

PERFORMANCE SISMIQUE DES SYSTÈMES D'ISOLATION DANS LE COMPOURTEMENT DYNAMIQUE D'UN PONT CAISSON TYPE: SEISMIC PERFORMANCE OF ISOLATION BEARING DEVICES IN DYNAMIC BEHAVIOR OF TYPICAL BOX GIRDER BRIDGE:

Réception : 10/05/2021

Acceptation : 12/10/2021

Publication : 05/01/2022

OUANANI Mouloud¹, SANDJAK Khaled², KHELAFI Abdelouhab Mourad³¹Université de Djelfa, Faculté des Sciences et de la Technologie, Djelfa, ALGERIE- mouloud.ouanani@g.enp.edu.dz ; m.ouanani@univ-djelfa.dz²Département de Génie Civil, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université M'Hamed Bougara, 35000, Boumerdès, ALGERIE- k.sandjak@univ-boumerdes.dz³Université de Djelfa, Faculté des Sciences et de la Technologie, Djelfa, ALGERIE- a.khellafi@univ-djelfa.dz

Résumé - Les ponts routiers fournissent des liens d'urgence pendant les tremblements de terre et leur fonctionnement est essentiel après un séisme. Ainsi, il est d'une importance cruciale d'être en mesure de prévoir une conception parasismique et d'établir un dimensionnement rationnel sous un séisme sévère. Dans la présente étude, trois systèmes d'isolation sismique en élastomères frettés sont examinés en vue d'illustrer leurs performances dans le comportement dynamique tridimensionnel des ponts caissons à inertie variable et les particularités de leurs modélisations. Dans ce travail, les dispositifs d'appui de dissipation d'énergie, tels qu'appareils d'appuis classiques en néoprènes frettés (NRB), appareils d'appuis en néoprènes frettés à amortissement élevé (HDRB) et appareils d'appuis en néoprènes frettés avec un noyau en plomb (LRB) sont considérés pour une meilleure conception parasismique performante et un dimensionnement rationnel de cette catégorie particulière de structures de ponts. Pour les besoins de l'étude, un modèle numérique 3-D par éléments finis d'un pont typique est développé à cet effet. L'analyse dynamique non linéaire est effectuée en utilisant des modèles de comportements hystérétiques bilinéaires des isolateurs antisismiques. Les résultats indiquent, entre autres, que les isolateurs ont un effet significatif sur la réponse sismique dans la direction longitudinale et peuvent réduire efficacement la demande sismique dans les structures de pont.

Mots - clés : Ponts routiers, Conception parasismique, Systèmes d'isolation sismique, Éléments finis, Analyse dynamique non linéaire

Abstract- Highway bridges provide emergency links during earthquakes and their operation is essential after an earthquake. Thus, it is of crucial importance to be able to predict an earthquake-resistant design and to establish a rational dimensioning under a severe earthquake. In the present study, three seismic isolation systems in rubber bearing devices are examined in order to illustrate their 3-D seismic performance of variable inertia box bridges and the particularities of their models. In this work, energy-dissipating bearings, such as a Normal Rubber Bearing (NRB), High Damping Rubber Bearing (HDRB) and Lead Rubber Bearing (LRB) are considered for better earthquake-resistant design and rational sizing of this particular category of bridge structures. For the purposes of the study, a 3-D finite element model of a typical bridge is developed. Nonlinear dynamic analysis is performed using bilinear hysteretic behavior models of earthquake isolators. The results indicate, among other, that isolators have a significant effect on the seismic response in the longitudinal direction and can effectively reduce the seismic demand in bridge structures.

Keywords: Highway bridges, Earthquake-resistant design, seismic isolation systems, Finite element model, Nonlinear dynamic analysis.

1- Introduction

La construction des ponts par encorbellements successifs a connu un essor considérable sous l'impulsion sans cesse croissante des maîtres d'ouvrage confrontés à la nécessité de franchir des portées de plus en plus importantes d'une part et du développement rapide des techniques de construction d'autre part.

En Algérie où les besoins en infrastructures routières sont très importants, les ponts vousoirs à inertie variable, de par leur aspect esthétique et leur coût compétitif, continuent de jouir d'une évolution croissante. Les facteurs ayant permis un développement rapide de ces derniers sont multiples : maîtrise du procédé de construction par encorbellements, nécessité de franchissement de portées plus importantes, efficacité de la technique et facilité d'entretien, entre autres.

Malheureusement, les effondrements spectaculaires de cette classe particulière de ponts ont été observés dans plusieurs événements de tremblements de terre sévères Réfs. [1 - 5] qui ont corroboré leur vulnérabilité quand leurs piles sont directement encastrées dans leurs tabliers. En outre, les techniques de conception parasismique sont basées sur une philosophie de construction que la sécurité de l'ouvrage doit être assurée après un séisme majeure et en vue de garantir une bonne conception parasismique, la structure doit avoir une résistance suffisante, une ductilité adéquate et une rigidité appropriée afin de maintenir l'intégrité structurale et d'assurer une fonctionnalité de l'ouvrage après un séisme.

Dans ce contexte, une technologie de design des structures de ponts qui consiste à découpler les mouvements de leurs superstructures à ceux de leurs appuis en introduisant des dispositifs d'appui parasismiques dans le but de réduire l'accélération spectrale de conception et par conséquent les forces inertielles et la fréquence fondamentale de vibration qui doit être inférieures à des fréquences du chargement sismique contenant une énergie prédominante. L'intérêt pour cette nouvelle technologie d'isolation sismique du pont est grandement justifié par l'aspect économique permettant de

réaliser des économies sur le coût de la construction de l'ouvrage en plus de présenter un avantage indéniable à long terme étant donné qu'elle préserve la fonctionnalité de l'ouvrage après séisme et élimine le coût de reconstruction.

Le concept d'isolation parasismique d'une structure par l'intermédiaire d'un dispositif d'appui remonte au début du 20^{ème} siècle Réf. [6 & 7] et la première proposition retenue pour isoler sismiquement une structure a été suggérée au Japon. C'est seulement au cours des dernières décennies que l'isolement sismique a été proposé comme une méthode de protection sismique des structures les Réfs. [7-10] ont étudié la réponse sismique d'un pont isostatique idéalisé avec un modèle simplifié en éléments finis 2D avec divers dispositifs d'isolation parasismique mis en œuvre et les aspects de la recherche future dans le domaine de l'isolation des ponts.

Plusieurs études expérimentales et numériques ont été effectuées pour évaluer l'effet des systèmes d'isolation sismiques sur la réponse dynamique des ponts, Réfs. [11-14]. En particulier des études analytiques réalisées par Li *et al.*, Réf. [15] qui ont présenté un état de l'art de la conception des ponts isolés isostatiques en utilisant la méthode des énergies balancées. Les auteurs de la Réf. [16] ont mis en évidence l'influence du système d'isolation LRB sur la réduction de la réponse sismique des ponts isolés. Ces derniers ont montré dans leurs investigations que ce système de protection sismique est très efficace et plus performant que les appareils d'appui en élastomères frettés de types NRB et HDRB d'une part et que la capacité importante de dissipation d'énergie de l'isolateur LRB est due essentiellement aux déformations cycliques plastiques du noyau en plomb intégré d'autre part.

Par ailleurs, il est également à noter que les dernières évolutions rapides en génie parasismique et des logiciels de calcul en génie civil, ont permis le développement de méthodes de calcul et de modèles de modélisation des dispositifs sismiques dans la perspective de réduire les accélérations sismiques en dessous de 0.12g, Réfs. [17-19].

En Algérie, l'isolation sismique des structures est mal maîtrisée à ce jour et peu

d'études et de réalisations ont été effectuées dans ce domaine en raison de leur coût élevé d'une part et l'absence de compétences dans ce vaste domaine d'autre part, Réfs. [20 & 21].

Dans ce travail, les dispositifs d'appui de dissipation d'énergie, tels que les appareils d'appui classiques en néoprènes frettés (NRB), appareils d'appuis en néoprènes frettés à amortissement élevé (HDRB) et appareils d'appuis en néoprènes frettés avec un noyau en plomb (LRB) sont considérés pour une meilleure conception parasismique et un dimensionnement rationnel de cette catégorie particulière de structures de ponts. Pour les besoins de l'étude, un modèle numérique 3-D par éléments finis d'un pont typique est développé à cet effet. L'analyse dynamique non linéaire est effectuée en utilisant des modèles de comportement hystérétiques bilinéaires des isolateurs antisismiques. Les réponses sismiques sont calculées et discutées en termes de variation temporelle des déplacements et des accélérations à l'endroit des culées et de l'effort de cisaillement à la base des piles ainsi que la quantité d'énergie sismique absorbée par les systèmes d'isolation sismiques NRB, HDRB et LRB.

2- Présentation de l'ouvrage

Le pont de Mascara est considéré comme l'un des premiers ponts construits en ALGERIE par encorbellements successifs, ce dernier était édifié sur le fleuve de Beni-Chograne dans la province de Mascara à l'ouest de l'Algérie vers 1984 par une entreprise de construction anglaise (voir Fig. 1). Le pont est situé dans une région montagneuse caractérisée par une accélération maximale du sol (PGA) égale à 0.33g conformément au Règlement Parasismique des Ouvrages d'Art Réf. [22]. Il s'étend sur une longueur totale de 216m et composé de trois travées continues en Béton Précontraint (BP) dont une travée centrale de portée égale à 100m et deux travées de rive de longueur chacune égale à 58m chacune Fig.2(a).

Le tablier est constitué d'une poutre caisson unicellulaire de largeur 9.50m (y compris les encorbellements) et de hauteur variable (5.95m à l'appui et 2.70m à la clé). La variation des moments d'inertie obéit à la relation type Réf. [23] (Fig. 2(b)).

La section des piles est de type tubulaire, de forme rectangulaire avec des parois de 0.30m d'épaisseur (Fig.2(c)).



Figure 1 : Configuration du pont de référence : pont de Mascara

Figure 1 : Reference Bridge Configuration: Mascara bridge

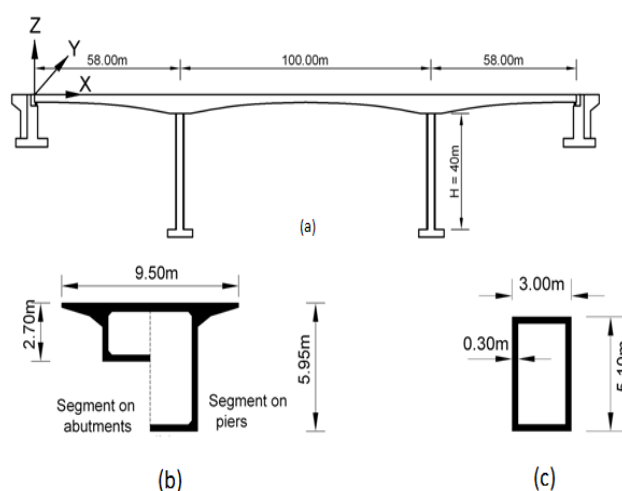


Figure 2 : Description du pont: (a) Vue générale du pont, (b) Sections transversales des voussoirs (c) Section des piles

Figure 2 : Description of Bridge: (a) Elevation of Bridge, (b) Cross-Section of Segments, (c) Cross-Section of Pier

Les extrémités du tablier du pont étudié reposent sur des culées rigides par l'intermédiaire d'une paire d'appui classiques en néoprènes frettés (NRB) par culée. Par contre, le mode de liaison entre le tablier et les piles du pont est rigide, les piles du pont étant encastrees au sol.

3- Modèles analytiques des dispositifs d'isolation antisismiques.

En vue d'évaluer la performance des systèmes de protection anti-sismique, il est nécessaire de bien maîtriser leurs comportements et en particulier le comportement complexe des matériaux dont ils sont composés pour aboutir à une modélisation idoine de ce type de systèmes.

3.1- Systèmes d'isolation en élastomères frettés (NRB et HDRB)

Ils sont constitués de néoprènes qui se composent de minces feuilles de caoutchouc collées sur des plaques minces en acier (frettes). Les feuilles de caoutchouc sont vulcanisées et liées à des plaques minces en acier sous une forte pression. (Cf. Fig. 3).

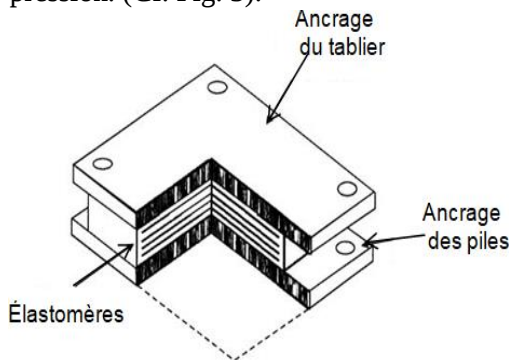


Figure 3 : Dispositif d'appui en néoprènes frettés (NRB et HDRB)

Figure 3 : Normal Rubber Bearing device (NRB and HDRB)

Le dispositif NRB est constitué de néoprènes de faibles propriétés inhérentes d'amortissement de l'ordre de 7%, comparativement au système NRB, les unités HDRB sont conçues d'élastomères modifiés par l'addition des produits spéciaux, tels que le carbone, les résines ou les fillers en vue d'augmenter l'amortissement des élastomères jusqu'à 10 à 20% sans affecter les propriétés mécaniques.

Modèle d'hystérésis des systèmes d'isolation NRB et HDRB

La rigidité effective des isolateurs sismiques est estimée par la relation suivante:

$$K_{eff} = \frac{W}{g} \left(\frac{2\pi}{T_d} \right)^2 \quad (1)$$

où T_d désigne la période d'isolation comprise entre $3T$ et $3sec.$, où T représente la période du pont non sismiquement isolé, W est la charge totale supportée par le système d'isolation Réf. [17-19].

En se référant au spectre de réponse établie par le RPOA 2008 Réf. [22], le déplacement cible de conception parasismique est déduit par l'équation 2:

$$d = \frac{S_a T_d^2}{4\pi^2} \quad (2)$$

où S_a représente la valeur de l'accélération spectral correspondant à la période effective T_d et l'amortissement effective du système d'isolation.

Dans cette étude numérique, les paramètres du modèle hystérétique bi-linéaire de type force – déplacement, tels que la rigidité élastique K_1 , la rigidité post-élastique K_2 et la résistance caractéristique Q des dispositifs antisismiques dans les directions longitudinales et transversales sont évalués en accord avec les Documents Techniques Réglementaires DTR Réfs. [17-19] pour une période cible du pont sismiquement isolé égale à trois fois à celle du pont non isolé. La figure 4, ci-dessous, illustre les caractéristiques des paramètres du modèle hystérétique bi-linéaire de type force-déplacement des dispositifs NRB et HDRB.

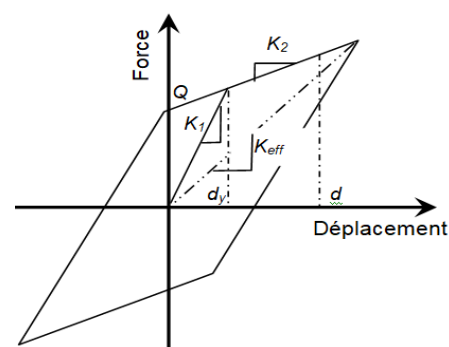


Figure 4 : Modèle hystérétique bi-linéaire de type force-déplacement des dispositifs NRB HDRB

Figure 4 : Bi-linear hysteretic model of the High Damping Rubber Bearing devices NRB and HDRB

La résistance caractéristique (Q) du modèle hystérétique bi-linéaire HDRB est estimée par la relation suivante :

$$Q = \frac{K_2 d^2 \cdot \pi \cdot \xi_{eff}}{(2 - \xi_{eff} \cdot \pi) \cdot d - 2 \cdot d_y} \quad (3)$$

Dans cette relation, d_y désigne typiquement le déplacement qui correspond à la force d'écoulement, en général c'est une quantité a priori inconnue, estimée approximativement de 0.05 à 0.1 fois la hauteur totale des élastomères Réfs. [18].

3.2- Systèmes d'isolation en élastomères frettés à noyau de plomb (LRB)

C'est le système d'isolation sismique le plus utilisé dans la conception parasismique du pont, il est constitué de couches d'élastomères entrelacées par des frettes et un noyau de plomb placé au centre pour dissiper de l'énergie sismique (voir Fig. 5).

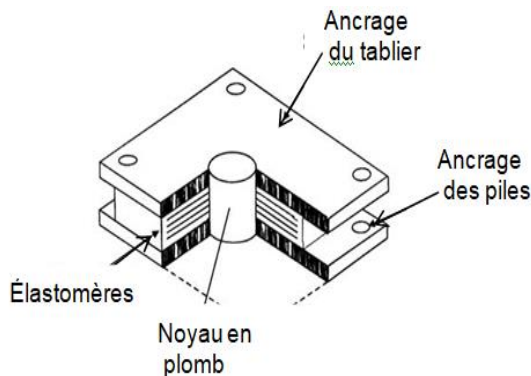


Figure 5 : Dispositif d'appui en élastomères frettés à noyau de plomb (LRB)

Figure 5 : Lead Rubber Bearing device LRB

Modèle d'hystérésis du système d'isolation LRB

Le comportement hystérétique de l'isolateur parasismique LRB est idéalisé par la relation bilinéaire de type force-déplacement et caractérisé par les paramètres suivants Réfs. [21, 24, 25)

$$W_D = 2\pi \cdot K_{eff} \cdot d^2 \cdot \xi_{eff} \quad (4)$$

Où W_D désigne l'énergie de dissipation par cycle.

Le rapport (K_1 / K_2) dépend des caractéristiques physiques de l'isolateur, estimées d'une valeur de 10 par les études expérimentales.

$$\frac{K_1}{K_2} = 10 \quad (5)$$

Pour les besoins de l'étude, un algorithme itératif est établi en vue d'appréhender les paramètres non linéaires du modèle hystérétique de LRB.

Étape 1: Dans cette étape, on néglige d'abord le déplacement d_y correspondant à la force d'écoulement F_y dans la 1^{er} approximation.

Étape 2: Ensuite on calcule la résistance caractéristique Q par la relation suivante :

$$Q = \frac{W_D}{4(d - d_y)} \quad (6)$$

Étape 3 : L'approximation de Q nous permet de calculer la rigidité post-élastique K_2 :

$$K_2 = K_{eff} - \frac{Q}{d} \quad (7)$$

Étape 4: La rigidité élastique (K_1) est déduite de l'équation (5).

Étape 5: A la fin, on recalcule le déplacement élastique d_y :

$$d_y = \frac{Q}{K_1 - K_2} \quad (8)$$

Les étapes de calcul 2. 3. 4 et 5 sont répétées autant de fois jusqu'à la convergence du déplacement d_y .

Les paramètres des modèles hystérétiques bi-linéaires des systèmes d'isolation sismique NRB, HDRB et LRB considérés dans cette étude ainsi que la rigidité effective K_{eff} et le pourcentage d'amortissement équivalent ξ_{eff} sont calculés pour une période cible égale à 3 sec et regroupés dans le Tableau 1 ci-après.

Tableau 1: Paramètres des modèles hystérétiques bi-linéaires des systèmes d'isolation sismiques**Table 1:** Hysteretic model parameters of seismic isolation systems

	NRB		HDRB		LRB	
	Culée	Pile	Culée	Pile	Culée	Pile
Amortissement effective, ξ_{eff} en %		7		16		25
Constante d'amortissement, KNs/m	52	340.3	125.7	829	174.3	1149
Déplacement cible. (m)	0.22	0.22	0.15	0.15	0.12	0.12
Rigidité effective, K_{eff} , KN/m	816	5382	926	6111	730	4814
Rigidité initiale, K_1 , KN/m	2021	13320	3680	24276	4174	27521
Rigidité post-élastique, K_2 , KN/m	898	5278	933.1	5393	417	2752
Résistance caractéristique, Q (KN)	19	123	30.16	199	39	258

4- Modèle analytique du pont étudié

La modélisation numérique par éléments finis Réf. [26 & 27] des ponts voussiers est l'une des étapes les plus importantes dans le processus d'analyse dynamique des ponts. Dans ce qui suit, l'élément fini de type portique tridimensionnel Réf. [28] est considéré en vue d'illustrer la performance des systèmes d'isolation sismique dans le comportement dynamique des ponts caissons. L'analyse sera effectuée de manière automatique en utilisant le code d'analyse des structures par éléments finis Réf. [29].

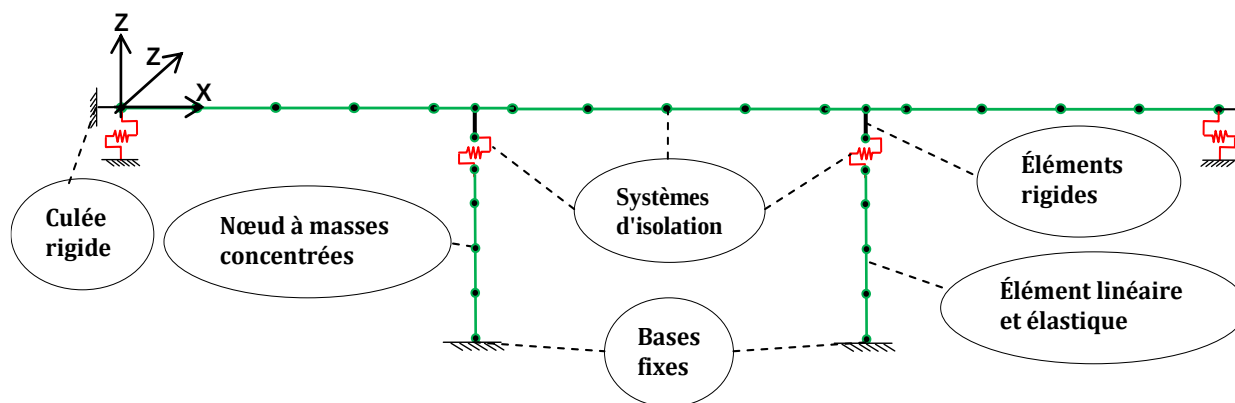
Les propriétés géométriques des sections transversales du pont étudié (Aires des sections. Moments d'inertie de torsion par rapport au centre de cisaillement, Moments d'inertie de flexion et les surfaces de cisaillement) seront calculées au niveau de chaque nœud du modèle retenu ; la taille de ce dernier étant minimisée sur la base de critères d'optimisation du maillage par éléments finis Réf. [30].

Il est à noter que les sources de non-linéarités sont localisées aux niveaux des unités d'isolation sismique. En raison de faibles accélérations sismiques, les forces inertielles transmises aux piles du pont sont exclusivement en deçà de leur capacité élastique, ce qui leur confère un comportement élastique et linéaire.

Les modules de déformation du béton sont respectivement pris égaux à 33 GPa pour les piles en B.A. et 36 GPa pour le tablier du pont en B.P.

Un amortissement modal constant égal à 5% pour les deux premiers modes de vibration est considéré.

Le modèle analytique ainsi obtenu à masses concentrées d'éléments finis et les éléments de connexion a été appliqué à l'étude du comportement dynamique 3-D du pont-caisson de Mascara sismiquement isolé. La modélisation de ce dernier est représentée dans la Fig. 6 ci-dessus.

**Figure 6:** Modèle analytique du pont isolé**Figure 6:** Analytical model of isolated bridge

5- Résultats numériques et discussion

5.1- Action sismique

Dans ce qui suit et en vue d'illustrer la performance des systèmes d'isolation sismique dans le comportement dynamique des ponts caissons. Le modèle analytique du pont sismiquement isolé est analysé sous l'effet d'un accélérogramme simulée compatible avec le spectre de réponse élastique conformément au Règlement Parasismique Algérien des Ouvrages d'Arts Réf. [22] avec un niveau d'accélération équivalent à 0.33g.

Les techniques de simulation pour la génération de mouvements sismiques de sol compatible avec un spectre de calcul peuvent être trouvées à titre d'exemple dans les Réf. [31&32].

Pour l'analyse sismique temporelle du pont. Un amortissement de 5% pour les deux premiers modes de vibration est considéré pour déterminer les coefficients de l'amortissement proportionnel de Rayleigh.

La méthode Fast Non linear Analysis (FNA) implémentée dans le code d'analyse non linéaire par éléments finis Réf. [29] utilisant un élément de liaison non-linéaire a été appliquée au système couplé isolateurs-structure soumis au mouvement de sol simulé.

Les figures 7 et 8 illustrent l'accélérogramme simulé compatible avec le spectre de réponse élastique conformément au RPOA Réf. [22].

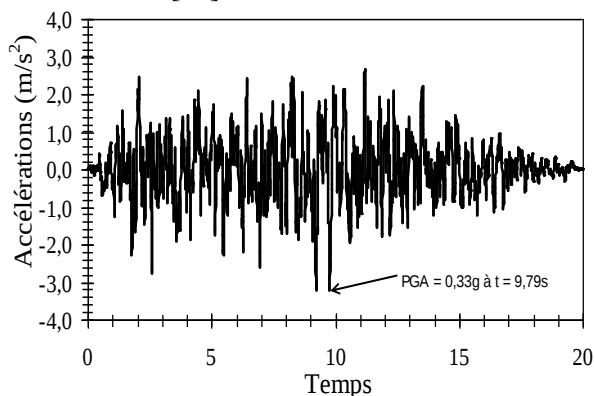


Figure 7: Accélérogramme simulée

Figure 7: Simulated ground motion

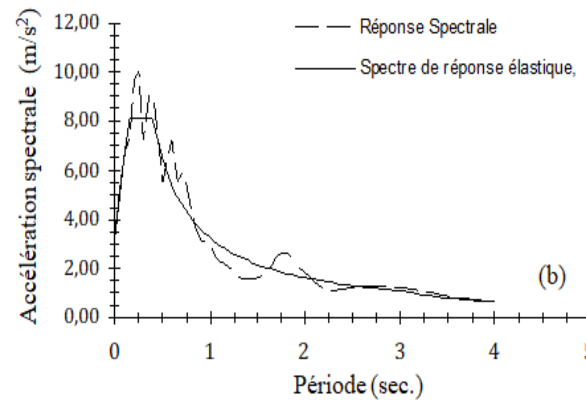


Figure 8 Réponse spectrale et Spectre de réponse élastique RPOA(2008)

Figure 8 Response spectra and design spectrum RPOA(2008) of the simulated ground motion

5.2- Effets des systèmes d'isolation sur les caractéristiques dynamiques et les réponses sismiques du pont

Pour les besoins de l'étude, les valeurs de périodes (T) et d'amortissements modaux (ξ) du pont isolé et sismiquement isolé pour divers systèmes d'isolation ont été déterminées et regroupées à titre illustratif pour les dix premiers modes de vibrations dans le Tableau 2 ci-après.

Tableau2 : Valeurs de périodes (T) et d'amortissements modaux (ξ) du pont sismiquement isolé

Table2 : Period (T) and modal damping (ξ) values of the seismically isolated bridge

Ordre modal	Système d'isolation							
	Non-isolé		NRB		HDRB		LRB	
	T (s)	ξ (%)	T (s)	ξ (%)	T (s)	ξ (%)	T (s)	ξ (%)
1	2.14	0.05	3.91	0.08	3.78	0.11	2,63	0,24
2	2.01	0.06	2.87	0.07	2.81	0.10	2,34	0,33
3	0.98	0.07	1.06	0.10	1.06	0.12	1,66	0,43
4	0.89	0.07	1.06	0.09	1.06	0.08	0,91	0,33
5	0.51	0.11	0.52	0.16	0.52	0.16	0,81	0,17
6	0.47	0.12	0.51	0.20	0.51	0.19	0,43	0,74
7	0.40	0.14	0.50	0.39	0.48	0.68	0,41	0,68
8	0.29	0.18	0.49	0.37	0.47	0.68	0,34	1,00
9	0.29	0.19	0.41	0.21	0.41	0.20	0,34	1,00
10	0.20	0.27	0.36	0.44	0.35	0.72	0,15	0,55

L'examen du Tableau 2 montre une augmentation de périodes des modes de vibrations des systèmes d'isolation comparativement à celles du pont non isolé. On peut de nouveau noter également que les taux d'amortissements modaux est substantiel pour le cas du système d'isolation LRB, ce qui représentera un dispositif d'appui très judicieux dans le cas où l'isolation sismique dans les ponts stratégiques est réalisée.

5.3- Effets des systèmes d'isolation sur les déplacements du tablier du pont

Afin de clarifier et de mieux comprendre les effets des systèmes d'isolation sismique sur le comportement dynamique des ponts, une investigation numérique relativement exhaustive est menée en utilisant les trois modèles de comportement des dispositifs d'appui NRB, HDRB et LRB.

Dans cette étude et pour des raisons d'espace, seule les réponses sismiques sont calculées et discutées à l'endroit des culées du pont isolé, les résultats obtenus sont comparés à ceux du pont de référence (non isolé).

La figure 9 ci-après, décrit les variations temporelles du déplacement sismique dans la direction critique (i.e. direction longitudinale) aux extrémités des travées de rives du tablier, i.e. à l'endroit des culées du pont étudié.

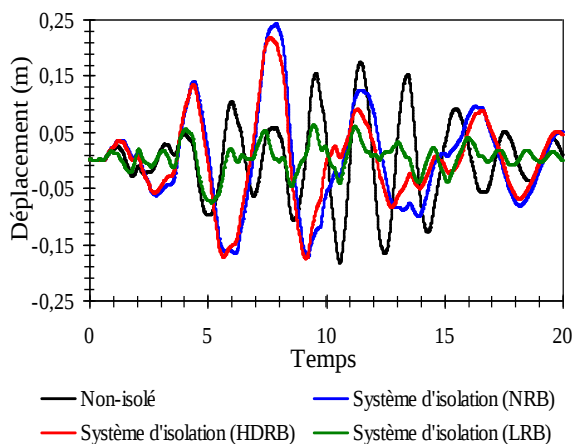


Figure 9: Variation temporelle des déplacements à l'endroit des culées du pont étudié

Figure 9: Time variation of displacements at the locations of abutments of study bridge

L'examen de la Fig. 9 montre que les systèmes d'isolation sismique affectent de manière drastique, notamment durant la phase forte du mouvement de sol, les valeurs de déplacements longitudinaux du tablier du pont. Pour illustrer cette différence, le déplacement maximum est égal à 0.18m pour un pont non-isolé, alors que dans le cas d'un pont équipé d'un système d'isolation sismique, ce dernier devient respectivement égal à 0.24m, 0.22m et 0.08m pour les dispositifs d'appui NRB, HDRB et LRB. Il est à noter que ces différences permettent de conclure que la flexibilité des systèmes d'isolation sismique NRB et HDRB tend à amplifier les joints de chaussées aux endroits des culées. Par ailleurs, l'isolateur à base d'appui fretté avec un noyau de plomb intégré LRB est plus efficace comparativement aux isolateurs suscités puisque les déplacements longitudinaux aux endroits des culées sont réduits de plus de 55%.

5.4- Effets des systèmes d'isolation sur la quantité d'énergie absorbée

En vue d'illustrer l'effet du système d'isolation antisismique sur la quantité d'énergie absorbée, une investigation numérique relativement exhaustive est effectuée entre l'énergie sismique d'entrée (Input Energy) et celle absorbée par les systèmes d'isolation pour la structure sismiquement isolé.

Les résultats obtenus sont reportés dans la Figure 10 ci-après.

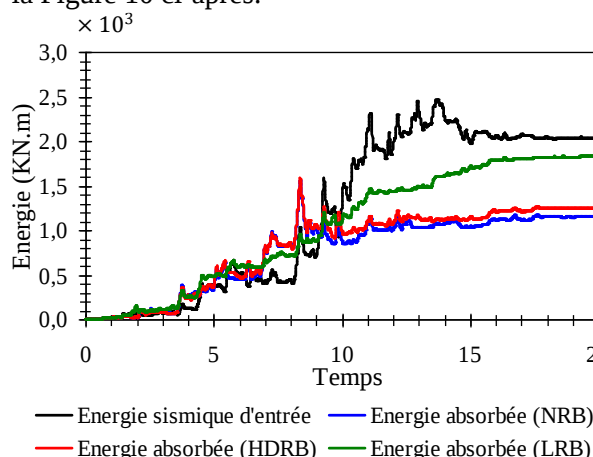


Figure 10: Variation temporelle de l'énergie absorbée par les systèmes d'isolation pour la structure sismiquement isolé

Figure 10: Variation temporelle de l'énergie absorbée par les systèmes d'isolation pour la structure sismiquement isolé

L'analyse des résultats de la Figure 10 montre clairement la fiabilité du système d'isolation LRB permettant d'absorber jusqu'à 74.26% de l'énergie du signal sismique d'entrée.

5.5- Effets des systèmes d'isolation sur les accélérations du tablier du pont

A titre d'illustration, les allures des accélérations sismiques dans la direction critique (i.e. direction longitudinale) aux extrémités des travées de rives du tablier du pont étudié sont brièvement reproduites dans la Fig.11.

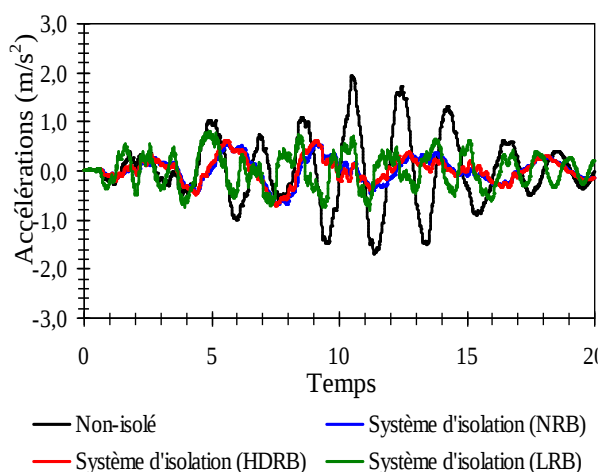


Figure 11: Variation temporelle des accélérations aux endroits des culées du pont étudié

Figure 11: Time variation of accelerations at the locations of the abutments of study bridge

Il est à noter à partir de la Fig. 11 que les accélérations sismiques aux endroits des culées du pont étudié sont considérablement réduites lorsque ce dernier est équipé d'un système d'isolation sismique. En outre, les systèmes d'isolation sismique permettent de filtrer les accélérations à hautes fréquences en vue de faire subir essentiellement à la superstructure du pont isolé un mode rigide traduit par de faibles accélérations et par conséquent les forces inertielles transmises aux éléments de fondations se réduisent et demeurent en deçà de la capacité portante du système de fondation de la structure.

5.6- Effets des systèmes d'isolation sur l'effort de cisaillement à la base des piles du pont étudié

La figure 12 montre les variations temporelles de l'effort de cisaillement à la base des piles dans la direction critique (i.e. direction longitudinale).

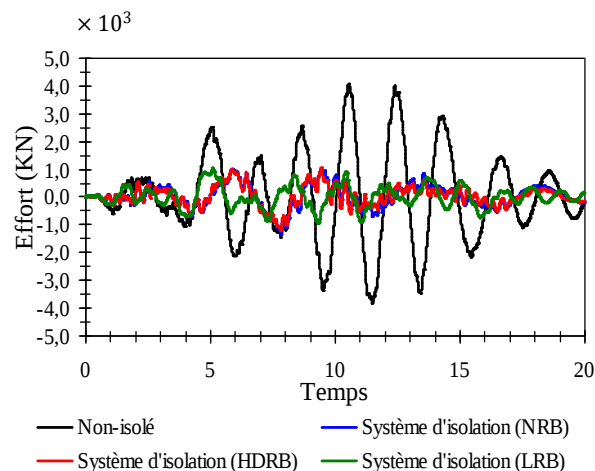


Figure 12: Variation temporelle de l'effort de cisaillement à la base des piles du pont étudié

Figure 12: Time variation of pier base shear of study bridge

L'examen de la Fig. 12 montre clairement que les systèmes d'isolation sismique permettent de réduire de façon drastique l'effort de cisaillement à la base des piles de l'ordre de 66%, 69% et 75% pour les dispositifs d'appui NRB, HDRB et LRB respectivement. En effet, ces différences importantes permettent de conclure que les systèmes d'isolation sismiques tendent à réduire les forces sismiques engendrées dans les piles pont ainsi que les déformations de cisaillement au niveau des culées. Par ailleurs et pour les cas pratiques, le déplacement maximum de l'appareil d'appui représente une grandeur d'un intérêt primordial dans la conception des structures de pont; si la distorsion de l'isolateur excède une certaine limite, l'appareil d'appui peut être fortement endommagé provoquant ainsi l'effondrement global du pont.

Le Tableau 3 ci-après, récapitule les réponses sismiques maximales en terme de déplacement sismique et d'accélérations à l'extrémité de la travée de rive du tablier et de l'effort de cisaillement à la base des piles calculées pour le pont non isolé et isolé et isolé avec des systèmes d'isolation sismiques NRB, HDRB et LRB.

Tableau3 : Valeurs maximales des réponses sismiques calculées pour divers systèmes d'isolation sismique

Table3 : Peak seismic response values calculated for various seismic isolation systems

Réponse sismiques	Système d'isolation			
	Non-isolé	NRB	HDRB	LRB
Déplacements (m)	0.18	0.24	0.22	0.08
Accélérations (m/s^2)	1.91	0.70	0.72	0.81
Efforts de cisaillement (KN)	4048	1394	1240	1015
Energie absorbée (KN.m)	2459	1560	1580	1826
Energie absorbée en (%)	-	63.44	64.25	74.26

On peut noter à partir du Tab. 3, ci-dessus, que le système à haut amortissement de type LRB permet de réduire de manière drastique les réponses sismiques dans la superstructure et à la base des piles du pont d'une part et d'absorber jusqu'à 74.26% de l'énergie du signal sismique d'autre part.

En conclusion, les dispositifs d'appui de type LRB, entre autres demeure une solution fiable dans l'isolation sismique des structures de ponts comparativement aux autres systèmes d'isolation présentés dans cette étude.

A toutes fins utiles, il serait également intéressant d'examiner les variations typiques de caractéristiques force de cisaillement-déplacement dans la direction critique longitudinale de l'unités d'isolation sismique LRB sous les accélérations du sol simulé compatible avec le spectre de réponse élastique conformément au Règlement Parasismique des Ouvrages d'Art RPOA Réf. [22].

A partir de la courbes hystérétiques illustrée dans la Fig. 13 ci-après, Il est clair que le système LRB comparativement aux autres systèmes est mieux adapté à l'isolation sismique des ponts sous un séisme sévère, car son modèle de comportement associé est

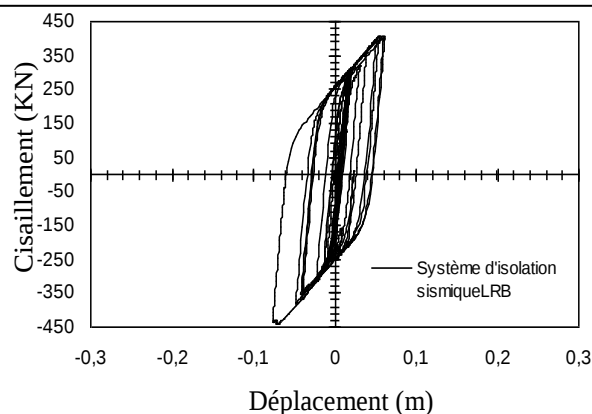


Figure 13 : Charge déformation en termes de cisaillement-déplacement des systèmes d'isolation sismiques NRB, HDRB et LRB

Figure 13 : Load deformation in term of shear-displacement of NRB, HDRB et LRB seismic isolator systems

capable de refléter adéquatement le comportement hystérétique et la résistance et il permet par hystérésis comme le montre la Fig.13 d'absorber une partie importante de l'énergie sismique et ainsi minimiser les dommages inélastiques dans les dits ponts.

C'est pourquoi ce système d'isolation sismique considéré comme un outil performant très bien adapté par les bureaux d'études techniques chargés de la conception de nouveaux ponts ou de réhabilitation de ponts existants.

6- Conclusions

A partir des résultats de cette étude exhaustive, il est possible de tirer les conclusions suivantes:

- La période d'isolation sismique du mode de vibration fondamentale du pont correspond assez bien à la valeur cible.
- Les résultats numériques montrent clairement l'importance de la flexibilité des systèmes d'isolation sismique NRB et HDRB qui tendent à sur-dimensionner les joints de chaussées aux endroits des culées.
- Comparativement aux unités d'isolation sismique NRB et HDRB, le dispositif d'appui LRB à haut amortissement a tendance à

- réduire substantiellement le souffle du joint de chaussée du pont isolé de l'ordre de 55%.
- Les forces sismiques de conception des piles de la structure du pont isolé sont typiquement de l'ordre de 75% que celles utilisées pour la conception conventionnelle (non isolé) de la même structure.
 - Les systèmes d'isolation LRB permettent d'absorber jusqu'à 74.26% de l'énergie du signal sismique d'entrée.
 - En conclusion, les dispositifs d'appui de type LRB, entre autres, demeurent une solution fiable pour les bureaux d'études techniques chargés de la conception de nouveaux ponts ou de réhabilitation de ponts existants comparativement aux autres systèmes d'isolation sismique présentés dans cette étude.

Références

- [1] Hung, C. J., Lin, H., Liu, Y. and Chai, J., *Reconnaissance report of 0512 China Wenchuan earthquake on bridges*. Proc. of the 14th World Conf. on Earthq. Eng., Beijing, China, 2008.
- [2] Association Française de Génie Parasismique AFPS. *Séisme de Boumerdès du 21 Mai 2003*, Rapport Préliminaire de la Mission AFPS Organisée avec le Concours du Ministère de l'Habitat. 2003.
- [3] Uzarski, j. and Arnold, C., *Chichi, Taiwan, earthquake of September 21, 1999: reconnaissance report*. Earthquake Spectra, Supplement, Taiwan.
- [4] Chouw, N., *Effect of the earthquake on 17th of January 1995 on Kobe*. Proc. of the D-A-CH Meeting of the German, Austrian and Swiss Society for Earthquake Engineering and Structural Dynamics, University of Graz, Austria, 1995.
- [5] Todd, D., Carino, N., Riley, M., Chung, H. S., Andrew, W., William, D., James, D., and Roland, N., *The Northridge, California, Earthquake of January 1994: Performance of Structures, Lifelines, and Fire Protection Systems*. National Institute of Standards and Technology (NIST), USA, 1994.
- [6] Buckle, I.G. and Mayes, R.L., *Seismic Isolation: History, Application and Performance - A World View*, Earthquake Spectra Journal, Vol. 6, n°2, pp 61–201. 1990.
- [7] Komodromos, P., *Seismic isolation for earthquake resistant structures*. WIT press Southampton, Boston, USA.
- [8] Kelly, J. M., *The Role of Damping in Seismic Isolation*. Earthquake Eng. Struct. Dyn., Vol. 28, pp 3–20. 1999.
- [9] Naiem, F. and Kelly, JM., *Design of seismic isolated structures: From Theory to Practice*, John Wiley et Sons Inc., 1999.
- [10] Matsagar, VA. And Jangid, RS., *Seismic response of simply supported base-isolated bridge with different isolators*. International Journal of Applied Science and Engineering, Vol. 4, n°1, pp 53-69, 2006.
- [11] Jiang, Yi, Huaiyu, Y. and Jianzhong, L., *Experimental and numerical study on isolated simply- supported bridges subjected to a fault rupture*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Elsevier, Vol. 127, n°105819, pp 1-1, 2019.
- [12] Feng, D., Zhang, F., *Seismic isolation retrofitting of typical multi-span steel girder bridges in New York State*. Transportation Research Record, journals.
- [13] Al-Azawi, A., AbdulMuttalib, I.S. and Al-Zaidee, S. R., *Modelling of base isolator as structural element*. Global Journal of Engineering Science and Research Management University of Baghdad, Vol. 4, n° 7, pp 92-103, 2017.
- [14] Makoto, O., Tomoshi, M., Masayuki, K., Takuzo, Y., Masashi, Y. and Naohiro, N., *Finite-Element Analysis of Laminated Rubber Bearing of Building Frame under Seismic Excitation*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics Journal, Vol. 44, n° 11, pp 1881–1898, 2015.
- [15] Li, Y., Li, C. and Zhao, GH., *Seismic isolation design for simply-supported beam bridges based on the energy balance method under near-fault ground*

motions. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 145, n° 106730, 2021.

[16] Manasa, M. and Mathai, M., *Performance of Lead Rubber Bearing as a Base Isolator*. International Journal of Science Technology and Engineering, Vol. 3, n°11, pp 33-36, 2017.

[17] AASHTO LRFD, *Bridge Design Specifications*. 8th ed. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., USA, 2017.

[18] FEMA 356/ASCE, *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*, American Society of Civil Engineers ASCE Federal Emergency Management Agency Washington, D.C., USA, 2000.

[19] ATC-40, *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*, Report No. SSC 96-01, Applied Technology Council, Redwood City, California, USA, 1996.

[20] Guizani, L., Reza M., Bouguerra, K. et Naimi, M., *Isolation Sismique Des Ponts En Algérie: Règles Et Perspectives*. 13th Arab Structural Engineering Conference University of Blida, Blida, Algeria.

[21] Khatteb, Ouanani, M., *Performance des dispositifs d'isolation sismique dans les bâtiments*. Mémoire de Master, Département de Génie Civil, Faculté des Sciences et de la Technologie, Université de Djelfa, 2011

[22] RPOA, *Règles Parasismiques Applicables au Domaine des Ouvrages d'Art*. Document Technique Règlementaire, Ministère des Travaux Publics, Alger, Algérie, 2008.

[23] Calgaro, J.A., Virlogeux, M., *Projet et construction des ponts : Généralités. Fondations. Appuis. Ouvrages courants*. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1991.

[24] Chena, Xu. and Chunxiang, L., *Seismic performance of tall pier bridges retrofitted with lead rubber bearings and rocking foundation*. Engineering structures, Vol. 212, n°110529, pp 1-15, 2020.

[25] Asif, H., Min-Se, K., Thang, DD. and Jin-Hoon, J., *Effect of Lead Rubber Bearing Characteristics on the Response of Seismic-isolated Bridges*. KSCE Journal of Civil Engineering, Vol.12, n°3, 2008.

[26] Ouanani, M., Sandjak, K. and Tiliouine, B., *Dynamic analysis of a multi-span simply supported prestressed concrete bridge with restrainers and seismic isolation devices*. J. Build. Mater. Struct., n°7, pp 105-118, 2020.

[27] Farrar, C.R., Duffey, T.A., *Bridge modal properties using simplified finite element analysis*. Journal of Bridge Engineering, ASCE, Vol.3, n°1, pp 38-46, 1998.

[28] Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., *The Finite Element Method*. Solid Mechanics, 6th Edition, Vol. 2, 2005.

[29] CSI Bridge, *Computer and Structures Inc. SAP2000 (Nonlinear Version 15), Nonlinear user's Manual Reference*. Berkeley, California USA, 2015.

[30] Tiliouine, B. and Ouanani, M., *Réponse Sismique 3-D d'un Pont-Caisson à Inertie Variable* Proc. of the 8th French National Conference on Earthquake Engineering: Dynamic and Vibratory Aspects in Civil Engineering, AFPS Paris, France, 2011.

[31] Pierfrancesco, C. and Laura, DA., *Response-spectrum-compatible ground motion*, Processe Encyclopedia of Earthquake Engineering, doi:10.1007/978-3-642-36197-5_325-1 pp 1-27, 2021.

[32] Tiliouine, B., Zermout, A. S., Mebarki, A., Christian, S., *Génération de spectre de puissance pour l'analyse stochastique de la réponse sismique des structures*. AFPS. 6ème Colloque AFPS 2003, Palaiseau, France, 2003.