour l'interaction sol-structure

Ce théorème a été établi par (Kausel et *al.*, 1978)[49]. Comme le montre la figure 43, on suppose que les équations générales de mouvement d'un système fondation-structure sont données par l'équation matricielle suivante :

$$M\ddot{U} + C\dot{Y} + KY = 0 \quad (18)$$

Où M , C et K sont les matrices de masse, d'amortissement et de rigidité du système; U et Y sont le déplacement absolu et relatif par rapport à un système général de référence au sol.

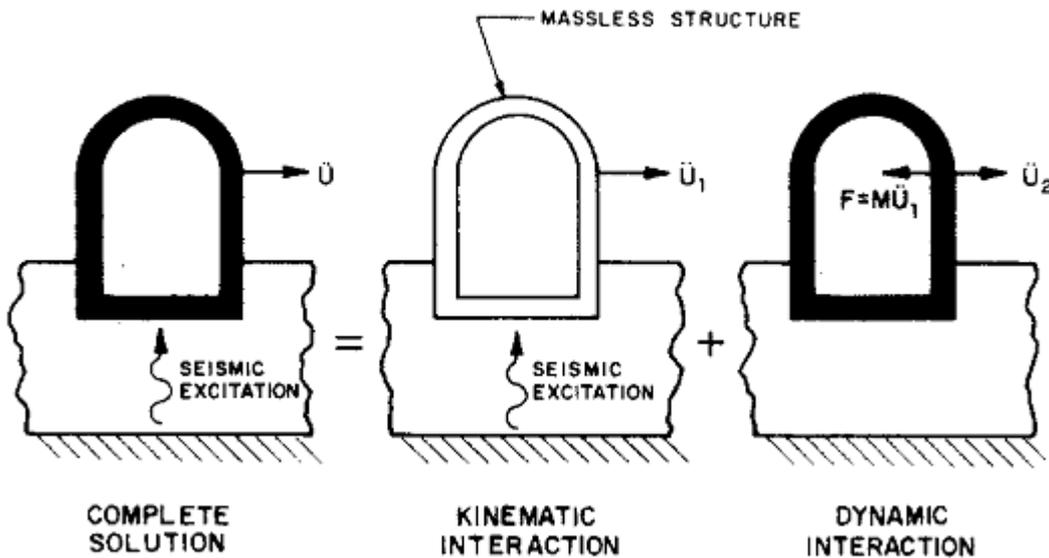


Figure 43 : Théorème de superposition [49].

La solution de cette équation est équivalente à la solution des deux équations matricielles.

$$M_1\ddot{U}_1 + C\dot{Y}_1 + KY_1 = 0 \quad (19)$$

$$M\ddot{Y}_2 + C\dot{Y}_2 + KY_2 = -M_2\ddot{U}_1 \quad (20)$$

Où : $U_1 = Y_1 + U_g$, $U = U_1 + Y_2$, $Y = Y_1 + Y_2$ et $M = M_1 + M_2$.

M_1 représente la masse de la structure, tandis que M_2 représente la masse du sol. U_g est un vecteur de mouvement du sol. L'équivalence entre les équations (19) et (18) est démontrée par addition simple.

Dans l'équation (19), la réponse de la structure sans masse sera appelée *interaction cinématique*. Les résultats de cette étape sont ensuite utilisés dans l'équation (20), qui définit *l'interaction inertielle*.

Dans la solution de la deuxième étape, il n'est pas pertinent de savoir si le sol est modélisé avec des éléments finis, ou de manière équivalente avec une matrice de rigidité modélisant le

sol de fondation et définie à l'interface sol-structure. Ces fonctions de rigidité peuvent être considérées comme résultant d'une condensation de tous les degrés de liberté dans le sol.

Pour la situation particulière où la structure de fondation est très rigide, il devient légitime de remplacer la matrice de rigidité par des ressorts et des amortisseurs. Cette matrice est appelée matrice d'impédance, Il s'ensuit également que la solution de la phase d'interaction cinématique est complètement définie par les rotations et les translations de la structure sans masse qui se déplace en tant que corps rigide. On peut donc, remplacer la structure sans masse dans l'équation (19) par une fondation rigide sans masse, soumise à la même excitation au sol que le système original.

En outre, un examen plus attentif de l'équation (20), montre que la solution Y_2 peut être considérée comme un vecteur de déplacements par rapport à un support fictif, alors que les translations et les rotations de corps rigides des fondations sans masse dans l'équation (19) sont le mouvement du support équivalent.

Pour que l'hypothèse d'une fondation rigide soit pertinente, il est donc possible de rompre la solution en trois étapes, comme le montre la figure 44.

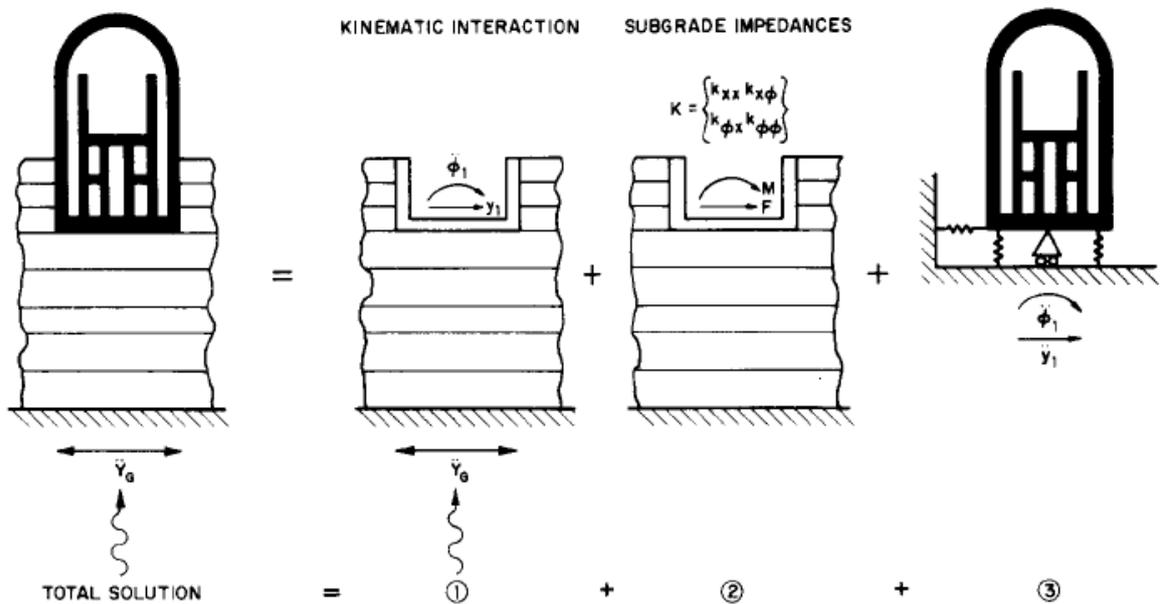


Figure 44 : Les trois étapes de solution pour le théorème de superposition [49].

- (1) Détermination du mouvement de la fondation rigide sans masse, lorsqu'elle est soumise au même mouvement d'entrée que la solution totale. C'est la solution de l'équation (19) ;

- (2) Détermination des raideurs du sol de fondation pour les degrés de liberté correspondants. Donc, cette étape produit la matrice d'impédance de la fondation ;
- (3) Calcul de la réponse de la structure réelle supportée sur les raideurs du sol de fondation et soumis à son support aux mouvements d'interaction cinématique.

III-4-Influence de l'interaction sol-structure sur la réponse dynamique d'un pont équipé d'un système d'isolation

Pour comprendre l'influence de l'interaction sol-structure et du système d'isolation parasismique sur les réponses des ponts isolés, il faut proposer un modèle analogue à deux masses et quatre degrés de liberté (figure 45) [52,54].

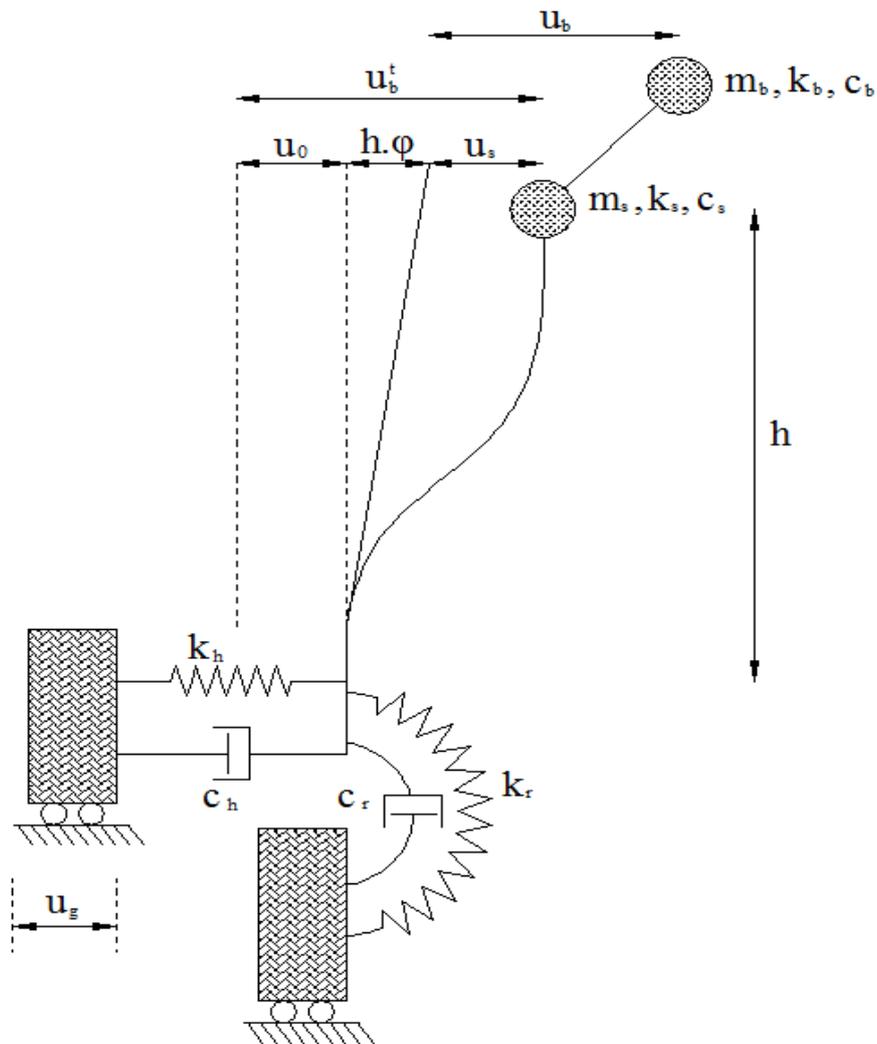


Figure 45 : Modèle analogue à quatre degrés de liberté pour un pont isolé y compris les impédances du sol.

Les masses m_b et m_s sont représentées respectivement par la masse du tablier au-dessus du système d'isolation et la masse en tête des piles. La rigidité et le coefficient d'amortissement du système d'isolation sont représentés par k_b et c_b . La rigidité et le coefficient d'amortissement du pont sont représentés respectivement par k_s et c_s . La fondation de ce pont repose sur un sol dont l'interaction avec celui-ci est modélisée par la rigidité horizontale et rotationnelle du sol qui sont données respectivement par k_h et k_r et par les coefficients d'amortissement horizontal et rotationnel du sol donnés par c_h et c_r .

Les quatre degrés de liberté de la figure 45 sont représentés par les déplacements horizontaux relatifs des deux masses u_b et u_s , le déplacement horizontal de la fondation u_0 et la rotation de la fondation autour d'un axe horizontal φ . Le modèle analogique précédent est soumis à un déplacement horizontal du sol de fondation représenté par u_g .

III-4-1-Equations de mouvement pour un modèle analogique à quatre degrés de liberté

Les équations d'équilibre dynamique du système trouvées à partir des équations de Lagrange en prenant en variable généralisées q_i :

$q_1 = u_b$: le déplacement relatif de la masse m_b

$q_2 = u_s$: le déplacement relatif de la masse m_s

$q_3 = u_0$: le déplacement relatif de la fondation

$q_4 = \varphi$: la rotation de la fondation

Les relations entre les déplacements absolus des deux masses u_b^t et u_s^t et les variables sont données par :

$$u_b^t = u_g + u_0 + h\varphi + u_b \quad (29)$$

$$u_s^t = u_g + u_0 + h\varphi + u_s \quad (30)$$

Indiquant par T l'énergie cinétique totale du système :

pour la masse m_b :

$$T_b = \frac{1}{2} m_b (\dot{u}_g + \dot{u}_0 + \dot{u}_b + h\dot{\varphi})^2 \quad (31)$$

pour la masse m_s :

$$T_s = \frac{1}{2} m_s (\dot{u}_g + \dot{u}_0 + \dot{u}_s + h\dot{\varphi})^2 \quad (32)$$

$$\begin{aligned}
 T &= T_s + T_b = \frac{1}{2} m_s (\dot{u}_g + \dot{u}_0 + \dot{u}_s + h\dot{\varphi})^2 + \frac{1}{2} m_b (\dot{u}_g + \dot{u}_0 + \dot{u}_b + h\dot{\varphi})^2 \\
 T &= \frac{1}{2} m_s (\dot{u}_g^2 + \dot{u}_0^2 + \dot{u}_s^2 + h^2 \dot{\varphi}^2 + 2\dot{u}_g \dot{u}_0 + 2\dot{u}_s h\dot{\varphi} + 2\dot{u}_g \dot{u}_s + 2\dot{u}_g h\dot{\varphi} + 2\dot{u}_0 \dot{u}_s + 2\dot{u}_0 h\dot{\varphi}) \\
 &+ \frac{1}{2} m_b (\dot{u}_g^2 + \dot{u}_0^2 + \dot{u}_b^2 + h^2 \dot{\varphi}^2 + 2\dot{u}_g \dot{u}_0 + 2\dot{u}_b h\dot{\varphi} + 2\dot{u}_g \dot{u}_b + 2\dot{u}_g h\dot{\varphi} + 2\dot{u}_0 \dot{u}_b + 2\dot{u}_0 h\dot{\varphi}) \quad (33)
 \end{aligned}$$

Désignant par V l'énergie potentielle totale du système :

Pour la masse m_b :

$$V_b = \frac{1}{2} (k_b (u_b - u_s)^2) \quad (34)$$

Pour la masse m_s :

$$V_s = \frac{1}{2} (k_h u_0^2 + k_r \varphi^2 + k_s u_s^2) \quad (35)$$

$$V = V_s + V_b = \frac{1}{2} (k_h u_0^2 + k_r \varphi^2 + k_s u_s^2 + k_b (u_b - u_s)^2)$$

$$V = V_s + V_b = \frac{1}{2} (k_h u_0^2 + k_s u_s^2 + k_r \varphi^2 + k_b u_b^2 + k_b u_s^2 - 2k_b u_b u_s) \quad (36)$$

et par δW le travail des forces d'amortissement :

$$\begin{aligned}
 \delta W &= -[c_b (\dot{u}_b - \dot{u}_s) \delta(u_b - u_s) + c_s \dot{u}_s \delta u_s + c_h \dot{u}_0 \delta u_0 + c_r \dot{\varphi} \delta \varphi] \\
 \delta W &= -[c_b (\dot{u}_b - \dot{u}_s) \delta u_b - c_b (\dot{u}_b - \dot{u}_s) \delta u_s + c_s \dot{u}_s \delta u_s + c_h \dot{u}_0 \delta u_0 + c_r \dot{\varphi} \delta \varphi] \quad (37)
 \end{aligned}$$

Les équations de Lagrange sont données par :

$$\left\{ \begin{aligned}
 \frac{\partial T}{\partial \dot{u}_b} &= \frac{1}{2} m_b (2\dot{u}_b + 2h\dot{\varphi} + 2\dot{u}_g + 2\dot{u}_0) \\
 \frac{\partial T}{\partial \dot{u}_s} &= \frac{1}{2} m_s (2\dot{u}_s + 2h\dot{\varphi} + 2\dot{u}_g + 2\dot{u}_0) \\
 \frac{\partial T}{\partial \dot{u}_0} &= \frac{1}{2} m_s (2\dot{u}_0 + 2\dot{u}_g + 2\dot{u}_s + 2h\dot{\varphi}) + \frac{1}{2} m_b (2\dot{u}_0 + 2\dot{u}_g + 2\dot{u}_b + 2h\dot{\varphi}) \\
 \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} &= \frac{h}{2} m_s (2h\dot{\varphi} + 2\dot{u}_s + 2\dot{u}_g + 2\dot{u}_0) + \frac{h}{2} m_b (2h\dot{\varphi} + 2\dot{u}_b + 2\dot{u}_g + 2\dot{u}_0)
 \end{aligned} \right. \quad (38)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{u}_b} \right) = m_b (\ddot{u}_b + h\ddot{\varphi} + \ddot{u}_g + \ddot{u}_0) \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{u}_s} \right) = m_s (\ddot{u}_s + h\ddot{\varphi} + \ddot{u}_g + \ddot{u}_0) \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{u}_0} \right) = m_s (\ddot{u}_0 + \ddot{u}_g + \ddot{u}_s + h\ddot{\varphi}) + m_b (\ddot{u}_0 + \ddot{u}_g + \ddot{u}_b + h\ddot{\varphi}) \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) = hm_s (h\ddot{\varphi} + \ddot{u}_s + \ddot{u}_g + \ddot{u}_0) + hm_b (h\ddot{\varphi} + \ddot{u}_b + \ddot{u}_g + \ddot{u}_0) \end{array} \right. \quad (39)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial V}{\partial u_b} = \frac{1}{2} (2k_b u_b - 2k_b u_s) = k_b u_b - k_b u_s \\ \frac{\partial V}{\partial u_s} = \frac{1}{2} (2k_s u_s + 2k_b u_s - 2k_b u_b) = -k_b u_b + (k_b + k_s) u_s \\ \frac{\partial V}{\partial u_0} = k_h u_0 \\ \frac{\partial V}{\partial \varphi} = k_r \varphi \end{array} \right. \quad (40)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\delta W}{\delta u_b} = -c_b (\dot{u}_b - \dot{u}_s) \\ \frac{\delta W}{\delta u_s} = c_b (\dot{u}_b - \dot{u}_s) - c_s \dot{u}_s = c_b \dot{u}_b - (c_b + c_s) \dot{u}_s \\ \frac{\delta W}{\delta u_0} = -c_h \dot{u}_0 \\ \frac{\delta W}{\delta \varphi} = -c_r \dot{\varphi} \end{array} \right. \quad (41)$$

En remplaçant les équations (38) à (41) dans les équations de Lagrange (05) pour les quatre variables généralisées, on aura :

$$\left\{ \begin{array}{l} m_b (\ddot{u}_g + \ddot{u}_b + \ddot{u}_0 + h\ddot{\varphi}) + c_b (\dot{u}_b - \dot{u}_s) + k_b u_b - k_b u_s = 0 \\ m_s (\ddot{u}_g + \ddot{u}_s + \ddot{u}_0 + h\ddot{\varphi}) - c_b \dot{u}_b + (c_b + c_s) \dot{u}_s - k_b u_b + (k_b + k_s) u_s = 0 \\ m_s (\ddot{u}_g + \ddot{u}_s + \ddot{u}_0 + h\ddot{\varphi}) + m_b (\ddot{u}_g + \ddot{u}_b + \ddot{u}_0 + h\ddot{\varphi}) + c_h \dot{u}_0 + k_h u_0 = 0 \\ hm_s (\ddot{u}_g + \ddot{u}_s + \ddot{u}_0 + h\ddot{\varphi}) + hm_b (\ddot{u}_g + \ddot{u}_b + \ddot{u}_0 + h\ddot{\varphi}) + c_r \dot{\varphi} + k_r \varphi = 0 \end{array} \right. \quad (42)$$

Les équations du mouvement (42) sous forme matricielle sont données par :

$$\begin{bmatrix} m_b & 0 & m_b & m_b h \\ 0 & m_s & m_s & m_s h \\ m_b & m_s & (m_b + m_s) & h(m_b + m_s) \\ m_b h & m_s h & h(m_b + m_s) & h^2(m_b + m_s) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_b \\ \ddot{u}_s \\ \ddot{u}_0 \\ \ddot{\varphi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b & -c_b & 0 & 0 \\ -c_b & (c_b + c_s) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_h & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_b \\ \dot{u}_s \\ \dot{u}_0 \\ \dot{\varphi} \end{Bmatrix} \quad (43)$$

$$+ \begin{bmatrix} k_b & -k_b & 0 & 0 \\ -k_b & (k_b + k_s) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_h & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_b \\ u_s \\ u_0 \\ \varphi \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} m_b \\ m_s \\ (m_b + m_s) \\ h(m_b + m_s) \end{Bmatrix} \ddot{u}_g$$

En tenant compte des relations entre accélération, vitesse et déplacement, on obtient :

$$\dot{x} = i \omega x ; \quad \ddot{x} = -\omega^2 x$$

Et en introduisant les pourcentages d'amortissement critique, on aura :

$$\xi_b = \frac{\omega c_b}{2k_b} ; \quad \xi_s = \frac{\omega c_s}{2k_s} ; \quad \xi_h = \frac{\omega c_h}{2k_h} ; \quad \xi_r = \frac{\omega c_r}{2k_r} \quad (44)$$

En supposant que le mouvement du sol est harmonique $u_g e^{i\omega t}$, les amplitudes de la force horizontale P_h et le moment M_r qui se développent à la base du pilier peuvent être écrits sous la forme suivante :

$$P_h = k_h (1 + 2\xi_h i + 2\xi_g i) u_0 \quad (45)$$

$$M_r = k_r (1 + 2\xi_r i + 2\xi_g i) \varphi \quad (46)$$

Les fréquences de vibrations ω_b , ω_r , ω_s et ω_h sont données par :

$$\omega_b^2 = \frac{k_b}{m_b} ; \quad \omega_r^2 = \frac{k_r}{(m_b + m_s) h^2} ; \quad \omega_s^2 = \frac{k_s}{(m_b + m_s)} ; \quad \omega_h^2 = \frac{k_h}{(m_b + m_s)} \quad (47)$$

En remplaçant les équations (10),(44), (45), (46) et (47) dans (43), on aura :

$$-m_b \omega^2 (u_b + u_0 + h\varphi) + k_b (1 + 2\xi_b i) (u_b - u_s) = m_b \omega^2 u_g \quad (48)$$

$$-m_s \omega^2 (u_s + u_0 + h\varphi) - k_b (1 + 2\xi_b i) (u_b - u_s) + k_s (1 + 2\xi_s i) u_s = m_s \omega^2 u_g \quad (49)$$

$$-m_s \omega^2 (u_s + u_0 + h\varphi) - m_b \omega^2 (u_b + u_0 + h\varphi) + k_h (1 + 2\xi_h i + 2\xi_g i) u_0 = (m_b + m_s) \omega^2 u_g \quad (50)$$

$$-m_s h \omega^2 (u_s + u_0 + h\varphi) - m_b h \omega^2 (u_b + u_0 + h\varphi) + k_r (1 + 2\xi_r i + 2\xi_g i) \varphi = (m_b + m_s) \omega^2 h u_g \quad (51)$$

On suppose:

$$\gamma = \frac{m_s}{m_b + m_s} \quad (52)$$

En remplaçant l'équation (52) dans les équations (48), (49), (50) et (51), on obtient:

$$-(u_b + u_0 + h\varphi) + \frac{\omega_b^2}{\omega^2}(1 + 2\xi_b i)(u_b - u_s) = u_g \quad (53)$$

$$-\gamma(u_s + u_0 + h\varphi) - \frac{\omega_b^2}{\omega^2}(1 - \gamma)(1 + 2\xi_b i)(u_b - u_s) + \frac{\omega_s^2}{\omega^2}(1 + 2\xi_s i)u_s = \gamma u_g \quad (54)$$

$$-\gamma(u_s + u_0 + h\varphi) + (\gamma - 1)(u_b + u_0 + h\varphi) + \frac{\omega_h^2}{\omega^2}(1 + 2\xi_h i + 2\xi_g i)u_0 = u_g \quad (55)$$

$$-\gamma(u_s + u_0 + h\varphi) + (\gamma - 1)(u_b + u_0 + h\varphi) + \frac{\omega_r^2}{\omega^2}(1 + 2\xi_r i + 2\xi_g i)h\varphi = u_g \quad (56)$$

Les équations (53), (54), (55) et (56) sous forme matricielle sont données par :

$$\begin{bmatrix} \frac{\omega_b^2}{\omega^2}(1 + 2\xi_b i) - 1 & -\frac{\omega_b^2}{\omega^2}(1 + 2\xi_b i) & & -1 \\ -\frac{\omega_b^2}{\omega^2}(1 - \gamma)(1 + 2\xi_b i) & \frac{\omega_s^2}{\omega^2}(1 + 2\xi_s i) + \frac{\omega_b^2}{\omega^2}(1 - \gamma)(1 + 2\xi_b i) - \gamma & & -\gamma \\ (\gamma - 1) & -\gamma & \frac{\omega_h^2}{\omega^2}(1 + 2\xi_h i + 2\xi_g i) - 1 & \\ (\gamma - 1) & -\gamma & & -1 \\ -1 & & & \\ -\gamma & & & \\ -1 & & & \\ \frac{\omega_r^2}{\omega^2}(1 + 2\xi_r i + 2\xi_g i) - 1 & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_b \\ u_s \\ u_0 \\ h\varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \gamma \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} u_g \quad (57)$$

III-4-2-Formulation des équations de mouvement pour un système équivalent à deux degrés de liberté

Le système équivalent est un oscillateur à deux degrés de liberté avec les mêmes masses précédentes m_b et m_s , les pulsations propres $\tilde{\omega}_b$ et $\tilde{\omega}_s$, les pourcentages d'amortissement $\tilde{\xi}_b$ et $\tilde{\xi}_s$, soumis à un déplacement harmonique \tilde{u}_g de pulsation ω à sa base, comme le montre la figure 46.

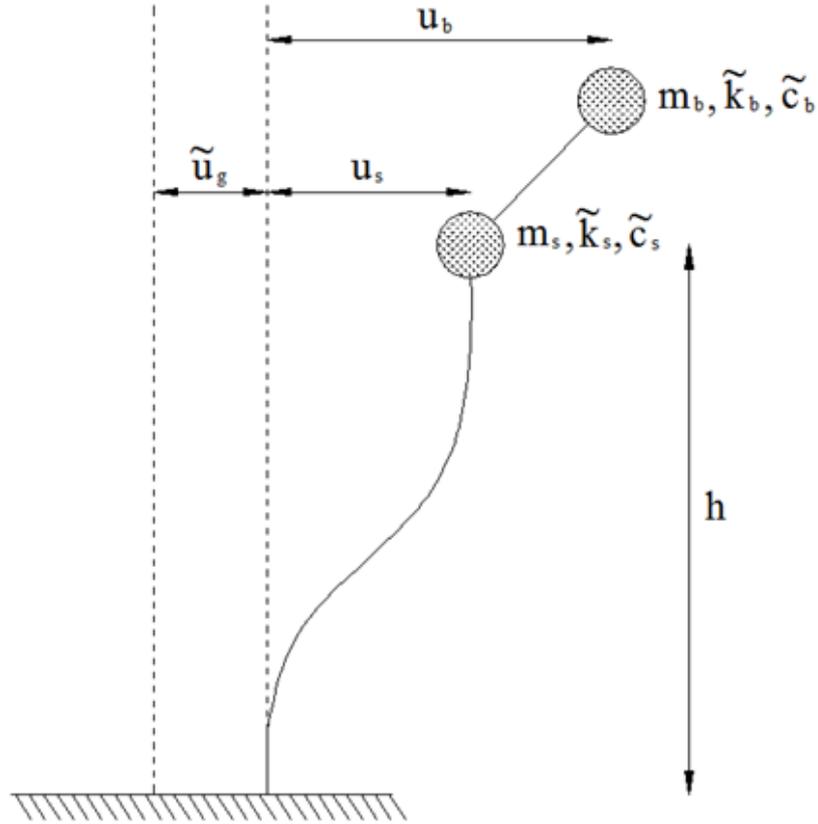


Figure 46 : Système équivalent à deux degrés de liberté pour un pont isolé et fixe à la base.

III-4-2-1-Equations de mouvement

Les équations du mouvement pour un pont isolé à deux degrés de liberté en termes de déplacement sont:

$$\begin{aligned} m_b (\ddot{u}_b + \ddot{\tilde{u}}_g) + \tilde{c}_b (\dot{u}_b - \dot{u}_s) + \tilde{k}_b (u_b - u_s) &= 0 \\ -m_b \omega^2 u_b + i\omega \tilde{c}_b (u_b - u_s) + \tilde{k}_b (u_b - u_s) &= m_b \omega^2 \tilde{u}_g \end{aligned} \quad (58)$$

$$\begin{aligned} m_s (\ddot{u}_b + \ddot{\tilde{u}}_g) + m_s (\ddot{u}_s + \ddot{\tilde{u}}_g) + \tilde{c}_s \dot{u}_s + \tilde{k}_s u_s &= 0 \\ -m_s \omega^2 u_s - m_b \omega^2 (u_b + \tilde{u}_g) + i\omega \tilde{c}_s u_s + \tilde{k}_s u_s &= m_s \omega^2 \tilde{u}_g \\ -m_s \omega^2 u_s + i\omega \tilde{c}_s u_s - i\omega \tilde{c}_b (u_b - u_s) + \tilde{k}_s u_s - \tilde{k}_b (u_b - u_s) &= m_s \omega^2 \tilde{u}_g \end{aligned} \quad (59)$$

Les fréquences de vibration $\tilde{\omega}_b$ et $\tilde{\omega}_s$, les pourcentages d'amortissement $\tilde{\xi}_b$ et $\tilde{\xi}_s$ sont donnés par:

$$\tilde{\xi}_b = \frac{\omega \tilde{c}_b}{2\tilde{k}_b}; \quad \tilde{\xi}_s = \frac{\omega \tilde{c}_s}{2\tilde{k}_s}; \quad \tilde{\omega}_b^2 = \frac{\tilde{k}_b}{m_b}; \quad \tilde{\omega}_s^2 = \frac{\tilde{k}_s}{m_b + m_s}$$

En substituant les paramètres de $\tilde{\omega}_b$, $\tilde{\omega}_s$, $\tilde{\xi}_b$ et $\tilde{\xi}_s$ dans les équations (58) et (59), on aura:

$$\begin{aligned}
 & -\frac{m_b \omega^2}{m_b \tilde{\omega}_b^2} u_b + \frac{i \omega 2 \tilde{k}_b \tilde{\xi}_b}{\omega m_b \tilde{\omega}_b^2} (u_b - u_s) + \frac{m_b \tilde{\omega}_b^2}{m_b \tilde{\omega}_b^2} (u_b - u_s) = \frac{m_b \omega^2}{m_b \tilde{\omega}_b^2} \tilde{u}_g \\
 & -\frac{\omega^2}{\tilde{\omega}_b^2} u_b + 2 \tilde{\xi}_b i u_b - 2 \tilde{\xi}_b i u_s + u_b - u_s = \frac{\omega^2}{\tilde{\omega}_b^2} \tilde{u}_g \\
 & \left[1 + 2 \tilde{\xi}_b i - \frac{\omega^2}{\tilde{\omega}_b^2} \right] u_b - (1 + 2 \tilde{\xi}_b i) u_s = \frac{\omega^2}{\tilde{\omega}_b^2} \tilde{u}_g \tag{60}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{m_s \omega^2}{(m_b + m_s) \tilde{\omega}_s^2} u_s + \frac{i \omega 2 \tilde{k}_s \tilde{\xi}_s}{\omega (m_b + m_s) \tilde{\omega}_s^2} u_s - \frac{i \omega 2 \tilde{k}_b \tilde{\xi}_b}{\omega (m_b + m_s) \tilde{\omega}_s^2} (u_b - u_s) + \frac{(m_b + m_s) \tilde{\omega}_s^2}{(m_b + m_s) \tilde{\omega}_s^2} u_s \\
 & -\frac{m_b \tilde{\omega}_b^2}{(m_b + m_s) \tilde{\omega}_s^2} (u_b - u_s) = \frac{m_s \omega^2}{(m_b + m_s) \tilde{\omega}_s^2} \tilde{u}_g \\
 & -\gamma \frac{\omega^2}{\tilde{\omega}_s^2} u_s + 2 \tilde{\xi}_s i u_s - \frac{\tilde{\omega}_b^2}{\tilde{\omega}_s^2} (1 - \gamma) 2 \tilde{\xi}_b i (u_b - u_s) + u_s - \frac{\tilde{\omega}_b^2}{\tilde{\omega}_s^2} (1 - \gamma) (u_b - u_s) = \frac{\omega^2}{\tilde{\omega}_s^2} \gamma \tilde{u}_g \\
 & -\left[\frac{\tilde{\omega}_b^2}{\tilde{\omega}_s^2} (1 - \gamma) (1 + 2 \tilde{\xi}_b i) \right] u_b + \left[1 + 2 \tilde{\xi}_s i + \frac{\tilde{\omega}_b^2}{\tilde{\omega}_s^2} (1 - \gamma) (1 + 2 \tilde{\xi}_b i) - \gamma \frac{\omega^2}{\tilde{\omega}_s^2} \right] u_s = \frac{\omega^2}{\tilde{\omega}_s^2} \gamma \tilde{u}_g \tag{61}
 \end{aligned}$$

Les équations de mouvement (60) et (61) sous forme matricielle sont données par :

$$\begin{bmatrix} 1 + 2 \tilde{\xi}_b i - \frac{\omega^2}{\tilde{\omega}_b^2} & -(1 + 2 \tilde{\xi}_b i) \\ -\frac{\tilde{\omega}_b^2}{\tilde{\omega}_s^2} (1 - \gamma) (1 + 2 \tilde{\xi}_b i) & 1 + 2 \tilde{\xi}_s i + \frac{\tilde{\omega}_b^2}{\tilde{\omega}_s^2} (1 - \gamma) (1 + 2 \tilde{\xi}_b i) - \gamma \frac{\omega^2}{\tilde{\omega}_s^2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_b \\ u_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\omega^2}{\tilde{\omega}_b^2} \\ \gamma \frac{\omega^2}{\tilde{\omega}_s^2} \end{Bmatrix} \tilde{u}_g \tag{62}$$

III-4-2-2- Calcul des fréquences propres

Pour déterminer les fréquences propres, on suppose que $\tilde{\xi}_b = \tilde{\xi}_s = 0$.

$$\begin{bmatrix} 1 - \frac{\tilde{\omega}_m^2}{\tilde{\omega}_b^2} & -1 \\ -\frac{\tilde{\omega}_b^2}{\tilde{\omega}_s^2} (1 - \gamma) & 1 + \frac{\tilde{\omega}_b^2}{\tilde{\omega}_s^2} (1 - \gamma) - \gamma \frac{\tilde{\omega}_m^2}{\tilde{\omega}_s^2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{\phi}_b^m \\ \tilde{\phi}_s^m \end{Bmatrix} = 0 \quad , \text{ avec : } m = 1, 2 \tag{63}$$

$$\begin{aligned} & \left(1 - \frac{\tilde{\omega}_m^2}{\tilde{\omega}_b^2}\right) \left(1 + \frac{\tilde{\omega}_b^2}{\tilde{\omega}_s^2}(1-\gamma) - \gamma \frac{\tilde{\omega}_m^2}{\tilde{\omega}_s^2}\right) - \left(\frac{\tilde{\omega}_b^2}{\tilde{\omega}_s^2}(1-\gamma)\right) = 0 \\ & 1 - \frac{\tilde{\omega}_m^2}{\tilde{\omega}_b^2} + \frac{\tilde{\omega}_b^2}{\tilde{\omega}_s^2}(1-\gamma) - \frac{\tilde{\omega}_m^2}{\tilde{\omega}_s^2}(1-\gamma) - \gamma \frac{\tilde{\omega}_m^2}{\tilde{\omega}_s^2} + \frac{\gamma}{\tilde{\omega}_b^2 \tilde{\omega}_s^2} \tilde{\omega}_m^4 - \frac{\tilde{\omega}_b^2}{\tilde{\omega}_s^2}(1-\gamma) = 0 \\ & \frac{\gamma}{\tilde{\omega}_b^2 \tilde{\omega}_s^2} \tilde{\omega}_m^4 - \left(\frac{1}{\tilde{\omega}_b^2} + \frac{1}{\tilde{\omega}_s^2}\right) \tilde{\omega}_m^2 + 1 = 0 \end{aligned}$$

En multipliant tous les termes par $\tilde{\omega}_s^2 \tilde{\omega}_b^2$, on obtient :

$$\gamma \tilde{\omega}_m^4 - (\tilde{\omega}_s^2 + \tilde{\omega}_b^2) \tilde{\omega}_m^2 + \tilde{\omega}_s^2 \tilde{\omega}_b^2 = 0 \quad (64)$$

On a :

$$\tilde{R}_s = \frac{\tilde{k}_b}{\tilde{k}_s} = \frac{\tilde{\omega}_b^2}{\tilde{\omega}_s^2}(1-\gamma) \text{ et } \tilde{\omega}_s^2 = \frac{\tilde{\omega}_b^2}{\tilde{R}_s}(1-\gamma)$$

Où \tilde{R}_s est le pourcentage de rigidité du système équivalent.

Donc l'équation caractéristique pour la détermination des fréquences propres $\tilde{\omega}_m$ est donnée comme suit :

$$\gamma \tilde{\omega}_m^4 - \tilde{\omega}_b^2 \left(1 + \frac{(1-\gamma)}{\tilde{R}_s}\right) \tilde{\omega}_m^2 + \frac{(1-\gamma)}{\tilde{R}_s} \tilde{\omega}_b^4 = 0 \quad (65)$$

Après résolution de cette équation on obtient :

$$\tilde{\omega}_{1,2}^2 = \left[\frac{\left(1 + \frac{(1-\gamma)}{\tilde{R}_s}\right) \mp \sqrt{\left(1 + \frac{(1-\gamma)}{\tilde{R}_s}\right)^2 - 4\gamma \frac{(1-\gamma)}{\tilde{R}_s}}}{2\gamma} \right] \tilde{\omega}_b^2 \quad (66)$$

III-4-2-3-Détermination des modes propres

Les modes propres de vibration de la structure sont déterminés par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \left(1 - \frac{\tilde{\omega}_m^2}{\tilde{\omega}_b^2}\right) \tilde{\phi}_b^m - \tilde{\phi}_s^m = 0 \\ \left(-\frac{\tilde{\omega}_b^2}{\tilde{\omega}_s^2}(1-\gamma)\right) \tilde{\phi}_b^m + \left(1 + \frac{\tilde{\omega}_b^2}{\tilde{\omega}_s^2}(1-\gamma) - \gamma \frac{\tilde{\omega}_m^2}{\tilde{\omega}_s^2}\right) \tilde{\phi}_s^m = 0 \end{cases} \quad (67)$$

Pour le premier mode $\tilde{\phi}^1$ et en fixant $\tilde{\phi}_b^1 = 1$, on a :

$$\begin{cases} \left(1 - \frac{\tilde{\omega}_m^2}{\tilde{\omega}_b^2}\right) - \tilde{\phi}_s^1 = 0 \\ \left(-\frac{\tilde{\omega}_b^2}{\tilde{\omega}_s^2}(1-\gamma)\right) + \left(1 + \frac{\tilde{\omega}_b^2}{\tilde{\omega}_s^2}(1-\gamma) - \gamma \frac{\tilde{\omega}_m^2}{\tilde{\omega}_s^2}\right) \tilde{\phi}_s^1 = 0 \end{cases} \quad (68)$$

La solution des équations précédentes nous donne :

$$\tilde{\phi}^1 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 - \frac{\tilde{\omega}_1^2}{\tilde{\omega}_b^2} \end{Bmatrix} \text{ et } \tilde{\alpha}_1 = \frac{\tilde{\omega}_1^2}{\tilde{\omega}_b^2} ; \text{ donc } \tilde{\phi}^1 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 - \tilde{\alpha}_1 \end{Bmatrix} \quad (69)$$

Pour le deuxième mode $\tilde{\phi}^2$ et en fixant $\tilde{\phi}_b^2$, on a :

$$\tilde{\phi}^2 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 - \frac{\tilde{\omega}_2^2}{\tilde{\omega}_b^2} \end{Bmatrix} \text{ et } \tilde{\alpha}_2 = \frac{\tilde{\omega}_2^2}{\tilde{\omega}_b^2} ; \text{ donc } \tilde{\phi}^2 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 - \tilde{\alpha}_2 \end{Bmatrix} \quad (70)$$

III-4-2-4-Facteur de Participation modale

$$\tilde{\psi}_1 = \frac{\tilde{\phi}^{1T} [M] r}{\tilde{\phi}^{1T} [M] \tilde{\phi}^1} = \frac{(1, 1 - \tilde{\alpha}_1) \begin{bmatrix} m_b & 0 \\ 0 & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix}}{(1, 1 - \tilde{\alpha}_1) \begin{bmatrix} m_b & 0 \\ 0 & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 - \tilde{\alpha}_1 \end{Bmatrix}} = \frac{m_b + (1 - \tilde{\alpha}_1) m_s}{m_b + (1 - \tilde{\alpha}_1)^2 m_s} = \frac{(1 - \gamma) + (1 - \tilde{\alpha}_1) \gamma}{(1 - \gamma) + (1 - \tilde{\alpha}_1)^2 \gamma} \quad (71)$$

$$\tilde{\psi}_2 = \frac{\tilde{\phi}^{2T} [M] r}{\tilde{\phi}^{2T} [M] \tilde{\phi}^2} = \frac{(1, 1 - \tilde{\alpha}_2) \begin{bmatrix} m_b & 0 \\ 0 & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix}}{(1, 1 - \tilde{\alpha}_2) \begin{bmatrix} m_b & 0 \\ 0 & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 - \tilde{\alpha}_2 \end{Bmatrix}} = \frac{m_b + (1 - \tilde{\alpha}_2) m_s}{m_b + (1 - \tilde{\alpha}_2)^2 m_s} = \frac{(1 - \gamma) + (1 - \tilde{\alpha}_2) \gamma}{(1 - \gamma) + (1 - \tilde{\alpha}_2)^2 \gamma} \quad (72)$$

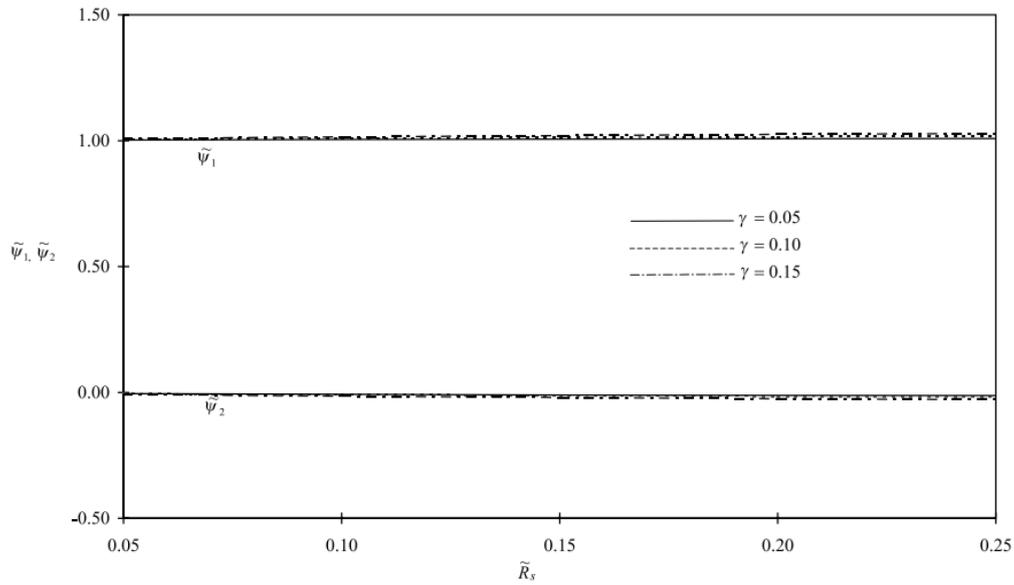


Figure 47 : Facteur de participation modale pour les deux modes.

Suivant les indications de la figure 47, la variation du facteur de participation modale par rapport au pourcentage de rigidité du système équivalent \tilde{R}_s ($\tilde{\psi}_1 \cong 1$ et $\tilde{\psi}_2 \cong 0$) montre que seul le premier mode qui doit être inclus par les ponts isolés, car le deuxième mode n'a aucun rôle dans la réponse dynamique du système isolé.

III-4-2-5-Fréquences du système équivalent

Par correspondance avec le système équivalent, les rapports de la rigidité et de la fréquence du système à quatre degrés de liberté sont donnés comme suit:

$$R_s = \frac{k_b}{k_s} \text{ et } \frac{\omega_b^2}{\omega_s^2} = \frac{R_s}{(1-\gamma)} \quad (73)$$

Les déplacements u_s et u_b pour le système initial à quatre degrés de liberté sont les mêmes pour le système équivalent à deux degrés de liberté de telle sorte que les deux systèmes ont la même réponse dynamique, et après avoir effectué une série de calculs algébriques, les fréquences du système équivalent sont obtenus comme suit:

$$\tilde{\omega}_b^2 = \frac{\omega_s^2}{\left(\frac{1-\gamma}{R_s}\right) \left[1 + \frac{1}{1+\gamma} \left(\frac{k_s}{k_h} + \frac{k_s h^2}{k_r}\right)\right]} \quad (74)$$

$$\tilde{\omega}_s^2 = \frac{\omega_s^2}{1 + \frac{1}{1+\gamma} \left(\frac{k_s}{k_h} + \frac{k_s h^2}{k_r}\right)} \quad (75)$$

III-4-2-6-Pourcentage d'amortissement du système équivalent

De la même manière, la relation entre les pourcentages d'amortissement du système équivalent à 2 DDL avec les pourcentages d'amortissement correspondant au système à 4 DDL est donnée comme suit :

$$\begin{bmatrix} \tilde{\xi} \\ \tilde{\xi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\xi}_{b11} & -\tilde{\xi}_{b12} \\ -\tilde{\xi}_{b21} & \tilde{\xi}_{b22} + \frac{1}{\tilde{R}_s} \tilde{\xi}_{s22} \end{bmatrix} \quad (76)$$

Où $\begin{bmatrix} \tilde{\xi} \\ \tilde{\xi} \end{bmatrix}$ est la matrice de pourcentage d'amortissement du système équivalent à 2 DDL.

avec:

$$\begin{aligned} \tilde{\xi}_{b11} &= \left[1 - \frac{\gamma}{\gamma+1} \left(\frac{\omega^2}{\omega_h^2} + \frac{\omega^2}{\omega_r^2} \right) \right] \xi_b + \left[\frac{\gamma}{\gamma+1} \frac{\omega^2}{\omega_h^2} \left(1 - \gamma \frac{\omega^2}{\omega_b^2} \right) \right] \xi_h \\ &+ \left[\frac{\gamma}{\gamma+1} \frac{\omega^2}{\omega_r^2} \left(1 - \gamma \frac{\omega^2}{\omega_b^2} \right) \right] \xi_r + \left[\frac{\gamma}{\gamma+1} \left(1 - \gamma \frac{\omega^2}{\omega_b^2} \right) \left(\frac{\omega^2}{\omega_h^2} + \frac{\omega^2}{\omega_r^2} \right) \right] \xi_s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{\xi}_{b12} &= \left[1 - \frac{\gamma}{\gamma+1} \left(\frac{\omega^2}{\omega_h^2} + \frac{\omega^2}{\omega_r^2} \right) \right] \xi_b + \left[\frac{\gamma}{\gamma+1} \frac{\omega_s^2}{\omega_b^2} \left(\frac{\omega^2}{\omega_h^2} + \frac{\omega^2}{\omega_r^2} \right) \right] \xi_s \\ &+ \left[\frac{\gamma}{\gamma+1} \frac{\omega^2}{\omega_h^2} \left(\gamma - \frac{\omega_s^2}{\omega_b^2} - \gamma^2 \frac{\omega^2}{\omega_b^2} \right) \right] \xi_h + \left[\frac{\gamma}{\gamma+1} \frac{\omega^2}{\omega_r^2} \left(\gamma - \frac{\omega_s^2}{\omega_b^2} - \gamma^2 \frac{\omega^2}{\omega_b^2} \right) \right] \xi_r \\ &+ \left[\frac{\gamma}{\gamma+1} \left(\gamma - \frac{\omega_s^2}{\omega_b^2} - \gamma^2 \frac{\omega^2}{\omega_b^2} \right) \left(\frac{\omega^2}{\omega_h^2} + \frac{\omega^2}{\omega_r^2} \right) \right] \xi_s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{\xi}_{b21} &= \frac{1}{\tilde{R}_s} \left\{ \frac{\omega_b^2}{\omega_s^2} \left[(1-\gamma) + \frac{\gamma^2}{\gamma+1} \left(\frac{\omega^2}{\omega_h^2} + \frac{\omega^2}{\omega_r^2} \right) \right] \right\} \xi_b + \frac{1}{\tilde{R}_s} \left[\frac{\gamma^2}{\gamma+1} \frac{\omega^2}{\omega_h^2} \left(\gamma \frac{\omega^2}{\omega_s^2} - \frac{\omega_b^2}{\omega_s^2} \right) \right] \xi_h \\ &+ \frac{1}{\tilde{R}_s} \left[\frac{\gamma^2}{\gamma+1} \frac{\omega^2}{\omega_r^2} \left(\gamma \frac{\omega^2}{\omega_s^2} - \frac{\omega_b^2}{\omega_s^2} \right) \right] \xi_r + \frac{1}{\tilde{R}_s} \left[\frac{\gamma^2}{\gamma+1} \left(\gamma \frac{\omega^2}{\omega_s^2} - \frac{\omega_b^2}{\omega_s^2} \right) \left(\frac{\omega^2}{\omega_h^2} + \frac{\omega^2}{\omega_r^2} \right) \right] \xi_s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \zeta_{b22} + \frac{1}{\tilde{R}_s} \zeta_{s22} &= \frac{1}{\tilde{R}_s} \left\{ \frac{\omega_b^2}{\omega_s^2} \left[(1-\gamma) + \frac{\gamma^2}{\gamma+1} \left(\frac{\omega^2}{\omega_h^2} + \frac{\omega^2}{\omega_r^2} \right) \right] \right\} \xi_b \\
 &+ \frac{1}{\tilde{R}_s} \left[1 - \frac{\gamma}{\gamma+1} \left(\frac{\omega^2}{\omega_h^2} + \frac{\omega^2}{\omega_r^2} \right) \right] \xi_s + \frac{1}{\tilde{R}_s} \left[\frac{\gamma}{\gamma+1} \frac{\omega^2}{\omega_h^2} \left(1 - \gamma \frac{\omega_b^2}{\omega_s^2} - \gamma^2 \frac{\omega^2}{\omega_s^2} \right) \right] \xi_h \\
 &+ \frac{1}{\tilde{R}_s} \left[\frac{\gamma}{\gamma+1} \frac{\omega^2}{\omega_r^2} \left(1 - \gamma \frac{\omega_b^2}{\omega_s^2} - \gamma^2 \frac{\omega^2}{\omega_s^2} \right) \right] \xi_r \\
 &+ \frac{1}{\tilde{R}_s} \left[\frac{\gamma}{\gamma+1} \left(1 - \gamma \frac{\omega_b^2}{\omega_s^2} - \gamma^2 \frac{\omega^2}{\omega_s^2} \right) \left(\frac{\omega^2}{\omega_h^2} + \frac{\omega^2}{\omega_r^2} \right) \right] \xi_g
 \end{aligned}$$

Il résulte des équations précédentes que l'interaction sol-structure a pour effet:

- de diminuer la fréquence du système d'isolation $\tilde{\omega}_b < \omega_b$;
- de diminuer la fréquence de la structure isolée $\tilde{\omega}_s < \omega_s$;
- et d'augmenter le pourcentage d'amortissement du système $\tilde{\xi} > \xi$.

Chapitre IV

**INFLUENCE DES SYSTEMES
D'ISOLATION PARASISMIQUE
SUR LA REPONSE DYNAMIQUE
DES PONTS ISOLES**

CHAPITRE IV

INFLUENCE DES SYSTEMES D'ISOLATION PARASISMIQUE SUR LA REPOSE DYNAMIQUE DES PONTS ISOLES

IV-1- Introduction

Pour illustrer l'influence des systèmes d'isolation parasismique sur les réponses sismiques des ponts isolés, une étude comparative a été réalisée sur un pont dans trois situations différentes. En première situation, on considère le pont sans isolation parasismique, alors qu'en deuxième et troisième cas, le pont est équipé successivement d'un système d'isolation en caoutchouc fretté avec barreau de plomb LRB (*Lead RubberBearings*) puis d'un système d'isolation en pendule glissant FPS (*Friction Pendulum System*).

Dans ces études, il y a plusieurs programmes numériques qui peuvent être utilisés pour la modélisation des systèmes d'isolation et l'analyse des structures isolées. Ces programmes commencent par des approches simples qui admettent la superstructure comme rigide et le comportement non linéaire considéré au niveau du système d'isolation parasismique seulement. Cependant, avec l'amélioration des technologies et la diminution du temps de traitement d'ordinateur, des programmes de calcul puissants ont été développés pour l'analyse et la conception des structures complexes avec une prise en considération du comportement non linéaire pour le système d'isolation et la superstructure [03, 37].

N-PAD est le premier programme de calcul développé spécifiquement pour l'analyse des structures isolées. Ce programme est basé sur une modélisation explicite pour les éléments du système d'isolation, mais il adopte une modélisation simplifiée pour la superstructure. Cette approche repose sur l'effet du système d'isolation à la base qui réduit considérablement les forces sismiques transmises à la superstructure.

Le 3D-BASIS est le programme de calcul le plus utilisé dans l'analyse des structures isolées. Il représente la superstructure avec un modèle élastique linéaire semblable au N-PAD. Ce programme contient les différents modèles du système d'isolation parasismique pour coïncider le comportement bilinéaire, frictionnel et linéaire visqueux de ces modèles.

Il existe d'autres programmes de calcul ; SAP2000 et ETABS qui sont plus sophistiqués et plus fiables pour l'analyse des structures isolées. Les deux programmes ont des capacités d'exécution de l'analyse statique équivalente, l'analyse modale spectrale et l'analyse dynamique linéaire et non linéaire par accélérogramme avec une interface graphique puissante et une facilité d'utilisation. Cependant, chacun de ces deux programmes a également ses propres caractéristiques.

SAP2000 : Capable d'analyser n'importe quel type de structure isolée telle que les ponts et les structures des bâtiments.

ETABS : Développé principalement pour l'analyse des structures avec système d'isolation à la base des bâtiments.

Dans le cadre de ce travail, nous utiliserons le programme numérique d'analyse dynamique des structures SAP2000 et dont l'étude consiste à comparer les réponses du pont en termes d'effort tranchant à la base, de déplacement, d'accélération et d'énergie absorbée.

IV-2- Présentation de l'ouvrage

L'ouvrage utilisé dans cette étude est un pont en béton armé à 03 travées de 22m de portée chacune. Le tablier à une épaisseur de 0.25m, une longueur de 66m et une largeur de 10m, il est composé de 06 poutres en béton précontraint de 1.2m de hauteur. Le pont est représenté sur les figures 48 et 49. Parmi les isolateurs passés en revue, notre choix est porté sur l'isolation en caoutchouc fretté avec barreau de plomb LRB et l'isolateur en pendule glissant FPS, dont les caractéristiques de ces appuis sont représentées dans les tableaux 01 et 02 comme suit :

Tableau 01 : Les caractéristiques du système d'isolation LRB.

β_{eff} (%)	K_{eff} (KN/m)	K_1 (KN/m)	K_v (KN/m)	F_y (KN)
20	196.96	1350.86	1965815.35	17.83

Tableau 02 : Les caractéristiques du système d'isolation FPS.

β_{eff} (%)	K_{eff} (KN/m)	K_v (KN/m)	μ	R (m)
20	298.86	29287.88	0.06	2.24

L'analyse est effectuée respectivement dans les trois cas:

- pont sans isolation parasismique ;
- pont équipé d'un système d'isolation parasismique LRB ;
- pont équipé d'un système d'isolation parasismique FPS.

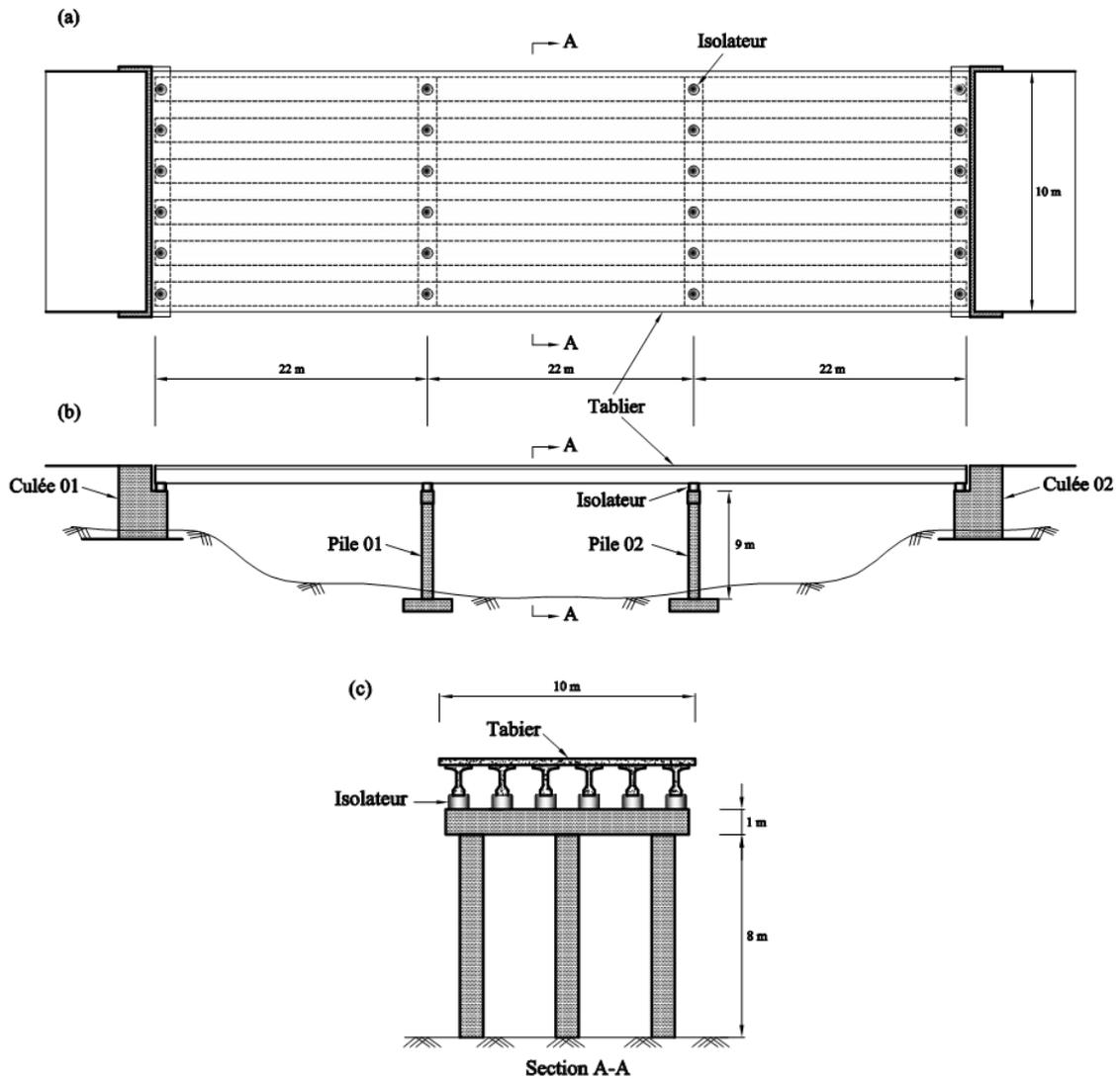
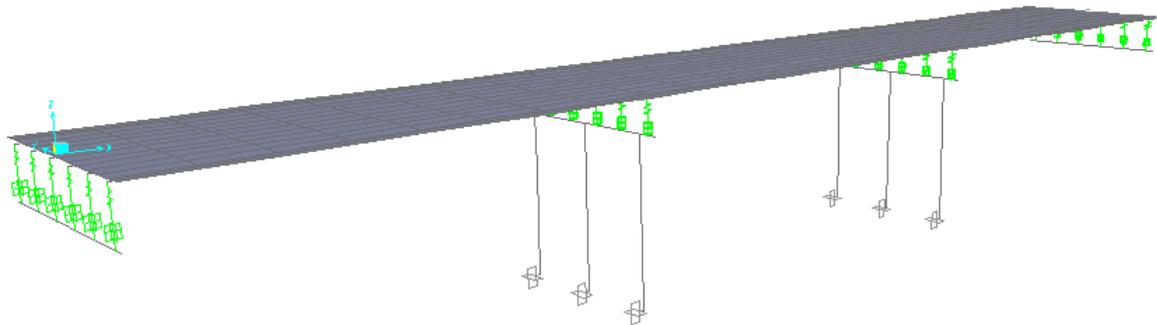
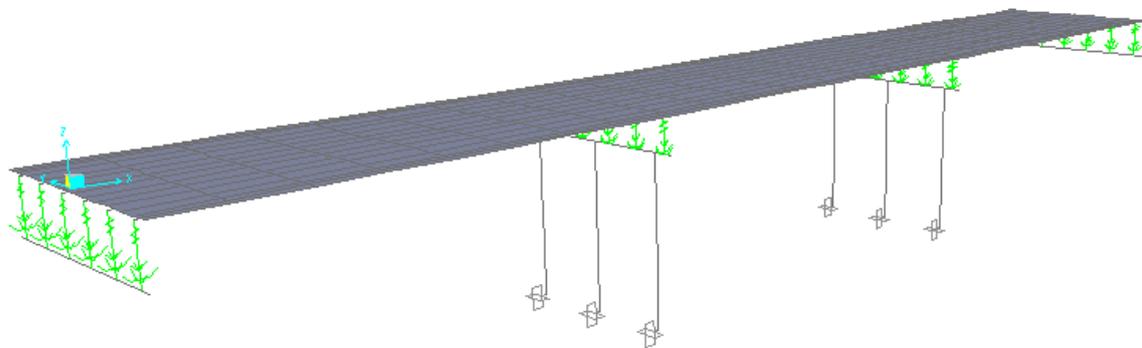


Figure 48 : Pont équipé d'un système d'isolation :

- (a) Vue en plan du pont ;
- (b) Vue en élévation avec trois travées ;
- (c) Schéma de la pile, l'emplacement de l'isolateur et le tablier.



(a)



(b)

Figure 49 : Vue en 3D du pont avec système d'isolation parasismique :
(a) Pont équipé avec système d'isolation parasismique LRB ;
(b) Pont avec système d'isolation parasismique FPS.

IV-3-Excitation sismique

Pour illustrer l'effet des systèmes d'isolation parasismique sur les réponses sismiques des ponts isolés, une analyse dynamique des réponses par accélérogramme est utilisée pour les trois cas de pont (sans isolation parasismique, avec isolateur LRB et avec isolateur FPS) et les chargements sismiques considérés avec leurs accélérations maximales du sol (Peak Ground Acceleration) PGA sont les suivants :

- La composante de Hollister du séisme de Loma Prieta (1989) avec PGA de 0.369g;
- La composante de Petrolia du séisme de Petrolia (1992) avec PGA de 0.662g;
- La composante de Newhall Firedu séisme de Northridge (1994) avec PGA de 0.589g;
- La composante de CHY080 du séisme de Chi-Chi (1999) avec PGA de 0.902g.

Les accélérations de ces excitations sont représentées respectivement sur les figures 50, 51, 52 et 53.

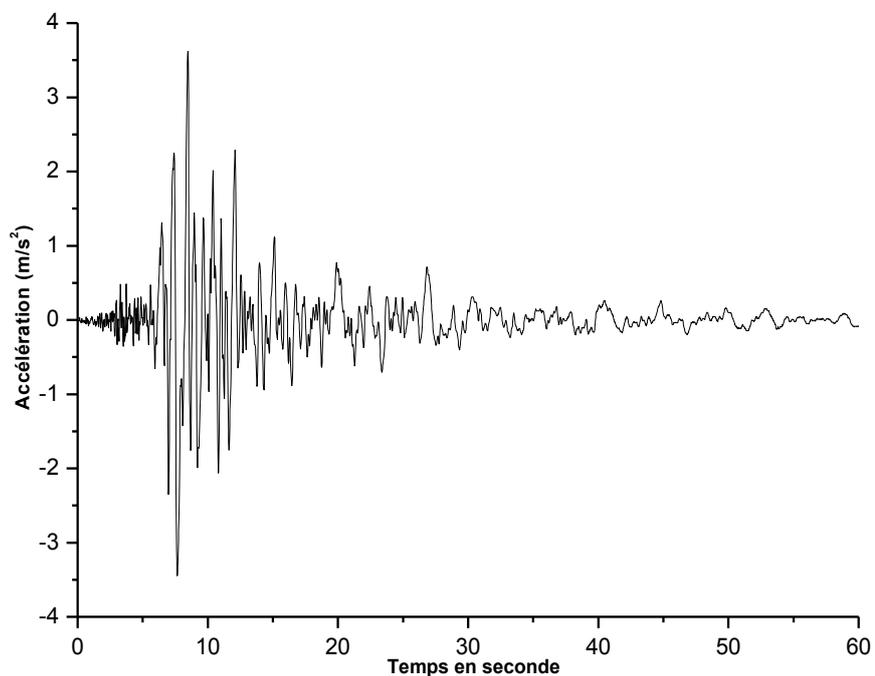


Figure 50 : La composante de Hollister du séisme de Loma Prieta (1989).

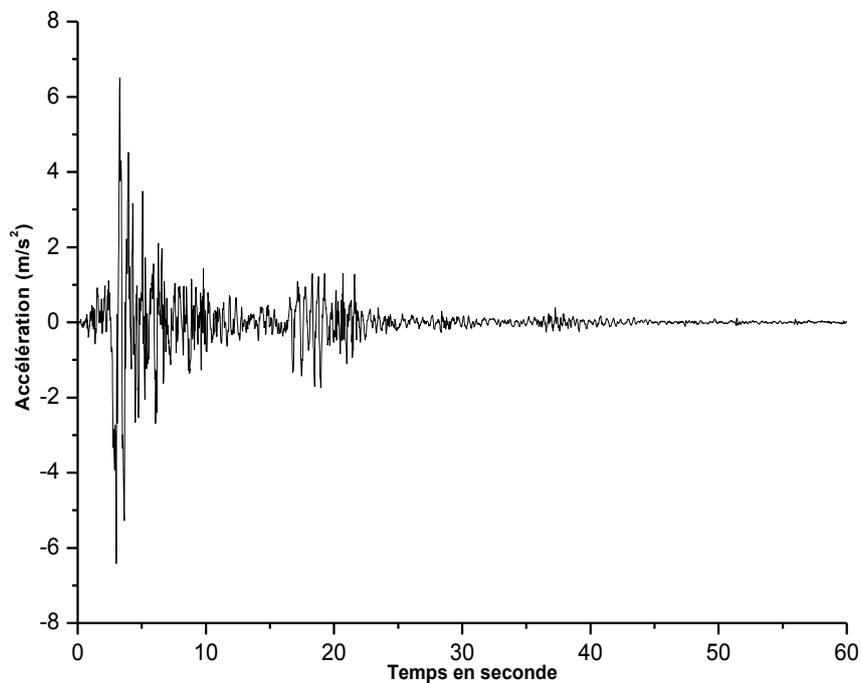


Figure 51 : La composante de Petrolia du séisme de Petrolia (1992).

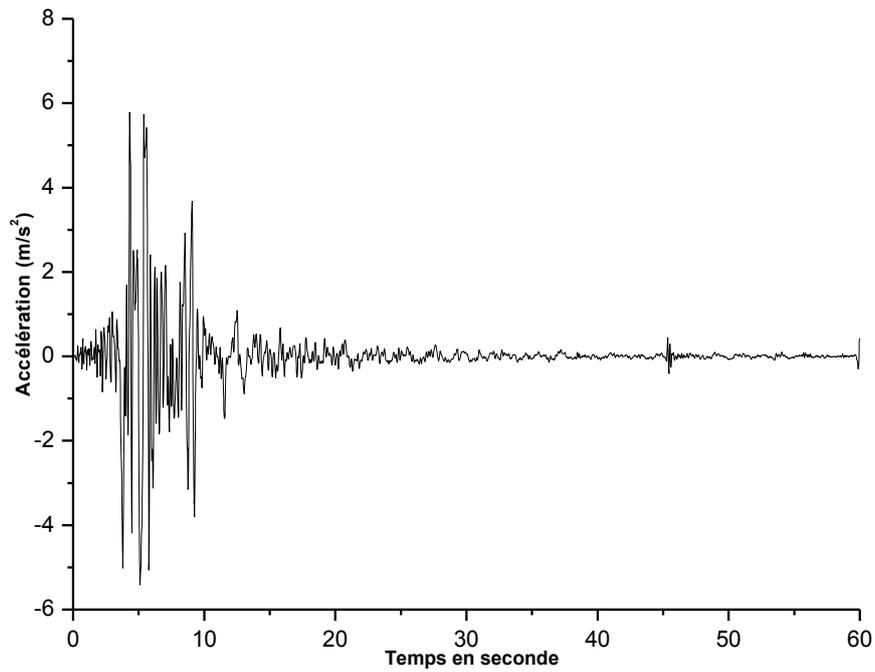


Figure 52 : La composante Newhall Fire du séisme de Northridge (1994).

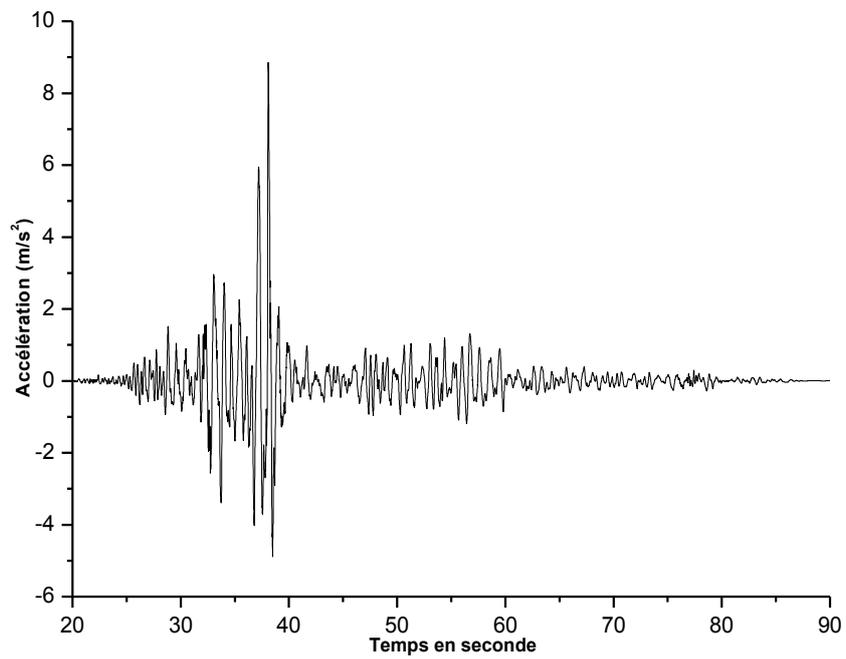


Figure 53 : La composante de CHY080 du séisme de Chi-Chi (1999).

IV-4-Comparaison des résultats

IV-4-1-Les efforts tranchants

La figure 54 illustre la comparaison des efforts tranchants à la base pour les trois cas étudiés de ponts (sans isolation parasismique, avec isolateur LRB et avec isolateur FPS) et pour les quatre chargements sismiques utilisés.

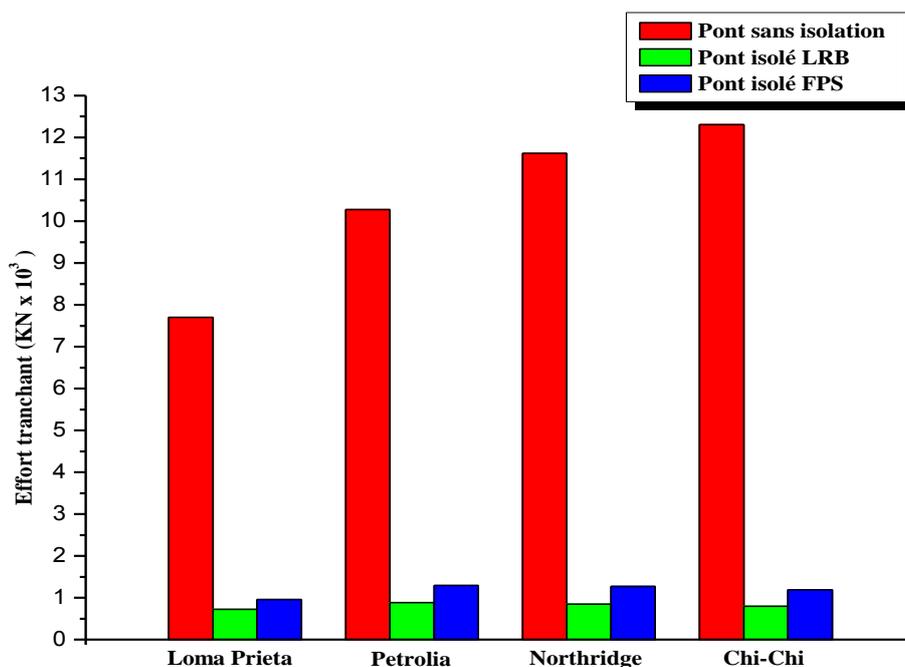


Figure 54 : Les efforts tranchants pour les trois ponts avec isolation (LRB ou FPS) et sans isolation parasismique pour les quatre chargements sismiques utilisés.

Les résultats de la comparaison précédente pour les quatre excitations sismiques utilisées sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 03 : Comparaison des efforts tranchants à la base du pont sans isolation parasismique et avec isolation parasismique (LRB ou FPS).

Excitation sismique	Effort Tranchant (kN)			Réduction LRB %	Réduction FPS %	Moyenne %	
	Pont sans isolation	Pont isolé LRB	Pont isolé FPS			LRB	FPS
Loma Prieta	7702.15	720.37	953.30	90.65	87.62	92.08	88.61
Petrolia	10276.01	879.94	1293.92	91.44	87.41		
Northridge	11617.15	846.53	1272.72	92.71	89.04		
Chi-Chi	12309.71	797.26	1187.69	93.52	90.35		

D'après les résultats de cette comparaison, nous constatons que le système d'isolation parasismique réduit les efforts tranchants à la base avec une moyenne de pourcentage de réduction pouvant atteindre 92.08% à cause de l'augmentation de la période fondamentale et le décalage de la fréquence vers la zone à faible excitation sismique.

IV-4-2-Déplacements et accélérations

L'analyse dynamique effectuée pour les trois cas de pont nous a permis d'effectuer une analyse comparative des résultats des déplacements et des accélérations du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont pour les quatre chargements sismiques utilisés. Ces résultats sont représentés dans les figures ci-dessous.

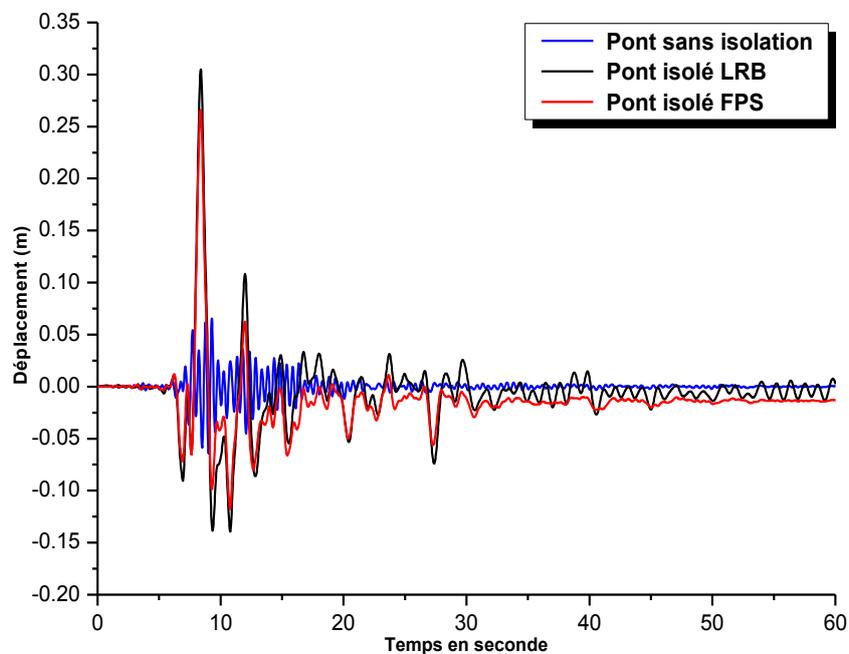


Figure 55 : Comparaison des déplacements du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont (sans isolation parasismique, avec isolateur LRB et avec isolateur FPS) soumis à la composante de Hollister du séisme de Loma Prieta.

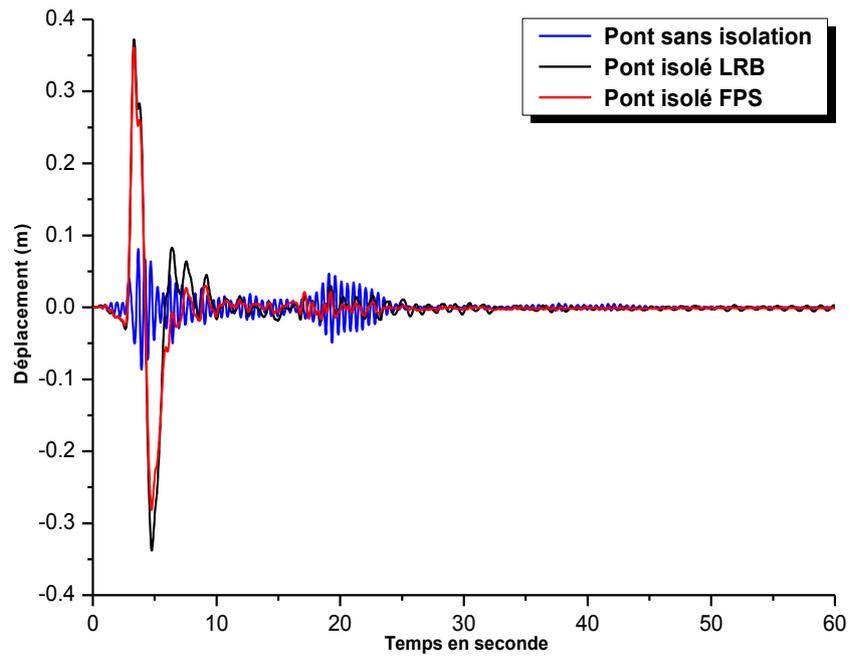


Figure 56 : Comparaison des déplacements du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont (sans isolation parasismique, avec isolateur LRB et avec isolateur FPS) soumis à la composante de Petrolia du séisme de Petrolia.

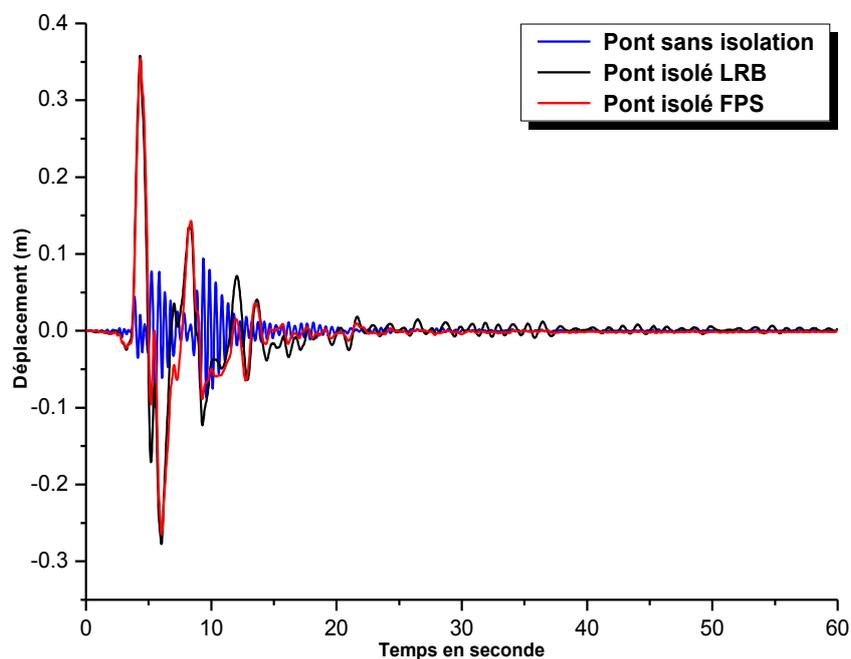


Figure 57 : Comparaison des déplacements du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont (sans isolation parasismique, avec isolateur LRB et avec isolateur FPS) soumis à la composante de Newhall Fire du séisme de Northridge.

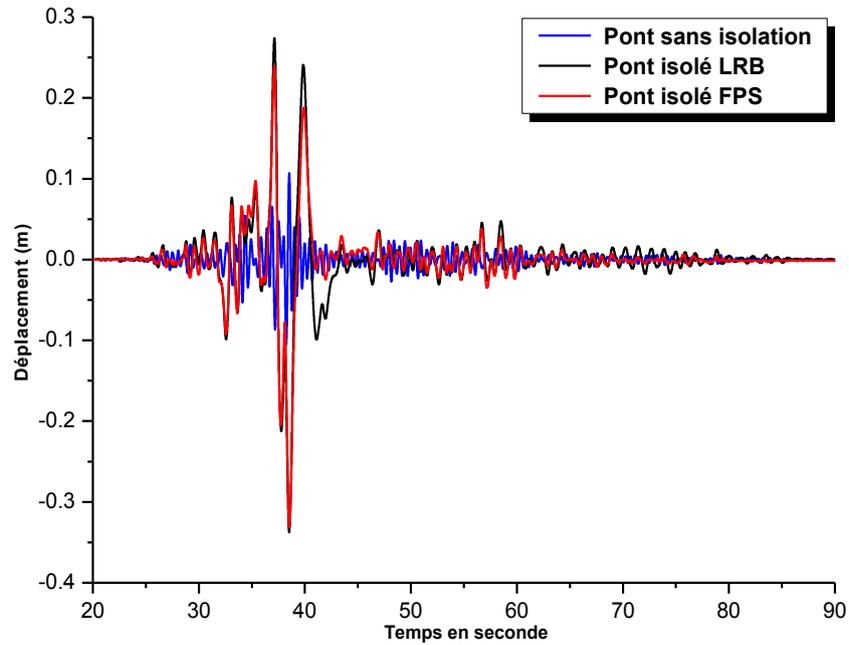


Figure 58 : Comparaison des déplacements du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont (sans isolation parasismique, avec isolateur LRB et avec isolateur FPS) soumis à la composante de CHY080 du séisme de Chi-Chi.

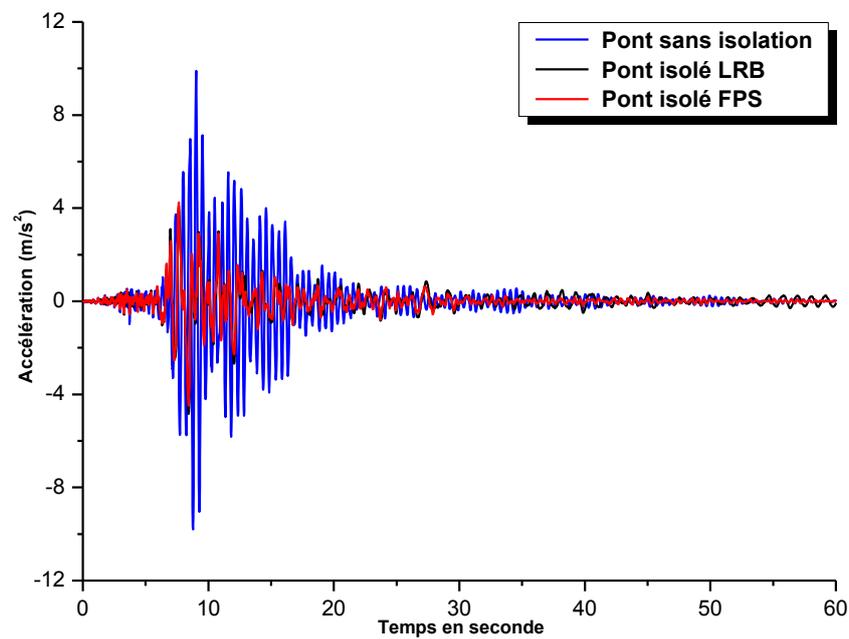


Figure 59 : Comparaison des accélérations du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont (sans isolation parasismique, avec isolateur LRB et avec isolateur FPS) soumis à la composante de Hollister du séisme de Loma Prieta.

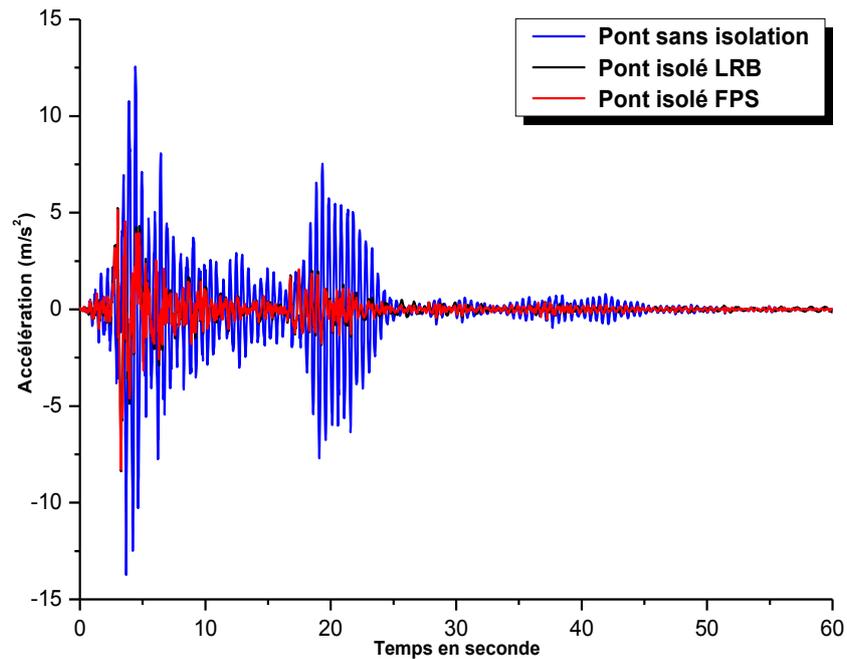


Figure 60 : Comparaison des accélérations du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont (sans isolation parasismique, avec isolateur LRB et avec isolateur FPS) soumis à la composante de Petrolia du séisme de Petrolia.

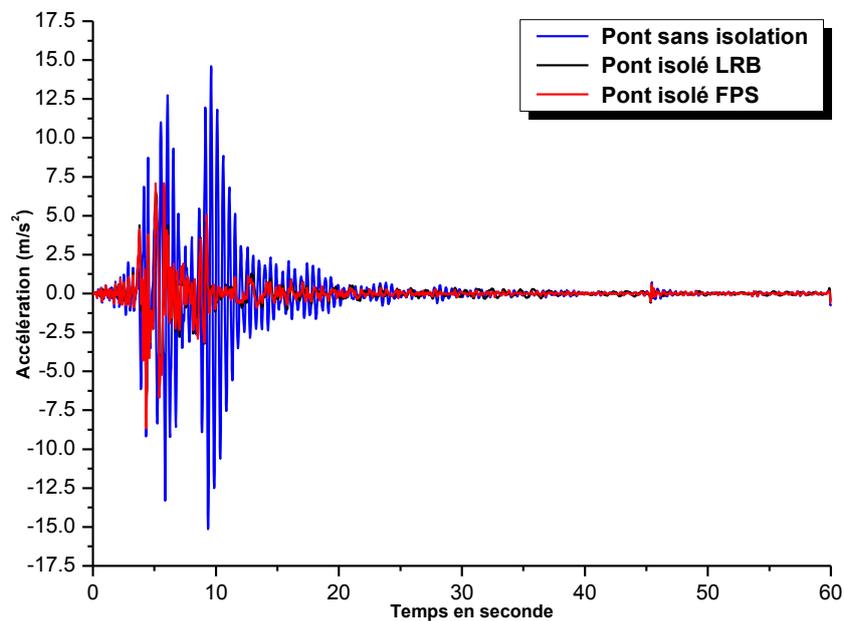


Figure 61 : Comparaison des accélérations du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont (sans isolation parasismique, avec isolateur LRB et avec isolateur FPS) soumis à la composante de Newhall Fire du séisme de Northridge.

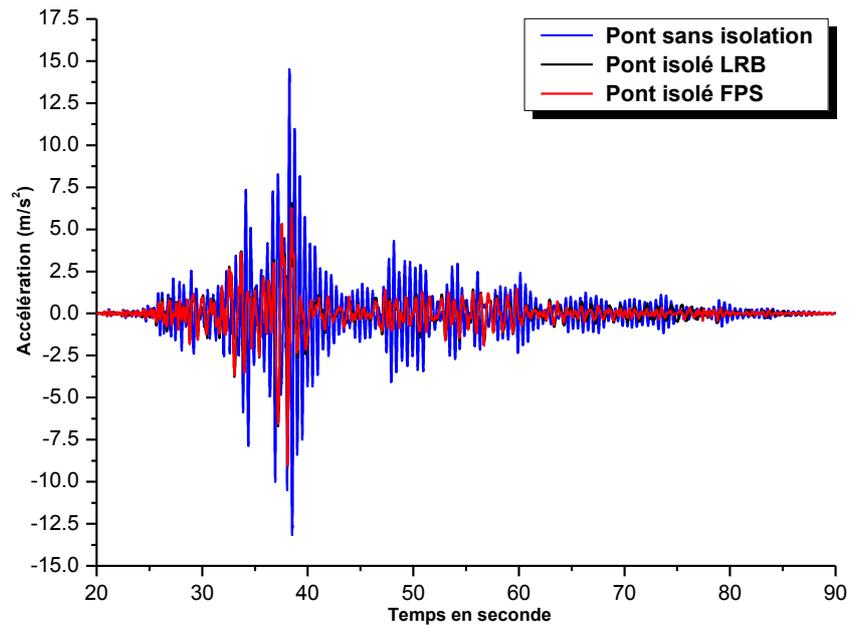


Figure 62 : Comparaison des accélérations du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont (sans isolation parasismique, avec isolateur LRB et avec isolateur FPS) soumis à la composante de CHY080 du séisme de Chi-Chi.

Les résultats de la comparaison des déplacements maximaux et des accélérations maximales du tablier pour les trois cas étudiés et pour les quatre excitations sismiques utilisées sont résumés dans les tableaux suivants :

Tableau 04 : Comparaison des déplacements maximaux du tablier au niveau de la pile 01 pour les trois cas de pont (sans isolation parasismique, avec isolateur LRB et avec isolateur FPS).

Excitation sismique	Déplacement (m)			Augmentation LRB %	Augmentation FPS %	Moyenne %	
	Pont sans isolation	Pont isolé LRB	Pont isolé FPS			LRB	FPS
	Loma Prieta	0.0654	0.3049	0.2659	366.21	306.57	292.94
Petrolia	0.0867	0.3723	0.3608	329.41	316.15		
Northridge	0.0996	0.3581	0.3546	259.54	256.02		
Chi-Chi	0.1066	0.3375	0.3311	216.60	210.60		

Tableau 05: Comparaison des accélérations maximales du tablier au niveau de la pile 01 pour les trois cas de pont (sans isolation parasismique, avec isolateur LRB et avec isolateur FPS).

Excitation sismique	Accélération (m/s ²)			Réduction LRB %	Réduction FPS %	Moyenne %	
	Pont sans isolation	Pont isolé LRB	Pont isolé FPS			LRB	FPS
Loma Prieta	9.89	4.84	4.49	51.06	54.60	45.39	43.72
Petrolia	13.74	8.38	8.29	39.01	39.67		
Northridge	15.14	7.49	8.67	50.53	42.73		
Chi-Chi	14.50	8.56	9.01	40.97	37.86		

Les figures 55 à 62 montrent que les déplacements des ponts isolés sont augmentés par rapport au pont sans isolation avec un moyen de pourcentage d'augmentation pouvant atteindre 292.94% comme il est donné dans le tableau 04. Par contre les accélérations des ponts isolés sont réduites par rapport au pont sans isolation parasismique avec une moyenne de pourcentage de réduction pouvant atteindre les 45.39% comme il est illustré dans le tableau 05. Ceci est traduit par un décalage en fréquence vers la zone à moindre excitation sismique et le pont se comporte dans les directions horizontales comme un oscillateur simple à fréquences relativement basses.

IV-4-3-Energie absorbée

Pour un pont avec isolation parasismique, une partie de l'énergie induite lors du séisme (*Input Energy*) est absorbée par les déformations plastiques correspondant au comportement d'hystérésis du système d'isolation LRB et par le glissement correspondant au comportement frottant du système d'isolation FPS et la partie restante de cette énergie transmise à la superstructure est connue sous le nom d'énergie transférée, dont une partie est dissipée par l'amortissement structural correspondant au comportement visqueux du pont qui est l'énergie de l'amortissement modal (*Modal Damping Energy*) et l'autre partie restante se compose de l'énergie cinétique (*Kinetic Energy*) de la masse et l'énergie potentielle (*Potential Energy*) pour les déformations élastiques structurales.

Pour illustrer l'effet du système d'isolation parasismique sur la dissipation d'énergie, une comparaison a été faite entre l'énergie sismique entrée (*Input Energy*), l'énergie absorbée par le système d'isolation et l'énergie d'amortissement modal (*Modal Damping Energy*) pour les trois cas de ponts étudiés (sans isolation parasismique, avec isolateur LRB et avec isolateur FPS) et pour les quatre chargements sismiques utilisés précédemment.

Les résultats de cette comparaison sont représentés par les figures suivantes :

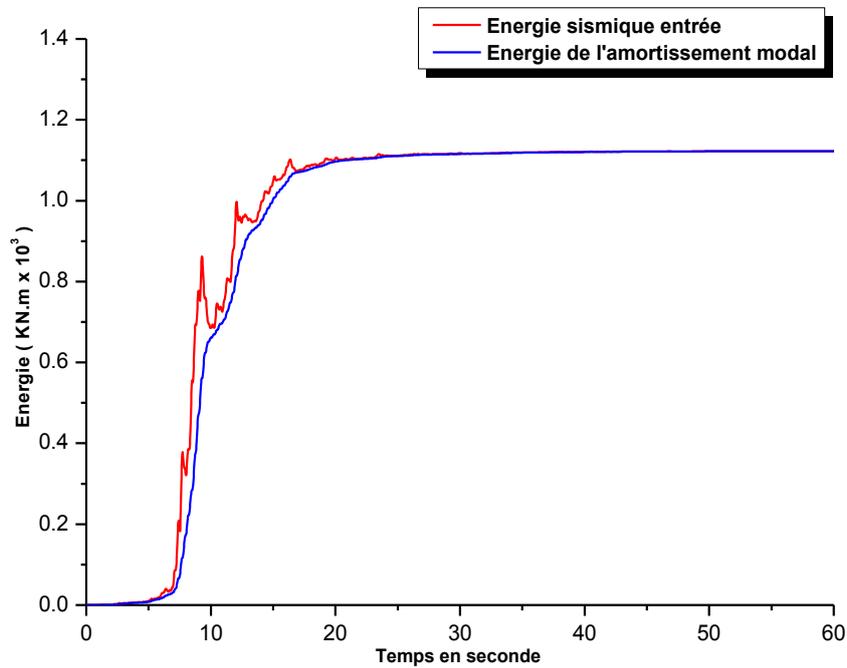


Figure 63 : Diagrammes des énergies absorbées par le pont sans isolation parasismique soumis à la composante de Hollister du séisme de Loma Prieta.

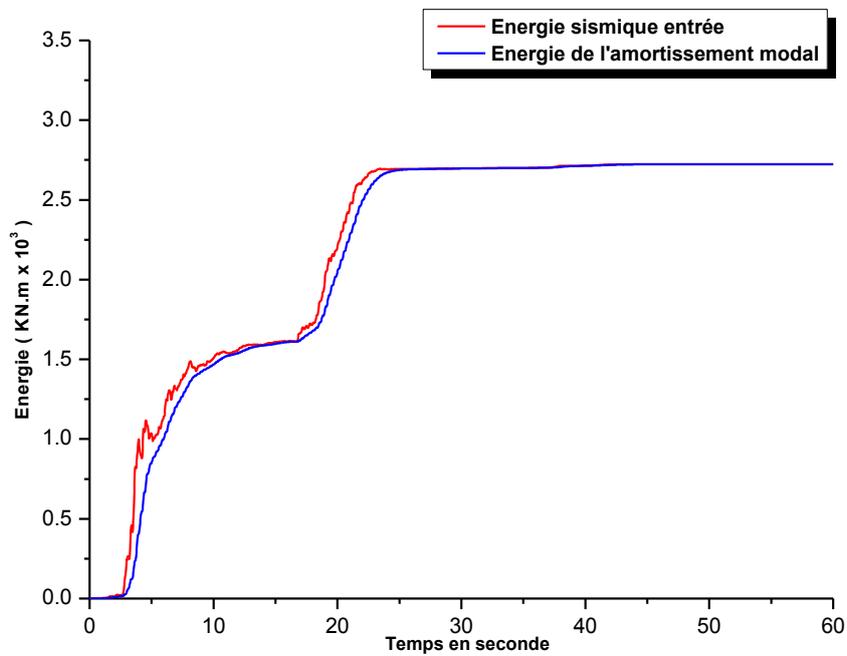


Figure 64 : Diagrammes des énergies absorbées par le pont sans isolation parasismique soumis à la composante de Petrolia du séisme de Petrolia.

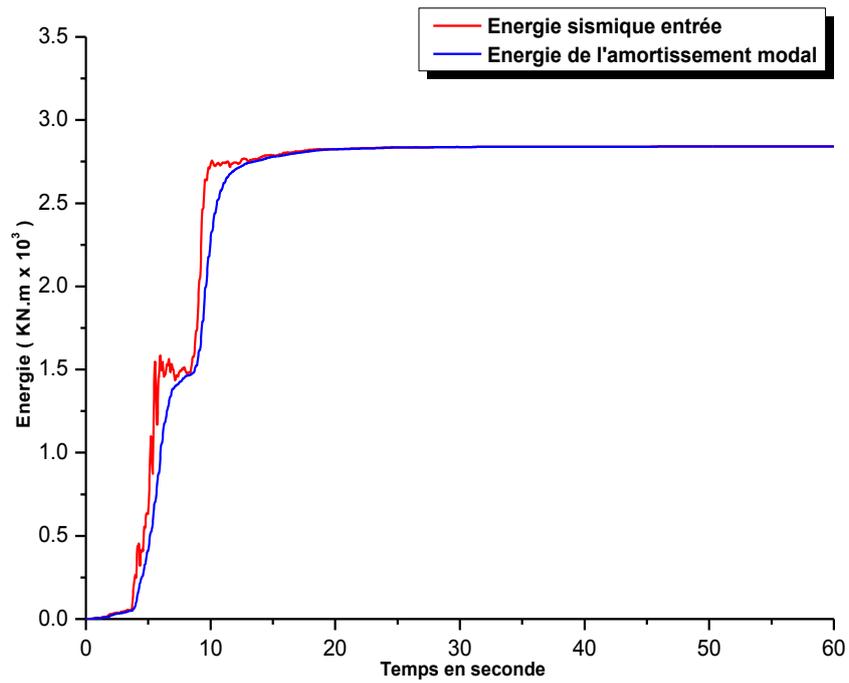


Figure 65 : Diagrammes des énergies absorbées par le pont sans isolation parasismique soumis à la composante de Newhall Fire du séisme de Northridge.

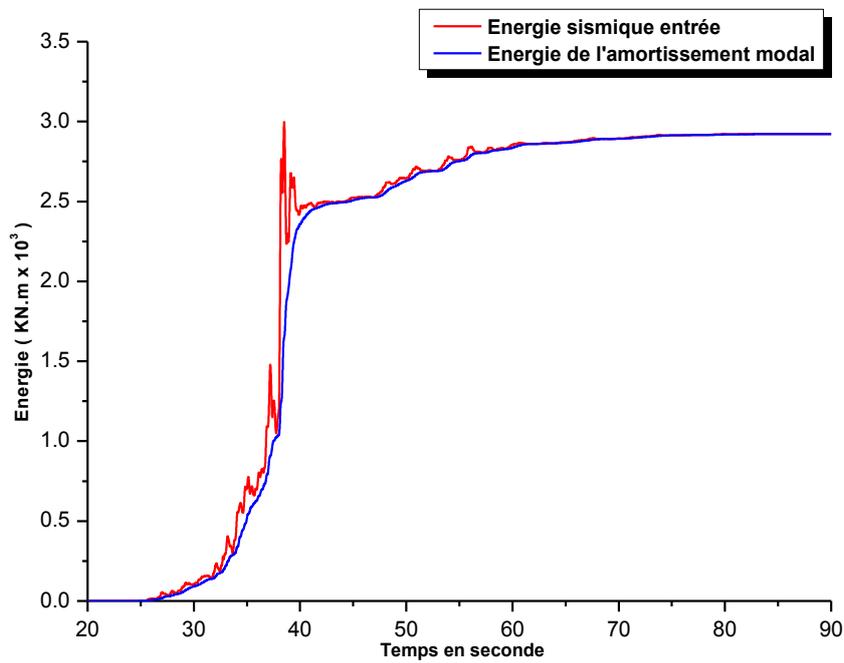


Figure 66 : Diagrammes des énergies absorbées par le pont sans isolation parasismique soumis à la composante de CHY080 du séisme de Chi-Chi.

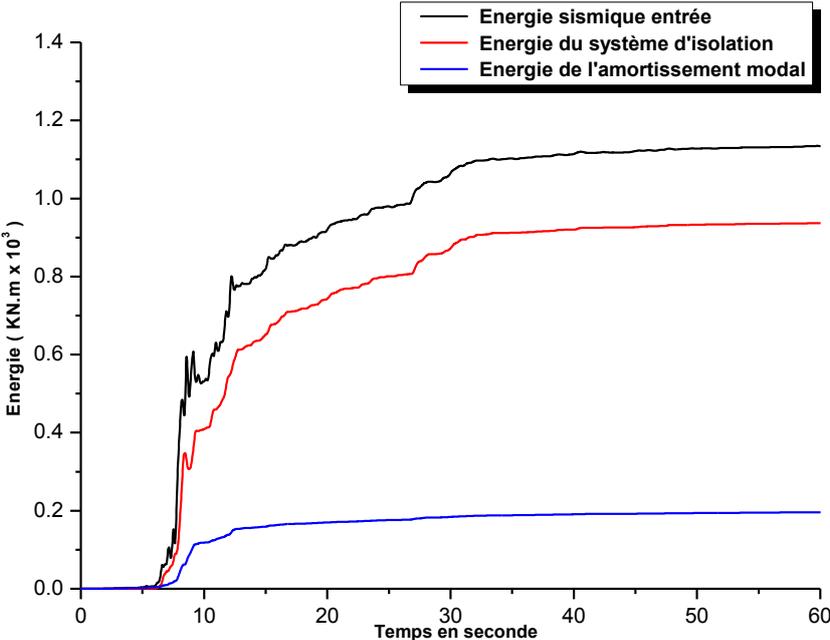


Figure 67 : Diagrammes des énergies absorbées par l’isolateur LRB et l'amortissement modal soumis à la composante de Hollister du séisme de Loma Prieta.

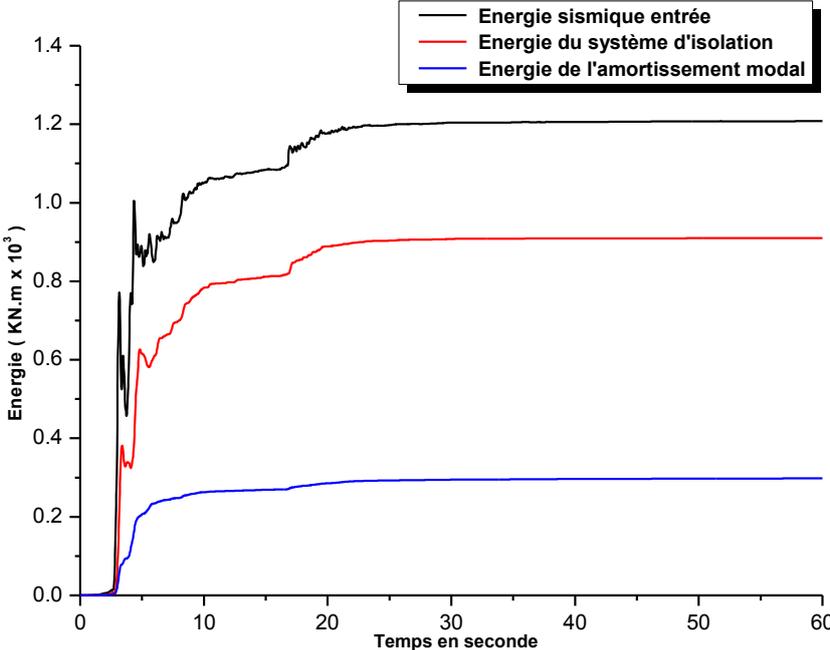


Figure 68 : Diagrammes des énergies absorbées par l’isolateur LRB et l'amortissement modal soumis à la composante de Petrolia du séisme de Petrolia.

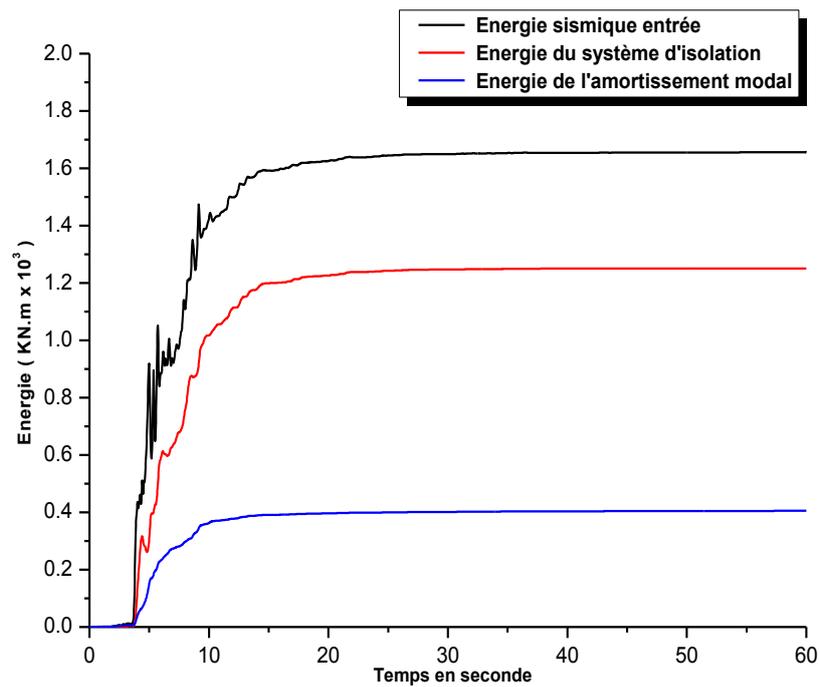


Figure 69 : Diagrammes des énergies absorbées par l'isolateur LRB et l'amortissement modal soumis à la composante de Newhall Fire du séisme de Northridge.

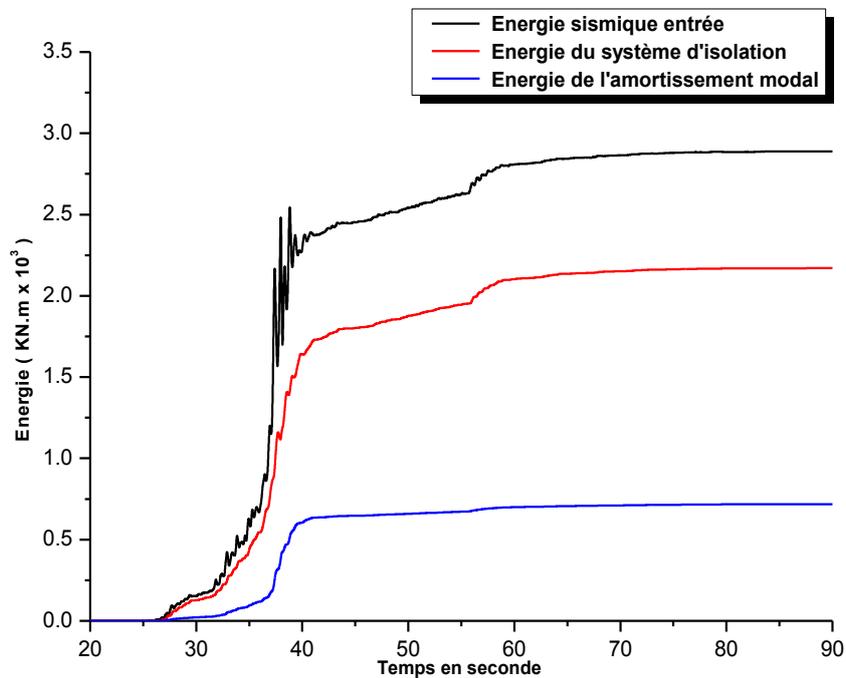


Figure 70 : Diagrammes des énergies absorbées par l'isolateur LRB et l'amortissement modal soumis à la composante de CHY080 du séisme de Chi-Chi.

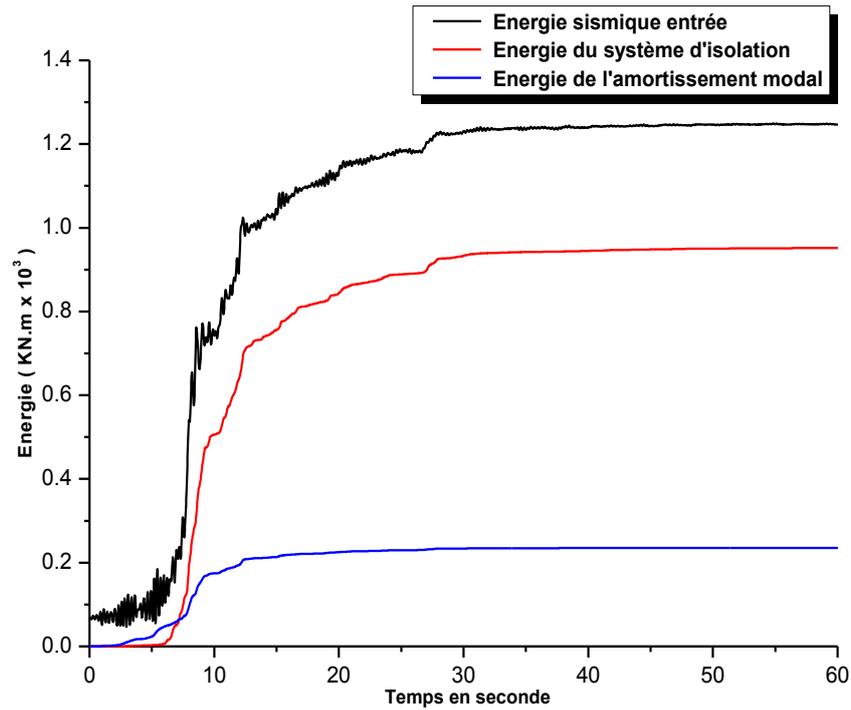


Figure 71 : Diagrammes des énergies absorbées par l'isolateur FPS et l'amortissement modal soumis à la composante de Hollister du séisme de Loma Prieta.

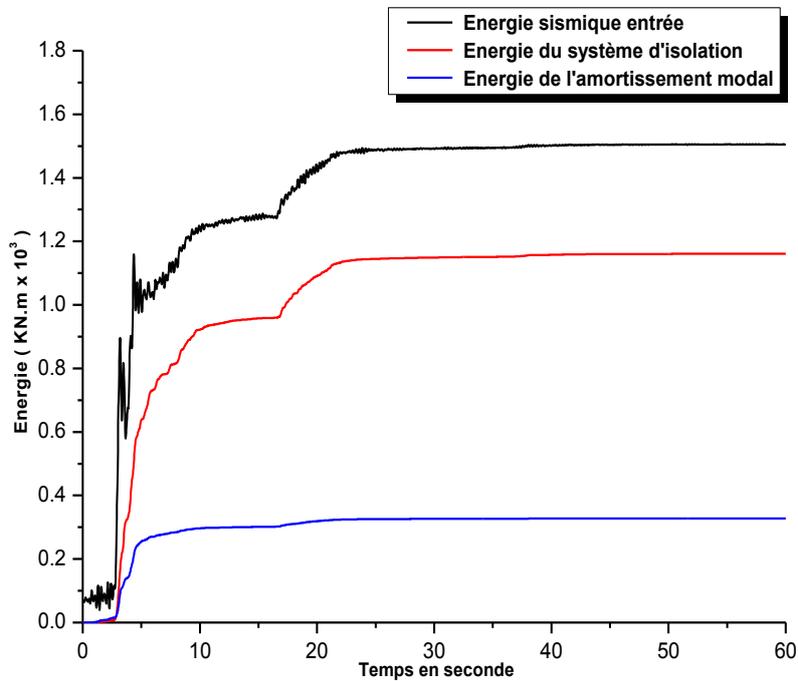


Figure 72 : Diagrammes des énergies absorbées par l'isolateur FPS et l'amortissement modal soumis à la composante de Petrolia du séisme de Petrolia.

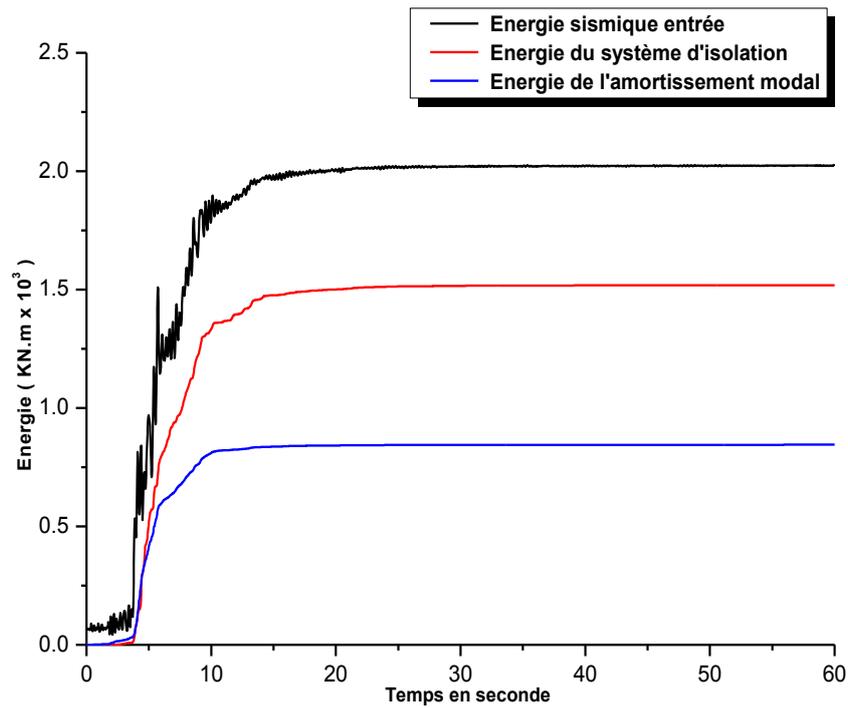


Figure 73 : Diagrammes des énergies absorbées par l'isolateur FPS et l'amortissement modal soumis à la composante de Newhall Fire du séisme de Northridge.

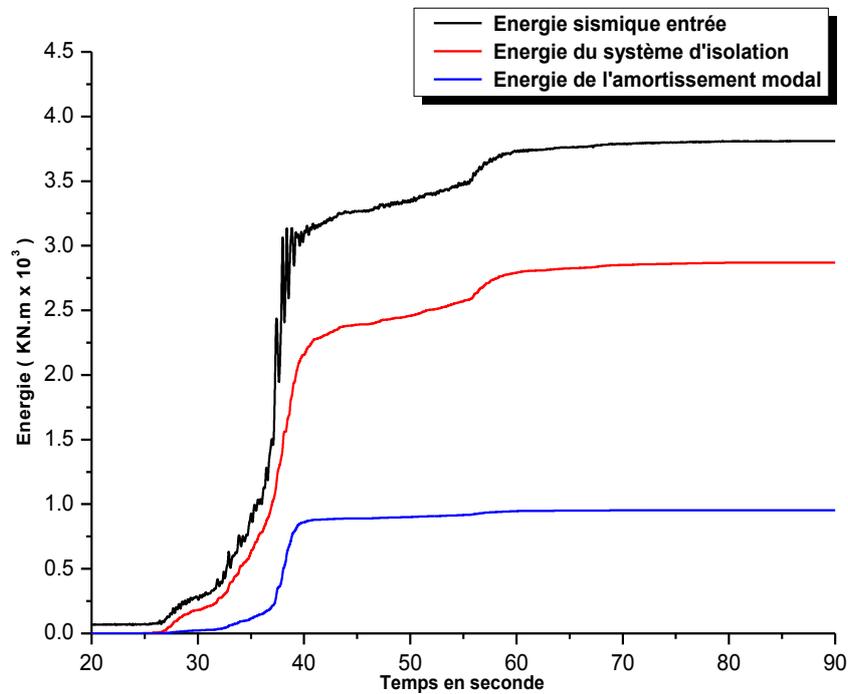


Figure 74 : Diagrammes des énergies absorbées par l'isolateur FPS et l'amortissement modal soumis à la composante de CHY080 du séisme de Chi-Chi.

Les résultats de l'étude comparative entre l'énergie sismique entrée et les énergies absorbées par le système d'isolation LRB et le système FPS pour les quatre excitations sismiques utilisées sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 06: Comparaison des énergies absorbées par les deux systèmes d'isolation (LRB, FPS).

Excitation sismique	Energie (kN.m)	Pont sans isolation	Pont isolé LRB	Pont isolé FPS	Energie absorbée (%)	
					LRB	FPS
Loma Prieta	Sismique entrée	1122.64	1134.62	1248.70	82.59	76.20
	Système d'isolation	–	937.05	951.48		
Petrolia	Sismique entrée	2724.19	1207.87	1505.78	75.32	77.08
	Système d'isolation	–	909.75	1160.67		
Northridge	Sismique entrée	2841.81	1656.79	2025.60	75.49	74.99
	Système d'isolation	–	1250.68	1518.95		
Chi-Chi	Sismique entrée	2996.64	2888.89	3809.41	75.11	75.34
	Système d'isolation	–	2169.90	2869.89		

Les figures 63 à 74 illustrent respectivement les diagrammes des énergies absorbées par le pont sans isolation parasismique, le pont avec isolateur LRB et le pont avec isolateur FPS pour les quatre excitations sismiques considérés, la comparaison de ces figures montre l'efficacité du système d'isolation qui a dissipé l'énergie sismique entrée et l'a empêchée de se transférer à la superstructure avec un pourcentage d'absorption pouvant atteindre 82.59%, comme il est donné dans le tableau 04.

La figure 75 illustre la distribution des contraintes en (kN/m²) pour les trois cas étudiés de ponts (sans isolation parasismique, avec isolateur LRB et avec isolateur FPS).

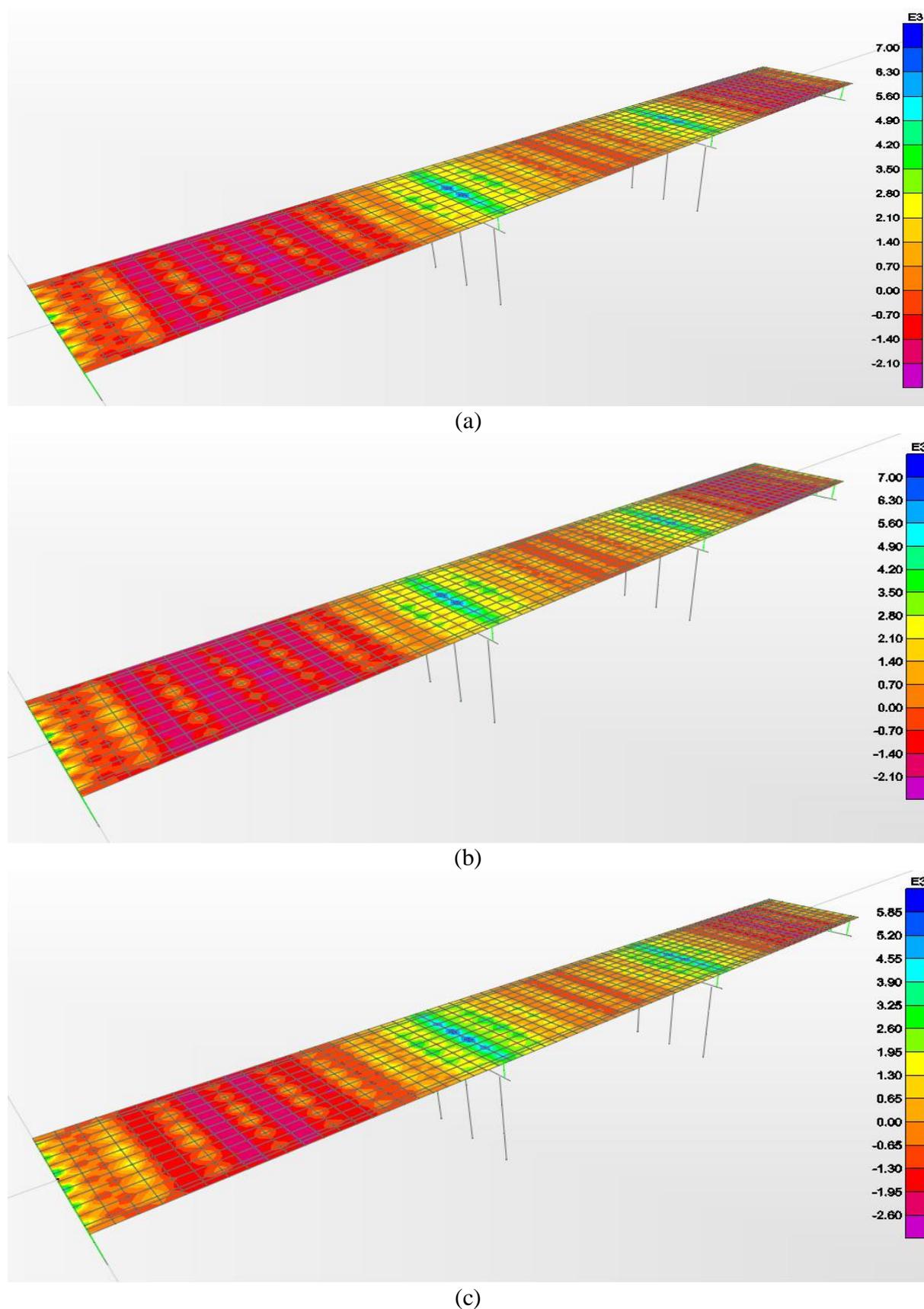


Figure 75 : Distribution des contraintes dans le tablier pour les trois cas étudiés de ponts :
(a) sans isolation parasismique ; (b) avec isolateur LRB ; (c) avec isolateur FPS.

IV-5- Conclusion

Les résultats obtenus par l'étude comparative de l'influence des systèmes d'isolation parasismique LRB et FPS sur la réponse dynamique d'un pont isolé par rapport au même pont sans isolation parasismique nous ont permis de déduire que les efforts tranchants à la base sont réduits avec une moyenne de pourcentage de réduction pouvant atteindre 92.08% à cause du décalage de la fréquence vers la zone à faible excitation sismique.

Ceci montre que l'influence des systèmes d'isolation parasismique LRB ou FPS est d'assouplir le pont isolé avec une moyenne de pourcentage d'augmentation des déplacements pouvant atteindre 292.94% et les accélérations des ponts isolés sont réduites avec une moyenne de pourcentage de réduction des accélérations pouvant atteindre 45.39% par rapport au pont sans isolation parasismique. On peut conclure aussi que les systèmes d'isolation ont dissipé l'énergie sismique entrée avec une moyenne de pourcentage d'absorption pouvant atteindre 82.59%.

Dans cette étude, la déformation se produit au niveau des isolations parasismiques qui sont conçus pour la supporter sans dommages lors d'un séisme. Donc, l'incorporation d'un dispositif d'amortissement permet de contrôler l'amplitude des déplacements du pont avec isolation parasismique.

Chapitre V

**EFFET DU SYSTEME COMBINE
ISOLATEUR FPS AVEC
AMORTISSEUR A FLUIDE
VISQUEUX**

CHAPITRE V

EFFET DU SYSTEME COMBINE ISOLATEUR FPS AVEC AMORTISSEUR A FLUIDE VISQUEUX

V-1- Introduction

Pour illustrer l'effet du système combiné isolateur FPS avec amortisseur à fluide visqueux sur les réponses sismiques des ponts isolés, une étude comparative a été réalisée sur un pont dans trois situations différentes. En première situation, on considère le pont sans isolation parasismique, alors qu'en deuxième et troisième cas, l'ouvrage est équipé successivement d'un système d'isolation en pendule glissant FPS (*Friction Pendulum System*) puis d'un système combiné isolateur FPS avec amortisseur à fluide visqueux et dont les résultats ont été analysés à l'aide du programme numérique d'analyse dynamique des structures SAP2000. Cette étude consiste à comparer les réponses du pont en termes d'effort tranchant, de déplacement, d'accélération et d'énergie absorbée.

V-2- Présentation de l'ouvrage et de l'excitation sismique

Le pont utilisé dans cette étude comparative est le même que celui utilisé précédemment dans le chapitre IV avec le même isolateur FPS combiné avec amortisseur à fluide visqueux, dont le pourcentage d'amortissement effectif est de 20% pour les deux cas de figure. Comme le montre la figure 76.

L'analyse est effectuée respectivement dans les trois cas:

- Pont sans isolation parasismique ;
- Pont équipé d'un système d'isolation parasismique FPS ;
- Pont équipé d'un système combiné isolateur FPS avec amortisseur à fluide visqueux

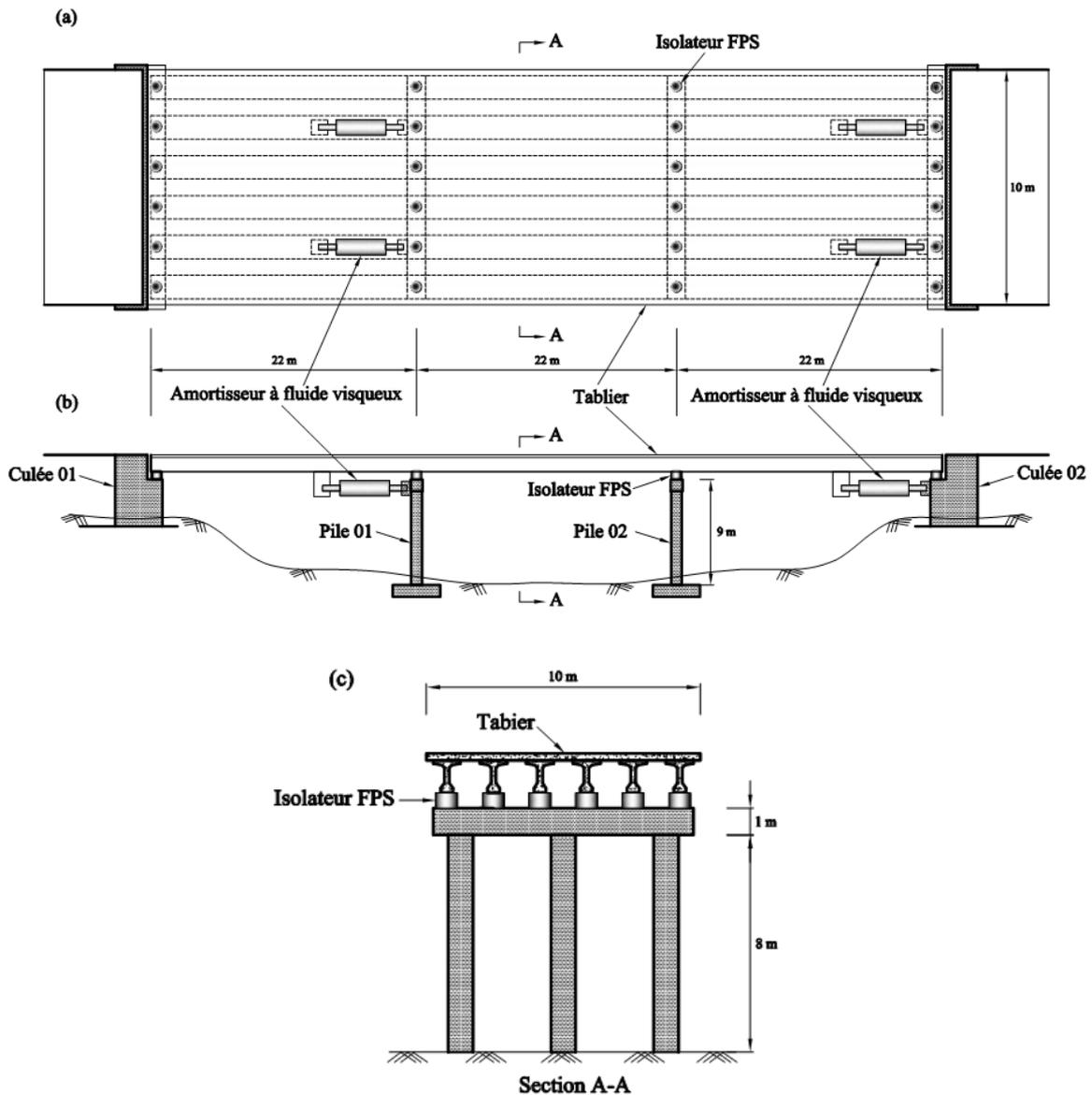


Figure 76 : Pont équipé d'un système combiné isolateur FPS avec amortisseur à fluide visqueux

- (a) Vue en plan du pont ;
- (b) Vue en élévation avec trois travées et l'emplacement de l'amortisseur à fluide visqueux ;
- (c) Schéma de la pile, l'emplacement de l'isolateur et le tablier.

Pour illustrer l'effet du système combiné ; isolateur FPS avec amortisseur à fluide visqueux, sur les réponses sismiques des ponts isolés, une analyse dynamique des réponses par accélérogramme est utilisée pour les trois cas de pont (sans isolation parasismique, avec isolateur FPS et isolateur FPS+amortisseur à fluide visqueux) et les chargements sismiques

considérés avec leurs accélérations maximales du sol (Peak Ground Acceleration) PGA sont les suivants :

- La composante de Hollister du séisme de Loma Prieta (1989) avec PGA de 0.369g;
- La composante de Petrolia du séisme de Petrolia (1992)avec PGA de 0.662g;
- La composante de Newhall Firedu séisme de Northridge (1994) avec PGA de 0.589g;
- La composante de CHY080 du séisme de Chi-Chi (1999)avec PGA de 0.902g.

Les quatre excitations sismiques utilisées sont les mêmes que celles utilisées précédemment dans le chapitre IV (voir les figures 50, 51, 52 et 53).

V-3-Résultats et Analyse

V-3-1-Les efforts tranchants

La comparaison des efforts tranchants à la base pour les trois cas étudiés de ponts (sans isolation parasismique, avec isolateur FPS et avec isolateur FPS+amortisseur à fluide visqueux) et pour les quatre chargements sismiques utilisés est représentée ci-dessous par la figure 77.

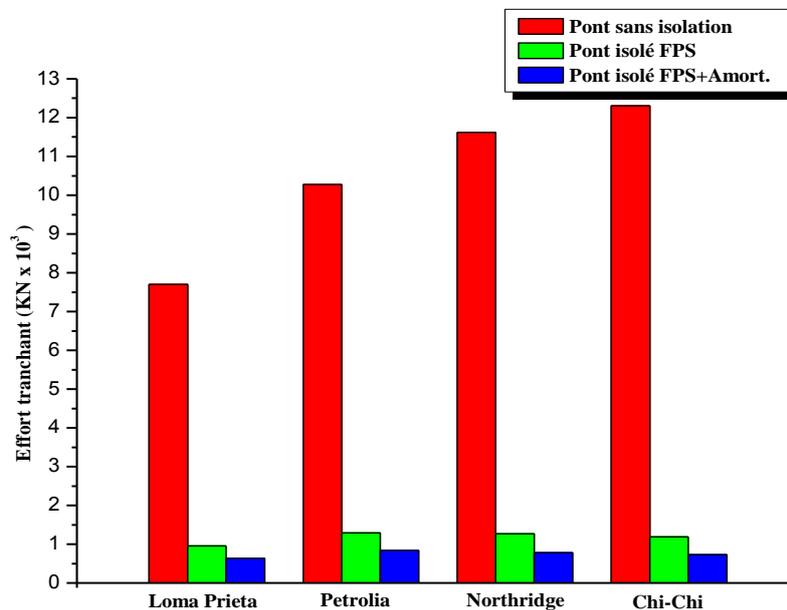


Figure 77 : Les efforts tranchants à la base pour les trois cas étudiés de ponts.

Les résultats de la comparaison précédente pour les quatre excitations sismiques utilisées sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 07 : Comparaison des efforts tranchants à la base pour les trois cas de pont (sans isolation parasismique, avec isolateur FPS et avec isolateur FPS+Amortisseur à fluide visqueux).

Excitation sismique	Effort Tranchant (kN)			Réduction FPS(%)	Réduction FPS+Amort.(%)
	Pont sans isolation	Pont isolé FPS	Pont isolé FPS+Amort.		
Loma Prieta	7702.15	953.30	634.37	87.62	91.76
Petrolia	10276.01	1293.92	843.06	87.41	91.80
Northridge	11617.15	1272.72	782.07	89.04	93.27
Chi-Chi	12309.71	1187.69	733.15	90.35	94.04

D'après les résultats de cette comparaison, nous constatons que le système d'isolation parasismique FPS réduit les efforts tranchants à la base avec un pourcentage de réduction pouvant atteindre 90.35% à cause de l'augmentation de la période fondamentale et le décalage de la fréquence vers la zone à faible excitation sismique. Nous constatons aussi qu'une augmentation de la réduction des efforts tranchants à la base est assurée par l'incorporation des dispositifs d'amortissement à fluide visqueux avec l'isolateur FPS qui permet de réduire au maximum les efforts tranchants pour les quatre chargements sismiques utilisés.

V-3-2-Déplacements et accélérations

La comparaison des déplacements et des accélérations du tablier au niveau de la pile 01 pour les trois cas étudiés de ponts (sans isolation parasismique, avec isolateur FPS et avec isolateur FPS+Amortisseur à fluide visqueux) et pour les quatre chargements sismiques utilisés est représentée dans les figures ci-dessous.

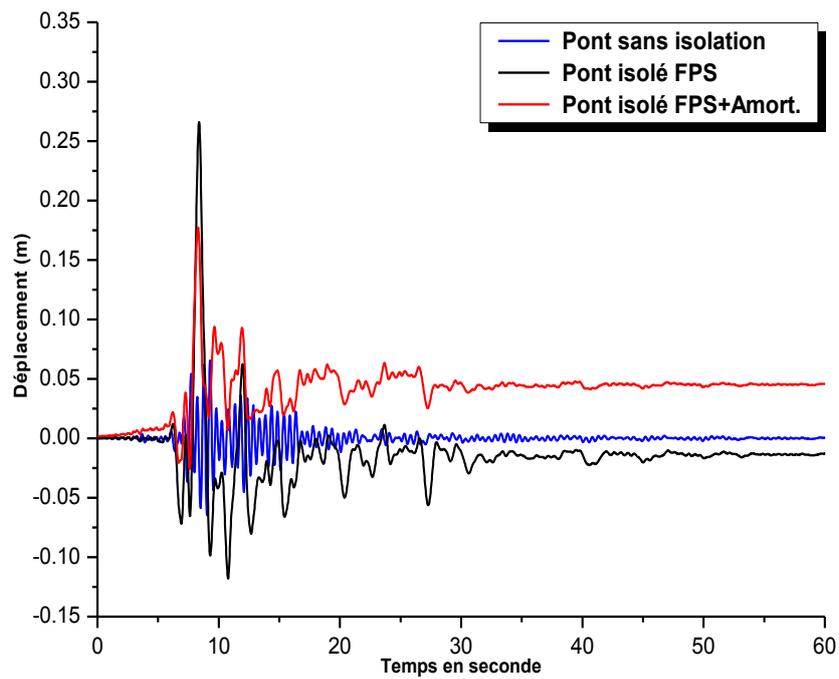


Figure 78 : Comparaison des déplacements du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont soumis à la composante de Hollister du séisme de Loma Prieta.

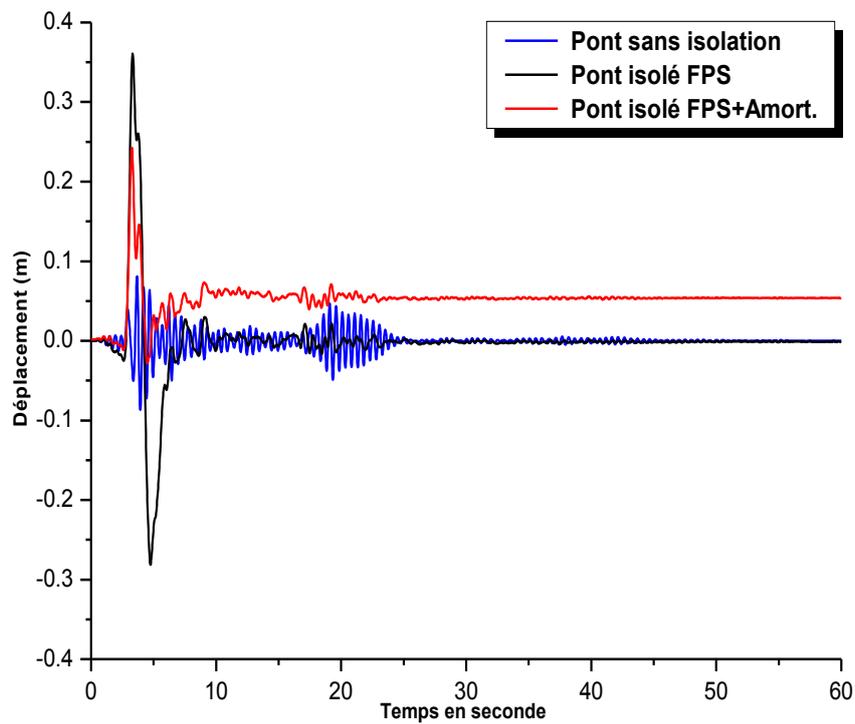


Figure 79 : Comparaison des déplacements du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont soumis à la composante de Petrolia du séisme de Petrolia.

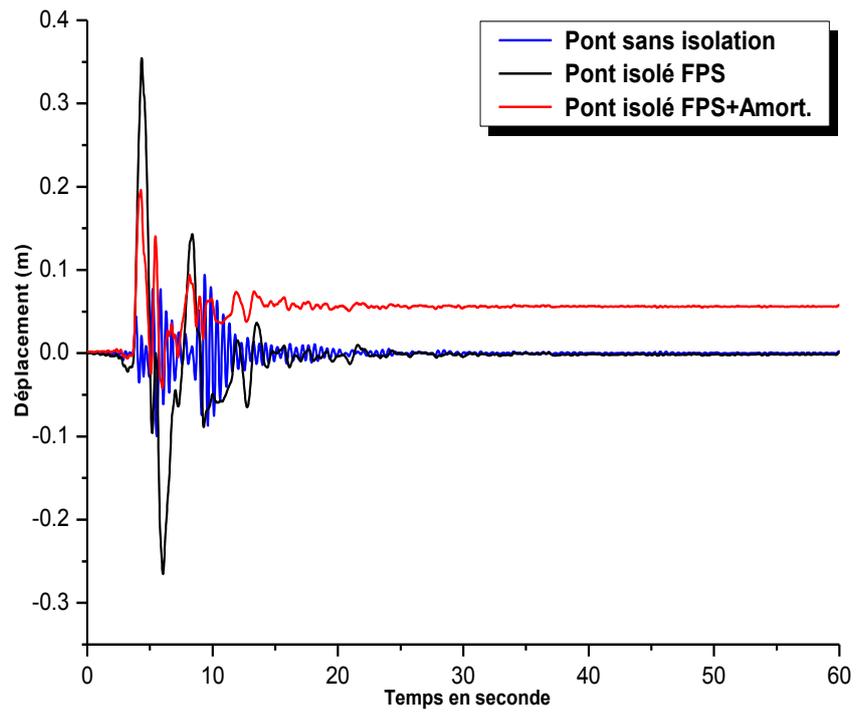


Figure 80 : Comparaison des déplacements du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont soumis à la composante de de Newhall Fire du séisme de de Northridge.

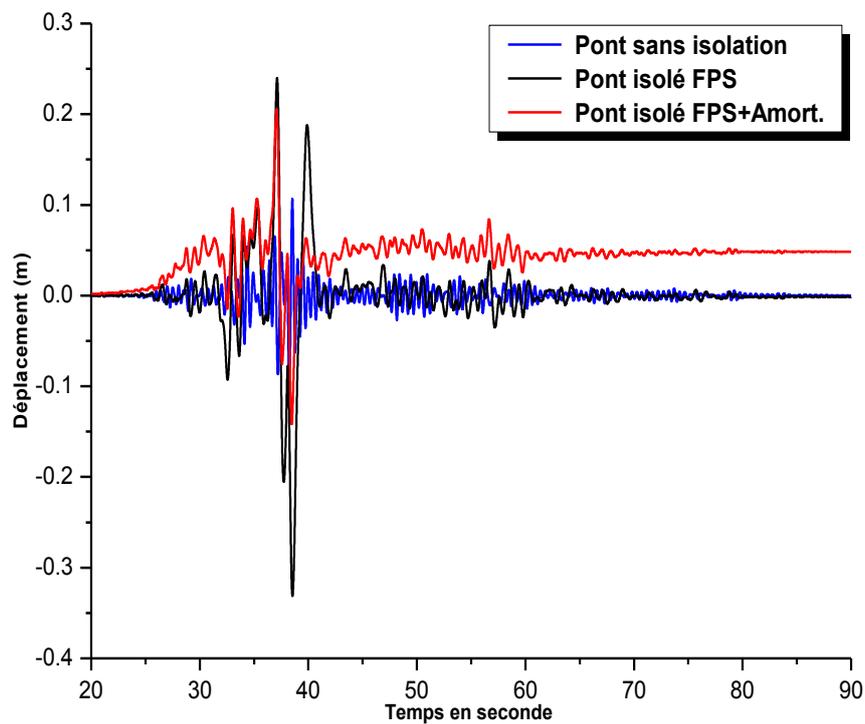


Figure 81 : Comparaison des déplacements du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont soumis à la composante de CHY080 du séisme de Chi-Chi.

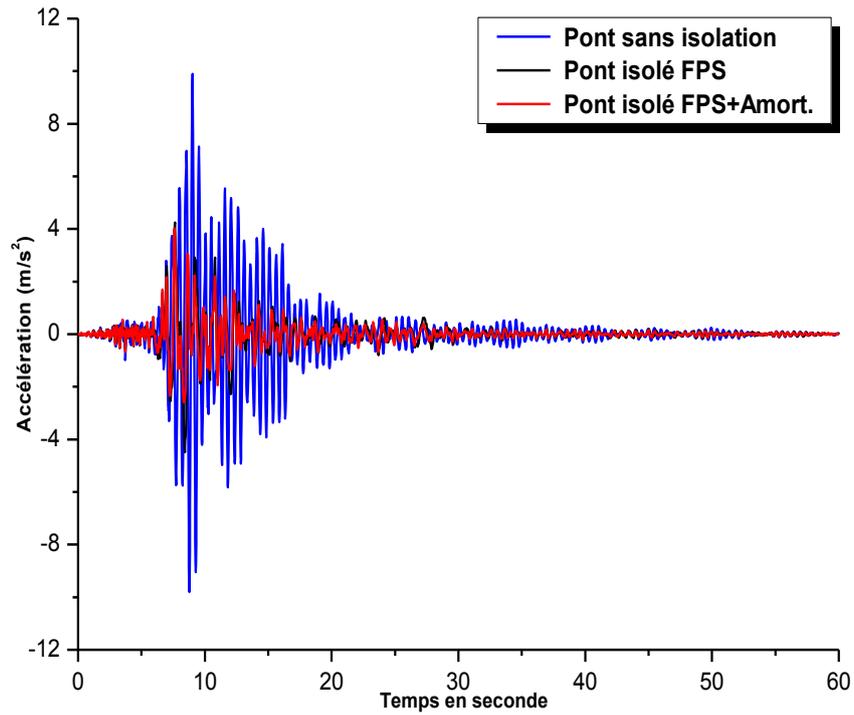


Figure 82 : Comparaison des accélérations du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont soumis à la composante de Hollister du séisme de Loma Prieta.

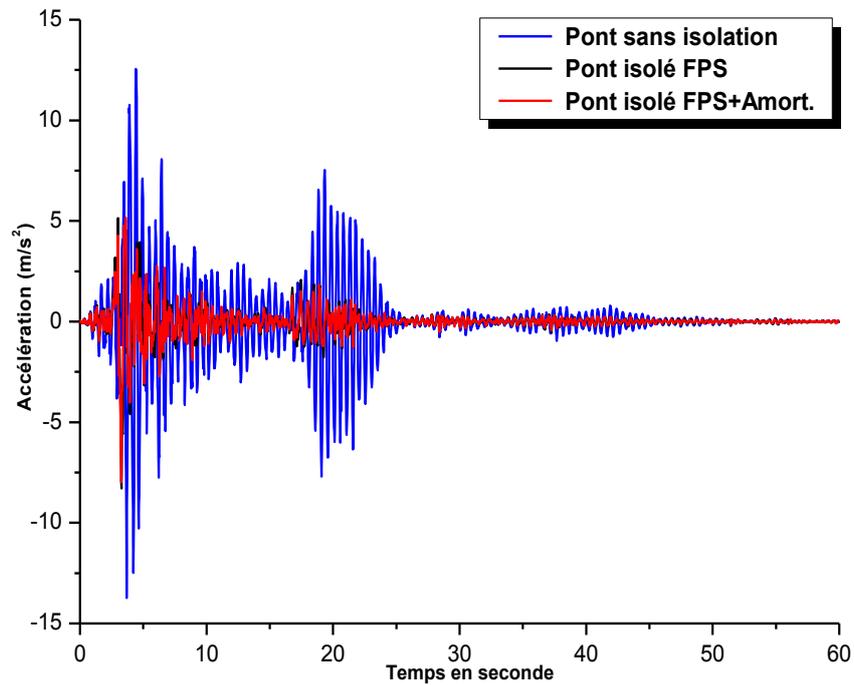


Figure 83 : Comparaison des accélérations du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont soumis à la composante de Petrolia du séisme de Petrolia.

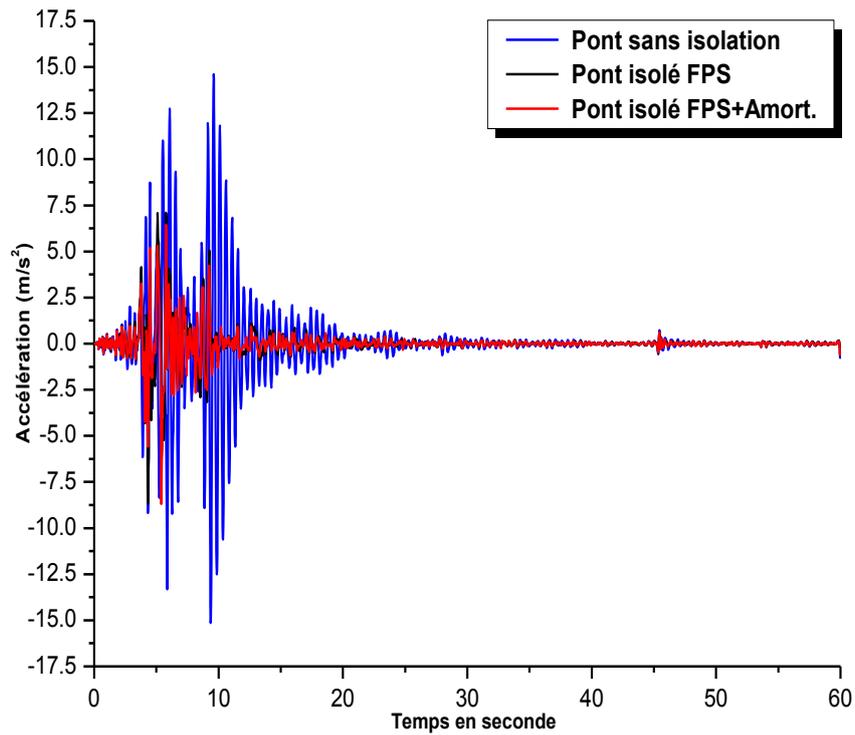


Figure 84 : Comparaison des accélérations du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont soumis à la composante de Newhall Fire du séisme de Northridge.

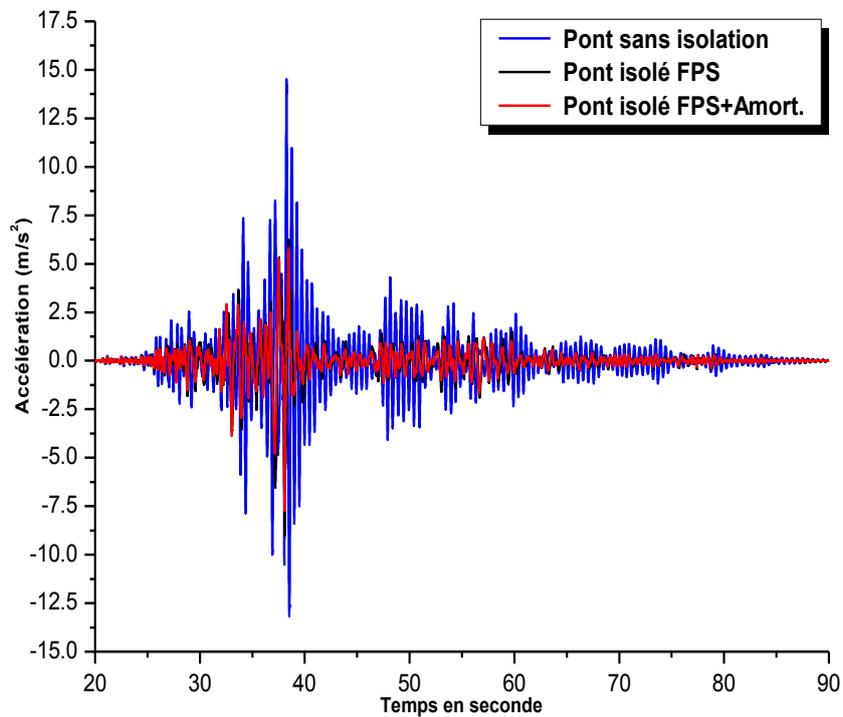


Figure 85 : Comparaison des accélérations du tablier au niveau de la pile 01 dans les trois cas de pont soumis à la composante de CHY080 du séisme de Chi-Chi.

Les résultats de la comparaison des déplacements maximaux et des accélérations maximales du tablier pour les trois cas étudiés et pour les quatre excitations sismiques utilisées sont résumés dans les tableaux suivants :

Tableau 08 : Comparaison des déplacements maximaux du tablier au niveau de la pile 01 pour les trois cas de pont.

Excitation sismique	Déplacement (m)			Augmentation FPS (%)	Augmentation FPS+Amort. (%)
	Pont sans isolation	Pont isolé FPS	Pont isolé FPS+Amort.		
Loma Prieta	0.0654	0.2659	0.1774	306.57	171.25
Petrolia	0.0867	0.3608	0.2428	316.15	180.05
Northridge	0.0996	0.3546	0.196	256.02	96.79
Chi-Chi	0.1066	0.3311	0.2056	210.60	92.87

Tableau 09: Comparaison des accélérations maximales du tablier au niveau de la pile 01 pour les trois cas de pont.

Excitation sismique	Accélération (m/s^2)			Réduction FPS (%)	Réduction FPS+Amort. (%)
	Pont sans isolation	Pont isolé FPS	Pont isolé FPS+Amort.		
Loma Prieta	9.89	4.49	4.01	54.60	59.45
Petrolia	13.74	8.29	7.98	39.67	41.92
Northridge	15.14	8.67	8.69	42.73	42.60
Chi-Chi	14.50	9.01	7.73	37.86	46.69

Les figures 78 à 85 montrent que les déplacements maximaux du tablier sur le pont avec système d'isolation parasismique FPS sont typiquement de l'ordre de 3 à 4 fois plus grands par rapport au pont sans isolation. Par contre, les accélérations du pont avec isolateur FPS sont réduites par rapport au pont sans isolation parasismique avec un pourcentage de réduction pouvant atteindre 54.60%. L'incorporation d'un dispositif d'amortissement à fluide visqueux avec l'isolateur FPS permet de contrôler et réduire les déplacements du tablier qui sont localisés au niveau du système FPS. Par conséquent, on peut constater une amélioration dans la réduction des accélérations maximales du tablier dans le pont composé des isolateurs

FPS et des amortisseurs à fluide visqueux par rapport au pont avec isolateur FPS comme il est illustré dans les tableaux 08 et 09. Ce comportement est traduit par la limitation des dommages subis par le pont après un séisme.

V-3-3-Energie absorbée

Pour un système combiné isolateur FPS avec amortisseur à fluide visqueux, une partie de l'énergie induite lors du séisme (*Input Energy*) est absorbée par le glissement correspondant au comportement frottant du système d'isolation FPS et par la force d'amortissement correspondant au comportement visqueux de l'amortisseur à fluide visqueux ; la partie restante de l'énergie induite transmise au tablier est connue sous le nom d'énergie transférée, dont une partie est dissipée par l'amortissement structural correspondant au comportement visqueux du pont qui est l'énergie de l'amortissement modal (*Modal Damping Energy*) et l'autre partie restante se compose de l'énergie cinétique (*Kinetic Energy*) de la masse et l'énergie potentielle (*Potential Energy*) pour les déformations élastiques structurales.

Pour illustrer l'effet du système d'isolation parasismique FPS et l'effet du système combiné ; isolateur FPS avec amortisseur à fluide visqueux sur la dissipation d'énergie, une comparaison a été faite entre l'énergie sismique entrée, l'énergie absorbée par le système d'isolation FPS, l'énergie absorbée par l'amortisseur à fluide visqueux et l'énergie d'amortissement modal pour les trois cas de ponts étudiés et pour les quatre chargements sismiques utilisés précédemment. Les résultats de cette comparaison sont représentés par les figures ci-dessous :

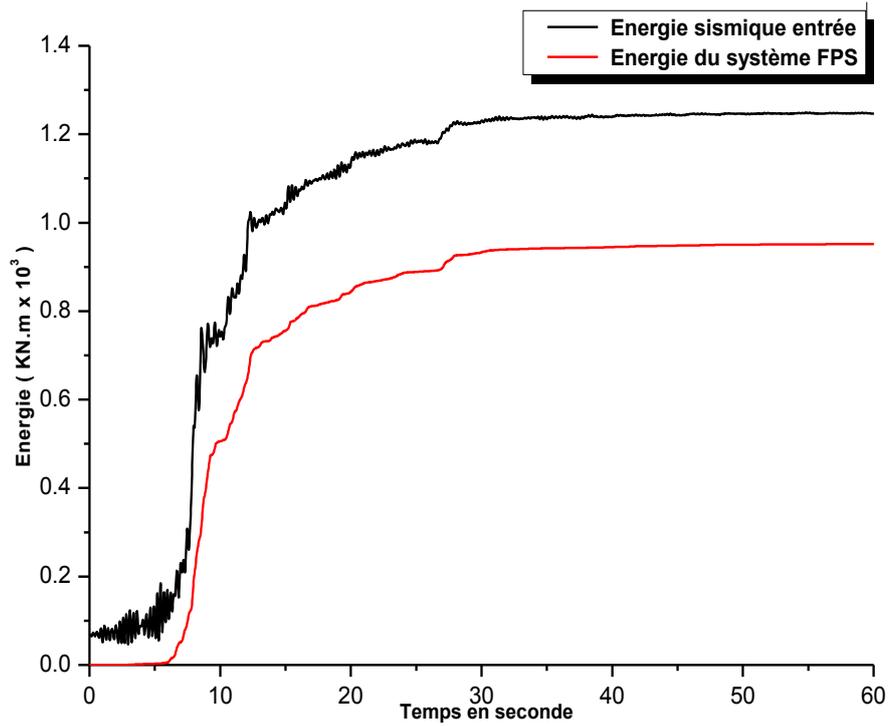


Figure 86 : Diagrammes des énergies absorbées par l'isolateur FPS soumis à la composante de Hollister du séisme de Loma Prieta.

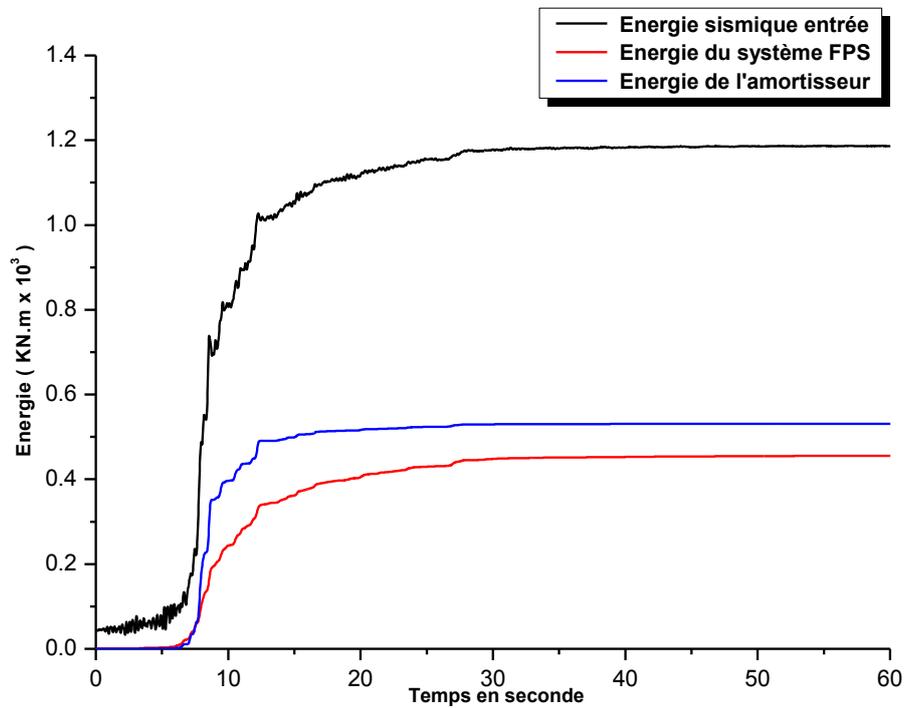


Figure 87 : Diagrammes des énergies absorbées par l'isolateur FPS et l'amortisseur visqueux soumis à la composante de Hollister du séisme de Loma Prieta.

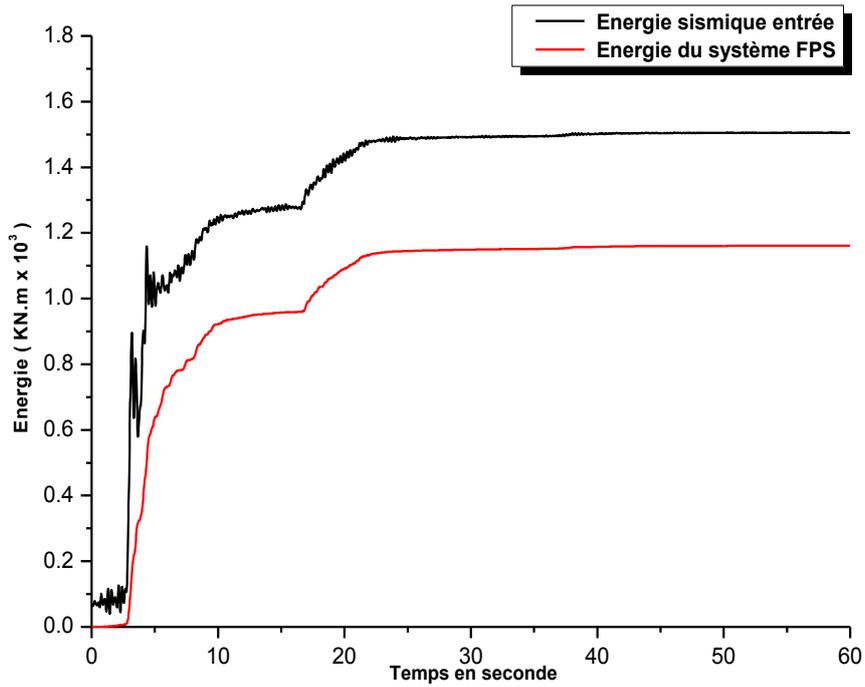


Figure 88 : Diagrammes des énergies absorbées par l'isolateur FPS soumis à la composante de Petrolia du séisme de Petrolia.

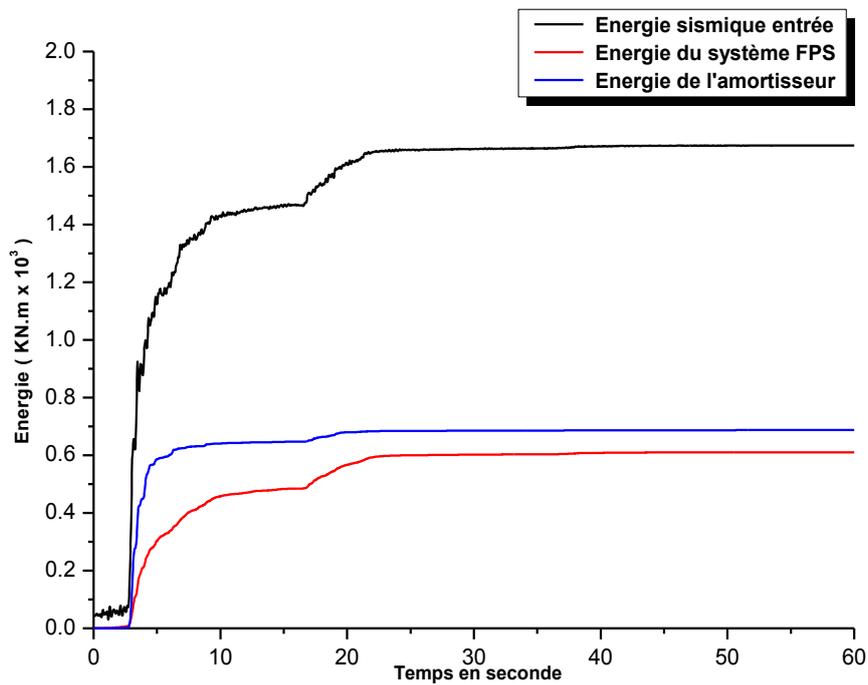


Figure 89 : Diagrammes des énergies absorbées par l'isolateur FPS et l'amortisseur visqueux soumis à la composante de Petrolia du séisme de Petrolia.

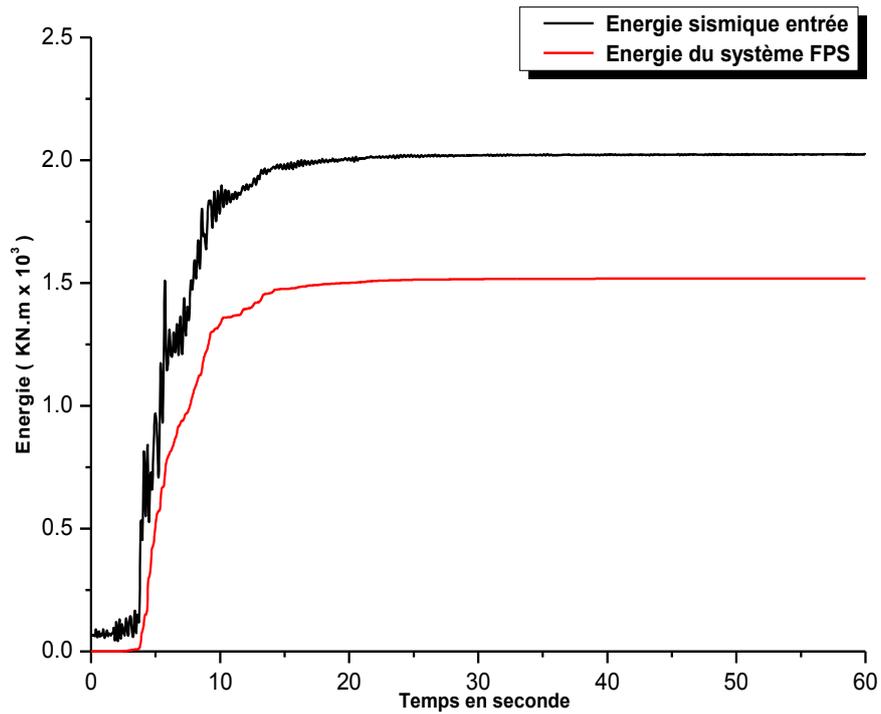


Figure 90 : Diagrammes des énergies absorbées par l'isolateur FPS soumis à la composante de Newhall Fire du séisme de Northridge.

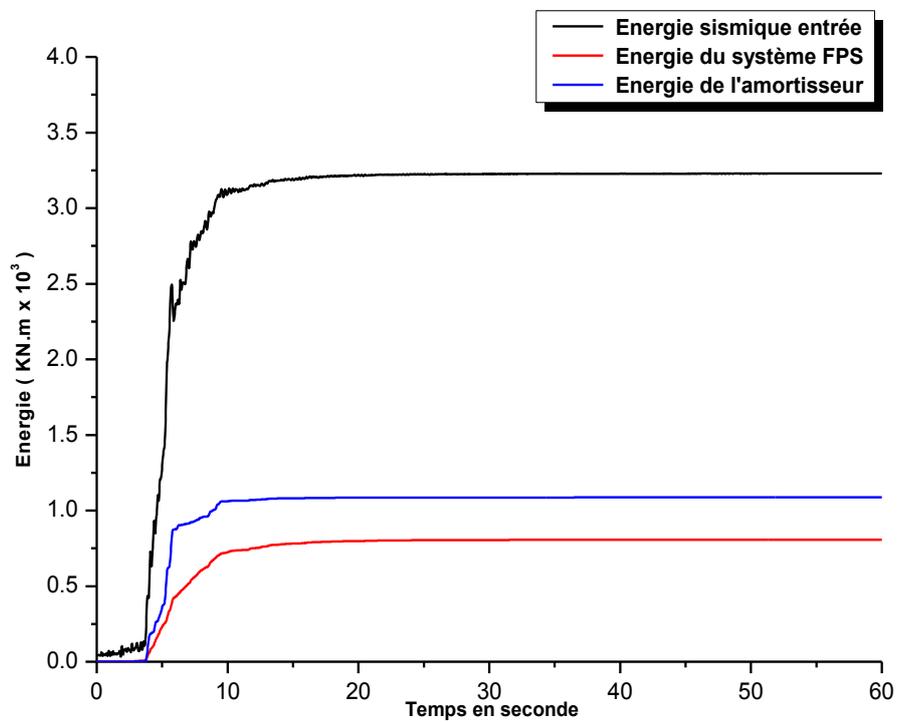


Figure 91 : Diagrammes des énergies absorbées par l'isolateur FPS et l'amortisseur visqueux soumis à la composante de Newhall Fire du séisme de Northridge.

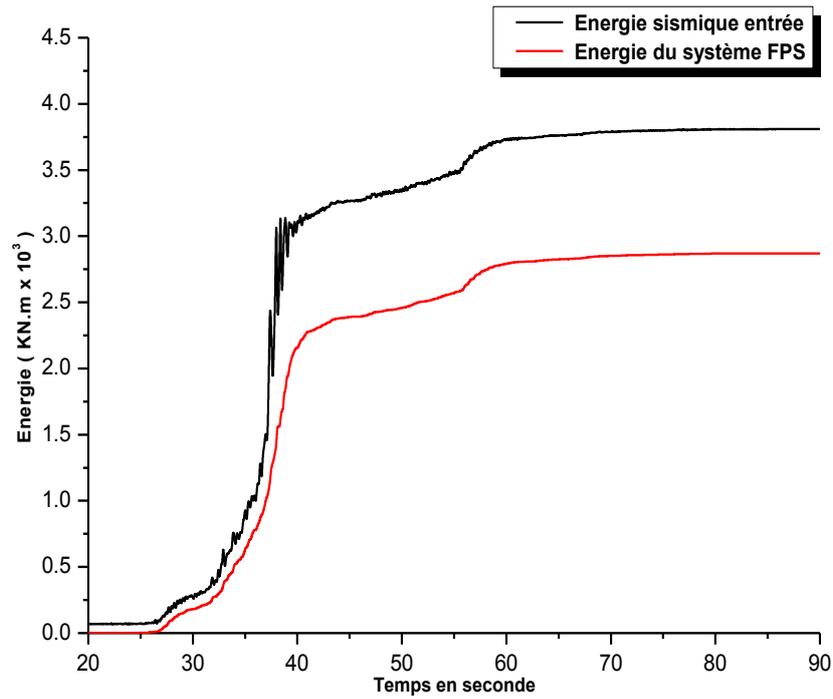


Figure 92 : Diagrammes des énergies absorbées par l'isolateur FPS soumis à la composante de CHY080 du séisme de Chi-Chi.

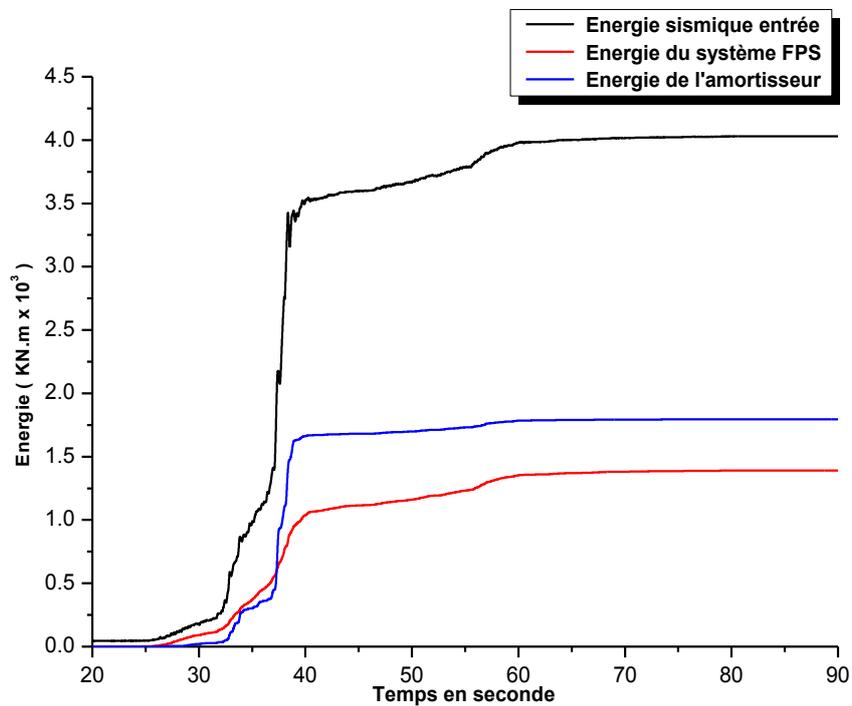


Figure 93 : Diagrammes des énergies absorbées par l'isolateur FPS et l'amortisseur visqueux soumis à la composante de CHY080 du séisme de Chi-Chi.

Les résultats de l'étude comparative d'une part entre l'énergie sismique entrée et les énergies absorbées par le système composé uniquement par des isolateurs FPS et d'autre part entre l'énergie sismique entrée et les énergies absorbées par le système composé des isolateurs FPS et des amortisseurs à fluide visqueux pour les quatre excitations sismiques utilisées sont résumés dans les tableaux suivants :

Tableau 10: Comparaison des énergies absorbées par le système d'isolation FPS.

Excitation sismique	Energies	Pont isolé FPS (kN.m)	Energie absorbée (%)
Loma Prieta	Sismique entrée	1248.70	76.20
	Système d'isolation	951.48	
Petrolia	Sismique entrée	1505.78	77.08
	Système d'isolation	1160.67	
Northridge	Sismique entrée	2025.60	74.99
	Système d'isolation	1518.95	
Chi-Chi	Sismique entrée	3809.41	75.34
	Système d'isolation	2869.89	

Tableau 11: Comparaison des énergies absorbées par le système combiné FPS+Amortisseur à fluide visqueux.

Excitation sismique	Energies	Pont isolé FPS+Amort. (kN.m)	Energie absorbée (%)		
			FPS	Amort.	FPS+Amort.
Loma Prieta	Sismique entrée	1187.08	38.35	44.75	83.10
	Système d'isolation	455.22			
	Amortisseur visqueux	531.19			
Petrolia	Sismique entrée	1674.45	36.43	41.04	77.47
	Système d'isolation	609.94			
	Amortisseur visqueux	687.16			
Northridge	Sismique entrée	3230.02	24.99	33.65	58.64
	Système d'isolation	807.04			
	Amortisseur visqueux	1087.06			
Chi-Chi	Sismique entrée	4030.07	34.51	44.55	79.06
	Système d'isolation	1390.81			
	Amortisseur visqueux	1795.35			

Les figures 63 à 66 et les figures 86 à 93 illustrent les diagrammes des énergies absorbées par le pont sans isolation parasismique, le pont avec isolateurs FPS et le pont avec isolateurs FPS combiné avec les amortisseurs à fluide visqueux pour les quatre excitations sismiques considérés. L'analyse comparative de ces figures montre l'efficacité du système d'isolation qui a dissipé l'énergie sismique entrée et l'a empêché de se transférer à la superstructure avec un pourcentage d'absorption pouvant atteindre 77.08%, comme il est donné dans le tableau 10. Cette comparaison montre aussi l'ajout offert par les amortisseurs à fluide visqueux dans la dissipation de l'énergie dont l'effet est bien distinguable dans le cas du pont composé des isolateurs FPS et des amortisseurs à fluide visqueux. Dans ce cas, l'énergie absorbée par le système est répartie entre les isolateurs FPS et les amortisseurs à fluide visqueux où ces derniers dépassent de peu les isolateurs en matière d'absorption, comme il est donné dans le tableau 11. Cela engendre une réduction des charges sismiques dépassant la moitié aux niveaux des isolateurs FPS, ce qui permet la conception d'isolateurs à dimension et à coût réduits tout en conservant leur efficacité suite aux séismes majeurs ou suite aux répliques.

V-4- Conclusion

Les résultats de la réponse sismique obtenus par l'étude comparative sous l'influence du système d'isolation parasismique FPS et du système combiné isolateur FPS avec amortisseur à fluide visqueux sur la réponse dynamique d'un pont isolé par rapport au même pont sans isolation parasismique nous ont permis de déduire que le système d'isolation parasismique FPS réduit les efforts tranchants à la base avec un pourcentage de réduction pouvant atteindre 90.35% et une augmentation de la réduction des efforts tranchants à la base est assurée par l'incorporation des dispositifs d'amortissement à fluide visqueux au système d'isolation parasismique FPS. On peut constater que le système d'isolation FPS assoupli le pont isolé 3 à 4 fois plus par rapport au pont sans isolation et réduit les accélérations de pont isolé au niveau du tablier. L'incorporation d'un dispositif d'amortissement à fluide visqueux avec l'isolateur FPS permet de contrôler les déformations qui sont localisées au niveau de ce dernier avec une amélioration de réduction des accélérations maximales du tablier et réaliser un compromis satisfaisant entre la réduction des forces sismiques et l'accroissement des déformations dans l'isolateur parasismique. On peut constater aussi une augmentation de l'énergie absorbée par le système combiné isolateur FPS avec amortisseur à fluide visqueux par rapport au système d'isolation FPS ce qui montre l'apport bénéfique des amortisseurs à fluide visqueux dans la dissipation de l'énergie.

Chapitre VI

INFLUENCE DE L'INTERACTION
SOL-STRUCTURE SUR LA
REPONSE DYNAMIQUE DES
PONTS ISOLES

CHAPITRE VI

INFLUENCE DE L'INTERACTION SOL-STRUCTURE SUR LA REPOSE DYNAMIQUE DES PONTS ISOLES

VI-1- Introduction

Comme il a été mentionné précédemment, les isolations parasismiques peuvent être considérées comme un moyen important pouvant offrir une solution technique efficace pour la protection contre les risques sismiques pour les ponts, elles consistent à découpler le mouvement de la pile et des isolateurs du mouvement du tablier dans le but de réduire les forces sismiques transmises à ce dernier. Pour illustrer l'influence de l'interaction sol-structure sur les réponses dynamiques des ponts isolés, une étude comparative a été réalisée à l'aide du programme numérique d'analyse dynamique des structures (SAP2000) sur un pont dans deux situations différentes. En première situation, on considère le pont sans isolation parasismique, alors que la deuxième, le pont est équipé d'un système d'isolation en pendule glissant FPS avec prise en compte de l'interaction sol-structure en variant le module de cisaillement du sol à la base du pont du sol très ferme au sol très meuble pour les deux cas. Cette étude consiste à comparer les réponses des ponts en termes de fréquence fondamentale, effort tranchant, déplacement et accélération.

VI-2- Modèle du sol

Le comportement dynamique des fondations du pont qui sont fondés sur un sol semi-infini avec une couche élastique de sol est simplement modélisé à l'aide de ressorts et d'amortisseurs (un couple pour chaque degré de liberté).

Le tableau 12 et la figure 94 représentent les différentes valeurs de la rigidité des ressorts et la constante d'amortissement qui sont données par les expressions de (Zhang et Wolf, 1998) en fonction de la vitesse des ondes sismiques V_s , le coefficient de Poisson ν , la masse volumique ρ et le module de cisaillement G [62].

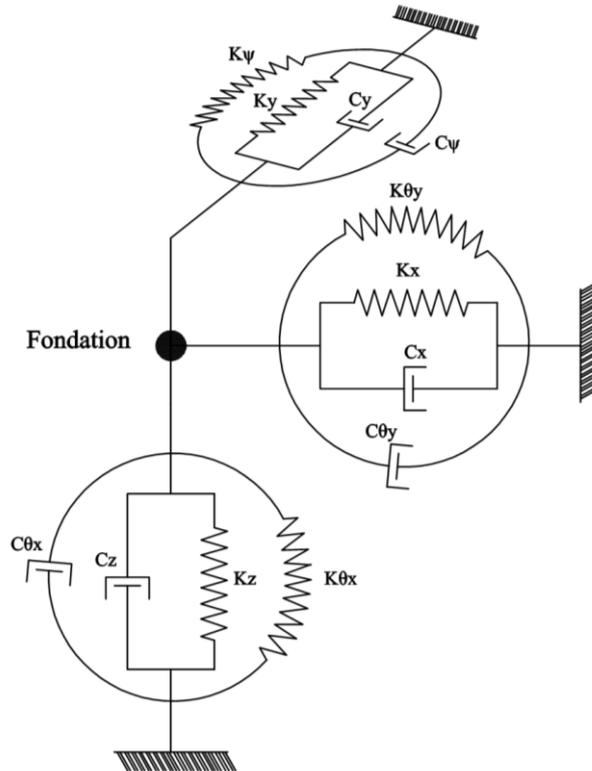


Figure 94 : Modèle analogique d'interaction sol-structure.

Tableau 12: Rigidité du ressort du sol par les expressions de Zhang et Wolf [62].

Mode de vibration	Rigidité de ressort	γ_0	μ_0
Vertical	$\frac{4Gr_0}{1-\nu}$	0.85	0.095
Horizontal	$\frac{8Gr_0}{2-\nu}$	0.58	0.27
Balancement	$\frac{8Gr_\theta^3}{3(1-\nu)}$	$\frac{0.3}{1 + \frac{3(1-\nu)m}{8r_\theta^5\rho}}$	0.24
Torsion	$\frac{16Gr_\psi^3}{3}$	$\frac{0.433}{1 + \frac{2m}{r_\psi^5\rho}} \sqrt{\frac{m}{r_\psi^5\rho}}$	0.045

$$c = \frac{r}{V_s} k \gamma_0 \quad \text{et} \quad m = \left(\frac{r}{V_s} \right)^2 k \mu_0$$

avec :

r : Le rayon de la fondation circulaire équivalente.

VI-3- Présentation de l'ouvrage et de l'excitation sismique

Le pont utilisé dans cette étude comparative est le même que celui utilisé précédemment dans le chapitre IV avec le même isolateur FPS et sans amortisseur à fluide visqueux comme le montre la figure 48 dans le chapitre IV.

Pour illustrer l'effet de l'interaction sol-structure sur les réponses dynamiques des ponts isolés, une analyse dynamique des réponses par accélérogramme est utilisée pour le pont sans isolation parasismique et pour le même pont équipé d'un système d'isolation FPS avec la prise en compte de l'interaction sol structure par la variation du module de cisaillement du sol à la base de pont de 500 MPa (sol très ferme) à 5 MPa (sol très meuble) pour les deux cas de pont. Les chargements sismiques considérés avec leurs accélérations maximales du sol (Peak Ground Acceleration) PGA sont les suivants :

- La composante de Hollister du séisme de Loma Prieta (1989) avec PGA de 0.369g;
- La composante de Petrolia du séisme de Petrolia (1992) avec PGA de 0.662g;
- La composante de Newhall Firedu séisme de Northridge (1994) avec PGA de 0.589g;
- La composante de CHY080 du séisme de Chi-Chi (1999)avec PGA de 0.902g.

Les quatre excitations sismiques utilisées sont les mêmes que celles utilisées précédemment dans le chapitre IV (voir les figures 50, 51, 52 et 53).

VI-4-Comparaison des résultats

VI-4-1-Fréquence fondamentale

Les résultats de la variation de la fréquence fondamentale en fonction du module de cisaillement du sol G pour les deux cas de pont sans et avec isolation parasismique sont représentés par les figures 95 et 96, où la prise en compte de l'interaction sol-structure consiste dans la variation du module de cisaillement de sol : du sol très ferme au sol très meuble.

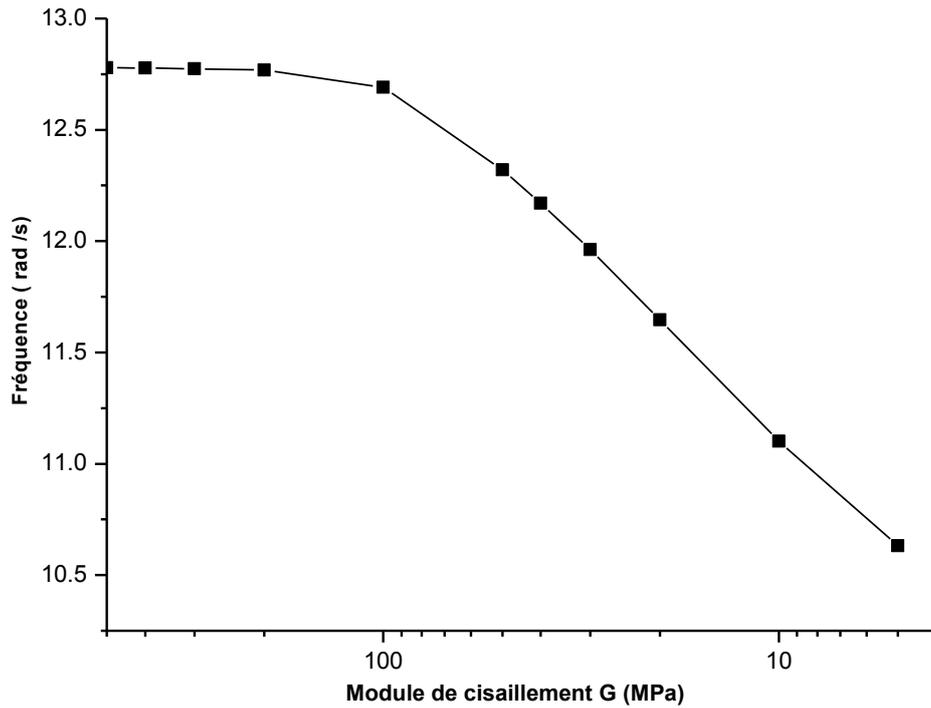


Figure 95 : Variation de la fréquence fondamentale en fonction du module de cisaillement du sol G pour le pont sans isolation parasismique.

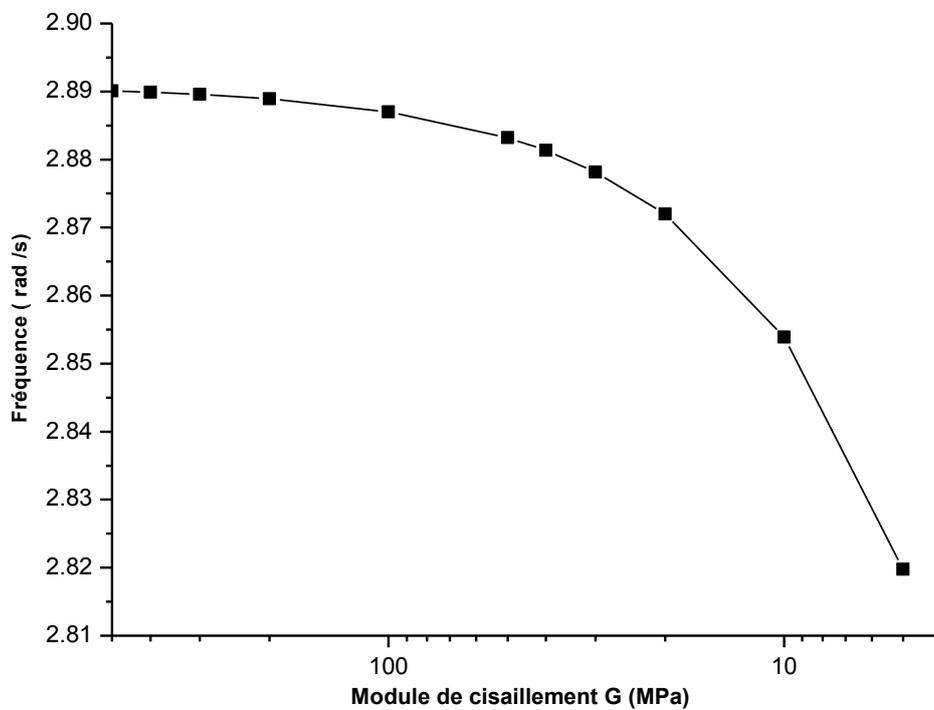


Figure 96 : Variation de la fréquence fondamentale en fonction du module de cisaillement du sol G pour le pont équipé de système isolation parasismique.

D'après les résultats représentés dans les figures 95 et 96, nous constatons que les fréquences fondamentales sont réduites pour le sol très meuble ce qui montre clairement dans ce cas l'effet significatif de l'ISS.

Pour le sol très ferme ou rigide, les fréquences fondamentales convergent avec la fréquence fondamentale naturelle du pont à base rigide (pont encasturé à sa base), ceci montre que l'effet de l'ISS est négligeable dans ce cas et la prise en compte de l'effet de l'ISS n'est pas considérée.

La comparaison des résultats de la variation de la fréquence fondamentale représentée dans les figures 95 et 96 montre l'efficacité du système d'isolation parasismique dans la réduction des fréquences fondamentales par rapport au pont sans isolation parasismique; elle montre aussi l'influence de l'ISS notée par une réduction supplémentaire significative des fréquences fondamentales ajoutée à celle réduite par le système d'isolation parasismique. Dans ce cas, l'effet de l'ISS est très significatif pour les ponts isolés qui sont fondés sur un sol très meuble.

VI-4-2-Les efforts tranchants

Pour illustrer l'influence du système d'isolation parasismique et de l'ISS sur les efforts tranchants à la base, une analyse numérique a été faite sur deux cas des ponts sans isolation parasismique et avec isolation parasismique en fonction du module de cisaillement du sol G variant du sol très meuble au sol très ferme sous les quatre chargements sismiques utilisés. Comme représentés ci-dessous par les figures 97 et 98.

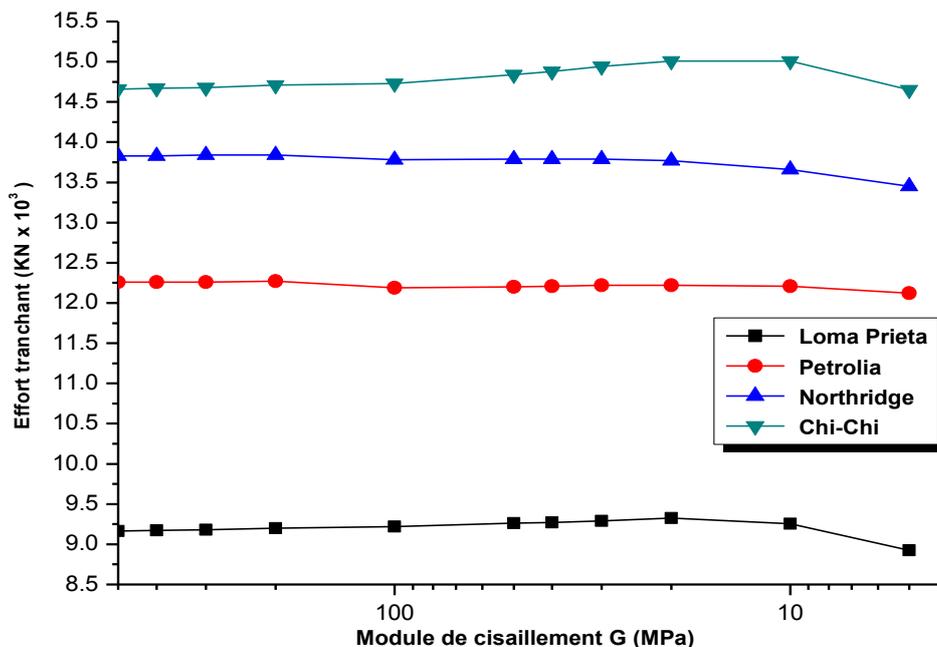


Figure 97 : Les efforts tranchants à la base pour le pont sans isolation parasismique en fonction du module de cisaillement du sol G sous les quatre excitations sismiques utilisées.

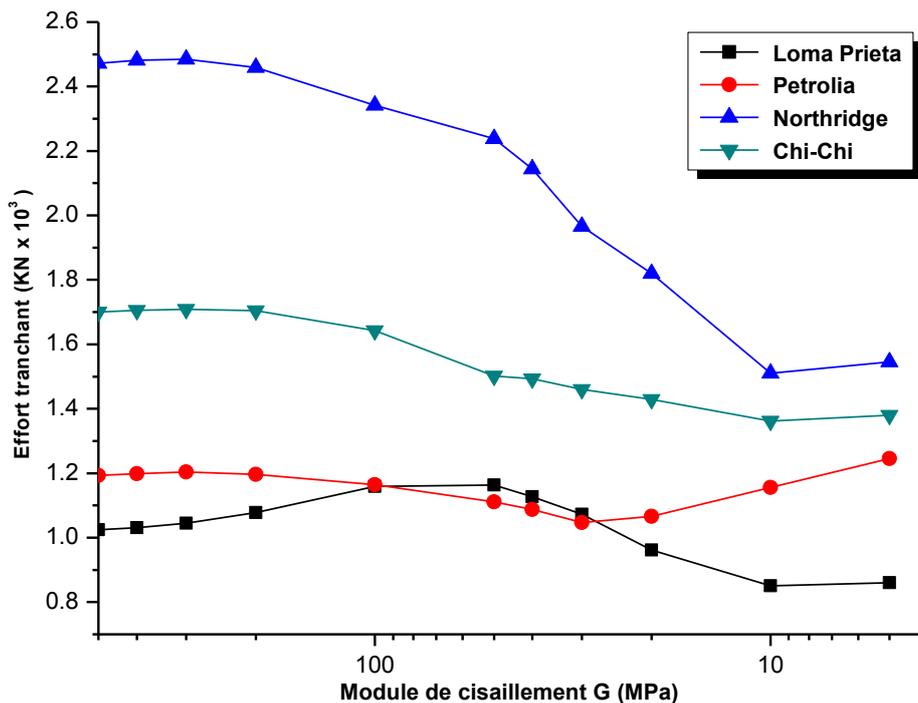


Figure 98 : Les efforts tranchants à la base pour le pont avec isolation parasismique en fonction du module de cisaillement du sol G sous les quatre excitations sismiques utilisées.

La comparaison des résultats représentés par les figures 97 et 98 montre l'efficacité du système d'isolation parasismique dans la réduction des efforts tranchants à la base à cause de la réduction de la fréquence fondamentale et le décalage de la fréquence vers la zone à moindre excitation sismique. Elle montre aussi l'influence de l'ISS notée par une réduction supplémentaire significative des efforts tranchants à la base ajoutée à celle réduite par le système d'isolation parasismique.

VI-4-3- Les déplacements

D'après les résultats des déplacements absolus du tablier au niveau de la pile 01 pour le pont sans isolation parasismique et en fonction du module de cisaillement du sol G sous les quatre excitations sismiques utilisées qui sont représentés par la figure 99, nous constatons que sous tous les chargements sismiques utilisés dans cette étude, les déplacements sont diminués avec l'augmentation de la rigidité du sol par la variation du module de cisaillement du sol G , allant du sol très meuble au sol très ferme. Ce qui montre l'influence de l'ISS qui augmente les déplacements absolus du tablier pour les sols flexibles (sol très meuble) où on doit prendre en compte l'effet de l'ISS.

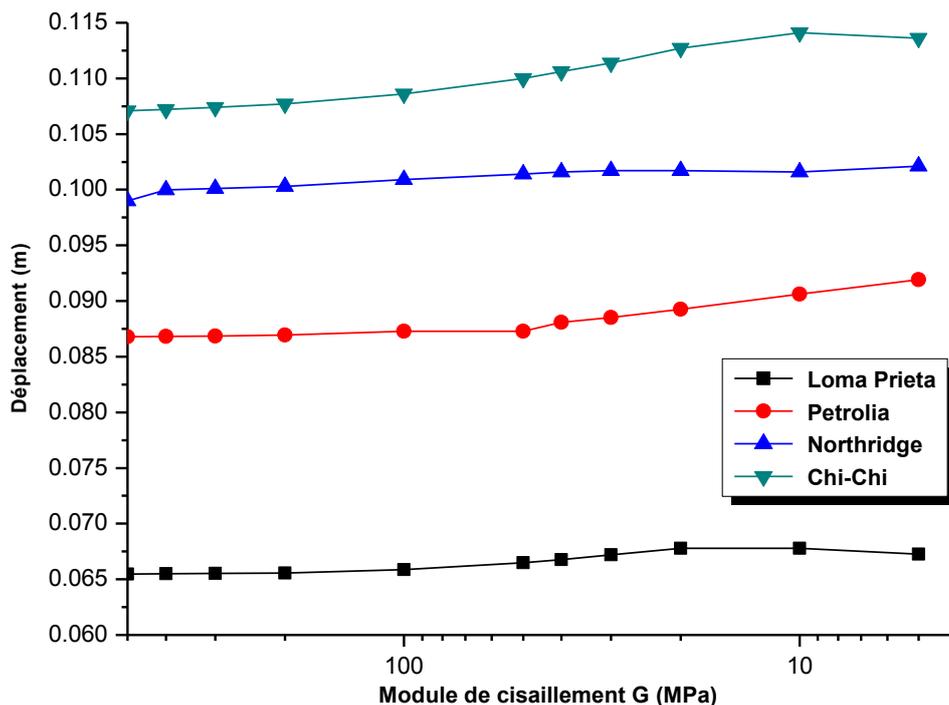


Figure 99 : Déplacements maximaux absolus du tablier au niveau de la pile 01 pour le pont sans isolation parasismique en fonction du module de cisaillement du sol G sous les quatre excitations sismiques utilisées

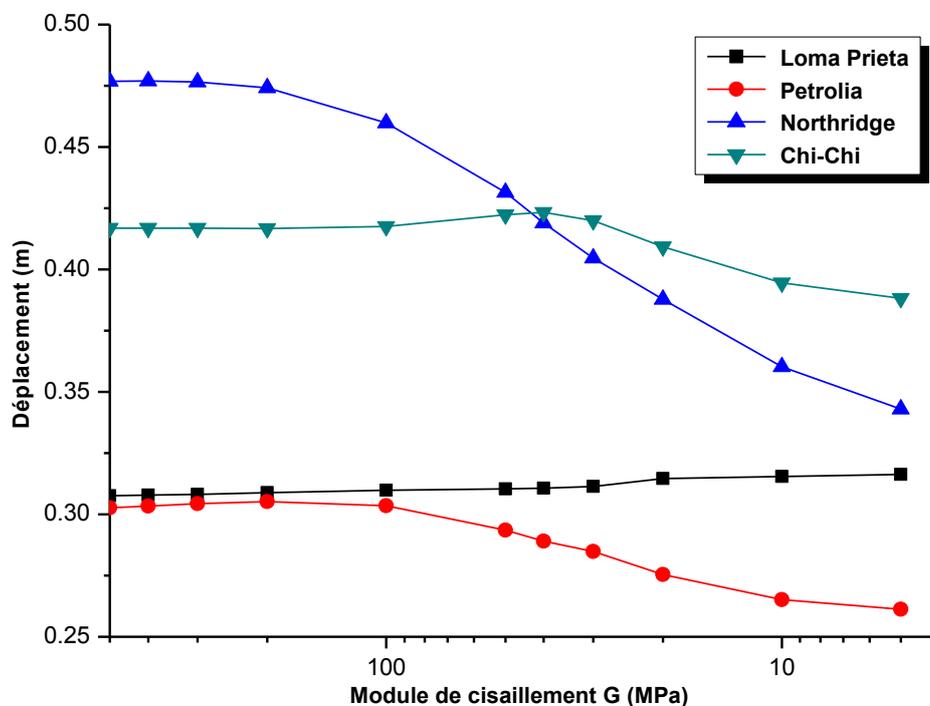


Figure 100 : Déplacements maximaux absolus du tablier au niveau de la pile 01 pour le pont avec isolation parasismique en fonction du module de cisaillement du sol G sous les quatre excitations sismiques utilisées.

Comme le montre la figure 100, les déplacements absolus du tablier au niveau de la pile 01 pour le pont avec isolation parasismique sont augmentés avec l'augmentation de la rigidité du sol pour les chargements sismiques moyens ou élevés qui sont représentés par les séismes de Petrolia, Northridge et Chi-Chi. Par contre, une légère diminution des déplacements absolus du tablier pour les chargements sismiques faibles comme le montre l'accélérogramme du séisme de Loma Prieta.

Ceci dénote que l'influence de l'ISS pour les ponts avec isolation parasismique est très significative lors des excitations sismiques moyennes ou élevées et devient moins significative pour des excitations faibles.

VI-4-4- Les accélérations :

L'analyse dynamique effectuée pour les deux cas de pont nous a permis de comparer les résultats des accélérations maximales du tablier au niveau de la pile 01 dans les deux cas de pont pour les quatre chargements sismiques utilisés. Ces résultats sont représentés dans les figures ci-dessous.

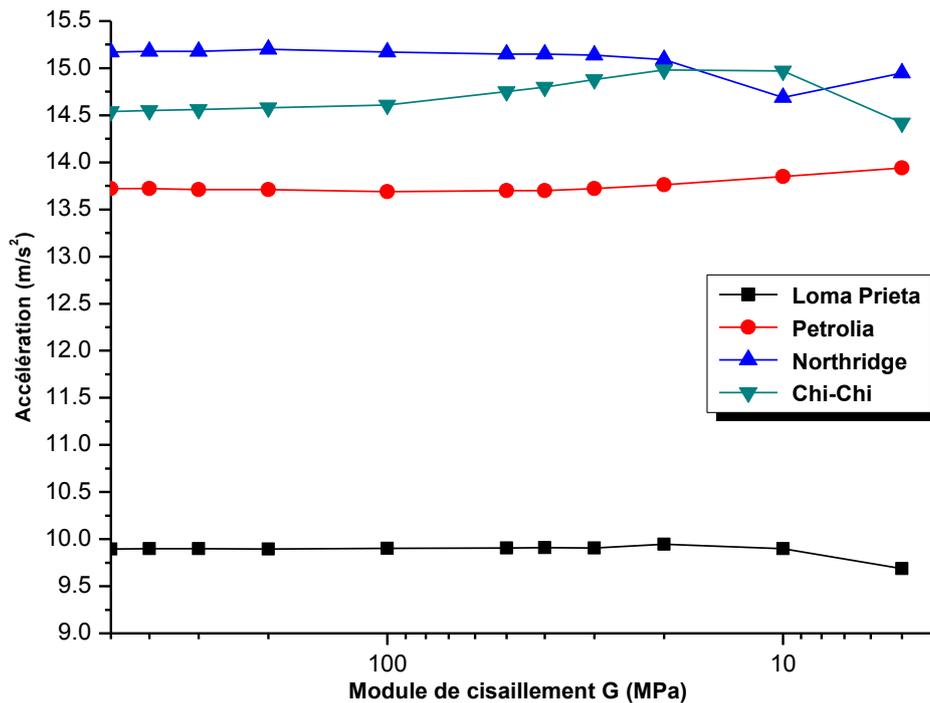


Figure 101 : Accélérations maximales du tablier au niveau de la pile 01 pour le pont sans isolation parasismique en fonction du module de cisaillement du sol G sous les quatre excitations sismiques utilisées.

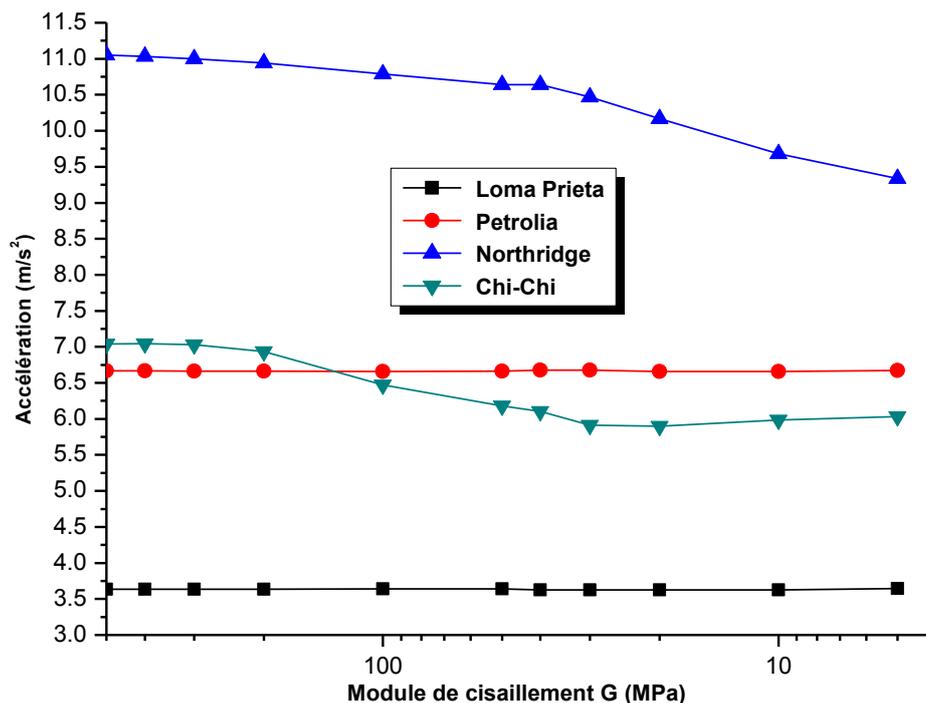


Figure 102 : Accélérations maximales du tablier au niveau de la pile 01 pour le pont avec isolation parasismique en fonction du module de cisaillement du sol G sous les quatre excitations sismiques utilisées.

La comparaison des résultats des accélérations maximales représentés dans les figures 101 et 102 montrent que le système d'isolation parasismique réduit les accélérations maximales sous tous les chargements sismiques utilisés quelle que soit la rigidité du sol par rapport à celles trouvées pour le pont sans isolation parasismique. Ceci est expliqué par l'efficacité du système d'isolation qui a découplé le mouvement du sol du mouvement du pont et a empêché l'excitation sismique de se transférer au tablier du pont. La comparaison précédente montre aussi que la prise en compte de l'effet de l'ISS sur la réduction des accélérations est significative pour le pont avec isolation parasismique par rapport à celle trouvée pour le pont sans isolation parasismique.

VI-5- Conclusion

Les résultats de la réponse sismique obtenus par l'étude comparative de l'influence de l'ISS sur la réponse dynamique d'un pont sans isolation par rapport au même pont avec isolation parasismique FPS nous ont permis de déduire que les fréquences fondamentales sont réduites par l'effet de l'ISS dans les deux cas de pont et l'effet de l'ISS est très significatif pour les ponts isolés fondés sur sol très meuble. On peut constater que l'influence du système d'isolation parasismique réduit les efforts tranchants à la base à cause de la réduction de la

fréquence fondamentale et le décalage de la fréquence vers la zone à moindre excitation sismique avec une réduction supplémentaire significative des efforts tranchants à la base notée par l'influence de l'ISS ajoutée à celle réduite par le système d'isolation parasismique ; l'effet de l'ISS réduit les déplacements pour le pont avec isolation parasismique fondé sur un sol flexible "sol très meuble" et cet effet est très significatif lors des excitations sismiques moyennes ou élevées alors qu'il devient moins significatif pour des excitations faibles. On peut conclure aussi que le système d'isolation parasismique réduit les accélérations maximales sous tous les chargements sismiques utilisés quelle que soit la rigidité du sol par rapport au pont sans isolation parasismique et la prise en compte de l'effet de l'ISS sur la réduction des accélérations est significative pour le pont avec isolation parasismique par rapport à celle trouvée pour le pont sans isolation parasismique.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Depuis toujours, les experts sont restés incapables de prévenir d'une manière suffisante des répercussions du séisme d'un côté, et de maîtriser la densité démographique dans certains endroits d'un autre côté. Ce qui a mis en évidence la nécessité de construire des ouvrages parasismiques. Pour ce faire, les chercheurs à travers le monde ont développé des techniques innovatrices telles que les systèmes de contrôle passif, actif, semi-actif et hybride, qui permettent de limiter les pertes humaines et d'atténuer les dégâts matériels.

L'objectif principal de ce travail était de mettre en évidence l'influence des systèmes d'isolation parasismique sur la réponse dynamique des ponts isolés avec prise en compte de l'interaction sol-structure.

Pour atteindre cet objectif, des analyses dynamiques des ponts isolés ont été effectuées pour deux systèmes d'isolation parasismiques avec prise en compte de l'interaction sol-structure par la variation du module de cisaillement du sol à la base du pont allant du sol très ferme au sol très meuble et sous différentes excitations sismiques afin de déterminer les réponses sismiques des systèmes en termes de fréquence fondamentale, effort tranchant, déplacement, accélérations et d'énergie absorbée pour évaluer l'influence des systèmes d'isolation parasismique ainsi que l'effet du système combiné d'un isolateur avec amortisseur à fluide visqueux et l'influence de l'interaction sol-structure sur la réponse dynamique des ponts isolés.

Les analyses numériques effectuées par l'étude comparative entre les deux ponts sans et avec isolation parasismique pour montrer l'efficacité du système d'isolation et l'influence du système combiné isolateur avec amortisseur à fluide visqueux sur cette efficacité nous ont permis de déduire les conclusions suivantes :

- Le système d'isolation réduit les efforts tranchants à la base à cause du décalage de la fréquence vers la zone à moindre excitation sismique.
- Les déplacements maximaux du pont isolé sont localisés au niveau des isolations parasismiques et le tablier de pont se déplace sur les appuis comme un corps rigide.
- les accélérations des ponts isolés sont réduites par rapport au pont sans isolation parasismique.
- Le système d'isolation a une efficacité de dissiper la plupart de l'énergie sismique entrée et d'empêcher cette énergie de se transférer vers la superstructure.
- L'incorporation d'un dispositif d'amortissement à fluide visqueux avec l'isolateur FPS permet de contrôler les déformations qui sont localisées au niveau de ce

dernier avec une amélioration de la réduction des accélérations maximales et réaliser un compromis satisfaisant entre la réduction des forces sismiques et l'accroissement des déformations dans l'isolateur parasismique.

- L'énergie absorbée par le système combiné isolateur FPS avec amortisseur à fluide visqueux augmente par rapport au système d'isolation FPS ce qui dénote de l'apport favorable des amortisseurs à fluide visqueux dans la dissipation de l'énergie.

Les résultats numériques obtenus par l'étude comparative sur un pont concernent deux situations différentes : dans la première situation on considère le pont sans isolation parasismique, alors que dans la deuxième le pont est équipé d'un système d'isolation FPS. Ces résultats illustrent parfaitement l'influence de l'interaction sol-structure sur la réponse dynamique des ponts isolés et nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Les fréquences fondamentales sont réduites par l'effet de l'ISS dans les deux cas de pont sans et avec isolation parasismique et l'effet de l'ISS est très significatif pour les ponts isolés fondés sur un sol très meuble.
- Les efforts tranchants à la base sont réduits avec une réduction supplémentaire significative notée par l'influence de l'ISS en plus de celle réduite par le système d'isolation parasismique.
- L'effet de l'ISS réduit les déplacements pour le pont avec isolation parasismique fondé sur un sol flexible "sol très meuble" et cet effet est très significatif lors des excitations sismiques moyennes ou élevées et devient moins significatif pour des excitations faibles.
- Le système d'isolation parasismique réduit les accélérations maximales sous tous les chargements sismiques utilisés quelle que soit la rigidité du sol par rapport au pont sans isolation parasismique et la prise en compte de l'effet de l'ISS sur la réduction des accélérations est significatif pour le pont avec isolation parasismique par rapport à celle trouvée pour le pont sans isolation parasismique.

Il serait aussi intéressant au futur de voir les réponses dynamiques d'un pont isolé sur l'influence avec d'autres systèmes de contrôle des vibrations tels que les systèmes de contrôle actif, semi-actif et hybride avec des études expérimentales en parallèle sur des modèles réduits des ponts isolés pour comparer les résultats numériques avec les résultats expérimentaux.

Bibliographie

- [01]: Hirokazu I., Mulyo H. P. (2003), "Structural Control", Earthquake Engineering Handbook, Chapter 19, CRC Press.
- [02]: Kobori T. (1988), "Active Seismic Response Control ", Ninth World Conference on Earthquake Engineering (9WCEE), Tokyo-Kyoto, Japan.
- [03]: Franklin Y.C., Hongping J., Kangju L. (2008), "Smart Structures Innovative Systems for Seismic Response Control", CRC Press.
- [04]: Bondonet G. (1997), "Elaboration d'un isolateur à la base original Pour les ponts et viaducs au CANADA", Université de Montréal, Canada.
- [05]: Etienne J. (2005), "Les nouvelles technologies du bâtiment au Japon", Ambassade de France au Japon, Service pour la Science et la Technologie.
- [06]: Zacek. M. (1996), "Construire parasismique ", Editions Parenthèses.
- [07]: Al-Hussaini T.M., Zayas V.A., Constantinou M.C. (1994), "Seismic Isolation of Multi-Story Frame Structures Using Spherical Sliding Isolation Systems" Technical Report NCEER-94-0007, University of New York at Buffalo.
- [08]: Soong T.T., Constantinou M.C. (1994), "Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering", International Centre For Mechanical Sciences, Springer Verlag, New York.
- [09]: Ben Mekki O. (2007), "Amortissement semi-actif des structures flexible: Application au Contrôle des Grands Ponts" Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France et Università di Roma "Tor Vergata", Italy.
- [10]: Soong T.T., Dargush G.F. (1997), "Passive Energy Dissipation System in Structural Engineering", 1st ed., John Wiley & Sons, Chichester, England.
- [11]: Kelly J. M., Skinner R. I., Heine A.J. (1972), "Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures", Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol. 5, No. 3, pp. 63 - 68.
- [12]: Skinner R.I., Kelly J.M., Heine A.J. (1975), "Hysteresis Dampers for Earthquake-Resistant Structures", Earthquake engineering and Structural Dynamics, Vol. 3, pp. 287 - 296.
- [13]: Diceli M., Milani A. S. (2015), "MARTI and MRSD: Newly Developed Isolation-Damping Devices with Adaptive Hardening for Seismic Protection of Structures", International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering Vol. 9, No. 6, pp. 702-706.

- [14]: Pall A.S., Marsh C. (1982),"Response of Friction Damper Braced Frames", Journal of structural division, ASCE, Vol. 108, No. 6.
- [15]: Aiken I.D., Nims D. K.; Whittaker A. S., Kelly J.M (1993)," Testing of Passive Energy Dissipation Systems", Earthquake Spectra, Vol. 9, No. 3, pp. 335-370.
- [16]: Nims D. K., Richter P. J. ,Bachman R. E. (1993),"The Use of the Energy Dissipating Restraint for Seismic Hazard Mitigation", Earthquake Spectra, Vol. 9, No. 3, pp. 467- 489.
- [17]: FitzGerald T. F., Anagnos T., Goodson M., Zsutty T. (1989),"Slotted Bolted Connections in Aseismic Design for Concentrically Braced Connections", Earthquake Spectra, Vol. 5, No. 2, pp. 383 – 391.
- [18]: Huffmann G.K (1985),"Full Base Isolation for Earthquake Protection by Helical Springs and Viscodampers ", Nuclear Engineering and Design, Vol. 84, pp. 331-338.
- [19]: Beards C.F. (1996)," Structural Vibration: Analysis and Damping", Arnold, London.
- [20]: Tamura Y., Fujii K., Ohtsuki T., Wakahara T., Kohsaka R. (1995), "Effectiveness of tuned liquid dampers under wind excitation", Engineering Structures, Vol.17, No. 9, pp. 609-621.
- [21]: De Silva C. W. (2005)," Vibration and shock handbook", CRC Press.
- [22]: Nishimura I. (1992),"Active Tuned Mass Damper", Journal of Smart Materials and Structures, Vol.1, pp 306-311.
- [23]: Cheng F.Y., (1988)," Response control based on structural optimization and its combination with active protection", in Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, International Association for Earthquake Engineering, Tokyo, Vol. 6, pp. 471-476.
- [24]: Chung L.L., Reinhom A.M., Soong T.T. (1988),"Experiment on Active Control of Seismic Structures," Journal of the Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 114, No. 2, pp. 241-256.
- [25]: Yang G. (2001),"Large-Scale Magnetorheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modeling, Testing and Control", Ph.D dissertation, University of Notre Dame.

- [26]: Symans M.D., Constantinou M.C. (1995), "Development and Experimental Study Of Semi-Active Fluid Damping Devices for Seismic Protection of Structures", Report No. NCEER 95-0011, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York.
- [27]: Soong T.T., Spencer Jr. B.F. (2002), "Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice," *Engineering Structures*, Vol. 24, pp. 243–259.
- [28]: Hrovat D., Barak P., Rabins M. (1983), "Semi-Active Versus Passive or Active Tuned Mass Dampers for Structural Control", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 109, No. 3, pp. 691-705.
- [29]: Yalla S.K, Kareem A.(2002) ," Tuned Liquid Dampers for Controlling Earthquake Response of Structures", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, No. 4, pp. 1037-1039.
- [30]: Kobori T. (1993), "Seismic Response Controlled Structure with Active Variable Stiffness System", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 22, pp. 925-941.
- [31]: Yang J.N., Danielians A., Liu, S.C. (1991), " Aseismic hybrid control systems for building structures", *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 117, No.4, pp. 836-853.
- [32]: Cheng F.Y. ,Jiang H. (1998), "Optimum control of hybrid system for seismic excitations with state observer technique", *Journal of Smart Materials and Structures*, Vol. 9, No. 5, pp. 654-663.
- [33]: Cheng FY ,Jiang H. (1998) ," Hybrid Control of Seismic Structures with Optimal Placement of Control Devices", *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 11, No. 2,pp. 52 - 58.
- [34]: Kelly J. M. (1986), " A seismic base isolation: review and bibliography ", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 5, No. 3, pp. 202-216.
- [35]: Jangid R. S., Datta T. K. (1995), "Performance of base isolation systems for asymmetric building subject to random excitation ", *Engineering Structures*, Vol. 17, No. 6, pp. 443-454.
- [36]: Kelly J. M. (1997), " Earthquake-Resistant Design with Rubber ", Springer-Verlag, London
- [37]: Naeim F., Kelly J. M. (1999), " Design of seismic isolated structures from theory to practice", John Wiley & Sons, New York.

- [38]: Zhang R. (2000), " Seismic Isolation and Supplemental Energy Dissipation ", Bridge Engineering Handbook, Chapter 41, CRC Press.
- [39]: Tan R.Y., Huang M.C. (2000), "System identification of a bridge with lead-rubber bearings ", Computers and Structures, Vol.74, pp. 267-280.
- [40]: Kunde M.C., Jangid R.S. (2003), "Seismic behavior of isolated bridges: A-state-of-the-art review ", Electronic Journal of Structural Engineering, Vol. 3, pp. 140-170.
- [41]: Jangid R. S. (2005), "Optimum friction pendulum system for near-fault motions", Engineering Structures, Vol. 27, pp. 349-359.
- [42]: Jangid R.S. (2007), "Optimum lead-rubber isolation bearings for near-fault motions ", Engineering Structures, Vol. 29, pp. 2503-2513.
- [43]: Taylor D., Constantinou M.C. (1995), "Testing Procedures for High Output Fluid Viscous Dampers used in Building and Bridge Structures to Dissipate Seismic Energy", Shock and Vibration, Vol. 2, No. 5, pp. 373-381.
- [44]: Infanti S., Kang H.T., Castellano M.G. (2004), "Retrofit of Bridges in Korea using Viscous Damper Technology", 13th World Conference on Earthquake Engineering.
- [45]: Saha P., Jangid R. S. (2009), " Seismic control of benchmark cable-stayed bridge using passive hybrid systems", The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering, Vol. 2, No. 1, pp. 1-16.
- [46]: WU F., Zhang Qingkai F.B. & Qiu J. (2016) "Research on the aseismic Behavior of Long-Span Cable-Stayed Bridge with Damping Effect", The Civil Engineering Journal.
- [47]: Park K.S., Jung H. J., Lee I. W. (2002), "A comparative study on aseismic performances of base isolation systems for multi-span continuous bridge", Engineering Structures, Vol.24, pp. 1001–1013.
- [48]: Matsagar V.A. , Jangid R.S.(2003), " Seismic response of base-isolated structures during impact with adjacent structures", Engineering Structures, Vol.25, No.10, pp. 1311–1323.
- [49] : Kausel E., Whitman R.V., Murray J.P. et Elsabee F. (1978), " The Spring Method for Embedded Foundations", Nuclear Engineering and Design, Vol. 48, pp. 377-392.
- [50]: Peker A. (1984), " Dynamique des sols", Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France.

- [51]: Wolf J. (1985), " Dynamic soil-structure interaction", Prentice Hall, Inc.
- [52]: Vlassis A. G., Spyrakos C. C. (2001), " Seismically isolated bridge piers on shallow soil stratum with soil-structure interaction", Computers and structures, Vol. 79, No. 32, pp. 2847-2861.
- [53]: Tongaonkar N.P., Jangid R.S. (2003), "Seismic response of isolated bridges with soil-structure interaction", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.23, pp.287-302.
- [54]: Spyrakos C.C, Vlassis A. G., (2002), "Effect of Soil-Structure Interaction on Seismically Isolated Bridges", Journal of Earthquake Engineering, Vol. 6, No. 3, pp. 391-429.
- [55]: Spyrakos C.C, Koutromanos I.A. et Maniatakis Ch.A. (2009), " Seismic response of base-isolated buildings including soil-structure interaction", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.29, pp.658-668.
- [56]: Spyrakos C.C, Maniatakis Ch.A. & Koutromanos I.A. (2009), "Soil–structure interaction effects on base-isolated buildings founded on soil stratum", Engineering Structures, Vol.31, pp.729-737.
- [57]: Olmos B.A., Jara J.M., Roesset J.M. (2011) , " Effects of isolation on the seismic response of bridges designed for two different soil types", Bull Earthquake Eng, Vol. 9, pp. 641-656.
- [58]: Stehmeyer E. H., Rizos D.C. (2008), " Considering dynamic soil structure interaction (SSI) effects on seismic isolation retrofit efficiency and the importance of natural frequency ratio", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 28, pp. 468-479.
- [59]: Farghaly A.A., Ahmed H.H. (2013), " Contribution of soil-structure interaction to seismic response of buildings", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 17, pp. 959-971.
- [60]: Peker A. (2007), " Advanced Earthquake Engineering Analysis ", International Centre for Mechanical Sciences, Courses and lectures, No 494.
- [61]: Hall W.S., Oliveto G. (2003), " Boundary element methods for soil-structure interaction", Springer Science & Business Media.
- [62]: Zhang C., Wolf J.P. (1998), " Dynamic Soil-Structure Interaction: Developments in Geotechnical Engineering, 83", ELSEVIER.