



Laval (Grand Montréal)

Du 12 au 15 Juin 2019 / June 12 - 15, 2019

SCÉNARIOS DE RISQUE SISMIQUE D'UN RÉSEAU MUNICIPAL DE PONTS POUR L'ÉVALUATION DES IMPACTS ÉCONOMIQUES

Fezai, H.^{1,3}, Nollet, M.-J.¹, Abo El Ezz, A.²

¹ École de technologie supérieure, Montréal, QC, Canada

² Ressources naturelles Canada, La commission géologique du Canada, Québec, QC, Canada

³ hamza.fezai.1@ens.etsmtl.ca

Résumé : Dans des régions qui sont sujettes aux tremblements de terre, les dommages aux ponts peuvent entraîner une perte de fonctionnalité du réseau routier. Par conséquent, l'évaluation sismique des ponts est cruciale pour établir des stratégies d'intervention et rétablir les réseaux routiers afin d'assurer le maintien des services essentiels tels que l'accès aux hôpitaux et l'acheminement des secours. L'objectif de cette étude est d'utiliser les résultats de scénarios sismiques pour identifier rapidement l'état de dommage des ponts d'un réseau municipal. Quatre étapes sont proposées dans cet article. La première étape consiste à interpréter un modèle d'aléa sismique générant une distribution spatiale de l'intensité de tremblement de terre pour différents scénarios sismiques. La deuxième étape est de construire un inventaire des ponts selon des classes définies en fonction des matériaux de construction et des systèmes structuraux. La troisième étape est d'évaluer la performance sismique des ponts du réseau selon des données de fragilités respectives aux différentes classes de ponts. La dernière étape utilise les résultats de l'étape précédente pour définir un modèle d'impact qui représente l'état du trafic routier selon la distribution et l'importance des dommages et l'estimation du coût de réparation. Ces données sont ensuite utilisées pour planifier les inspections après séisme du réseau de ponts. L'approche intègre les incertitudes sur les données de fragilité et sur l'intensité du séisme du scénario considéré. Cet article présente une étude de cas pour l'évaluation des dommages d'un réseau de ponts situé au Québec et soumis à un scénario sismique d'une magnitude M6.

1 INTRODUCTION

Après un tremblement de terre, l'évaluation sismique des ponts est primordiale pour prioriser les inspections, planifier les réparations et rétablir les réseaux routiers. De même, une évaluation rapide de l'état d'un réseau des ponts est essentielle pour prendre une décision éclairée sur son niveau de fonctionnalité (Lin et al. 2004, Wald et al. 2006). Généralement, la vulnérabilité sismique des ponts est définie par le produit de la fragilité d'une structure exposée et de sa valeur socio-économique. Un modèle de fragilité est une fonction qui décrit la probabilité qu'une structure atteigne un niveau de dommage pour une intensité sismique donnée. Sur la base de l'état d'endommagement d'un pont et de sa capacité à supporter le flux de circulation, il est possible de déterminer le coût de réparation et le niveau de fonctionnalité des ponts du réseau (Werner et al. 2006, Padgett et DesRoches 2007). La génération de scénarios de dommages pour plusieurs intensités sismiques permet alors de définir la vulnérabilité de l'ouvrage, prioriser les ponts d'un réseau et ainsi planifier les mesures de mitigation (Werner et al. 2006). Dans le but de pouvoir identifier rapidement l'état d'un réseau de ponts et optimiser le processus décisionnel suite à un séisme, il est nécessaire d'étudier d'une part, les paramètres pertinents pouvant influencer la vulnérabilité sismique des ponts et d'autre part, l'impact des scénarios sur l'état du réseau et sur les pertes économiques. Cet article présente une approche rapide d'évaluation sismique qui permet

d'identifier l'état de dommage d'un réseau municipal de 39 ponts situés dans la ville de Québec. Un scénario sismique d'une magnitude 6.0 avec un épicentre à 10 km du centre de la ville est considéré.

2 MÉTHODOLOGIE

La méthodologie proposée comprend quatre étapes principales, illustrées à la Figure 1. Le modèle d'aléa sismique est basé sur des équations de prédiction du mouvement du sol en générant une distribution spatiale de l'intensité de tremblement de terre pour différents scénarios sismiques. L'intensité est considérée d'abord en termes des accélérations de la réponse spectrale $S_a(t)$ et, ensuite, selon des valeurs de l'accélération horizontale maximale du sol PGA. Le modèle d'exposition fournit une base de données des classes de ponts. Celles-ci sont identifiées par les critères de classification des ponts du Ministère des transports du Québec (MTQ), et sont ensuite associées aux classes correspondantes pour lesquelles les données de fragilité sont générées. La base de données intègre alors des caractéristiques pouvant affecter la fragilité des ponts telles que les matériaux de construction, le comportement sismique et les systèmes structuraux. Finalement, le modèle de dommage intègre des données de fragilité respectives aux classes des ponts permettant d'évaluer ses réponses dynamiques face aux événements sismiques. L'ensemble de ces informations sert à définir un modèle d'impact qui représente l'état du trafic routier, la priorité d'inspection des ponts du réseau et le coût de réparation. L'ensemble de ces étapes inclut les incertitudes sur les données de fragilité et sur l'intensité du séisme du scénario considéré.

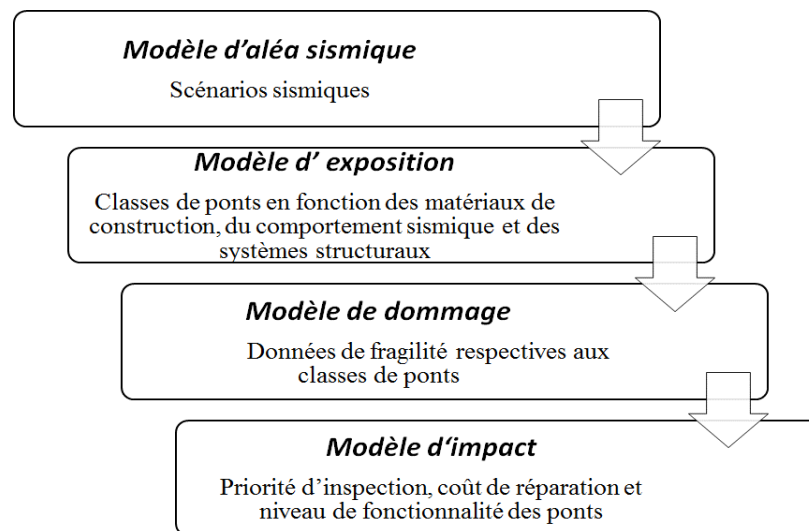


Figure 1 : La méthodologie d'évaluation du risque sismique.

2.1 Modèle d'aléa sismique

Le modèle d'aléa sismique est fondé sur un algorithme simple qui a été développé relativement à une distance, une magnitude et une géométrie de faille spécifiques (Nastev et al. 2015). Cet algorithme utilise des équations de prédiction du mouvement du sol (GMPEs) développées par Atkinson et Adams (2013). Il applique la nouvelle génération des modèles de prévision du mouvement du sol de l'Est du Canada pour des valeurs spectrales de référence, notamment PGA et $S_a(T)$. Celles-ci sont établies pour le code national du bâtiment du Canada CNBC 2015 (NRC 2015). Les incertitudes concernant l'aléa sismique sont quantifiées en considérant des modèles alternatifs des GMPEs. Deux niveaux de confiance (inférieur et supérieur) sont définis pour exprimer l'incertitude d'un niveau central représentatif. Ces trois niveaux des GMPEs ont été définis pour chaque type d'événement sismique (crustal oriental, crustal occidental, interface, intraslab et offshore). Pour identifier les différents scénarios sismiques, une analyse de régression est déterminée en évaluant la relation des valeurs de $S_a(T)$ et de PGA par rapport à la magnitude et à la distance épicentrale. Sur la base du code canadien sur le calcul des ponts routiers 2014

(CSA S6-14), les valeurs de la réponse spectrale et celles de l'accélération horizontale maximale du sol sont ajustées en fonction des conditions locales du site. La classe de site de référence est de type sol très dense et roche tendre. La mesure d'intensité sismique est corrigée à l'aide des facteurs d'amplifications du sol qui sont déterminés à l'aide d'une valeur moyenne de l'onde de cisaillement (V_{s30}).

2.2 Base de données des ponts

Un inventaire de pont permet de répertorier un ensemble des groupes de structures. Il peut être réalisé à l'échelle locale des ponts ou à l'échelle régionale soit, en se fondant sur les bases de données du département des transports, soit en interprétant des données des ponts municipaux. Cette étude concerne un réseau de 39 ponts à poutres en béton situés au Québec, dont 20 ponts sont à travée unique et 19 ponts sont à travée multiple (Figure 2).

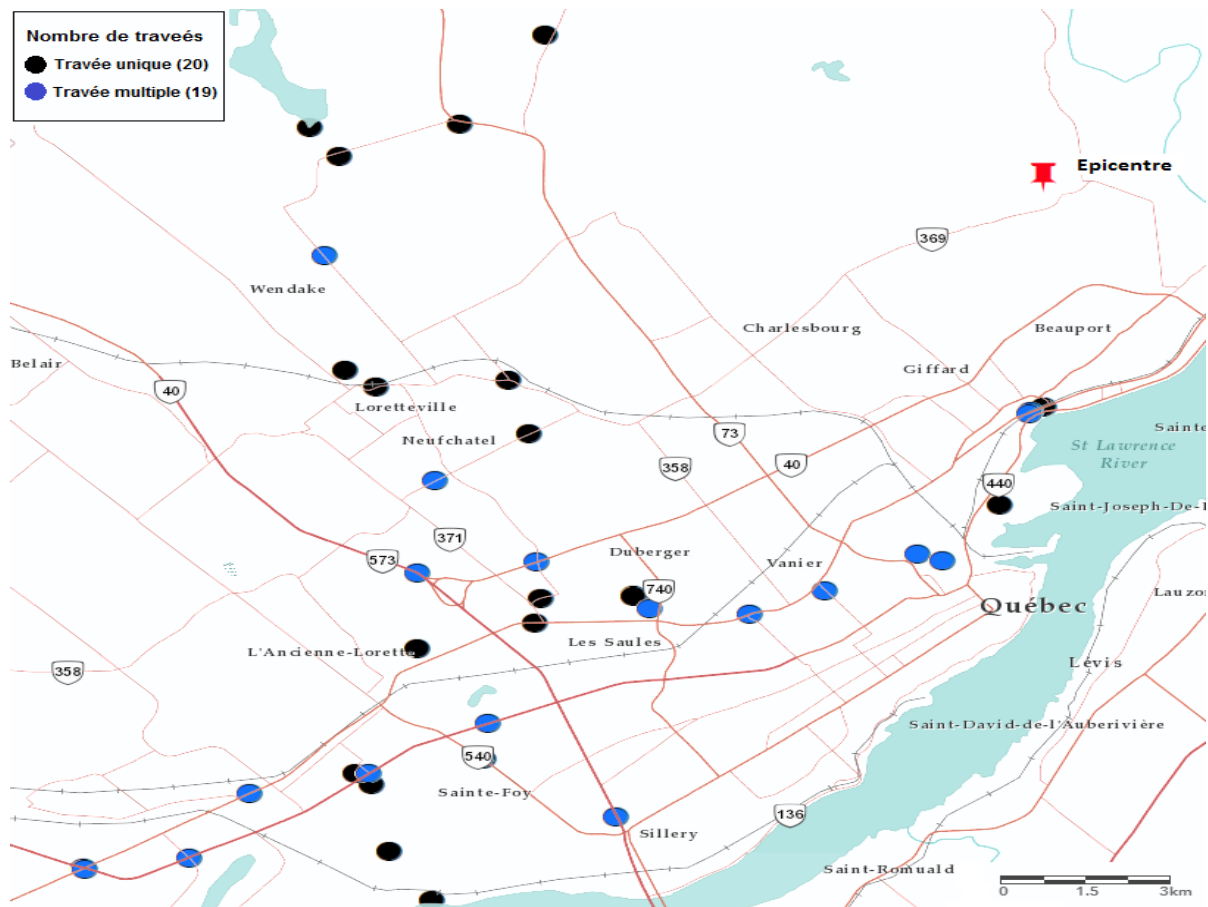


Figure 2 : Carte illustrant l'emplacement d'un réseau de 39 ponts à poutre en béton (figure réalisée par l'auteur).

La classification des ponts du MTQ se base principalement sur le fonctionnement mécanique qui est caractérisé par le mode de transmission des charges aux appuis et sur les matériaux de construction. D'autres critères peuvent être aussi ajoutés pour identifier le type du pont, tel que la section transversale (pont dalle ou pont à poutre) ou la disposition en plan (droit, avec biais ou courbe) etc. (MTQ 2013). Pour simplifier les analyses structurelles, des structures individuelles des ponts sont classées selon leur comportement attendu sous les charges sismiques (Basoz et Mander 1997, FEMA 2012). La taxinomie des ponts dans Nielson (2005) est basée essentiellement sur le type de travée; travée unique (TU), travée

multiple simplement appuyée (TMSA) ou travée multiple continue (TMC), ainsi que sur le type de matériau des poutres; béton ou acier. Le Tableau 1 présente une classification adoptée pour les ponts types de l'Est des États-Unis (Nielson, 2005). Dans cette étude préliminaire, les ponts individuels du réseau sont classés à l'aide de la base de données du MTQ et sont ensuite attribués une classe selon la taxinomie des ponts de Nielson pour laquelle les courbes de fragilité sont générées. Cette classification est une approximation du premier ordre des ponts de l'Est du Canada. Les 39 ponts du réseau sont alors regroupés en deux classes différentes; 20 ponts appartiennent à la classe (TU-Béton) et 19 ponts sont inclus dans la classe (TMSA-Béton). De plus, plusieurs paramètres reliés à la vulnérabilité sismique des ponts sont répertoriés pour intégrer les incertitudes dans l'inventaire : année de construction; type de structure (béton, acier ou bois); nombre de travées (unique ou multiple); type de pile (à colonne unique, à colonnes multiples ou mur); type de culée (monolithique ou non); type de l'appareil d'appui (en élastomère ou en acier); continuité de travées (continue, simplement appuyée ou discontinue); angle de biais. Il convient de noter que le réseau étudié ne représente qu'un échantillon des ponts de la grande région de la ville de Québec.

Tableau 1: Classification des ponts de l'Est des États-Unis (Nielson 2005).

Travée multiple continue	Travée multiple simplement appuyée	Travée unique
TMC-Béton	TMSA-Béton	TU-Béton
TMC-Acier	TMSA-Béton (Poutre-cassions)	TU-Acier
TMC-Dalle	TMSA-Acier	
	TMSA-Dalle	

2.3 Fonctions de fragilité

L'une des étapes principales de l'évaluation du risque sismique est de créer une méthode mathématique discrète pour estimer l'état de dommage des ponts du réseau. Les courbes de fragilité liées aux classes des ponts permettent de donner la probabilité d'atteindre les différents niveaux de dommages (aucun, faible, modéré, avancé ou complet) en fonction d'une intensité sismique donnée (Équation 1). Ceci est particulièrement pratique dans les régions à sismicité modérée telles que le Québec (Tavares, 2012).

$$[1] \text{ Fragility} = P[LS / IM] = y$$

Où LS est l'état limite de dommage des ponts et de leurs composants, IM est la mesure d'intensité sismique et y est la mesure réalisée de l'intensité sismique, exprimée souvent en termes de PGA ou de $S_a(T)$. Ils existent trois approches principales pour créer des fonctions de fragilité : (1) des méthodes basées sur le jugement et l'opinion d'expert estiment la probabilité de dommages pour différentes intensités sismiques. Cette estimation a été établie par un questionnaire normalisé (ATC 1985); (2) des méthodes empiriques utilisent des données de dommages issues d'observations post-sismiques (Basoz et Kiremidjian 1999, Shinozuka et al. 2000, Yamazaki et al. 2000); (3) des méthodes analytiques reposent sur des modèles mécaniques structurels ou des modèles numériques afin de simuler la réponse des ponts face aux sollicitations sismique (FEMA 2012, Tavares et al. 2012). Les données de fragilité fournies par Nielson sont développées à l'aide des états limites qualitatifs et des modèles probabilistes de demande sismique (PSDMs). Ces derniers sont générés par une analyse dynamique temporelle non linéaire. Le PSDM de chaque classe de pont peut être représenté sous la forme d'une fonction de distribution log-normale ou d'un modèle de puissance déterminé par une mesure d'intensité appropriée. Dans cette étude, chacune des deux classes des ponts est analysée indépendamment par une fonction de distribution log-normale en se basant sur les données de fragilité établies par Nielson (2005). Les valeurs de la médiane sont considérées en fonction des accélérations horizontales maximales du sol. La Figure 3 présente les fonctions de fragilité appliquées aux deux classes des ponts. Les courbes de fragilité (a) montrent la distribution des niveaux probables de dommages correspondants à la classe (TMSA-Béton), tandis que les courbes de fragilité (b) concernent la classe (TU-Béton).

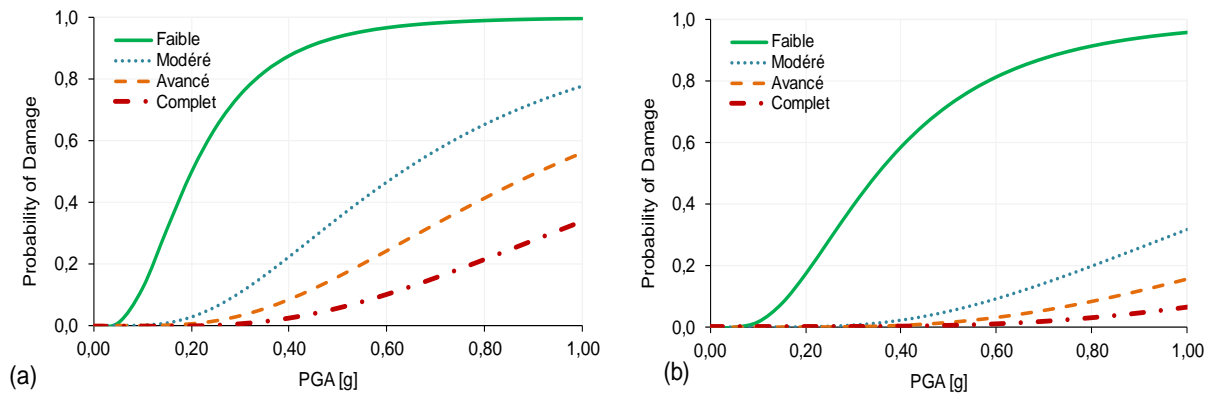


Figure 3 : Courbes de fragilité appliquées pour des ponts à poutre en béton; (a) courbes correspondent à (TMSA-Béton); (b) courbes correspondent à (TU-Béton) (selon Nielson2005).

2.4 Analyse d'impact

Sur la base de l'évaluation des degrés de dommages, les dégâts causés aux ponts sont quantifiés à l'aide d'un modèle d'impact. Celui-ci est décrit par une analyse statistique en considérant le facteur moyen de dommage (FMD), la variance et l'écart type. Le FMD de chaque pont est déterminé d'après une somme pondérée, en fonction du rapport moyen de dommage (D_i) et de la probabilité d'être dans chaque état de dommage $P(DSi)$ (Équation 2).

$$[2] FMD = \sum_{i=1}^4 D_i \cdot P(DSi)$$

Pour estimer les impacts économiques sur les ponts du réseau, les états de dommages attendus (aucun, faible, moyen, avancé ou complet) sont basés sur l'estimation du coût de réparation de REDARS (Werner et al. 2006). Par conséquent, chaque niveau de dommage est présenté respectivement, en fonction d'un (D_i) et d'un intervalle du rapport de dommage (Tableau 2). La valeur du FMD de chaque pont est alors associée à l'intervalle du rapport de dommage approprié pour identifier les priorités d'inspections et l'état probable du trafic routier (Lin et al. 2014). Elle peut être ensuite utilisée pour estimer le coût de réparation (Werner et al. 2006).

Tableau 2 : États des dommages des ponts correspondant à la priorité d'inspection et l'état probable du trafic routier après un séisme (Lin et al. 2003 et Werner et al. 2006).

État de Dommage	Aucun	Faible	Modéré	Avancé	Complet
Intervalle du rapport de dommage	0	1%-5%	5%-50%	50%-80%	80%-100%
Rapport moyen de dommage (D)	0	3%	25%	75%	100%
Priorité d'inspection	Aucune	Faible	Moyenne	Moyenne à élevée	Élevée
État probable du Trafic après évènement	Ouvert au trafic normal Sans restrictions	Ouvert au trafic normal Sans restrictions	Ouvert à un trafic limité Restrictions de Vitesse/poids/voie	Véhicule d'urgence seulement Restrictions de Vitesse/poids/voie	Fermé jusqu'à étayer /renforce /renforce Risque d'effondrement

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Dommages aux ponts

Une fois que les ponts sont classés et analysés, un scénario sismique déterministe est envisagé avec une magnitude 6.0 et un épicentre à 10 km du centre de la ville de Québec. Les degrés de dommages sont estimés pour chaque pont du réseau à l'aide d'un FMD. Le calcul de ce ratio est effectué en termes de l'accélération horizontale maximale du sol. Pour tenir compte des incertitudes épistémiques, les équations de prédiction du mouvement du sol sont déterminées pour les deux niveaux de confiance (inférieur et supérieur). Dans cette étude préliminaire, les résultats de l'état des ponts sont basés sur des GMPEs représentatifs (central). Quant aux effets du site, l'algorithme d'Atkinson et Adams (2013) considère une vitesse moyenne de l'onde de cisaillement égale à 760 m/s. Celle-ci est à la limite des classes du sol B et C (CSA S6-14). Les valeurs de PGA sont alors ajustées en fonction des facteurs d'amplification correspondants à chaque emplacement du pont selon les informations tirées de la carte de microzonage sismique de la ville de Québec (LeBoeuf et al. 2013). La Figure 4 illustre les états de dommages probables des ponts du réseau pour chaque niveau des GMPEs.

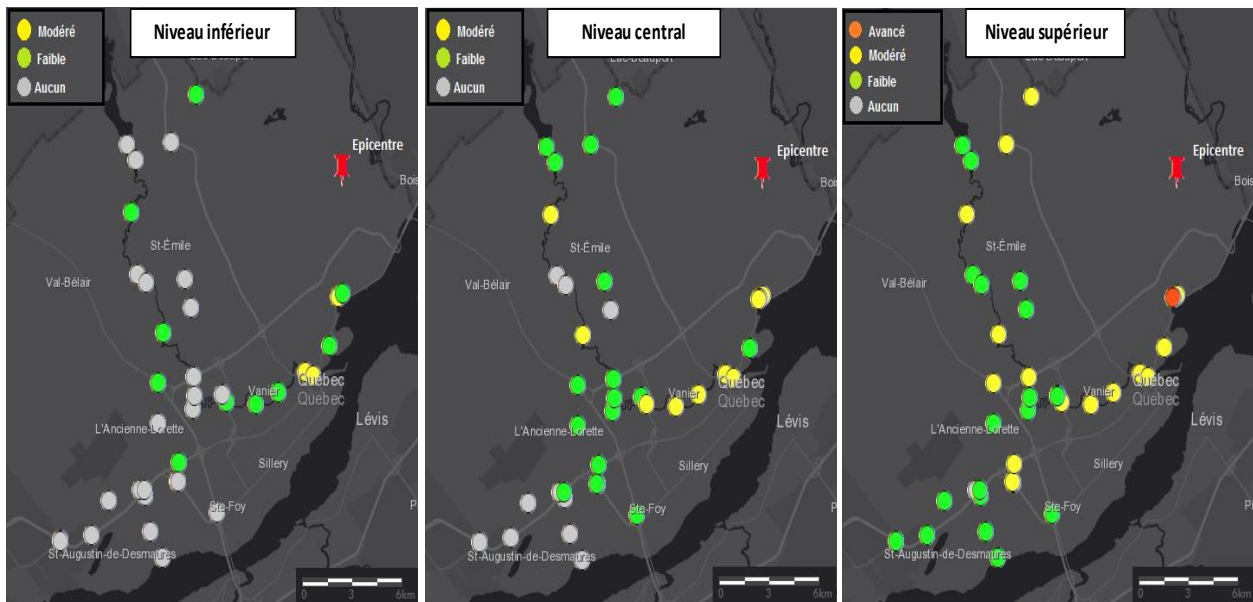


Figure 4 : Évaluation des dommages pour un scénario M6.0 correspondant aux trois niveaux des GMPEs (figure réalisée par l'auteur).

Comme l'indique la Figure 4, les dommages attendus sont proportionnels aux trois niveaux des GMPEs. De plus, la majorité des ponts avoisinant l'épicentre ont subi des dégâts plus importants que d'autres, plus éloignés. Ceci est dû au fait que les PGA élevées sont adjacentes à l'épicentre. Exécutant le niveau central des GMPEs, les résultats montrent que 10 ponts du réseau sont modérément endommagés, dont 9 ponts appartiennent à la classe (TMSA-Béton) et un seul pont appartient à la classe (TU-Béton). Conformément aux courbes de fragilités définies, les ponts à poutre à travée multiple sont plus vulnérables que ceux qui sont à travée unique. En outre, les variations du type de sol ont indiqué un changement des niveaux de dommages, expliquant l'impact des effets du site sur la réponse sismique des ponts.

3.2 Analyses d'impact

Les résultats des degrés de dommages pour un niveau central des GMPEs sont utilisés pour estimer les impacts économiques sur les ponts du réseau. Sur la base d'un FMD, les 10 ponts qui ont subi des

dommages modérés sont examinés. L'état probable du trafic routier indique un niveau de fonctionnalité moyen où les ponts sont ouverts à un trafic limité avec une restriction de vitesse, de poids et de voie. Les 10 ponts modérément endommagés sont en une priorité d'inspection moyenne. Les pertes économiques peuvent être estimées en multipliant les valeurs de FMD par un coût de réparation moyen, exprimé en dollar par unité de surface. Le Tableau 4 présente les FMD des ponts subissant des dommages modérés.

Tableau 4 : Facteur moyen de dommage des ponts.

Classes des ponts	Ponts avec dommages modérés	FMD (Ratios du coût de réparation)
TMSA-béton	9	36%;35 %;15% ;14% ;11% ;9% ;8% ;7% ;6%
TU-béton	1	12%

4 CONCLUSION

Cet article décrit une approche qui permet d'identifier rapidement les états de dommages et les impacts économiques sur un réseau municipal de ponts. Les quatre étapes de la méthodologie proposée ont été discutées. Le réseau routier étudié, compte un total de 39 ponts à poutres en béton situés dans la ville de Québec. Les ponts sont classés d'après leur matériau de construction et d'après leur type de travée; 20 ponts sont à travée simple (TU-Béton) et 19 ponts sont à travée multiple simplement appuyée (TMSA-Béton). Les fonctions de fragilité appropriées aux deux classes des ponts ont été développées par la méthodologie de Nielson (2005). Les incertitudes sur les données de fragilité sont alors incluses suite à l'intégration de la demande sismique des ponts et de leurs composants. Le modèle de prévision du mouvement du sol décrit par Atkinson et Adams (2013) est un outil exprimant l'intensité de secousse sismique. Il tient compte des incertitudes concernant l'aléa sismique, en utilisant les deux niveaux (supérieur et inférieur) des GMPEs. Les effets du site sont pris en compte par des facteurs d'amplification correspondant à l'emplacement de chaque pont. Un scénario sismique d'une magnitude 6.0 avec un épïcêtre à 10 km du centre de la ville a été considéré. Une analyse statistique est ensuite réalisée pour déterminer les états de dommages probables et les impacts économiques sur les ponts du réseau. Le degré évalué de dommage a été utilisé pour estimer le coût de réparation, la priorité d'inspection et le niveau de fonctionnalité des ponts. Les résultats indiquent que les paramètres influençant la vulnérabilité d'un pont dépendent de la classe du pont, des effets du site et des données de fragilité considérées. Une telle évaluation rapide de l'état de ponts est essentielle pour prendre une décision éclairée sur leur niveau de fonctionnalité après un tel évènement sismique. Elle peut être également utilisée pour planifier les mesures de mitigation avant un séisme. Les travaux futurs devraient porter sur la collecte des données requises afin d'améliorer la base de données des ponts et d'intégrer des données de fragilité plus fiable.

Remerciements

Cette étude est basée sur une recherche financée par la commission géologique de Canada (CGC). Leur soutien est grandement apprécié. La CGC fait partie du Secteur des sciences de la Terre de Ressources naturelles Canada. Elle contribue à la gestion des risques géologiques naturels. Les auteurs tiennent à remercier l'équipe de recherche du département de construction de l'école des technologies supérieure de Montréal pour leur contribution à l'achèvement de cet article.

Références

- ATC. 1985. Earthquake damage evaluation data for California. *ATC-13*. Applied Technology Council, Redwood City, California.
- Atkinson, G.M. et Adams, J. 2013. Ground motion prediction equations for application to the 2015 Canadian national seismic hazard maps. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **40**(10), 988-998.
- Basoz, N, et Mender, J. 1999. Enhancement on the Highway Transportation Lifeline Module in Hazus. 1999. *National Institute of Building Sciences*, Washington, DC, USA.

- Basoz, N, et Kiremidjian, A. S. 1999. Development of empirical fragility curves for bridges. *Optimizing post-earthquake lifeline system reliability*, ASCE, Reston, VA.
- CAN/CSA. 2014. *Code canadien sur le calcul des ponts routiers - CAN/CSA-S6-14*. Mississauga (Ont.): Association canadienne de normalisation, chapitre 4.
- FEMA. 2012. Multi-Hazard Loss Estimation Methodology, Earthquake Model, HAZUS-MH MR1 Technical Manual. 2012. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C, USA.
- Leboeuf, D., Perret D., Nollet M-J., Lamarche L., Nastev M. et Parent M. 2013. *Microzonage sismique des Villes de Québec-Ancienne-Lorette et Réserve indienne de Wendake (Catégories d'emplacement)*. Commission géologique du Canada, Dossier Public 6875, Échelle 1: 50,000, doi: 10.4095/292640.
- Lin, K.W., Turner, L.L. et Wald, D. 2014. ShakeCast V3: An Enhanced Tool for Post-Earthquake Response. *Caltrans Division of Research, Innovation & System Information*, Sacramento, CA, USA.
- MTQ. 2013. *Ouvrages d'art Tome III, Classification des ouvrages d'art*. Direction générale des infrastructures et des technologies, Ministère des Transports du Québec, Les publications du Québec, Québec.
- Nastev, M., Nollet, M.J., Abo El Ezz, A., Smirnov, A., Ploeger, S.K., McGrath, H., Sawada, M., Stefanakis, E. et Parent, M. 2015. Methods and tools for natural hazard risk analysis in eastern Canada: Using knowledge to understand vulnerability and implement mitigation measures. *Natural Hazards Review*, **18**(1), p.B4015002.
- Nielson, B.G. 2005. Analytical fragility curves for highway bridges in moderate seismic zones. *Doctoral dissertation*, Georgia Institute of Technology, USA.
- Nilson, E. 2008. Seismic risk assessment of the transportation network in Charleston, SC. *Master dissertation*, Georgia Institute of Technology, USA.
- NRC. 2015. National Building Code of Canada, NBCC 2015. *National Research Council of Canada*. Ottawa, Canada.
- Padgett, J.E. et DesRoches, R. 2007. Bridge functionality relationships for improved seismic risk assessment of transportation networks. *Earthquake Spectra*, **23**(1):115-30.
- Tavares, D.H., Padgett, J.E. et Paultre, P. 2012. Fragility curves of typical as-built highway bridges in eastern Canada. *Engineering Structures*, **31**(40):107-18.
- Shinozuka, M., Feng, M. Q., Lee, J., et Naganuma, T. 2000. Statistical analysis of fragility curves. *J. Eng. Mech.*, 10.1061/(ASCE)0733-9399 (2000)126:12(1224), 1224-1231.
- Wald, D.J., Lin, K.W., Worden. B. et Turner, L. 2006. ShakeCast: Facilitating the use of ShakeMap for post-earthquake decision-making and response within Caltrans and other critical lifeline communities. *Fifth National Seismic Conference on Bridges & Highways*; San Francisco, USA, 2006.
- Werner, S., Taylor, C., Cho, S., Lavoie, J.P., Huyck, C., Eitzel, C., Chung, H. et Eguchi, R. 2006. *REDARS 2 methodology and software for seismic risk analysis of highway systems (technical manual)*. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER): Oakland, CA. 2006.
- Yamazaki, F., Motomura, H., et Hamada, T. 2000. Damage assessment of expressway networks in Japan based on seismic monitoring. *Proc., 12th World Conf. on Earthquake Engineering (CD-ROM)*, 1-8.