

Caractéristiques optimales des systèmes d'isolation sismique pour les ponts du Québec et potentiel des appuis frettés comme isolateurs sismiques

Au 27^{ième} colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, 5 et 6 Mai 2021, Ville de Québec (Qc)

Par : Lotfi Guizani¹, Xuan Dai Nguyen²

¹*Professeur, Dépt. de génie de la construction - ÉTS, Montréal, QC, Canada*
lotfi.guizani@etsmtl.ca

²*Candidat au doctorat, Dépt. de génie de la construction - ÉTS, Montréal, QC, Canada*
Chargé de cours, Institut des Techniques d'Ingénierie Spéciale, Université Technique de Le Quy Don, Hanoi, Vietnam.
xuandai.nguyen@lqdtu.edu.vn

Résumé

Cet article vise à déterminer les caractéristiques hystérétiques optimales des systèmes d'isolation sismique de la base pour les ponts situés dans les zones à sismicité élevée et à sismicité modérée, notamment au Québec et au Canada. La classification des zones sismiques a été effectuée sur la base des cartes de zonage sismique globales combinées aux paramètres spectraux des sites. Une étude paramétrique variant les propriétés de l'isolation sismique a été réalisée pour proposer la fourchette des valeurs optimales (minimisant la demande sismique en force et en déplacement) pour les deux localités de Montréal et Vancouver. Un ratio de résistance caractéristique par le poids allant de 1.5% à 4.5%. Un ratio de rigidité post-élastique par le poids entre $0.5m^{-1}$ et $4.0m^{-1}$, mais pouvant être évalué de façon plus précise par une corrélation avec les résistances caractéristiques sont proposés. Une étude de cas sur des ponts à deux travées, entre 30 et 40m, situées dans différentes localités au Québec montre que les appuis frettés, avec une épaisseur légèrement ajustée à la hausse, mais inférieure à 100mm peuvent réduire les forces sismiques de 2 à 5 fois tout en maintenant les déplacements sismiques en dessous de 60mm, selon le code S6-14. Finalement, pour augmenter la capacité de dissipation d'énergie des appuis frettés de sorte à rencontrer les valeurs optimales, un amortisseur métallique en U est proposé. Les références pour ces études détaillées sont identifiées.

1. Introduction : Contexte historique et normatif

L'isolation sismique (IS) de la base est une technique permettant de réduire les forces sismiques induites dans la structure en introduisant une grande flexibilité latérale entre le sol et l'ouvrage de sorte à allonger la période fondamentale de la structure et l'éloigner de la fourchette des périodes dominantes des séismes. En ce faisant, l'énergie captée par la structure est grandement réduite mais les déplacements sismiques se trouvent accrus. Pour contrôler ces déplacements, l'isolation sismique inclut, le cas échéant, un mécanisme de dissipation d'énergie, augmentant du fait même l'amortissement de la structure (pour les modes isolés).

Les systèmes d'isolation sismique ont été développés en premier pour des applications dans les zones ayant une activité sismique élevée, lesquelles ont vu les premières applications de cette technologie. Ainsi, la période allant de 1970 à 2000 a connu des applications de plus en plus nombreuses sur les ponts et bâtiments en Italie, la Nouvelle Zélande, le Japon et la Californie (États-Unis). Au Canada, les premières applications ont eu lieu en Colombie Britannique, région avec l'aléa sismique le plus élevé au pays, au début des années 1990. Néanmoins, lors des deux dernières décennies, l'isolation sismique a gagné beaucoup d'intérêt dans des régions à activité sismique modérée comme le Québec où après des premières applications qui remontent au début des années 2000, plusieurs ponts et viaduc sont isolés à la base (Guizani 2003, Guizani 2007). Dans un premier temps, au Québec, le contexte normatif du code canadien sur le calcul des ponts routiers, CSA-S6, dans ces versions 2000 et 2006, a indirectement encouragé le recours à l'isolation sismique. En effet, ces deux versions spécifiaient pour le Québec un spectre de calcul sismique basé sur celui de l'AASHTO, développé pour l'ouest du continent. En conséquence, ces spectres ne reconnaissaient pas les caractéristiques spécifiques de la sismicité de l'Est du continent et du Québec. À titre d'exemple, le même spectre de calcul, basé uniquement sur l'accélération maximale au sol (PGA), est spécifié pour les localités de Montréal (Qc) et de Vancouver (C.B.), malgré les différences importantes dans les caractéristiques de leur sismicité, notamment au niveau du contenu fréquentiel, sources de séismes, etc. (GC, 2021). Le code national du bâtiment du Canada a ajusté les données sismiques pour le Québec dans son édition 2005. Un tel changement n'a été reflété dans le code des ponts que tardivement, soit l'édition 2014 et ne s'est mis en application et

concrétisé sur le terrain que vers 2015-2016. Or, ce changement implique de très importantes différences au niveau du spectre de calcul pour les longues périodes, lesquelles intéressent particulièrement les applications de l'isolation sismique.

2. Objectifs et méthodologie

L'examen préliminaire des différences au niveau des spectres de calcul pour les localités du Québec, du code S6-06 et du code S6-14, montre que la demande sismique (réponse sismique maximale) pour les longues périodes est nettement réduite pour le Québec. Ceci amène à penser que l'efficacité de l'isolation sismique serait accrue et à se questionner sur la pertinence de recourir à des systèmes d'isolation plus adaptés, qui seraient potentiellement moins coûteux également.

L'objectif global de cet article est de présenter sommairement les résultats de quelques travaux de recherche réalisés à l'École de technologie supérieure poursuivant un objectif global de rendre l'isolation sismique des ponts plus accessible et plus adaptée au Québec. Les principaux objectifs spécifiques traités dans cet article sont les suivants: 1) classifier les zones sismiques du point de vue de l'isolation sismique de la base; 2) définir les fourchettes de valeurs optimales des principales caractéristiques des systèmes d'isolation dans chaque zone sismique, notamment pour le Québec; 3) Explorer le potentiel des appuis frettés comme système d'isolation pour les ponts au Québec en identifiant les rendements possibles, les limitations et une méthode d'améliorer leur performance.

Pour atteindre le premier objectif spécifique, une étude du zonage sismique mondial puis des caractéristiques de l'aléa sismique et du spectre de calcul utilisé dans différentes localités des zones à sismicité élevée et à sismicité modérée est effectuée pour en ressortir les caractéristiques communes vis-à-vis l'isolation sismique. Par la suite, pour atteindre l'objectif spécifique 2, une étude paramétrique faisant varier les caractéristiques principales du système d'isolation et du pont est effectuée et la réponse sismique maximale est évaluée pour chaque jeu de paramètres. Ensuite, l'effet de la variation des caractéristiques de l'isolation sismique sur la réponse maximale est étudié pour identifier la fourchette des valeurs optimales des caractéristiques de l'isolation sismique pour chaque classe de zone sismique. Finalement, l'objectif spécifique 3 est poursuivi via des études de cas de deux ponts types de deux travées. Pour ces cas d'étude, plusieurs localités au

Québec, notamment Montréal, au Saguenay et au Charlevoix sont considérés. Pour chaque pont et chaque localité, les appuis frettés sont dimensionnés et utilisés comme isolateurs sismiques. Des analyses sismiques au moyen de la méthode spectrale unimodale permettent de calculer la demande sismique (réponse sismique maximale) en force et en déplacement. Une comparaison de la demande sismique avec la variante de conception conventionnelle (non isolée) permet de déterminer le niveau de réduction des forces sismiques et du déplacement sismiques. La vérification des critères de stabilité est ensuite effectuée pour vérifier si les appuis frettés peuvent reprendre les déplacements sismiques combinés aux déplacements de service (thermiques et fluage). Un aperçu sur les limitations de l'appui fretté à titre d'isolateur sismique est donné et une technique d'ajout d'amortisseur métallique est présentée. Une formulation analytique et des résultats d'analyses non linéaires du comportement d'un système d'isolation sismique composé d'appuis frettés combinés à ces amortisseurs métalliques sont présentés. Les études plus complètes et plus détaillées de ces objectifs sont présentées dans des articles de revue (Nguyen et Guizani, 2020, Nguyen et Guizani 2021), une thèse de doctorat (Nguyen 2021) et un rapport de recherche basé sur une maîtrise (Tremblay et Guizani 2018).

3. Classification des zones sismiques et caractéristiques de l'aléa sismique

Le principe général des programmes de classification et de zonage sismique est basé sur les statistiques des tremblements de terre se produisant dans chaque région pour donner des évaluations sismiques. Généralement, ces programmes ont présenté des cartes globales d'aléa sismique basées sur l'accélération maximale au sol (PGA) avec une probabilité de dépassement de 10% dans 50 ans (une période de retour de 475 ans). La Figure 1 illustre un carte du globe de zonage sismique ((M. Pagan, 2018), produite dans le cadre de la poursuite et la mise à jour des résultats du programme mondial initial d'évaluation des risques sismiques GSHAP (Giardini, 1999; Shedlock, Giardini, Grunthal, & Zhang, 2000). Comme illustré, la ceinture de feu du Pacifique (la côte de l'Ouest de l'Amérique, Japon, Philippines, Indonésie, Nouvelle-Zélande, etc.) et la ceinture alpine-himalayenne (Italie, Turquie, Grèce, Albanie, etc.) sont connues comme les deux régions à sismicité la plus élevée au monde. Les régions formant ces ceintures (en jaune - orange) sont classées des régions à sismicité élevée où, les valeurs de PGA (475 ans) sont supérieures à 0.2g. D'autres régions sismiques comme: l'Est de l'Amérique du Nord, le nord-ouest de

l'Europe, etc. (identifiées en bleu) ont un taux d'activité sismique relativement plus faible où la plupart des sites dans ces régions ont un PGA de 0.0.08g à 0.2g. Ces régions sont classées des zones à sismicité modérée. Le territoire du Québec, en général (à l'exception de quelques foyers : Charlevoix), notamment les villes de Montréal, Québec et Hull, font partie de cette classification (d'après cette carte de classification mondiale). Les zones claires (bleu très pale et blanc) sont des zones à faible sismicité et ne présentent pas d'intérêt, actuellement, pour l'isolation sismique.

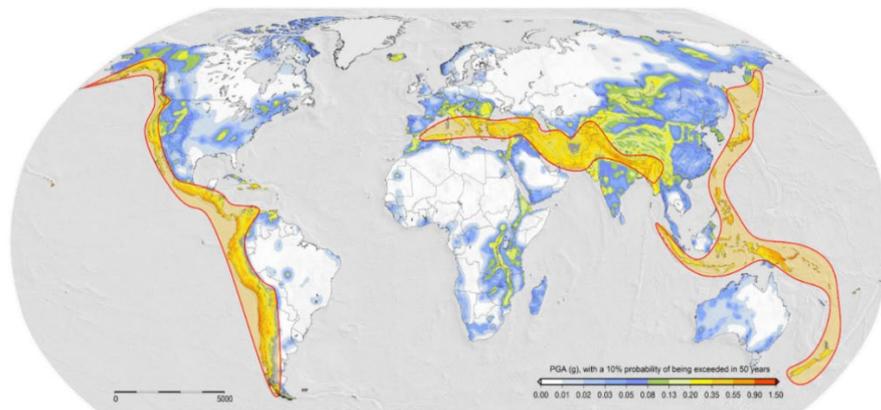


Figure 1. Carte mondiale d'aléa sismique, basée sur PGA au sol avec une probabilité de dépassement de 10% en 50 ans, adaptée de M. Pagni (2018)

Sur la base de cette classification des zones sismiques, les caractéristiques sismiques sont considérées dans un cadre de conception d'isolation sismique à la base. Pour ce faire, le rapport de PGA/PGV renseigne sur le contenu fréquentiel et sur la demande en dissipation d'énergie. Les ratios des valeurs de spectres de calcul d'accélération et de déplacement (avec une probabilité de dépassement de 2% en 50 ans) les périodes de 0.2s (représentative des structures non isolées) et 2.0s (représentative des structures isolées) sont employés comme indicateurs permettant la distinction des caractéristiques des zones sismiques en lien avec l'IS. Pratiquement, le ratio des accélérations spectrales (S_a) ($S_a(0.2)/S_a(2.0)$) indique le potentiel de réduction des force d'inertie suite à un allongement de la période de 0.2s à 2.0s. Similairement, le ratio des déplacements spectraux (S_d) ($S_d(2.0)/S_d(0.2)$) présente l'augmentation du déplacement suite à un tel allongement de la période. Des localités typiques à l'Est et à l'Ouest du Canada, représentatives respectivement des zones à sismicité modérée et à sismicité élevée, sont utilisées pour des analyses.

Tableau 1. Comparaison entre les caractéristiques de l'aléa sismique utilisé par le code CSA-S6- 19 pour des localités à l'Est et à l'Ouest du Canada

Sites	PGA / PGV (1/s)	$S_a(0,2) / S_a(2,0)$	$S_d(2.0) / S_d(0.2)$
Montréal	14.5	8.7	11.4
Québec	13.7	7.5	13.3
Ottawa	14.0	7.8	12.8
Rivière-du-Loup	13.8	9.0	11.1
Vancouver	6.5	3.3	30.3
Victoria	6.8	3.3	30.5

Les résultats du Tableau 1 montrent que les rapports PGA/PGV pour les sites à l'Est du Canada sont environ 2 fois plus élevés que pour les sites à l'Ouest. Ces résultats reflètent le fait que les ondes sismiques sur la côte Est sont caractérisées par un plus riche contenu de hautes fréquences par rapport ceux sur la côte Ouest du pays. De plus, les ratios de l'accélération spectrale, S_a , pour les sites à l'Est sont plus élevés (deux fois ou plus) que ceux des sites à l'ouest. À contrario, les ratios du déplacement spectral, S_d , à l'Est sont de l'ordre de la moitié et moins que ceux à l'Ouest.

L'étude de ces paramètres pour d'autres localités situées dans les zones à sismicité modérée et élevée en Europe et en Amérique aboutit à des résultats similaires que ceux obtenus pour l'Est et l'Ouest du Canada respectivement (Nguyen et Guizani, 2020).

Ils montrent que, pour les sites à l'est du Canada (zones modérées), l'allongement de la période de vibration par isolation sismique provoque une réduction plus importante (de l'ordre de 2 fois ou plus) de la force sismique et une augmentation plus fiable (de l'ordre de la moitié et moins) du déplacement sismique que les sites dans les zones à sismicité élevée. En d'autres termes, des systèmes d'isolation moins performants que ceux initialement développés pour les zones à sismicité élevée peuvent être très efficaces pour les ponts isolés dans les zones à sismicité modérée et en particulier au Québec.

4. Caractéristiques optimales des systèmes d'isolation sismique pour les ponts au Canada

Le comportement hystérique des systèmes d'isolation sismique courants est généralement idéalisé par un modèle bilinéaire de la relation force-déplacement, tel que montré sur la .

Typiquement, la rigidité élastique initiale (K_u) est très élevée et joue un rôle mineur sur la réponse sismique du pont isolé. La résistance caractéristique initiale (Q_d) et la rigidité latérale post-élastique (K_d) sont les deux propriétés primaires les plus importantes gouvernant la réponse sismique du pont isolé (Castaldo & Tubaldi, 2018; Choun, Park, & Choi, 2014; CSA-S6, 2019; Dicleli & Buddaram, 2006; Dicleli & Karalar, 2011; Liu & Zhang, 2016; Zhang & Huo, 2009).

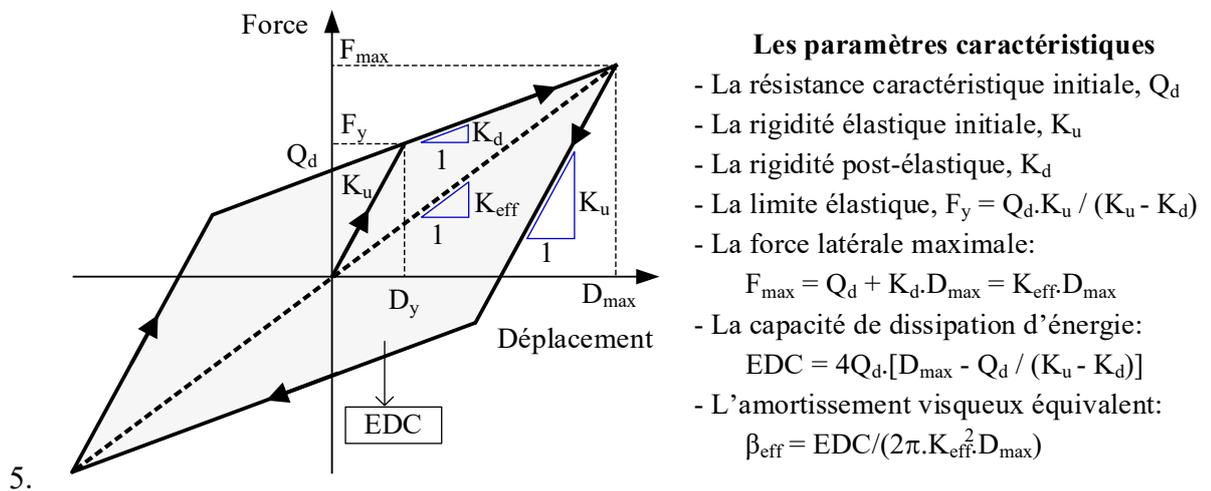


Figure 2. Modèle d'hystérésis bilinéaire

La performance de l'isolation sismique est évaluée par les réponses sismiques maximales en force (F_{\max}) et déplacement (D_{\max}) du pont isolé. Par conséquent, le critère d'optimisation de l'isolation sismique consiste à minimiser la force sismique maximale et le déplacement sismique maximal. Comme ces deux réponses suivent des tendances contraires, il s'agira alors de choisir la fourchette des propriétés optimales comme étant celle occasionnant une force sismique maximale proche du minimum et un déplacement sismique maximum contrôlé et proche du minimum.

Pour déterminer la fourchette des valeurs de Q_d et k_d optimales, une étude paramétrique est effectuée en faisant varier ces propriétés et en considérant les deux localités de Montréal (sismicité modérée) et de Vancouver (sismicité élevée) pour l'aléa sismique. La superstructure est supposée relativement rigide et considérée comme un diaphragme dans

le plan. Tous les isolateurs subissent le même déplacement latéral et leurs propriétés peuvent être regroupées dans un système unique d'isolateur équivalent où la propriété équivalente globale (Q_d ou k_d) est la somme des propriétés de tous les isolateurs. En considérant une seule direction, la structure du pont isolé avec la sous-structure supposée rigide est modélisée comme un système à un degré de liberté (1 DDL) (AASHTO, 2017; CSA-S6, 2019; Dicleli & Buddaram, 2007; ECS, 2005a; Guizani, 2007; Jara, Jara, Olmos, & Casas, 2012; Koval, Christopoulos, & Tremblay, 2016). Ce faisant, le pont isolé peut être modélisé par un modèle simplifié à un degré de liberté (1DDLD). Pour généraliser les résultats, un poids sismique W quelconque a été considéré et les propriétés Q_d et k_d ont été normalisés par ce poids (sous forme de Q_d/W et k_d/W) Ce modèle est toujours approprié pour les ponts avec les sous-structure (unités de fondation) flexibles, tant que les masses des sous-structures restent faibles (Buckle, Constantiou, Dicleli, & Ghasemi, 2006; Shiravand & Rasouli, 2019; Wei & Buckle, 2012), puis la propriété équivalente est combinée en série de l'isolateur et de la substructure. Par ailleurs d'autres variantes avec des localités en Europe et aux états unis ont été étudiés, mais leurs résultats ne sont pas résumés ici (Nguyen, 2021).

Deux méthodes d'analyse sismique ont été utilisées pour les modèles à un degré de liberté représentant les variantes du pont générées par l'étude paramétrique : 1) Analyse spectrale unimodale avec le spectre de calcul du code S6-19, sur le modèle linéaire équivalent et ayant recours à un processus itératif et ; 2) Analyse temporelle non-linéaire, utilisant le modèle bilinéaire et une sélection d'enregistrements sismiques (48 enregistrements artificiels et 6 historique) calibrés sur les spectres de calcul (2% en 50 ans) conformément aux indications du code S6-19 (Nguyen et Guizani, 2020).

Les effets de la variation de Q_d et de k_d sur la demande en force et en déplacement du pont isolé sont illustrés par la figure 3 pour les deux sites.

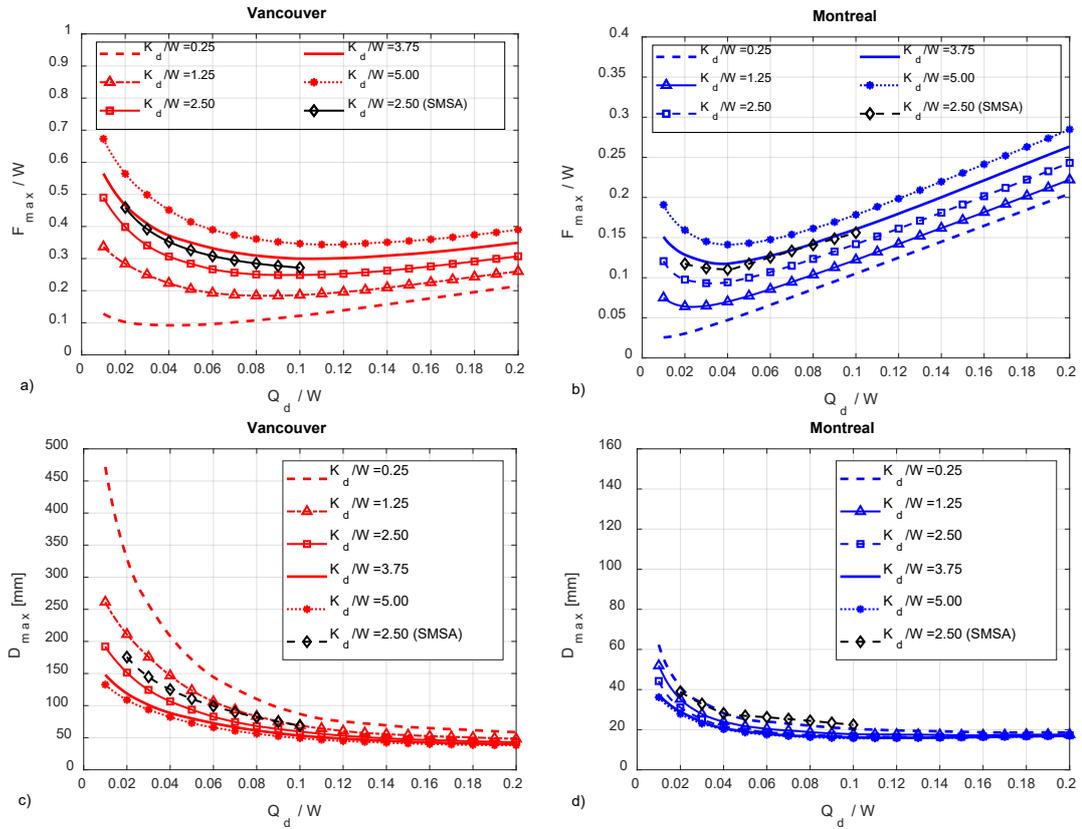


Figure 3. Effets de variation de Q_d/W et de K_d/W sur la F_{max} et D_{max} : (a,c) Vancouver, (b,d) Montréal

D'après ces résultats, nous tirons les constatations suivantes :

Pour le site de Montréal (zone à sismicité modérée) : l'augmentation de Q_d au-delà d'un certain seuil se traduit par une augmentation de F_{max} , des valeurs faibles à modérées ($Q_d/W = [0.015 \text{ à } 0.045]$) sont les plus appropriées.

Pour le site de Vancouver (zone à sismicité élevée) : F_{max} diminue avec l'augmentation de Q_d , jusqu'à une limite supérieure (de $0.12W$ à $0.14W$), au-delà de laquelle F_{max} augmente avec l'augmentation de Q_d , zone optimale $Q_d/W = [0.08 \text{ à } 0.12]$.

Ces valeurs des fourchettes optimales sont supportées par une analyse statistique des résultats : distribution des valeurs de Q_d minimisant F_{max} . (Nguyen et Guizani 2020, Nguyen 2021)

La rigidité post-élastique, K_d , influence D_{max} et F_{max} de manières opposées. En général, si K_d augmente, F_{max} augmente et D_{max} diminue. Ces effets sont plus significatifs pour les

ponts dans les zones à sismicité élevée (Vancouver) mais sont nettement plus faibles pour Montréal (sismicité modérée). Néanmoins, des valeurs trop faibles de K_d conduisent à de grands D_{\max} et surtout des déplacements résiduels, D_r , trop élevés. Des valeurs optimales de $K_d/W(m-1) = [0.5 \text{ } 4]$ sont recommandées pour les deux localités. Les valeurs plus petites sont préférées, notamment à Vancouver (HSA) pour limiter F_{\max} .

Une valeur minimale de $K_d/W > 0.5 \text{ m}^{-1}$ assure le contrôle du déplacement résiduel, $D_r < 6 \text{ mm}$ pour Montréal et 15 mm pour Vancouver. Une corrélation linéaire entre k_d optimal et Q_d optimal est proposée dans Nguyen et Guizani, 2021^a

5. Potentiel des appuis frettés pour l'isolation sismique des ponts au Québec

Tel que montré par les résultats précédents, les caractéristiques optimales des systèmes d'isolation sismique pour les régions à sismicité modérée, comme le Québec (en général) diffèrent de ceux dans les régions à sismicité élevée, comme Vancouver. En fait, les systèmes d'isolation sismique à amortissement modéré sont plus souhaitables pour le Québec. Dès lors, une étude a été réalisée pour évaluer le rendement des appuis frettés comme isolateurs sismiques pour les ponts de deux travées s dans différentes localités du Québec (Tremblay et Guizani, 2018). Ces ponts sont munis d'appuis frettés et sont modélisés par un système à un degré de liberté et analysés au moyen de la méthode simplifiée (spectrale unimodale). Plusieurs paramètres ont été variés, notamment le type de pont (poutres en acier de 39m de travée, poutres en béton précontraint NEBT de 33m de travée), les dimensions des appuis, la dureté de l'élastomère, l'épaisseur de l'appui, la flexibilité des piles et la localité (Montréal, Saguenay et la Malbaie). Sur la base d'essais expérimentaux sur des appuis en caoutchouc fretté utilisés au Québec, un amortissement de 5% à 20°C et de 7.95% à -9.5°C a été attribué aux appuis. Le spectre du code CSA-S6-14 a été utilisé.

Les résultats indiquent que selon la hauteur de la pile, les appuis frettés peuvent être dimensionnés, en ajustant leur épaisseur pour atteindre des réductions de force sismique (par rapport à la variante non isolée) allant de 3.2 à 5.4 pour les ponts à poutre en acier et de 2.6 à 4.4 pour les ponts avec poutre NEBT. Dans les deux cas, les déplacements

sismiques demeurent inférieurs à 57mm, soit de l'ordre de 1.2 à 2.3 fois le déplacement sismique du pont non isolé.

Les vérifications des différents critères de stabilité et capacité de déformation des appuis et montrent que des appuis frettés d'une épaisseur de 100mm et plus sont généralement satisfaisants pour toutes les localités du Québec à l'exception de la région du Charlevoix (laquelle nécessite des appuis plus épais).

6. Avenue d'amélioration des appuis frettés pour fin d'isolation sismique

Nguyen et Guizani (2021) ont étudié le rendement des appuis frettés en caoutchouc naturel par rapport aux caractéristiques optimales déterminées plus haut. En tenant compte de la variabilité des propriétés de ces appuis sous l'effet de la température notamment, les résultats montrent que ces appuis permettent une réduction de la force sismique et performant mieux que des appuis frettés en caoutchouc à haut taux d'amortissement (HDRB) qui sont très sensibles aux basses températures. Néanmoins, l'amortissement associé aux appuis frettés en caoutchouc naturel est en dessous de l'amortissement optimal (Q_d/W optimal). Les auteurs ont proposé de combiner ces appuis avec des amortisseurs métalliques en U. Les principaux avantages de ces amortisseurs sont leur faible coût, la flexibilité de conception et leur insensibilité aux effets des basses températures. Ces amortisseurs ont été formulés analytiquement et des expressions de leur rigidité, résistance et capacité d'amortissement sont proposées. En variant le nombre et les dimensions des amortisseurs en U, il est possible d'ajouter ces amortisseurs aux appuis (existants ou neufs) pour atteindre l'amortissement et la résistance initiale désirés, tels que les valeurs optimales pour les zones à sismicité modérée ou élevée. Nguyen 2021 a démontré la fiabilité d'une telle amélioration des appuis frettés pour fins d'isolation sismique au Canada et leur meilleur rendement que les appuis à Noyau de plomb ou à caoutchouc avec amortissement élevé.

Références

- AASHTO. (2017). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 8th Edition. In *American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC*.
- Atkinson, G. M. (2009). Earthquake time histories compatible with the 2005 National building code of Canada uniform hazard spectrum. *Canadian Journal of Civil Engineering, 36*(6), 991-1000.
- Buckle, I., Constantiou, M., Dicleli, M., & Ghasemi, H. (2006). *Seismic isolation of highway bridges*: MCEER, University at Buffalo, the State University of New York.
- Castaldo, P., & Tubaldi, E. (2018). Influence of ground motion characteristics on the optimal single concave sliding bearing properties for base-isolated structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 104*, 346-364.
- Choun, Y.-S., Park, J., & Choi, I.-K. (2014). Effects of mechanical property variability in lead rubber bearings on the response of seismic isolation system for different ground motions. *Nuclear Engineering and Technology, 46*(5), 605-618.
- CSA-S6. (2014). CSA-S6-14, Canadian highway bridge design code. In: Canadian Standards Association.
- CSA-S6. (2019). CSA-S6-19, Canadian highway bridge design code. In: Canadian Standards Association.
- Dicleli, M., & Buddaram, S. (2006). Effect of isolator and ground motion characteristics on the performance of seismic-isolated bridges. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 35*(2), 233-250.
- Dicleli, M., & Buddaram, S. (2007). Comprehensive evaluation of equivalent linear analysis method for seismic-isolated structures represented by sdof systems. *Engineering Structures, 29*(8), 1653-1663.
- Dicleli, M., & Karalar, M. (2011). Optimum characteristic properties of isolators with bilinear force–displacement hysteresis for seismic protection of bridges built on various site soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 31*(7), 982-995.
- ECS. (2005a). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. In: European Committee for Standardization Brussels.
- Giardini, D. (1999). The global seismic hazard assessment program (GSHAP)-1992/1999. *Annals of Geophysics, 42*(6).
- Guizani, L. (2003). Isolation sismique au Canada, 10^{ième} colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, Québec (Qc), 2003
- Guizani, L. (2007). *Isolation sismique et technologies parasismiques pour les ponts au Québec: Mise au point*. Paper presented at the 14e Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art.
- Jara, M., Jara, J., Olmos, B., & Casas, J. (2012). Improved procedure for equivalent linearization of bridges supported on hysteretic isolators. *Engineering Structures, 35*, 99-106.
- Koval, V., Christopoulos, C., & Tremblay, R. (2016). Improvements to the simplified analysis method for the design of seismically isolated bridges in CSA-S6-14. *Canadian Journal of Civil Engineering, 43*(10), 897-907.

- Liu, T., & Zhang, Q. (2016). AP/VP specific equivalent viscous damping model for base-isolated buildings characterized by SDOF systems. *Engineering Structures*, *111*, 36-47.
- M. Pagani, J. G.-P., R. Gee, K. Johnson, V. Poggi, R. Styron, G. Weatherill, M. Simionato, D. Viganò, L. Danciu, D. Monelli. (2018). Global Earthquake Model (GEM) Seismic Hazard Map (version 2018.1 - December 2018). doi:10.13117/GEM-GLOBAL-SEISMIC-HAZARD-MAP-2018.1
- NRCAN. (2020). Earthquakes Canada - Canada. Retrieved from <http://earthquakescanada.nrcan.gc.ca>
- Nguyen, X.-D. (2021). *Contributions sur l'optimisation et l'analyse de l'isolation sismique des ponts dans les zones à sismicité modérée*, Thèse de doctorat, École de technologie supérieure, juin 2021.
- Nguyen X.-D. et Guizani, L. (2020) Optimal seismic isolation characteristics for bridges in moderate and high seismicity areas, *Revue canadienne de génie civil*, *48*(6): 642-655. <https://doi.org/10.1139/cjce-2020-0058>
- Nguyen X.-D. et Guizani, L. (2021) Analytical and numerical investigation of natural rubber bearings incorporating U-shaped dampers behaviour for seismic isolation, sous presse, *Journal of Engineering Structures*, Elsevier, accepté en mai 2021.
- Shedlock, K. M., Giardini, D., Grunthal, G., & Zhang, P. (2000). The GSHAP Global Seismic Hazard Map. *Seismological Research Letters*, *71*(6), 679-686. Retrieved from <http://pubs.er.usgs.gov/publication/70022421>.
- Shiravand, M., & Rasouli, M. (2019). *Effects of substructure mass participation on natural period of multi-column base isolated bridges*. Paper presented at the Structures.
- Tremblay, D. et Guizani, L. *Capacité d'isolation sismique des appareils d'appui à élastomère fretté pour les ponts au Québec selon le code canadien sur le calcul des ponts routiers S6-14*, Rapport de recherche DRSR No. 201810-01-LG, École de technologie supérieure
- Wei, C., & Buckle, I. (2012). *A simplified method of analysis of isolated bridges with yielding substructures*. Paper presented at the Structures Congress 2012.
- Zhang, J., & Huo, Y. (2009). Evaluating effectiveness and optimum design of isolation devices for highway bridges using the fragility function method. *Engineering Structures*, *31*(8), 1648-1660. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029609000674>. doi:<http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.02.017>