



Isolation Sismique des Ponts en Algérie: Règles et Perspectives

Lotfi Guizani¹, Mohammadreza Moradiankhabiri², Kheireddine Bouguerra³ et
Mohammed Naimi⁴

¹Professeur (auteur correspondant), Dép. Génie de la construction, École de technologie supérieure (U. Québec) / 1100 Notre Dame Ouest, Montréal (Québec) H3C 1K3 Canada. /courriel : lotfi.guizani@etsmtl.ca

²Étudiant à la maîtrise, Dép. Génie de la construction., École de technologie supérieure (U. Québec), Montréal (Qc), Canada.

³Maître de conférences, Dép. Génie civil, faculté technologie, U. Mohamed Boudhiaf, M'Sila, Algérie.

⁴Chargé de Projets, SNC-Lavalin Inc., Montréal (Qc), Canada.

Résumé: Ce papier présente les principaux éléments de la technologie de l'isolation sismique de la base et de son application aux ponts. Il discute dans ce contexte de la réglementation parasismique algérienne sur les ouvrages d'art (RPOA) et met en évidence quelques éléments de comparaison avec les spécifications en vigueur au Canada et aux États Unis. Il donne un bref aperçu des principaux projets d'isolation de ponts au Québec réalisés durant les douze dernières années et des systèmes d'isolation utilisés. Sur la base d'analyse spectrale uni-modal, sur un modèle linéaire équivalent et d'analyses dynamiques non linéaires, utilisant respectivement le spectre de calcul d'Alger et des enregistrements sismiques du séisme de Boumerdès (Algérie), ce papier explore le potentiel de gain et d'efficacité que peut apporter l'application de cette technologie à la conception et la réhabilitation sismique des ponts stratégiques algériens. Il démontre que l'option de l'isolation sismique de la base permet une réduction importante des forces sismiques de conception pour les ponts stratégiques situés dans la zone sismique la plus forte (zone III) de l'Algérie, pour un sol ferme. Cependant, les simulations numériques effectuées mettent en évidence la possibilité de déplacements résiduels élevés. Les résultats préliminaires indiquent qu'un choix judicieux et balancé est requis pour assurer un bon compromis entre la réduction des forces sismiques et le contrôle du déplacement sismique maximum et résiduel.

Mots clés: Isolation sismique, Règlement parasismique algérien sur les ouvrages d'art (RPOA), Spectre de calcul, Calibration, Analyse dynamique non linéaire, Génie parasismique, Conception de ponts.

1. INTRODUCTION

L'Algérie et plus particulièrement sa région du nord est aux prises avec une activité sismique importante comme en témoigne les séismes destructeurs de Chlef (El Asnam) de 1954 et 1980 et plus récemment celui de Boumerdès 2003 [1, 2, 23]. Le risque sismique posé par cette activité sismique est d'autant plus important vu que la région du nord d'Algérie est la plus peuplée du pays et vu que les principales infrastructures s'y trouvent. Par exemple, l'autoroute stratégique est-ouest, traverse toute l'Algérie du nord, parallèlement à la méditerranée et reliant les villes les plus importantes du pays allant de la frontière tunisienne à la frontière marocaine. Ce projet, lancé en 2005 et devant s'achever en 2016, constitue un lien économique vital et comprend plusieurs ponts importants, lesquels devraient être préservés contre les risques sismiques. En avril 2015, les autorités algériennes annonçaient le départ imminent d'un projet ambitieux d'une ligne de train à grande vitesse reliant les trois pays du nord du Maghreb. Celui-ci devrait suivre un tracé similaire à celui de l'autoroute est-ouest, c'est-à-dire, dans le cœur de la région la plus active au niveau sismique de l'Algérie. De plus, vu la nature peuplée et montagneuse de cette région, ce projet comprendrait vraisemblablement la construction de plusieurs ponts et viaducs importants. En consultant la carte des infrastructures routières et aéroportuaires du pays, on constate à quel point ces infrastructures sont pour l'essentiel localisées dans la région du nord laquelle est également le siège de l'activité sismique la plus forte englobant tout le nord d'Algérie mais particulièrement intense notamment dans les wilayas d'Alger, Chlef, Tipaza, Ain-Defla, Blida et Boumerdès [1,3].

Devant le risque posé par l'activité sismique et suite aux dégâts causés par le séisme Boumerdès 2003, les autorités algériennes s'étaient lancées dans un programme de mise à niveau et de rehaussement de leur réglementation parasismique. Le Règlement Parasismique Algérien pour les Ouvrages d'Arts -2008 (RPOA), adopté en 2009, s'inscrit dans ce contexte et s'applique aux ponts routiers et ferroviaires ainsi que les tunnels neufs et existants [3].

L'approche conventionnelle de conception parasismique des ponts repose sur le principe de conception en capacité, lequel prévoit la dissipation de l'énergie sismique au sein même de la structure moyennant des dommages contrôlés. Néanmoins, la technologie de l'isolation sismique de la base connaît depuis quelques deux à trois décennies un intérêt croissant de partout dans le monde et plus spécifiquement en Amérique du Nord. Elle offre une des alternatives des plus efficaces et économiques pour protéger les structures importantes et préserver leur fonctionnalité après le séisme [4,5]. Dans la seule province du Québec au Canada, au moins une douzaine de ponts importants ont profité de cette technologie depuis sa première application en 2003 [6, 7, 8, 18].

Ce papier présente un survol de la technologie d'isolation sismique à la base et des principaux systèmes d'isolation sismique ayant été utilisés sur les ponts au Canada et plus particulièrement au Québec. Il examine les principales spécifications du règlement parasismique algérien sur les ouvrages d'art à cet effet et explore le potentiel de réduction des forces sismiques que peut offrir le recours à l'isolation sismique des ponts stratégiques algériens.

2. PHILOSOPHIES ET STRATÉGIES DE CONCEPTION PARASISMIQUE

Les codes modernes pour le calcul sismique des ponts routiers à l'instar du code Canadien S6 (CAN/CSA-S6-06 et CAN/CSA-S6-14), de l'AASHTO tout comme le code RPOA visent à assurer une performance acceptable à un coût raisonnable des ponts en fonction de leur importance. La philosophie générale adoptée par ces codes veut que tous les ponts devraient pouvoir être utilisés immédiatement après un séisme mineur à modéré mais doivent éviter l'effondrement après un séisme majeur [3, 9, 10, 11, 12]. Toutefois, les seuils des dommages tolérés après le séisme de calcul (majeur) dépend de l'importance du pont. À cet effet, le code canadien, S6-06 (CAN/CSA-S6-06), utilise un facteur de majoration des charges de conception en fonction de l'importance du pont, I, valant respectivement 3.0, 1.5 et 1.0 pour les trois catégories d'importance: (1) Ponts de secours, (2) Ponts d'urgence et (3) Autres ponts. Ce facteur est destiné à annuler en partie ou en totalité l'effet du facteur de réduction des forces, R représentant la ductilité pour moduler ainsi le niveau de dommage acceptable dans les ponts en fonction de leurs importances. Par exemple, un pont de secours doit demeurer ouvert au trafic après le séisme de calcul et doit être accessible aux véhicules d'urgences après un séisme extrême alors qu'un pont d'urgence, peut subir des dommages de nature à nécessiter sa fermeture au trafic régulier après le séisme de calcul sans toutefois empêcher le passage des véhicules d'urgence [9, 10]. Pour ce type de pont, des dommages réparables (dans les zones relativement faciles d'accès) sont tolérés après un séisme majeur. Dans sa nouvelle édition, le code canadien, S6-14 (CAN/CSA-S6-14, adopte une approche de conception et d'analyse axée sur la performance (Performance Based Design) où des critères de performance plus explicites sont énoncés. Par exemple, ce code impose des niveaux de dommages maximum en fonction de l'importance du pont, lesquels sont traduits en valeurs maximales des déformations au niveau du béton et de l'acier dans les sections critiques, pour chaque niveau de dommage [11]. Le code RPOA s'inscrit dans une philosophie similaire à celle du code canadien. Il classe les ponts en 3 groupes d'importance : (1) Stratégique ; (2) Important et ; (3) D'importance moyenne. Après un séisme faible à modéré, tous les ponts doivent demeurer élastiques alors qu'après le séisme de calcul (majeur), tout pont doit éviter l'effondrement, maintenir son intégrité structurelle et posséder une résistance résiduelle suffisante de sorte à pouvoir supporter un trafic d'urgence. Les ponts stratégiques doivent être circulables (fonctionnels) immédiatement après le séisme de calcul. Afin d'y parvenir, le règlement impose de forces sismiques plus grandes (majorées) aux ponts stratégiques que les deux autres groupes de ponts via le spectre de calcul, lequel est défini en fonction de l'emplacement/zonage sismique et du groupe d'importance du pont. Comme on peut le constater au tableau 1, présenté plus loin, les facteurs de majoration des efforts, par rapport à un pont d'importance moyenne, varient entre 1.2 et 1.33 pour un pont important et entre 1.5 et 1.67 pour un pont stratégique [3].

On peut classer les stratégies de conception parasismique des ponts en deux catégories : (1) Une conception conventionnelle avec base fixe, basée sur le principe de dimensionnement en capacité où l'énergie sismique est principalement dissipée au sein de la structure et ; (2) Une conception utilisant des technologies parasismique où l'énergie sismique captée est dissipée ou réduite principalement grâce à l'usage de dispositifs technologiques spécialement conçus.

2.1 Conception conventionnelle à base fixe et calcul en capacité

La méthode conventionnelle de conception parasismique consiste à dissiper l'énergie induite par le séisme de calcul au sein même de la structure et ce via des déformations inélastiques concentrées dans des zones préalablement sélectionnées et détaillées à cet effet. Les zones de dissipation d'énergie par déformations inélastiques sont dites zones de rotules plastiques. Dans le cas des ponts, elles sont typiquement situées à la base des unités d'appui (piles) et/ou à leurs extrémités supérieures. Ainsi, la structure notamment les parties accessibles des unités de fondation (piles, culées) est conçue à un niveau de résistance de plusieurs fois inférieur à la demande élastique en force sismique (demande si la structure demeure élastique). Ceci transforme la demande en force élastique en une demande en ductilité. Dans le

code S6-06, la réduction des forces élastiques est représentée par le coefficient de modification de réponse R. Ce coefficient, variant entre 2 et 5 et est fonction du type des unités de fondation (redondance structurale, performance passée). Il est directement et explicitement relié à des exigences concernant les détails des zones critiques de ces éléments de sorte à leur assurer un niveau de ductilité consistant avec la valeur de R utilisée [9, 10, 11]. Dans le code RPOA, la notion de ductilité est également au cœur du concept de calcul en capacité adopté. Elle est représentée par le coefficient de comportement, q, servant à réduire les forces élastiques et allant de 1.0 à 4.0 selon le type de l'unité de fondation (unité d'appui). De plus ce facteur est limité à une valeur maximale, laquelle dépend notamment de la prédominance du cisaillement (rapport hauteur pile à sa profondeur), du niveau de la contrainte de compression et de l'irrégularité de la structure. Le règlement spécifie d'autres dispositions constructives (ferraillage) et des règles et critères de calcul (facteurs de surcapacité) destinés à favoriser la dissipation de l'énergie par les modes ductiles, comme la flexion, et à écarter les modes fragiles (cisaillement, flambage des armatures,...) dans les zones de rotules plastiques présélectionnées pour assurer à ces zones critiques une ductilité locale suffisante et cohérente avec la ductilité globale de la structure. Le tablier et la superstructure sont conçus pour demeurer élastiques et exempts de rotules plastiques. Ainsi, dans le cas où les piles sont encastrées à leurs extrémités supérieures, des dispositions sont spécifiées pour éviter la formation d'une rotule plastique au sein du tablier ou de la superstructure [3].

2.2 Conception avec des technologies parasismiques

Le développement de techniques de calcul sur support informatique beaucoup plus puissantes, la disponibilité d'installations d'essais telles que les simulateurs sismiques (tables vibrantes) ont favorisé l'émergence de technologies innovatrices et leur application aux ponts et aux bâtiments sur une base de plus en plus routinière durant les deux dernières décennies en particulier. Par ailleurs, la fin de la guerre froide vers le début des années 1990, a rendu possible le transfert de la technologie d'amortisseurs hydrauliques, initialement développés pour des besoins militaires, vers des applications de génie civil qui s'est vu soudainement profiter de progrès technologiques, accumulées pendant presque un demi-siècle. Trois principales technologies parasismiques sont des plus utilisées sur les ponts, soit :

- 1- L'isolation sismique de la base : Décrise plus loin;
- 2- L'usage d'amortisseurs sismiques externes: Il s'agit d'ajouter à la structure avec des appuis conventionnels (fixes et mobiles), un système de dissipation d'énergie externe afin d'absorber une part importante de l'énergie induite par le séisme et ainsi réduire la demande en déplacements et/ou force sur la structure. On distingue trois principales familles d'amortisseurs à savoir : (1) Les amortisseurs hydrauliques ayant un amortissement visqueux (la force d'amortissement est proportionnelle à la vitesse exposant un facteur α) ; (2) Les amortisseurs à base de friction et ; (3) Les amortisseurs à base de comportement hystérotique dont l'amortissement est généralement de nature élasto-plastique;
- 3- L'usage de Transmetteurs de Chocs Sismiques (TCS): L'utilisation des TCS vise à augmenter la résistance de la structure en mobilisant, lors du séisme, les unités de fondation avec appuis mobiles. Pour ce faire, les TCS sont installés en parallèle avec les appuis mobiles des unités de fondation qu'on veut engager lors du séisme. Un TCS se comporte comme un appui mobile, en opposant une faible résistance, lorsque sollicité par des mouvements lents, tels ceux induits par les variations thermiques ou le fluage. Cependant, il est configuré (par l'ajustement des orifices et de la viscosité du liquide) pour bloquer (totalement ou partiellement) lorsqu'il est sollicité par des mouvements rapides, tels ceux engendrés par un séisme, le vent ou le freinage. En ce faisant, les unités de fondation équipées de TCS sont mobiles sous les conditions de service (mouvement thermique) mais deviennent fixes (totalement ou partiellement) lors du séisme et prennent part au système de résistance aux forces sismiques du pont [4, 5].

L'intérêt pour ces "nouvelles" technologies est grandement justifié par l'aspect économique. Au Canada, et plus particulièrement dans la province du Québec, les exigences plus sévères des éditions du code S6 antérieures à l'an 2000 (S6-00 et S6-06) ont poussé les ingénieurs à chercher des alternatives économiques à la conception conventionnelle, en capacité, et ce notamment pour les ponts de secours, lesquels doivent demeurer pratiquement élastiques [9, 10, 11].

En effet, généralement l'isolation sismique permet 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 sa reconstruction. Cet avantage revêt une importance capitale pour un pont classé comme pont de secours, ou pont stratégique au sens du code RPOA, lequel qui doit demeurer en service après le séisme [3]. Cet avantage de préserver la fonctionnalité de l'ouvrage après le séisme constitue la principale motivation derrière le recours systématique à l'isolation sismique (Menshin Design) sur les projets de ponts au Japon. Ce recours systématique fut initié dès le début des années 1990 et avait été accélérée après le séisme de Kobe 1995 [13, 14].

3. L'ISOLATION SISMIQUE DE LA BASE

3.1 Bref historique et objectifs

L'isolation sismique de la base est un concept simple qui remonte même au début du 20^{ème} siècle. Néanmoins ses premières applications modernes dans le monde ont été réalisées dans les années 1970 à 80. Au Canada, c'est seulement aux années 1990 que les premiers ponts dans l'ouest du pays ont été munis de systèmes d'isolation sismique de la base (en 1990, réfection d'un pont sur l'autoroute 99, Richmond, C.B.). Au Québec, il a fallu attendre à l'an 2002-2003 pour qu'un premier pont soit isolé à la base contre les séismes, dans le cadre d'un projet pilote [4]. En Algérie, à

la connaissance des auteurs, aucun pont n'aurait été muni d'un système d'isolation sismique jusqu'à présent malgré le fait que le code RPOA 2008 consacre une bonne partie du chapitre 6 pour les isolateurs sismiques. Néanmoins, la technologie d'isolation sismique a été appliquée pour la première fois vers 2005 sur un bâtiment à bureaux de 4 étages, le siège du bureau de contrôle technique (CTC)-Chlef à Ain Defla [15]. Un projet de collaboration piloté par le CTC-Chlef et le département de génie civil de l'université Perugia en Italie avait été mené entre 2006 et 2009. Dans le cadre de cette collaboration, un projet d'isolation sismique a été réalisé sur le bâtiment de 5 étages servant de chef-lieu de la daïra (arrondissement) d'Ain Defla [17]. Plus tard, la technologie d'isolation sismique de la base aurait été appliquée à la salle de prière de la grande mosquée d'Alger [16]

3.2 Principe de base et principales composantes

L'isolation sismique de la base consiste à découpler le mouvement du sol du mouvement de la structure dans le but de réduire les forces transmises à cette dernière. Les forces sismiques exercées sur la structure isolée sont typiquement de l'ordre de 3 à 10 fois plus petites que la demande en force sur la structure non isolée. Par conséquent, les forces d'inertie transmises aux éléments de la structure isolée sont limitées et demeurent facilement en deçà de sa capacité élastique. Ceci se traduit, le cas échéant par la préservation de la fonctionnalité structurale après le séisme [4, 5].

L'isolation sismique de la base repose sur le principe voulant que si la période de vibration est augmentée suffisamment pour s'éloigner de la période d'excitation prédominante du tremblement de terre, les accélérations transmises à la structure (et par conséquent les forces d'inertie) sont considérablement réduites. En revanche, l'augmentation de la période engendre des déplacements plus importants. Dès lors l'incorporation d'un dispositif de dissipation d'énergie (amortissement) est généralement requise afin de réaliser un compromis satisfaisant entre la réduction de la force et l'accroissement du déplacement. Les principales composantes (caractéristiques) de base d'un système d'isolation sismique typique sont :

- Un appui capable de transmettre les charges verticales avec une faible rigidité horizontale (dans la direction isolée);
- Un mécanisme de dissipation d'énergie (amortisseur sismique incorporé ou externe à l'appui);
- Un système de recentrage pour contrôler la rigidité post-élastique du système et recentrer la superstructure ;
- Un système de retenue élastique (fusible), au besoin. Il sert à fournir une rigidité suffisante sous les charges non sismiques.

4. PRINCIPAUX SYSTÈMES D'ISOLATION DE LA BASE UTILISÉS AU QUÉBEC

Il existe une multitude de systèmes d'isolation appliqués aux bâtiments et aux ponts à travers le monde. Au Canada, la plupart des applications de l'isolation sismique sur les ponts ont été réalisés dans la province de la Colombie Britannique (C.B.), le territoire du Youkon (ouest Canadien) et dans la province du Québec (est Canadien). Les principaux systèmes ayant été utilisés au Québec sont :

4.1 Les systèmes à base d'élastomère

Ces systèmes exploitent le principe de l'appui en élastomère fretté et sa grande flexibilité latérale. Il existe plusieurs variantes dans cette catégorie d'appui telles que les appuis frettés ordinaires, ceux avec élastomères à haut taux d'amortissement (par hystérésis interne) et ceux avec un noyau de plomb. Cette dernière variante est la plus répandue de cette famille d'isolateurs sismiques. Elle a été utilisée pour la première fois en 2010, sur la structure d'approche sud du pont principal de l'autoroute A25, au-dessus de la rivière Richelieu puis en 2013, sur un pont courbe à l'échangeur des autoroutes A20 et A73 à Lévis, Québec [18]. Le système à noyau de plomb est également envisagé sur deux ponts d'étagement de l'échangeur Félix-Leclerc (A40 / A73), dont les travaux de reconstruction sont en cours [19]. Un système d'isolation en élastomère fretté ordinaire a été utilisé pour améliorer la performance sismique du pont Richelieu sud existant (sur A10 Est, au-dessus de la rivière Richelieu, Chambly, Qc) [19, 24].

4.2 Les systèmes à base de glissement

Ces systèmes permettent le découplage des mouvements de la superstructure de ceux des unités de fondation au moyen d'interface de glissement lequel permet en plus de dissiper l'énergie sismique par friction. A titre d'exemple, le système de pendule à friction est un système qui utilise une interface de glissement sous forme de cuvette (portion d'une sphère) qui confère à la structure un mouvement global similaire à un pendule. Le rayon de courbure et le coefficient de frottement de l'interface sont les caractéristiques clé, contrôlant respectivement la période d'isolation et la quantité d'énergie dissipée (amortissement) du système. Un système d'isolation sismique des ponts et viaducs à base d'un appui de pont à élastomère confiné muni d'un système de recentrage à ressorts hélicoïdaux et d'une interface de glissement en acier inoxydable - Téflon renforcé a été développé au Québec. Ce système a été appliqué au premier pont isolé à la base au Québec, à savoir le pont d'Alma construit en 2002-2003 sur la route 169 au-dessus de la rivière grande décharge [6]. De plus, il a été appliqué sur d'autres ponts entre 2006 et 2010 dont la réhabilitation sismique du pont Madrid (A20 sud, au-dessus de la rivière Nicolet) [7,8]. Un système similaire, utilisant un appui à disque et des ressorts en élastomère, a été utilisé dans les années 2003-2006 sur un pont et trois passerelles dans la région d'Ottawa.

5. SURVOL DES DISPOSITIONS RÉGLEMENTAIRES DU RPOA

5.1 Spécifications générales :

Le code RPOA adopte une approche de conception parasiismique de base utilisant le calcul en capacité à base fixe, exposé plus haut. Néanmoins, des dispositions sont données pour un calcul élastique et des directives relatives à la

conception au moyen de l'isolation sismique y sont formulées. Le territoire est divisé en 5 zones sismiques dont un extrait, montrant les zones les plus actives, situées le long de la côte comme les wilayas de Chlef, Tipaza, Alger, Boumerdès et les parties nord d'Ain Defla et de Blida, est montré sur la figure 1 [3].



Figure 1 : Carte de zonage sismique du nord d'Algérie, adoptée dans le RPOA. (Source : [3])

Le règlement propose deux spectres de calcul de base pour tout le pays : (1) Un spectre élastique à être utilisé avec un calcul élastique, pour lequel le coefficient de comportement, q , représentant la ductilité est limité à un ($q=1.0$) et; (2) Un spectre de dimensionnement utilisé pour un calcul en capacité, dans lequel le coefficient de comportement, q , est supérieur à un ($q>1.0$). Ces spectres de base sont donnés pour les 4 types de sol, définis dans le règlement et similaires à ceux du code S6-14, et pour différents taux d'amortissement visqueux. En fonction du zonage sismique et du groupe d'importance du pont, le règlement affecte un coefficient d'accélération, A , tels que montrés dans le tableau 1. Le spectre de calcul d'un ouvrage donné est alors dérivé à partir de l'un des deux spectres de base, selon l'approche choisie, à l'aide de ce coefficient d'accélération, A , du type de sol et du taux d'amortissement des unités d'appuis (piles, culées et leur appareils d'appuis) [3].

Tableau 1 : Coefficients d'accélération de zone, A (g)

Groupe du pont	Zone sismique			
	I	IIa	IIb	III
1 : Stratégique	0.15	0.25	0.30	0.40
2 : Important	0.12	0.20	0.25	0.30
3 : Autre	0.10	0.15	0.20	0.25

La figure 2 montre les spectres de calcul élastique et de dimensionnement en capacité d'un pont stratégique à Alger, (zone III) sur un sol de type S2 (ferme) pour des taux d'amortissement de 5% et de 20%.

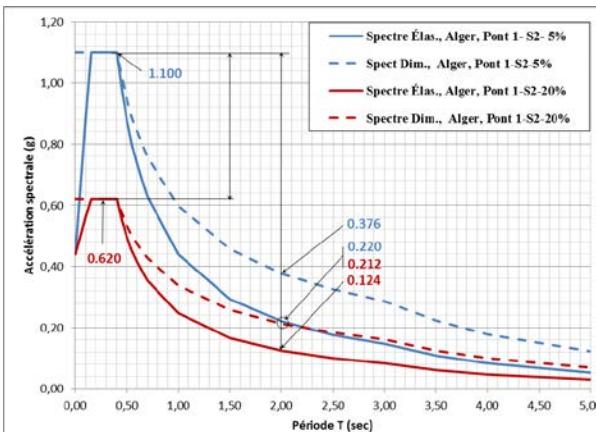


Figure 2 : Spectres de réponse élastique et de calcul en capacité : Pont stratégique, Zone III, sol S2, $\xi = 5\%$ et 20% .

5.2 Spécifications relatives à l'isolation sismique :

Le chapitre 6 du code RPOA-2008 est consacré aux appuis et sa section 6.7 traite d'exigences additionnelles spécifiques à l'isolation sismique de la base. Le règlement préconise une analyse dynamique non linéaire pour les structures isolées à la base. Cependant, il permet le recours à des analyses moins complexes comme la méthode spectrale multimodale lorsque le taux d'amortissement ne dépasse pas 30% ou bien la méthode spectrale uni-modale, si en plus aucune faille active connue ne se trouve à moins de 10 km de distance du site du projet. La variabilité des propriétés hystéritiques des unités d'isolation doit être prise en compte, selon la méthode adoptée par les codes AASHTO et S6-14, laquelle consiste à effectuer une analyse avec la limite supérieure et une autre analyse avec la limite inférieure des propriétés [12]. Toutefois, si la différence entre le déplacement sismique obtenu avec les propriétés nominales et celui obtenu avec les limites supérieure et inférieure est moins que 15%, le dimensionnement peut être fait sur la base d'une analyse avec les propriétés nominales uniquement. Les unités d'isolation sismique doivent être conçues pour un déplacement total égalant le déplacement sous les charges permanentes et de précontrainte plus le déplacement sismique plus 50% du déplacement thermique, sans que ce déplacement de calcul ne soit inférieur à 150% du déplacement sismique. Le règlement exige une force de rappel minimale mais ne donne pas d'indication précise à cet effet. La résistance du système de retenue sacrificiel (fusible) ne doit pas dépasser 40% de la force sismique de

conception de l'unité d'isolation. Les propriétés des unités d'isolation peuvent être représentées par un modèle bilinéaire et leurs valeurs doivent être établies ou validées par des essais sur au moins une paire de prototypes de chaque type et grandeur d'unité d'isolation. Cinq essais, selon une séquence prédefinie, sont prescrits. Ils consistent à vérifier le comportement des unités d'isolation sous les charges non sismiques et les déformations imposées lors du séisme. Des essais supplémentaires de stabilité et de comportement sous basse température peuvent être requis selon le type d'appui (porteur ou non) et son emplacement (zone pouvant atteindre des températures sous zéro ou non). Des critères d'acceptation concernant la variabilité des propriétés entre les prototypes, la dégradation des propriétés hystéritiques avec les cycles, l'écart entre les valeurs nominales et celles obtenues, l'endommagement des unités ou le manque de stabilité sont établis et doivent être rencontrés. Ces essais sont très semblables à ceux spécifiés dans le code S6 et dans l'AASHTO. Il est cependant à noter que le règlement ne spécifie pas d'essai visant à déterminer la résistance ultime du fusible comme c'est le cas dans le S6 [3, 9,10, 11, 12].

Finalement, il est important de mentionner que le règlement RPOA n'exige pas un choix de méthode de calcul pour les structures isolées à la base et ne limite pas explicitement la valeur du coefficient de comportement, q , à une valeur maximale comme c'est le cas dans le code CAN/CSA-S6. Néanmoins, pour les ponts isolés à la base et pour les ponts stratégiques, lesquels doivent demeurer fonctionnels après le séisme de calcul, il est tout à fait indiqué et cohérent, selon les auteurs, de faire un calcul élastique, $q=1.0$. Par ailleurs, comme on peut le constater sur la figure 2, le recours à un calcul en capacité avec une faible valeur du coefficient de comportement, q , n'est pas justifié puisque le spectre de calcul en capacité est de l'ordre de 1.5 fois plus fort que le spectre élastique pour les longues périodes. Ceci traduit probablement une volonté implicite du législateur à imposer un dimensionnement élastique pour les structures isolées. Dans la suite de ce papier nous considérons que le calcul des structures isolées se fait dans le domaine élastique. Pour ces raisons, nous adoptons le spectre de réponse élastique pour les structures isolées pour le reste de cette étude. Pour les autres approches technologiques, comme l'ajout d'amortissement ou le recours à des transmetteurs de chocs sismiques, l'approche de calcul en capacité et l'usage du spectre de dimensionnement avec un coefficient q supérieur à un, peuvent être tout à fait valables si des dommages permanents sont acceptables vis-à-vis le règlement selon l'importance du pont.

6. EXPLORATION DU POTENTIEL DE L'ISOLATION SISMIQUE DES PONTS EN ALGÉRIE

Pour explorer le potentiel de réduction des forces que peut apporter l'isolation sismique de la base, le cas d'un pont stratégique, situé dans la zone sismique III (i.e. Alger) sur un sol ferme, type S2 est considéré. Les spectres de calcul d'un tel pont, pour les deux approches de conception, sont montrés sur la figure 2 pour un taux d'amortissement de 5%, typique pour les unités d'appui en béton armé et pour un taux de 20% typique des ponts isolés à la base ou munis d'amortisseurs. Le spectre élastique avec 5% d'amortissement montre qu'en allongeant la période initiale à une valeur de 2.0 secondes, l'accélération spectrale élastique est réduite de 1.1g initialement à 0.22g, soit une réduction de 5 fois. Si en plus, le taux d'amortissement est augmenté de 5% à 20%, l'accélération spectrale élastique n'est que de 0.124g, soit une réduction brute de l'ordre de 9 fois. En revanche, les spectres de déplacements, non illustrés, montrent que le déplacement sismique passe de 17.1 mm pour une période initiale de 0.25 sec et 5% d'amortissement à 219 mm lorsqu'on accroît la période de la structure à 2.0 sec. En combinant cet accroissement de période à un accroissement de l'amortissement à 20%, comme s'est souvent le cas pour les applications d'isolation sismique, le déplacement sismique est réduit presque de moitié, soit à 123 mm. Par ailleurs, on peut constater que l'accroissement de l'amortissement de 5% à 20%, sans l'allongement de la période, amène une réduction limitée des forces sismiques, soit de 1.77 fois seulement (1.1g/0.62g). Ces calculs basés sur la méthode spectrale uni-modale et en assimilant le comportement du pont isolé à un système linéaire équivalent à un degré de liberté, nous permettent de constater que l'isolation sismique serait très efficace pour le cas étudié. Afin d'explorer davantage le potentiel de l'isolation sismique de la base des ponts dans le contexte algérien, des analyses dynamiques non linéaires sur un modèle à un degré de liberté d'un pont stratégique, situé dans la zone III (Alger) sur un sol ferme, type S2, ont été réalisées. Le modèle du pont isolé est représenté par un système masse- ressort avec un comportement bilinéaire caractérisé par la résistance caractéristique, Q_d , (résistance initiale avant glissement ou plastification du système) et la rigidité post-élastique, k_d , (rigidité du système de recentrage). Pour des fins pratiques nous avons considéré un pont ayant un poids sismique effectif, W , de 10000 kN et un système d'isolation de base ayant une résistance caractéristique de 210 kN, soit 2.1% W , et une rigidité post-élastique, k_d , de 6850 kN/m. Ce système correspond à un modèle linéaire équivalent ayant une période de 2.0 sec et un amortissement de 20%, calculés avec le spectre du code S6-06 pour Montréal et Vancouver. L'effet de la variation des caractéristiques hystéritiques de ce système de base a été examiné dans la référence [26] sous le contexte sismique Canadien. Dans la présente étude, nous avons fait varier les caractéristiques hystéritiques de base, afin d'illustrer comment ils affectent la réponse du pont. Les variantes étudiées et les propriétés de leurs systèmes linéaires équivalents respectifs calculés avec le spectre élastique d'Alger de la figure 2, sont données à la première ligne du tableau 3. Les analyses dynamiques non-linéaires ont été effectuées à l'aide du logiciel SAP 2000-v15 [22].

Le code RPOA (Cl. 4.3.3.2) recommande l'utilisation d'un nombre suffisant d'enregistrements sismiques réels ou artificiels couvrant le spectre du site pour obtenir une estimation fiable de l'action sismique au moyen d'une analyse dynamique temporelle. À Cet effet, quatre paires d'enregistrements horizontaux provenant du séisme de Boumerdès 2003 ont été utilisées. Afin de mieux estimer les réponses maximales, sans avoir à changer l'angle d'attaque du séisme sur le pont, ces paires d'enregistrement ont d'abord été transformées dans les directions principales pour extraire une

composante majeure (EQ1) et une composante mineure (EQ2) selon l'approche proposée par la référence [20]. Par la suite, les deux composantes ont été calibrées, dans le domaine du temps, sur le spectre de réponse élastique d'Alger pour 5% d'amortissement, selon la méthodologie d'ajout d'ondelettes détaillée dans la référence [21]. Le tableau 2 montre un résumé des principales caractéristiques des enregistrements utilisés, avant leur calibration, notamment leur distance de l'épicentre du séisme ainsi que les accélérations et les vitesses maximales dans les deux directions horizontales, x et y. Les spectres des enregistrements transformés et calibrés utilisés sont montrés à la figure 3.

Tableau 2 : Résumé des principales caractéristiques des enregistrements utilisés, avant transformation et calibration

	Station	R (km)	PGA (%g) x / y	PGV (m/s) x / y
Séisme Boumerdès, 21 mai 2003, Algérie, M. 6.8	Boumerdès	3.4	29.6 / 13.1	0.44 / 0.26
	Kedara	12.8	33.9 / 26.0	0.15 / 0.11
	Hussein Dey	29.9	27.5 / 23.6	0.19 / 0.18
	Azazga	42.3	12.2 / 8.8	0.14 / 0.12

Le tableau 3 présente les résultats obtenus par les analyses non linéaires sous les enregistrements utilisés en termes de force sismique maximale, V, de déplacement sismique maximal, D, et de déplacement résiduel, D_r, pour les différentes valeurs de Q_d et K_d considérées. Les valeurs maximales moyennes, plus représentatives des valeurs à adopter pour la conception, sont présentées sur l'avant dernière ligne du tableau.

Nous avons également effectué des analyses spectrales uni-modales des variantes étudiées, représentées par des modèles linéaires équivalents à un degré de liberté. La dernière ligne du tableau 3 présente les résultats de ces analyses. L'analyse spectrale uni-modale, d'un pont de poids sismique W, muni d'un système d'isolation ayant une résistance initiale Q_d et une rigidité pos-élastique k_d, est obtenue selon la procédure itérative suivante: 1) Supposer un déplacement sismique, D; 2) Calculer la force sismique maximale par F_{max}=Q_d+k_d D; 3) Déduire la rigidité effective par k_{eff}=F_{max}/D; 4) Déduire la période effective T_{eff}=2π(W/(gk_{eff}))^{1/2}; 5) Calculer l'énergie dissipée par cycle, EDC=4Q_d D; 6) Calculer le taux d'amortissement équivalent par β=EDC/(2πk_{eff}D²) et le facteur de correction d'amortissement η=(7/(2+β*100)^{1/2}; 7) Calculer la réponse spectrale, Sae(T_{eff},η) avec le spectre élastique du site (équation 3.1 du code RPOA); 8) Déduire le déplacement sismique D=Sae(T_{eff},η)/(2π/T_{eff})²; 9) Comparer le déplacement D obtenu à l'étape 8) à celui supposé à l'étape 1). En cas de non convergence (différence entre les deux déplacements à l'intérieur d'une tolérance choisie), reprendre à l'étape 1) avec le déplacement obtenu à l'étape 8) jusqu'à convergence [6,26].

À titre comparatif, le même pont non isolé ayant une période de 0.25 sec, un taux d'amortissement de 5% et répondant dans le domaine élastique subirait en moyenne un cisaillement à la base, V, de 6200 kN, un déplacement sismique de 17.1 mm et un déplacement résiduel nul. L'examen des résultats du tableau 3 permet de tirer les constatations suivantes, pour les cas étudiés :

- Les différentes variantes d'isolation sismique permettent une réduction plus ou moins importante du cisaillement sismique maximum, comparativement au pont non isolé. Le facteur de réduction brut moyen varie de 3.3 à 12.0;
- Le système le plus efficace en termes de réduction des forces sismiques est celui ayant la résistance caractéristique, Q_d, la plus petite. Cependant, les déplacements maximums et plus particulièrement le déplacement résiduel, associés à ce système peuvent devenir problématiques en présence d'un système de recentrage faible (k_d);
- Un bon compromis doit être trouvé entre la réduction des forces et des déplacements sismiques et une rigidité de recentrage adéquate est absolument requise pour contrôler le déplacement résiduel à un niveau acceptable.
- Les prédictions de l'analyse spectrale uni-modale sur un modèle linéaire équivalent fournissent un estimé assez proche (à ±10%) des valeurs maximales moyennes des analyses dynamiques non linéaires, pour des taux d'amortissement inférieurs à 30%. Elles ne permettent pas cependant d'estimer directement le déplacement résiduel.

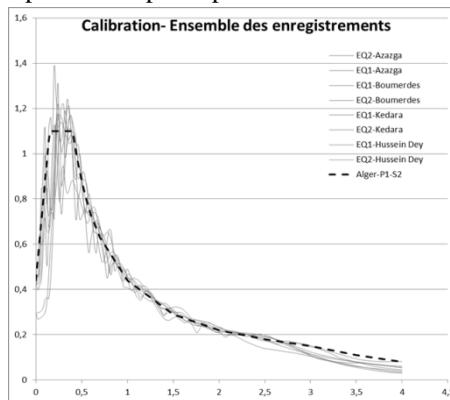


Figure 3: Spectres des enregistrements calibrés sur le spectre élastique d'Alger, pont stratégique, sol S2 et $\xi = 5\%$.

Tableau 3 : Résultats des analyses non linéaires spectrales uni-modales des variantes du pont isolé considérées.

Enregistrement sismique	$Q_d=420\text{kN}; k_d=6850\text{kN/m}$ ($T_e=2.23$ sec; $\xi=9.62\%$)			$Q_d=420\text{kN} ; k_d=13700\text{kN/m}$ ($T_e= 1.59$ sec, $\xi=15.9\%$)			$Q_d=210\text{kN} ; k_d=2100\text{kN/m}$ ($T_e= 3.50$ sec, $\xi=25.3\%$)		
	V (kN)	D (mm)	D_r (mm)	V (kN)	D (mm)	D_r (mm)	V (kN)	D (mm)	D_r (mm)
Boumerdès -1	1734	222	1	2329	139	0	558	166	7
Boumerdès-2	1478	185	8	1959	112	1	411	96	0
Keddara-1	1630	207	3	1979	114	1	428	104	6
Keddara-2	1668	213	1	2111	123	0	543	158	10
Houssein Dey-1	1734	222	3	1547	82	2	584	178	4
Houssein Dey-2	1491	187	19	1678	92	5	567	170	62
Azazga-1	1035	120	10	1617	87	3	512	144	25
Azazga-2	1522	192	39	1855	105	13	528	152	146
Moyenne	1536	194	11	1884	107	3	516	146	33
Spec. Mod. Éq.¹	1388	172.3	----	1687	92.5	---	526	150.8	---

¹ : Résultats d'analyse spectrale uni-modale (procédure itérative) sur modèle linéaire équivalent du système isolé.

7. CONCLUSION

Ce papier présente un survol de l'isolation sismique des ponts dans le contexte sismique et normatif algérien, basé sur l'expérience canadienne. Le potentiel que peut offrir l'isolation sismique des ponts a été exploré avec des études de cas basés sur des calculs par la méthode spectrale uni-modale et sur des analyses dynamiques non linéaires utilisant des enregistrements sismiques provenant du séisme de Boumerdès 2003, calibrés sur le spectre de calcul du code RPOA. Cette étude exploratoire démontre que l'isolation sismique peut apporter une réduction importante des forces sismiques allant de 3 à 12.0. Cependant, une attention particulière doit être accordée au choix des caractéristiques hystéritiques du système d'isolation afin de contrôler le déplacement imposé par la demande sismique et particulièrement le déplacement résiduel, lequel peut devenir problématique en présence d'un faible recentrage. Pour les cas étudiés, la méthode spectrale uni-modale appliquée aux systèmes linéaires équivalents a permis d'estimer les demandes sismiques en force et en déplacement de manière satisfaisante, avec une marge de l'ordre de 10%.

RÉFÉRENCES

- [1]- CRAAG, <http://www.craag.dz/surveillance%20sismologique/boumerdes.html>, consulté le 27 juin 2015.
- [2]- Azur séisme, <http://www.azurseisme.com/Seisme-de-Boumerdes.html>, consulté le 27 juin 2015.
- [3]- Ministère des Travaux Public Algérien, Organisme national de Contrôle Technique des Travaux Publics (CTTP), "Règles parasismiques applicables au domaine des ouvrages d'Art, RPOA 2008", 2008.
- [4]- R.I. SKINNER, W. ROBINSON, H. William , et G.H. MCVERRY, "An introduction to seismic isolation", John Wiley & Sons, 1993.
- [5]- F. Naeim, et J. Kelly, "Design of seismic Isolated Structures: From Theory to Practice", John Wiley & sons, 1999 (published online 2007).
- [6]- L. Guizani, "Sur l'isolation sismique des ponts au Canada", 10^{ème} colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, Québec, Qc, Canada, 2003.
- [7]-L. Guizani, "Isolation sismique et technologies sismiques pour les ponts au Québec: Mise au point", 14ième colloque sur la progression de la recherché québécoise sur les ouvrages d'art, Québec, Qc, Canada, 2007.
- [8]-L. Guizani L. et O. Chaallal, "Mise en conformité sismique des ponts par l'isolation de la base - Application au pont Madrid au Québec", Revue Canadienne de de génie civil, Vol. 38, No. 1, pp. 1-10, 2011. .
- [9]-CSA, "CAN/CSA-S6-00, Canadian highway bridge design code", 2000.
- [10]-CSA, "CAN/CSA-S6-00, Canadian highway bridge design code", 2006.
- [11]-CSA, "CAN/CSA-S6-014, Canadian highway bridge design dode", 2014.
- [12]-AASHTO, "Guide Specifications for Seismic Isolation Design", 3rd Edition, 2010.
- [13]-K. Kawashima, "Seismic isolation of highway bridges", J. of Japan Association for Earthquake Engineering, 04(03), 283-297, 2004.
- [14]- S. Unjoh, "Menshin (Seismic Isolation) bridges in Japan", Technical note of PWRI (Public Works Research Institute of Japan) No. 4288, 2014.
- [15]-CTC (Contrôle Technique de Construction), "Contact Chlef, Newsletter", No. 22, janvier-février 2009.
- [16]-CTC (Contrôle Technique de Construction), "Contact Chlef, Newsletter", No. 60, octobre 2012.
- [17]-A. Dusi, M. Mezzi et H. Azzouz, Relevant Italy-Algeria cooperation project on the application of advanced seismic protective techniques, 14 WCCE, Beijing, China, 2008.
- [18]-Parinaz P. (2014). Isolation parasismique de la base d'un pont (Bretelle A20/A73 à Lévi, Qc), Communiqué de presse sur le site de Goodco-Ztech /structal pont. Lien : <http://blog.structalbridges.com/fr/isolation-parasismique-base-dun-pont-2/>, sept. 2014.

- [19]-L. Guizani, Correspondance privée avec la firme de génie-conseil Tetra Tech, Ville du Québec (QC), Canada, janvier-février 2015.
- [20]-J. PENZIEN, M. WATABE, "Characteristics of 3-Dimensional Earthquake Ground Motions", *Coll. Earthquake Eng. and Struct. Dyn.*, 1975.
- [21]-J. HANCOCK, J. WATSON-LAMPREY, N.A. ABRAHAMSON, J.J. BOMMER, A. MARKATIS, E. MCCOY, R. MENDIS, "An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets", *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 10, n° SPEC. ISS. 1, p. 67-89, 2006.
- [22]-CSI, Computer & Structures, "SAP2000-Integrated Software for Structural Analysis and Design", Berkeley, CA, 2011.
- [23]-AFPS (Association Francais du Génie Parasismique), Rapport préliminaire: Séisme du 21 mai 2003 en Algérie, Version du 8 juillet 2003.
- [24]-N. Velev, J. fortier et C. Lemay, "Réhabilitation sismique d'un pont existant avec des appuis en élastomères frettés, retour vers l'avenir", 18^{ème} Colloque Québécois sur la progression de la recherche sur les ouvrages d'art, Québec,Qc,Canada, 2011.
- [25]-N. Velev, J. fortier et C. Lemay, "Réhabilitation sismique d'un pont existant avec des pendules à friction", 19^{ème} Colloque Québécois sur la progression de la recherche sur les ouvrages d'art, Québec,Qc,Canada, 2012.
- [26]-A. Beji et L. Guizani, "Assessment of temperature effects on base isolated bridges in eastern and western Canada", 11th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Victoria, C.B., Canada, 2015.