

Influence of the combined system FPS isolator with viscous fluid damper on the dynamic response of the isolated bridges

Influence du système combiné isolateur FPS avec amortisseur à fluide visqueux sur la réponse dynamique des ponts isolés

Mohamed-Zohair Kaab^{1,2✉}, Abdelhafid Ounis¹

1 Université d'El-oued, BP 789, Algérie

2 Laboratoire LARGHYDE, Université de Biskra, BP 145, Algérie

Received 29 September 2016

Revised 12 December 2016

Accepted 20 April 2017

Published online: 27 Jun 2017

Keywords

Seismic isolation

Bridge

FPS isolation system

Viscous fluid damper

Seismic response

Abstract: To illustrate the effect of the combined system FPS isolator (*Fiction Pendulum System*) with viscous fluid damper on the seismic response of the isolated bridges, a comparative study was realised on a bridge in three different situations. In first situation, we consider the bridge without seismic isolation, while in the second and the third situation, the bridge is successively equipped with a system of FPS isolator then with a combined system FPS isolator and viscous fluid damper. The analysis was done using the digital program of dynamic analysis of the structures SAP2000 and this study consists in comparing the responses of the bridge in terms of baseshear, displacement, acceleration and absorbed energy. The results show that the incorporation of a damping device with viscous fluid damper to the isolator allows to dissipate the maximum of energy, to control the deformations which are located at the level of the isolator and to realize a satisfying compromise between the reduction of the seismic forces and the increase of the deformations in the seismic isolation.

© 2017 The authors. Published by the Faculty of Sciences & Technology, University of Biskra. This is an open access article under the CC BY license.

Résumé : Pour illustrer l'effet du système combiné isolateur FPS (*Friction Pendulum System*) 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 puis d'un système combiné isolateur FPS avec amortisseur à fluide visqueux. L'analyse a été faite à l'aide du 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. Les résultats montrent que l'incorporation d'un dispositif d'amortissement à fluide visqueux avec l'isolateur FPS permet de dissiper le maximum d'énergie, de contrôler les déformations qui sont localisées au niveau de ce dernier et réaliser un compromis satisfaisant entre la réduction des forces sismiques et l'accroissement des déformations dans l'isolateur parasismique.

Mots clés : Isolation parasismique ; Pont ; Système d'isolation FPS ; Amortisseur à fluide visqueux ; Réponse sismique.

1. Introduction

Après les tremblements de terre de LomaPrieta 1989, Northridge 1994 et Kobe 1995, les règles parasismiques des ponts ont été améliorées, surtout dans les régions à forte séismicité à cause des effondrements des structures des ponts malgré leur conformité aux normes de conception précédentes (Naeim et Kelly 1999).

Les systèmes d'isolation parasismique sont connus déjà depuis un certain temps et 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 ; Kunde et Jangid 2003). 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 (Zhang 2000).

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 (Soong et Constantinou 1994). Dans les années 80, des efforts importants ont été fournis 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 (Soong et Dargush 1997 ; Soong et Spencer 2002).

Plusieurs études ont été effectuées pour évaluer l'effet des systèmes d'isolation sur la réponse dynamique des structures et des ponts comme les études réalisées par (Jangid 2005 ; Panchal et Jangid 2008) qui montrent l'effet des systèmes d'isolation FPS sur le comportement des structures isolées suite à un séisme. Elles montrent également qu'il existe une valeur particulière du coefficient de frottement pour lequel les accélérations atteignent

✉ Corresponding author. E-mail address: kaab-mohamed-zohair@univ-eloued.dz

une valeur minimale sous une excitation sismique de source proche.

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.

La présente étude tente d'illustrer les effets du système combiné isolateur FPS avec amortisseur à fluide visqueux sur les réponses des ponts isolés avec une analyse comparative de la réponse du pont isolé (FPS, FPS+amortisseur à fluide visqueux) et celles du même pont sans isolation parasismique. Cette analyse a été faite à l'aide du 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 (CSI 2009).

2. Comportement du système d'isolation FPS

L'isolateur FPS constitué de rotule glissante se déplace le long de la surface sphérique concave en acier inoxydable et 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.

Le glissement des interfaces confère à ce dispositif un comportement frottant important. Ce comportement frottant peut être représenté par l'approximation bilinéaire illustrée à la Figure 1.

Les paramètres de l'approximation bilinéaire exprimant le comportement frottant sont les suivants (Naeim et Kelly 1999) :

W : La charge verticale transmise par l'isolateur,

R : Le rayon de la surface de glissement sphérique,

μ : Le coefficient de frottement dynamique.

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

$$K_{eff} = \frac{W}{R} + \frac{\mu W}{D} \quad (1)$$

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

$$W_D = 4\mu WD \quad (2)$$

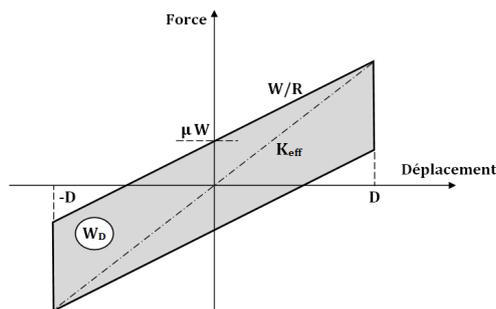


Fig.1. Comportement frottant exprimé en force-déplacement.

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

$$\beta_{eff} = \frac{W_D}{2\pi K_{eff} D^2} \quad (3)$$

3. Amortisseur à fluide visqueux

Ces amortisseurs peuvent dissiper l'énergie des vibrations par une force de résistance proportionnelle à la vitesse appliquée. Cette force est nulle quand le déplacement est maximal. Ce comportement visqueux peut être représenté par la relation force-déplacement d'un amortisseur à fluide visqueux comme le montre la figure 2.

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

$$F_D = C_D \cdot |\dot{u}|^\alpha \text{sgn}(\dot{u}) \quad (4)$$

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

$$W_D = \int F_D du \quad (5)$$

où : 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 $\text{sgn}(\dot{u})$ 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 Constantinou 1994). La présente étude est consacrée uniquement au cas de l'amortisseur à fluide visqueux linéaire.

4. Présentation de l'ouvrage

L'ouvrage utilisé dans cette étude est un pont en béton armé à 3 travées de 22m de portée chacune. Le tablier a une épaisseur de 0.25m, une longueur de 66m et une largeur de 10m ; il est composé de 6 poutres en béton précontraint de 1.2m de hauteur. Le pont est représenté sur la figure 3. 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.

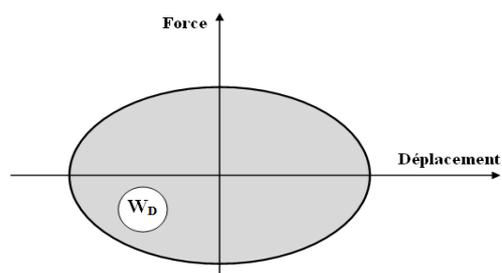


Fig.2. Comportement visqueux exprimé en force-déplacement (Soong et Constantinou 1994).

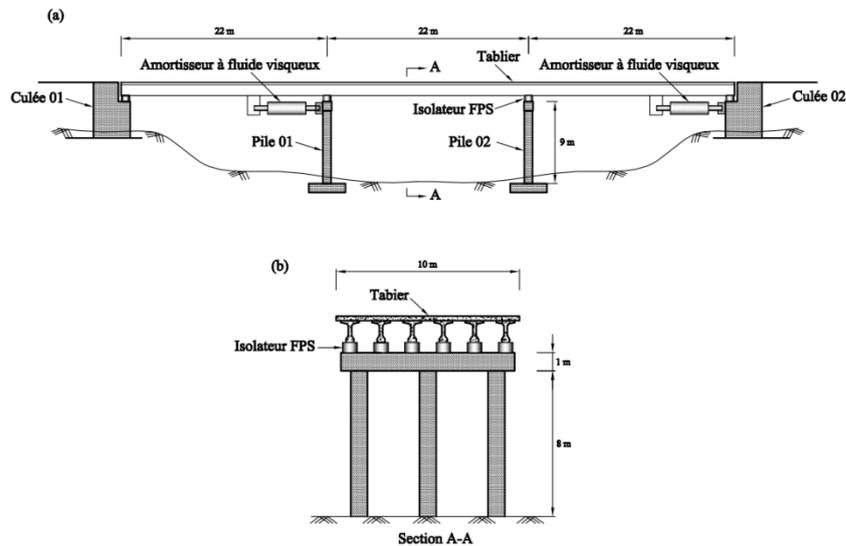


Fig.3. Pont équipé d'un système combiné isolateur FPS avec amortisseur à fluide visqueux : (a) Vue en élévation avec trois travées et l'emplacement de l'amortisseur à fluide visqueux.(b) Schéma de la pile, l'emplacement de l'isolateur et le tablier

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 accélérogrammes est utilisée pour les trois cas de pont (sans isolation parasismique, avec isolateur FPS et isolateur FPS+amortisseur à fluide visqueux). Quatre chargements sismiques ont été considérés avec leurs accélérations maximales du sol (Peak Ground Accélération) PGA comme suit :

- La composante de Hollister du séisme de LomaPrieta, en 1989, avec PGA de 0,369g ;

- La composante de Petrolia du séisme de Petrolia, en 1992, avec PGA de 0,662g ;
- La composante de Newhall-Firedu séisme de Northridge, en 1994, avec PGA de 0,589g ;
- La composante de CHY080 du séisme de Chi-Chi, en 1999, avec PGA de 0,902g.

Les accélérations de ces excitations sont représentées respectivement sur la figure 4.

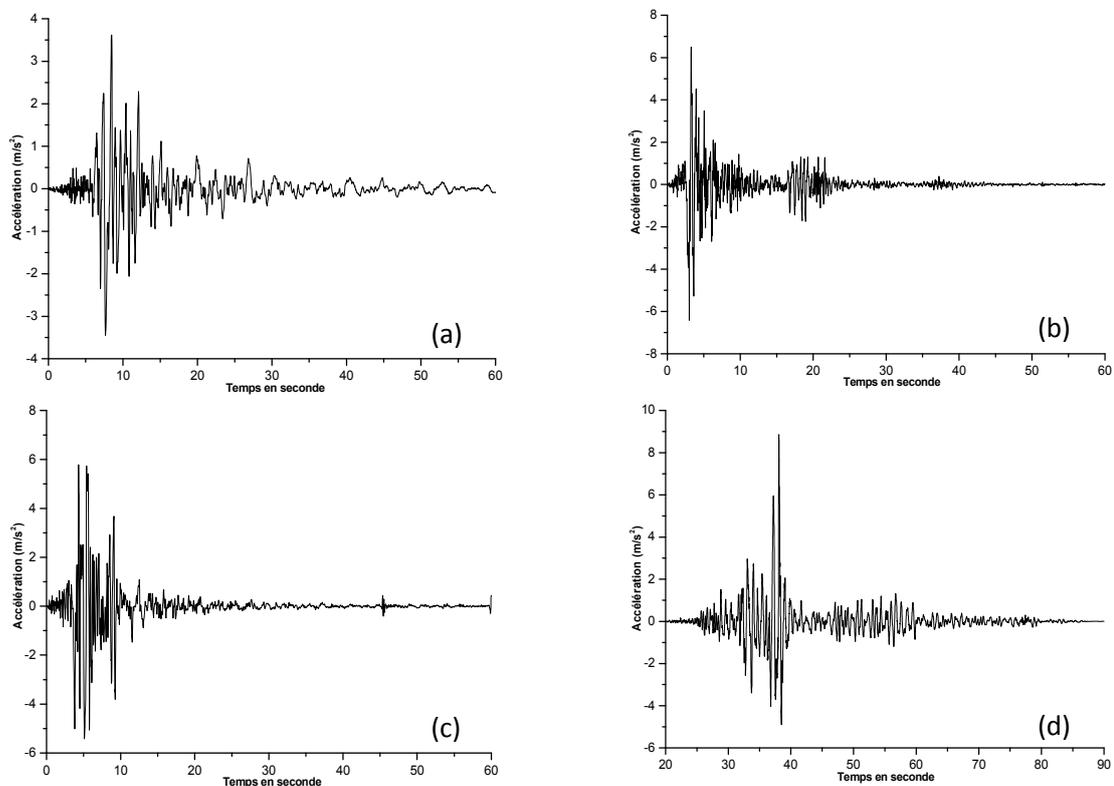


Fig. 4. Accélérations des excitations sismiques considérées : (a) Composante de Hollister du séisme de LomaPrieta en 1989 ; (b) Composante de Petrolia du séisme de Petrolia en 1992 ; (c) Composante Newhall-Fire du séisme de Northridge en 1994 ; (d) Composante de CHY080 du séisme de Chi-Chi en 1999 (CSI 2009).

5. Résultats et analyses

5.1. Les efforts tranchants

L'analyse 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 sur la figure 5.

Les résultats de cette analyse, pour les quatre excitations sismiques utilisées, sont présentés dans le tableau 1. D'après les résultats de cette analyse, nous constatons que le système d'isolation parasismique FPS réduit de manière significative les efforts tranchants à la base de la pile jusqu'à 90%. Nous constatons aussi que le couplage des dispositifs FPS + amortisseur à fluide visqueux permet de réduire au maximum les efforts tranchants pour les quatre chargements sismiques utilisés.

Tableau 1. Efforts tranchants à la base ainsi que les déplacements maximaux et les accélérations maximales du tablier au niveau de la pile 01 pour les trois cas de pont considérés.

Excitation sismique	Pont sans isolation	Pont isolé FPS	Pont isolé FPS + Amort VF	FPS (%)	FPS + Amort VF (%)
Efforts tranchants (kN)					
LomaPrieta	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
Déplacements maximaux (m)					
LomaPrieta	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
Accélérations maximales (m/s²)					
LomaPrieta	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

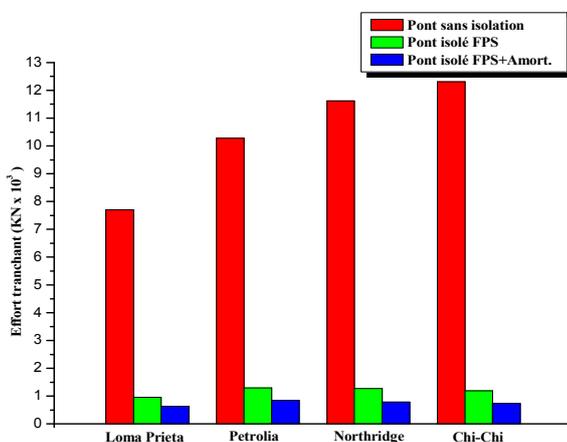


Fig. 5. Efforts tranchants à la base pour les trois cas étudiés de ponts pour les quatre chargements sismiques utilisés.

5.2. Déplacements et accélérations

L'analyse dynamique effectuée pour les trois cas de pont nous a permis de comparer les résultats des déplacements et des accélérations du tablier au niveau de la pile 1 dans les trois cas de pont pour les quatre chargements sismiques utilisés. Ces résultats sont représentés sur les figures 6 et 7.

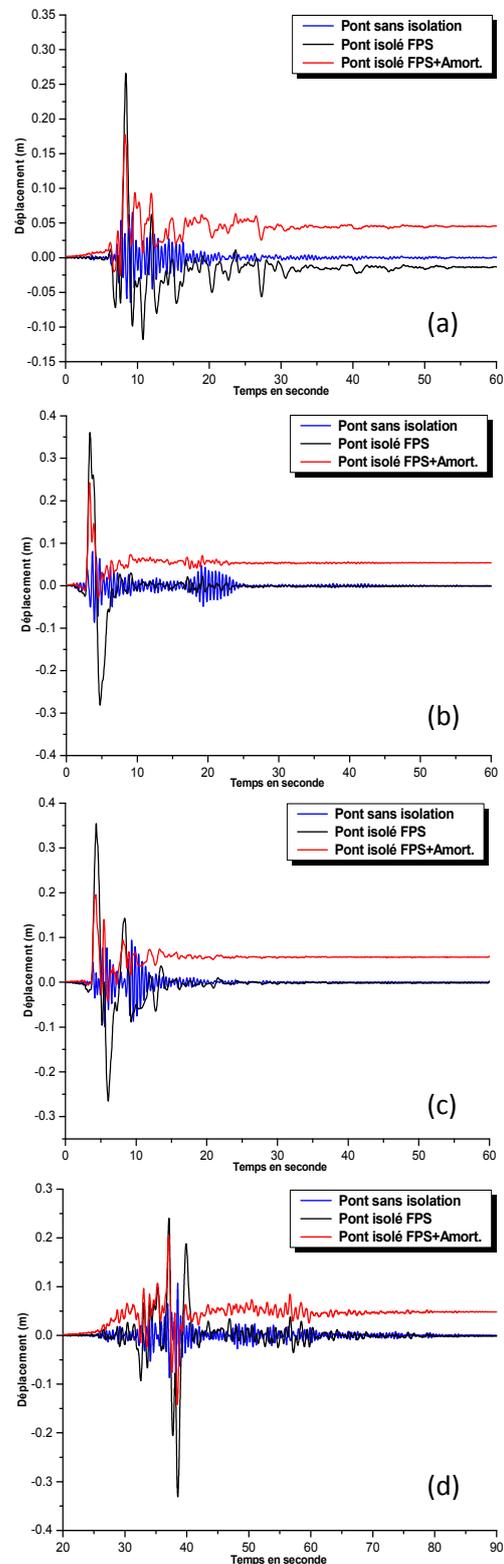


Fig. 6. Déplacements du tablier pour le séisme de : (a) LomaPrieta ; (b) Petrolia ; (c) Northridge ; (d) Chi-Chi.

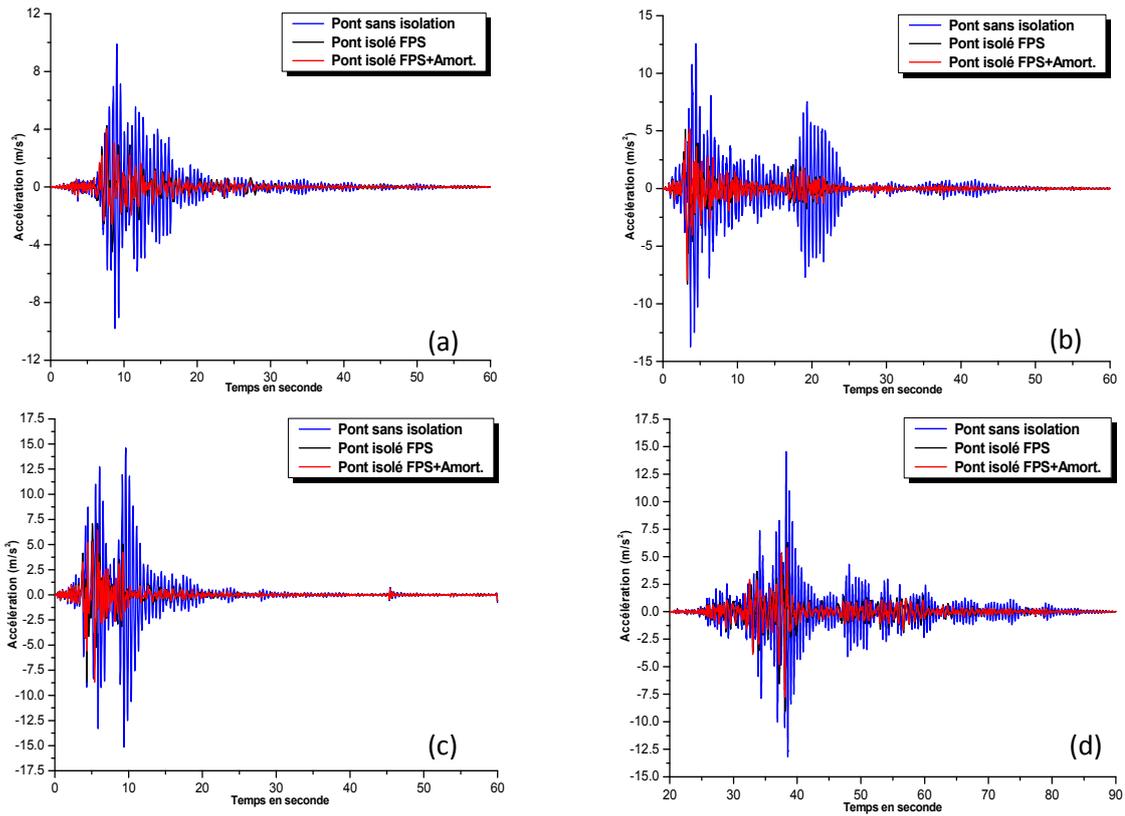


Fig. 7. Accélérations du tablier pour le séisme de : (a) LomaPrieta ; (b) Petrolia ; (c) Northridge ; (d) Chi-Chi.

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 le tableau 1.

Les figures 6 et 7 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 de pont isolé 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 de réduction des accélérations maximales du tablier dans le pont composé des isolateurs FPS et des amortisseurs à fluide visqueux par rapport au pont isolé avec FPS comme il est montré dans le tableau 1. Ce comportement est traduit par la limitation des dommages subis par le pont après un séisme.

5.3 Energie absorbée

Les résultats de l'analyse comparative entre l'énergie sismique entrée et les énergies absorbées pour les excitations sismiques considérées sont donnés aux tableaux 2 et 3 suivant deux configurations : i) comparaison entre l'énergie sismique entrée et les énergies absorbées par le système FPS, ii) comparaison entre l'énergie sismique entrée et les énergies absorbées par le pont équipé d'isolateurs FPS avec amortisseurs à fluide visqueux.

Les figures 8 à 10 illustrent les diagrammes des énergies absorbées par le pont sans isolation parasismique, le pont à isolateurs FPS et le pont à isolateurs FPS combiné avec les amortisseurs à fluide visqueux pour les quatre excitations sismiques considérées. L'analyse de ces résultats montre l'efficacité du système d'isolation qui a dissipé l'énergie sismique entrée et a empêché son transfert à la superstructure avec un pourcentage d'absorption pouvant atteindre 77,08%, comme il est donné dans le tableau 2. Cette comparaison montre aussi l'importance de l'ajout des amortisseurs à fluide visqueux dans la dissipation de l'énergie dont l'effet est bien montré dans le cas du pont composé d'isolateurs FPS avec 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 3.

Tableau 2. Energies absorbées par le système d'isolation FPS.

Excitation sismique	Energies	Pont isolé FPS (kN.m)	Energie absorbée (%)
LomaPrieta	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	

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 aux répliques sismiques.

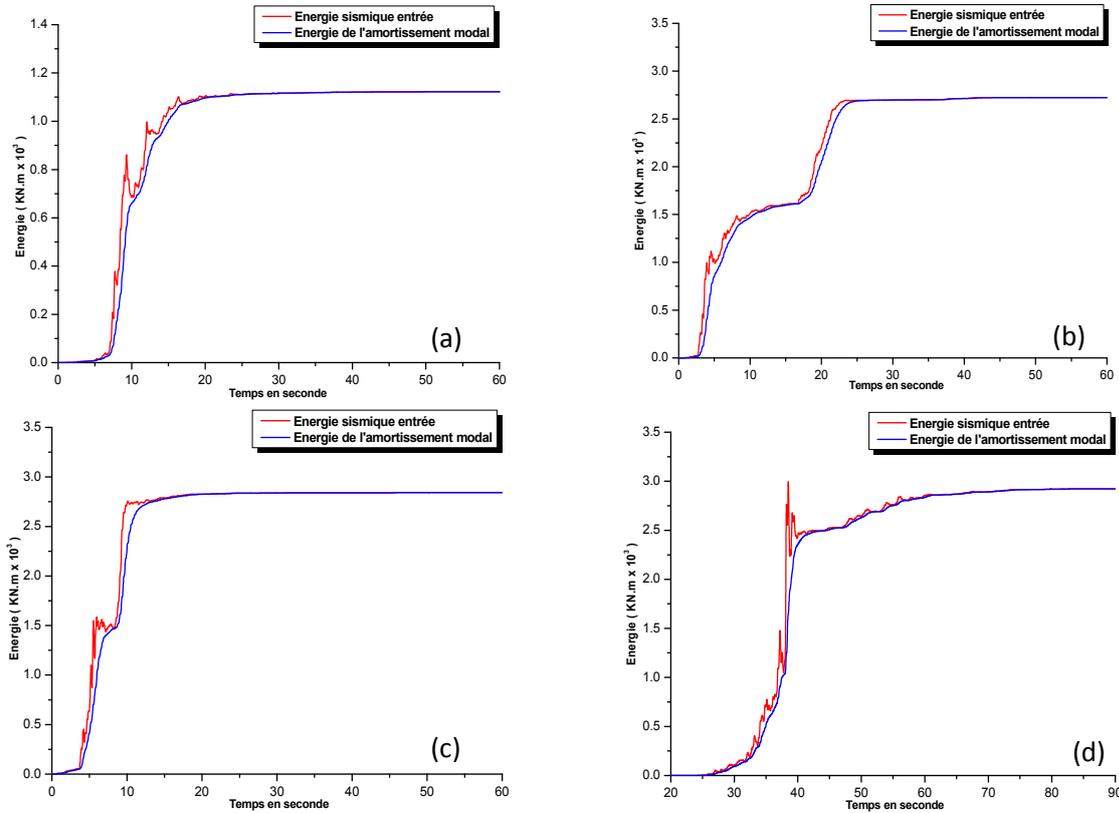


Fig. 8. Energies absorbées par le pont sans isolation parasismique pour le séisme de : (a) LomaPrieta ; (b) Petrolia ; (c) Northridge ; (d) Chi-Chi.

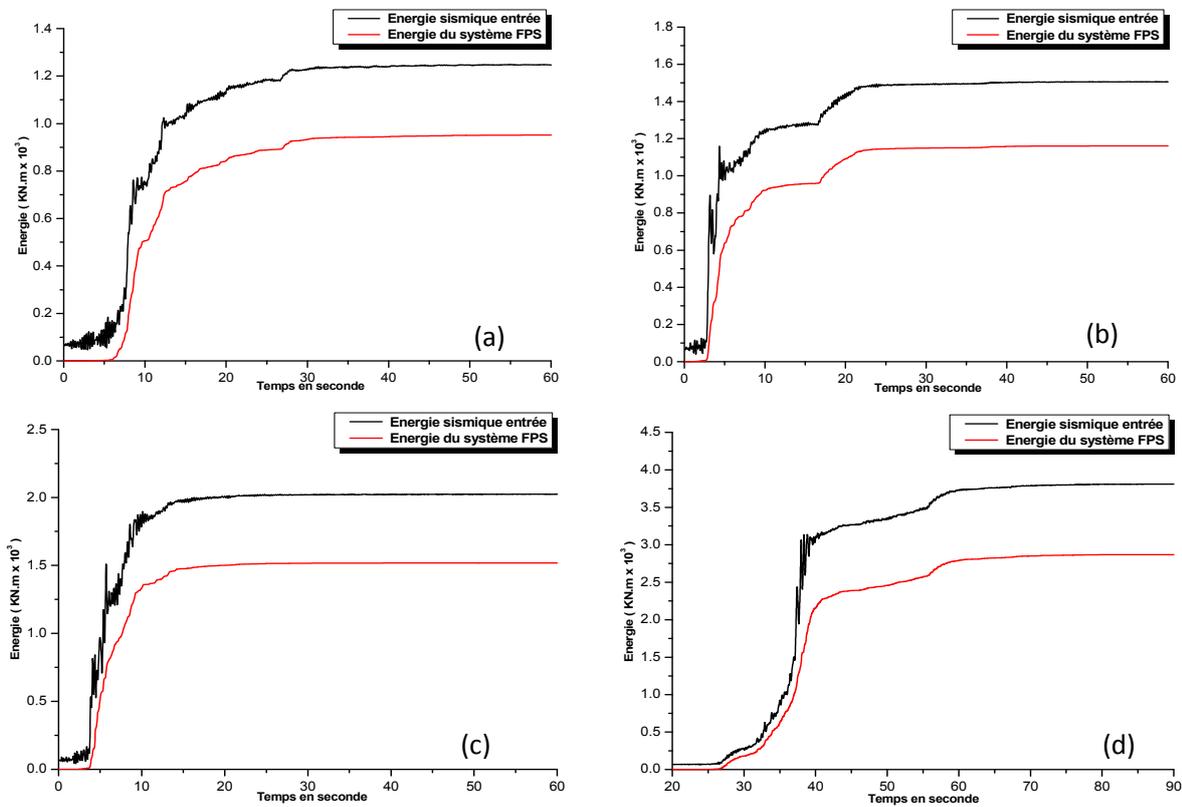


Fig. 9. Energies absorbées par l'isolateur FPS pour le séisme de : (a) LomaPrieta ; (b) Petrolia ; (c) Northridge ; (d) Chi-Chi.

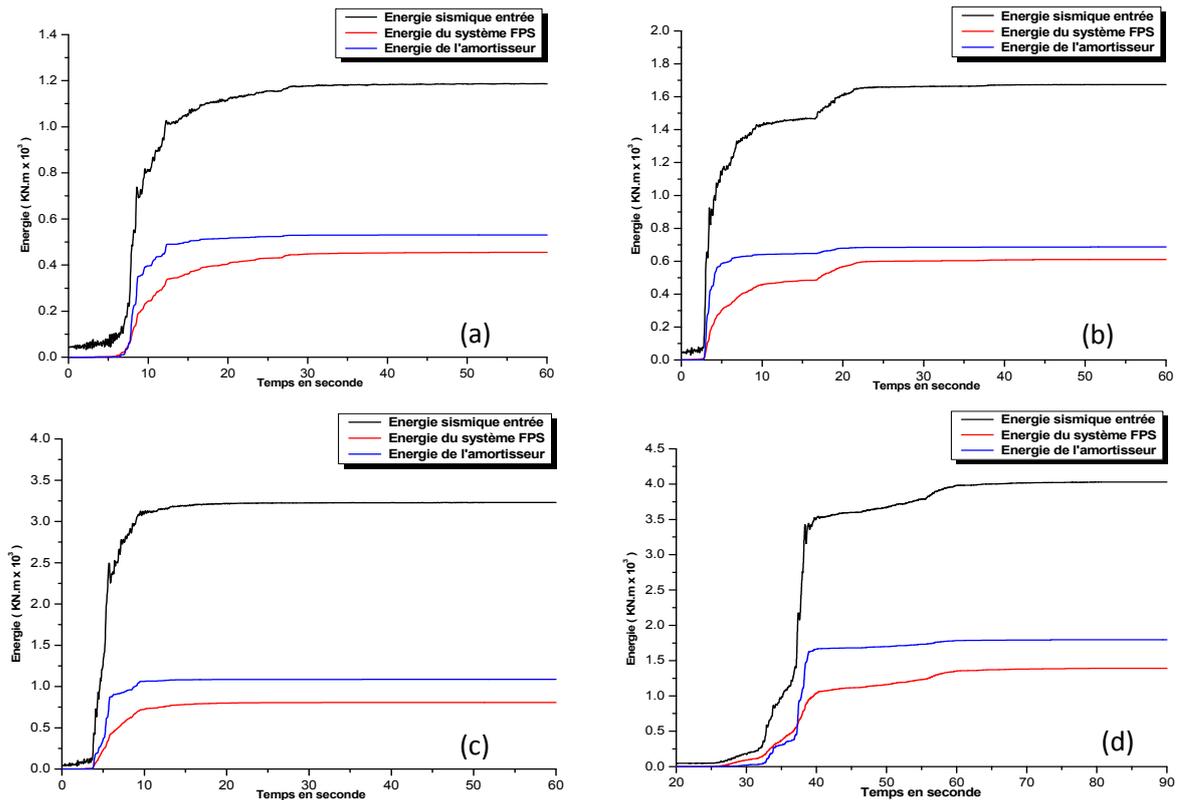


Fig. 10. Energies absorbées par l'isolateur FPS et l'amortisseur visqueux pour le séisme de : (a) LomaPrieta ; (b) Petrolia ; (c) Northridge ; (d) Chi-Chi.

Tableau 3. Energies absorbées par le système combiné FPS+amortisseur visqueux

Excitation sismique	Energies	Pont isolé FPS+Amort. VF (kN.m)	Energie absorbée (%)		
			FPS	Amort.	FPS+ Amort VF.
LomaPrieta	SE*	1187,08			
	SI*	455,22	38,35	44,75	83,10
	AV*	531,19			
Petrolia	SE*	1674,45			
	SI*	609,94	36,43	41,04	77,47
	AV*	687,16			
Northridge	SE*	3230,02			
	SI*	807,04	24,99	33,65	58,64
	AV*	1087,06			
Chi-Chi	SE*	4030,07			
	SI*	1390,81	34,51	44,55	79,06
	AV*	1795,35			

* SE: Sismique entrée; SI: Système d'isolation; AV: Amortisseur visqueux

6. Conclusions

Une étude comparative de l'influence du système d'isolation parasismique FPS et le système combiné isolateur FPS, avec amortisseur à fluide visqueux, est effectué en considérant la réponse dynamique d'un pont isolé sans et avec isolation parasismique. Les résultats de la réponse sismique obtenus ont permis de déduire que le système d'isolation parasismique FPS réduit les efforts tranchants à la base de manière significative (jusqu'à 90%). Une augmentation de la réduction des efforts tranchants à la base est également constatée. Cette dernière 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 du 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. Ce type d'isolation a permis également de 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'importance de l'apport des amortisseurs à fluide visqueux dans la dissipation de l'énergie.

Références

- Al-Hussaini, T.M., V.A. Zayas, M.C. Constantinou (1994) Seismic isolation of multi-story frame structures using spherical sliding isolation systems. Technical Report NCEER-94-0007, State University of New York.
- CSI Computers and Structures Inc. (2009) Bridge Seismic Design, Automated Seismic Design of Bridges AASHTO Guide Specification for LRFD Seismic Bridge Design. Berkeley.
- Jangid, R.S. (2005) Optimum friction pendulum system for near-fault motions. Engineering Structures 27(3): 349-359.
- Jangid, R.S., T.K. Datta (1995) Performance of base isolation systems for asymmetric building subject to random excitation. Engineering structures 17(6): 443-454.

- Kunde, M.C., R.S. Jangid (2003) Seismic behavior of isolated bridges: A state-of-the-art review. *Electronic Journal of Structural Engineering* 3(2): 140-169.
- Kelly, J.M. (1986) A seismic base isolation: review and bibliography. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 5(4):202-216.
- Kelly, J.M. (1997) *Earthquake-Resistant Design with Rubber*. 2nd edition, Springer, New York.
- Naeim, F., J.M. Kelly (1999) *Design of seismic isolated structures: from theory to practice*. Wiley, Chichester, England.
- Panchal, V.R., R.S. Jangid (2008) Variable friction pendulum system for seismic isolation of liquid storage tanks. *Nuclear Engineering and Design* 238(6): 1304-1315.
- Soong, T.T., M.C. Constantinou (1994) *Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering*. International Centre for Mechanical Sciences, Springer, New York.
- Soong, T.T., G.F. Dargush (1997) *Passive Energy Dissipation System in Structural Engineering*. Wiley, New York.
- Soong, T.T., B.F. Spencer (2002) Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice. *Engineering Structures* 24(3): 243-259.
- Zhang, R. (1999) Seismic isolation and supplemental energy dissipation. In: W.F. Chen and L. Duan (Eds.), *Bridge Engineering Handbook*, CRC Press, Boca Raton.