

RENTABILITÉ POTENTIELLE DE L'ISOLATION SISMIQUE SUR LE CYCLE DE VIE DES PONTS

Jean-François Martel, ing. et Yannick Maltais, ing. Ph. D.

CIMA+, Société d'ingénierie, 1145, boul. Lebourgneuf, bureau 300, Québec, Canada

RÉSUMÉ

L'utilisation d'équipements spécialisés pour atténuer les effets des séismes, tels que les isolateurs sismiques, représente une solution prometteuse pour réduire l'envergure des systèmes structuraux conventionnels de résistance aux charges latérales des ponts. L'objectif de l'étude réalisée pour le compte du ministère des Transports du Québec est de cibler les circonstances dans lesquelles l'utilisation d'isolateurs sismiques présente un avantage économique sur la durée de vie (75 ans) des nouveaux ponts construits au Québec. Pour ce faire, des ponts conçus selon différents ensembles de paramètres représentant les ouvrages couramment construits par le Ministère ont été étudiés. Une cinquantaine de ponts ont ainsi été dimensionnés en utilisant l'approche de conception basée sur la performance de la norme CAN/CSA S6-14. Les coûts de construction de ces ponts, conçus avec et sans isolateurs sismiques, ont ensuite été estimés. Par la suite, les coûts des ponts sur l'ensemble de leur cycle de vie ont été évalués, incluant les coûts des réparations anticipées suite aux séismes probables. Pour ce faire, les courbes de fragilité de différents éléments des ponts ont été obtenues, puis combinées aux courbes de l'aléa sismique des localités considérées dans le cadre de l'étude. Les coûts sur le cycle de vie des ponts conçus avec et sans isolateurs sismiques ont finalement été comparés de manière à déterminer dans quelles circonstances l'isolation sismique des ponts présente un avantage économique sur la durée de vie de ces ouvrages.

OBJECTIF

L'étude vise à orienter le ministère des Transports du Québec dans l'utilisation d'équipements spécialisés permettant d'atténuer les effets des séismes sur les ponts courants du Ministère, soit des ponts à multiples travées, de catégories urgence et secours. De façon plus particulière, cette étude vise à cibler les situations dans lesquelles l'utilisation d'isolateurs sismiques présente un avantage économique sur la durée de vie (75 ans) des nouveaux ponts construits au Québec.

MÉTHODOLOGIE

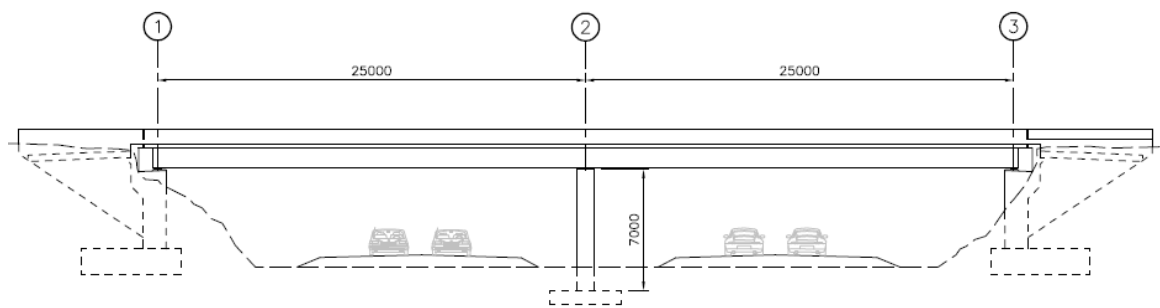
Afin d'atteindre l'objectif énoncé précédemment, trois géométries de ponts ont été définies. Pour chacune de celles-ci, différents paramètres d'analyse ont été considérés et combinés entre eux. Dans tous les cas, les ponts étudiés ont d'abord été dimensionnés (avec ou sans système d'isolation) selon les charges prévues par les codes et normes applicables aux nouveaux ponts construits au Québec. Les coûts de construction de ces ponts ont aussi été évalués.

Une méthode d'analyse a ensuite été élaborée pour établir l'étendue des dommages causés aux ponts suite aux séismes probables dans les régions où ceux-ci sont implantés. Réalisé en collaboration avec Polytechnique Montréal, cet exercice a été fait pour les aléas sismiques des localités de Montréal, La Malbaie et Rivière-du-Loup.

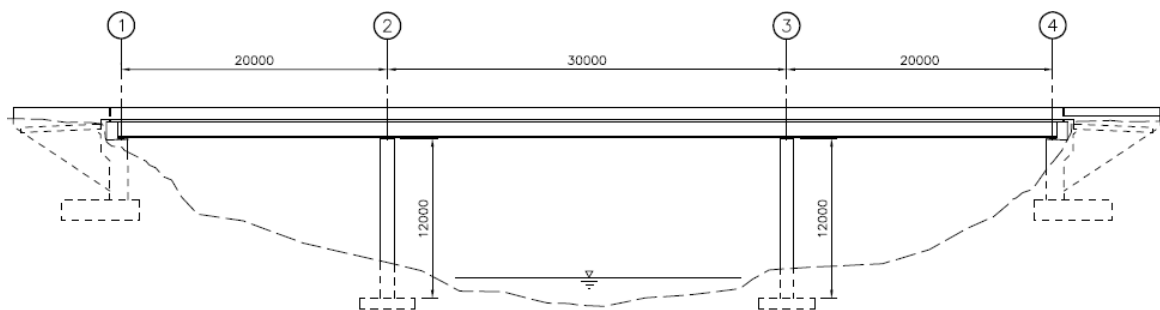
Une fois ce travail complété, l'estimation de l'ensemble des coûts encourus sur le cycle de vie des ponts a été réalisée. Pour ce faire, les coûts de réparation de ces ponts suite aux séismes probables ont été évalués. Ces coûts ont enfin été ajoutés à ceux associés à l'exploitation et l'entretien des ouvrages.

CARACTÉRISTIQUES ET DIMENSIONNEMENT DES PONTS ÉTUDIÉS

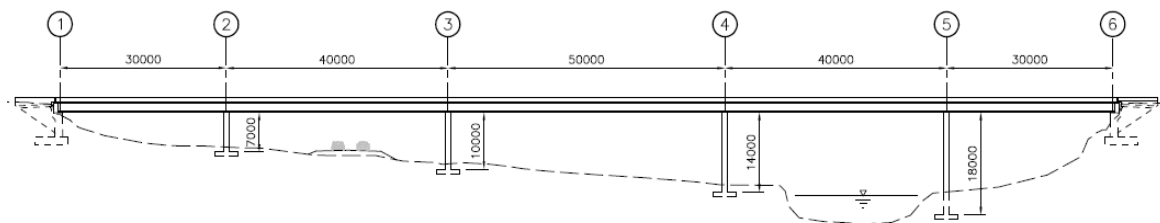
Cette étude a tout d'abord débuté par la sélection de ponts visant à représenter le parc d'infrastructures du ministère des Transports du Québec. Ces ponts se définissent par une géométrie (voir figure 1) et un ensemble de paramètres (voir tableau 1) choisis en considérant les résultats obtenus lors d'une étude paramétrique réalisée par Maltais et coll. (2012). Dans ce qui suit et à titre d'exemple, un pont de type 1-A (i) est un pont à deux travées (géométrie type 1) conçu selon l'ensemble de paramètres A (pont de secours, construit à Montréal sur fondations superficielles).



a) Géométrie de type 1



b) Géométrie de type 2



c) Géométrie de type 3

Figure 1 : Géométries des ponts considérées dans cette étude

Tableau 1 : Ensembles de paramètres considérés dans cette étude

Paramètre	A	B	C	D	E	F
Localité	Montréal	La Malbaie	Rivière-du-Loup	Montréal	La Malbaie	La Malbaie
Catégorie d'importance	Secours	Secours	Secours	Urgence	Urgence	Autre
Appui fondation	(i) Roc, (ii) Pieux	(i) Roc, (ii) Pieux	(i) Roc, (ii) Pieux	Roc	Roc	Roc

Aux combinaisons de paramètres présentées au tableau 1 s'ajoutent diverses variantes liées à des choix de conception usuellement faits au cours du processus d'élaboration des plans et devis d'un projet (voir le tableau 2).

Tableau 2 : Paramètres choisis par le concepteur

Type de tablier	Fixités du tablier	Nombre de modules joints	SRFS *
Lourd, léger	No des unités de fondation	1, 2, 3, etc.	Conventionnel, isolé

* SRFS : Système de résistance aux forces sismiques.

Les ponts ont été dimensionnés conformément au Code canadien sur le calcul des ponts routiers (CAN/CSA S6) et au *Manuel de conception des structures* du ministère des Transports du Québec. Notons que les charges sismiques et la philosophie de conception prévues par la norme CAN/CSA S6-14 (parue en mars 2015) sont significativement différentes des prescriptions apparaissant à l'édition antérieure de cette même norme. Dans le cadre de cette étude, les charges sismiques pour la récurrence 1 : 2475 ans et la méthodologie prévues à la norme CAN/CSA S6-14 ont été utilisées de manière à maximiser l'intérêt du travail réalisé. Les fondations ont donc été dimensionnées avec une approche basée sur la performance (*Performance-Based Design*). Selon cette approche, la conception des différents éléments se fait pour un niveau de performance donné selon, notamment, l'importance de l'ouvrage et l'importance des éléments considérés en regard de la stabilité de l'ouvrage. Différents critères de performance sont ainsi associés à des événements de différentes probabilités d'occurrence.

Interaction sol-structure pour les cas avec fondations profondes

Les ponts construits par le MTQ sur des sites dont la catégorie d'emplacement, définie conformément à la norme CAN/CSA S6-14, correspond à C, D ou E sont, dans une proportion importante, construits sur des fondations profondes. Pour ces cas, la modélisation de l'interaction sol-structure peut avoir une influence significative sur le dimensionnement des pieux et la réponse dynamique de l'ouvrage. Une procédure simplifiée utilisant des ressorts en translation et en rotation, basée sur les corrélations de Chen (2000), de même qu'une modélisation détaillée en 3D avec ressorts en translation provenant de courbes p-y obtenues par la méthode des différences finies, ont permis la prise en compte de l'interaction sol-structure dans un processus itératif, et ce, pour l'ensemble des ponts étudiés sur fondations profondes.

ESTIMATION DES COÛTS DE CONSTRUCTION DES PONTS

Rappelons que le principal objectif de cette étude est d'évaluer la rentabilité de l'isolation sismique en comparant les coûts sur le cycle de vie des ponts conçus de manière conventionnelle à ceux des mêmes ponts, mais conçus en utilisant l'isolation sismique comme moyen de mitigation des effets des tremblements de terre. La première étape de cette analyse des coûts sur le cycle de vie est l'estimation des coûts de construction.

L'estimation sommaire des coûts de construction de tous les ponts considérés dans le cadre de l'étude a été faite en se basant sur la *Liste des prix suggérés 2014 – Construction et réparation* fournie par le MTQ et des prix obtenus pour des projets comparables réalisés par CIMA+ au cours des dernières années.

ÉVALUATION DES DOMMAGES CAUSÉS PAR LES SÉISMES PROBABLES

Cette section présente l'approche retenue pour évaluer l'endommagement des ponts suite aux séismes probables auxquels les ponts considérés dans cette étude pourraient être exposés sur leur durée de vie. Il s'agit essentiellement, dans un premier temps, d'obtenir les courbes de fragilité des différents éléments des ponts qui sont susceptibles de subir des dommages lors d'un séisme. Ces dernières ont ensuite été combinées aux courbes d'aléa sismique d'une localité pour déterminer l'envergure des réparations prévues pour les ponts construits dans une localité donnée, et ce, suite aux séismes probables sur une période de 75 ans. Afin d'illustrer l'approche retenue, l'étude de la variante conventionnelle du pont 1-A (i) est présentée dans ce qui suit. À titre de précision, le pont de type 1-A (i) à tablier léger possède un tablier de type dalle sur poutres d'acier d'une largeur de 11,9 mètres. Il comprend deux travées de 25 mètres chacune. La pile centrale compte trois colonnes à section circulaire d'une hauteur de sept mètres.

Modèle numérique pour l'analyse non linéaire

Le pont de type 1-A (i) sélectionné pour la réalisation des analyses non linéaires présente l'avantage d'être peu complexe, en ayant notamment une seule pile, ce qui permet d'extrapoler les résultats tirés de son analyse aux autres variantes de ponts considérées. Tel qu'indiqué au tableau 1, le pont de type 1-A (i) est un pont de « Secours ». Le dimensionnement de ce pont a donc été fait pour que cet ouvrage demeure ouvert à toute circulation suite à un séisme de probabilité d'occurrence 1 : 975 ans. En conséquence, l'endommagement des joints et murs garde-grèves a été prohibé.

Les analyses dynamiques incrémentales (IDA) décrites plus loin ont été effectuées avec le logiciel SeismoStruct. Les éléments finis de fibres (voir figure 2) permettent de modéliser les segments de colonnes dont on souhaite caractériser le comportement non linéaire. Les autres éléments sont modélisés et se comportent dans le domaine linéaire élastique.

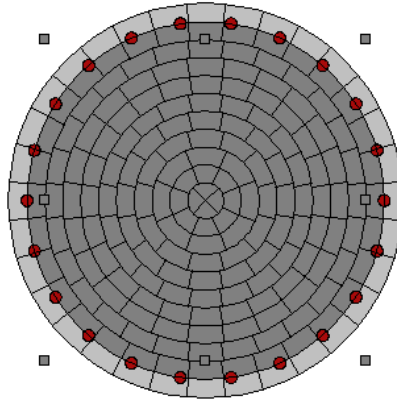
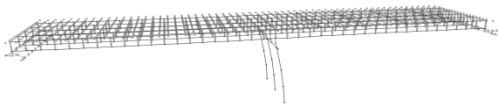


Figure 2 : Section de la colonne inélastique

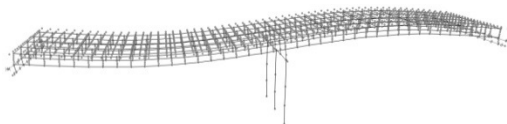
Pour valider le modèle SeismoStruct, une comparaison des premiers modes de vibration des ponts a été réalisée entre les modèles SeismoStruct et CSi-Bridge (voir la figure 3).

Modèle CSi-Bridge

1^{er} mode : T = 0,949 s

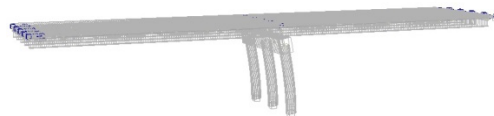


2^e mode : T = 0,308 s



Modèle SeismoStruct

1^{er} mode : T = 0,944 s



2^e mode : T = 0,345 s

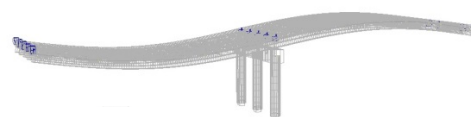


Figure 3 : Comparaison des analyses des premiers modes de vibration obtenus des logiciels CSi-Bridge et SeismoStruct

Courbes de fragilité

Les courbes de fragilité sont des outils efficaces pour évaluer la vulnérabilité sismique des ponts. Elles constituent une distribution de la probabilité qu'un élément structural atteigne ou dépasse un critère d'endommagement précis à l'occurrence d'une secousse sismique ayant une intensité donnée. Il est à noter que le paramètre d'intensité de la secousse sismique (ISS) retenu pour cette étude est l'accélération spectrale à la période fondamentale de la structure ($S_a(T_1)$). Le choix de ce paramètre a été fait en collaboration avec Polytechnique Montréal et découle notamment des recommandations de Mackie et Stojadinovic (2003).

La vulnérabilité sismique d'un pont peut être mesurée en décrivant le comportement de quatre éléments principaux : la pile, les appareils d'appui, les joints d'expansion et les murs garde-grèves. Notons que l'évaluation de la réponse en déplacement permet, pour ces quatre éléments, une bonne caractérisation de leur comportement. Pour évaluer la réponse en déplacement d'un pont, des analyses dynamiques temporelles non linéaires sont nécessaires. Ces dernières nécessitent la sélection d'un certain nombre d'accélérogrammes représentatifs du site où se trouve l'ouvrage.

Sélection des secousses sismiques

Onze (11) enregistrements ont été sélectionnés parmi les accélérogrammes synthétiques générés par Atkinson (2009). La procédure proposée par cet auteur et le spectre d'aléa uniforme (UHS) du CNBC 2010 ont été utilisés pour choisir les secousses sismiques permettant l'analyse d'un pont construit à Montréal sur un sol présentant un profil de type C. Pour couvrir adéquatement le contenu fréquentiel susceptible de contrôler la réponse du pont étudié, les accélérogrammes ont été sélectionnés en considérant notamment la période du mode fondamental du pont à l'étude. Pour ce faire, les paires magnitude (M) et distance (R) suivantes ont été considérées : M = 6 et R = 15 km (5 enregistrements pour hautes fréquences) et M = 7 et R = 25 km (6 enregistrements pour basses fréquences). Les accélérogrammes ont ensuite été étalonnés afin d'obtenir une accélération spectrale égale à 1 g à la période fondamentale du pont. Notons que les résultats obtenus de ces accélérogrammes peuvent être généralisés, de manière approximative, aux autres sites considérés dans la présente étude. En effet, la procédure utilisée pour la construction des courbes de fragilité, soit les analyses dynamiques incrémentales (IDA), est indépendante de l'intensité de la secousse sismique au site étudié.

Définition des critères d'endommagement

Afin de baliser les différents critères d'endommagement des éléments structuraux, des critères de performance basés sur le déplacement ont été choisis. La procédure utilisée s'inspire des travaux de Mackie et coll. (2007), mais certaines simplifications ont été faites. Les critères d'endommagement considérés sont présentés au tableau 3.

Analyses dynamiques temporelles non linéaires

Les analyses dynamiques temporelles non linéaires réalisées pour caractériser le comportement des divers éléments considérés ont été effectuées avec le logiciel SeismoStruct. Pour couvrir la totalité des états d'endommagement définis précédemment avec une quantité de résultats suffisante pour minimiser l'erreur statistique, des analyses dynamiques incrémentales (IDA) ont été effectuées. Les accélérogrammes décrits précédemment ont été affectés de facteurs compris entre 0,1 et 2,0, avec un incrément de 0,1, de sorte que 20 analyses ont été réalisées pour chaque séisme. Tel qu'indiqué par Vamvatsikos et Fragiadakis (2009), cette méthodologie permet de caractériser la gamme de comportements possibles des structures. En effet, dans la présente étude, ce type d'analyse a permis de décrire le comportement élastique jusqu'à la plastification, le comportement inélastique, puis l'instabilité globale des éléments structuraux. De plus, cette méthode a permis de prendre en compte la variabilité de la résistance des éléments structuraux et des secousses sismiques.

Tableau 3 : Résumé des critères d'endommagements considérés

Élément	Paramètre de réponse	Dommmages légers	Variance	Dommmages moyens	Variance	Dommmages importants	Variance	Rupture	Variance
Pile	Déplacement relatif à la hauteur des éléments (<i>drift ratio</i>)	0,23 %	0,3	2,09 %	0,35	7,74 %	0,25	8,33 %	0,2
Mur garde-grève	Déplacement relatif à la hauteur des éléments (<i>drift ratio</i>)	0,25 %	0,3	0,5 %	0,35	-	-	2 %	0,2
Appareils d'appui	Déplacement du tablier (mm)	-		-		-		300 % hauteur de l'appareil	0,3
Joints	Déplacement du tablier (mm)	-		-		-		100 % ouverture des joints	0,3

Résultats

Les courbes de fragilité constituent une distribution de la probabilité qu'un élément structural atteigne ou dépasse un critère d'endommagement précis à l'occurrence d'une secousse sismique d'une intensité donnée ($P(CE|ISS)$). Cette distribution peut être décrite par l'équation 1 qui est tirée du travail de Nielson et DesRoches (2006).

$$[1] \quad P(CE|ISS) = \Phi \left(\frac{\ln(S_{DS}/S_{CS})}{\sqrt{\beta_{DS|ISS}^2 + \beta_{CS}^2}} \right)$$

Dans cette équation S_{DS} est la médiane de la demande sismique, S_{CS} la médiane de la capacité sismique, $\beta_{DS|ISS}$ la variance de la demande sismique, β_{CS} la variance de la capacité sismique et Φ la fonction de répartition de la loi normale standard. Enfin, il est pratique de représenter ces courbes de fragilité dans un graphique. À titre d'exemple, la figure 4 présente les courbes de fragilité obtenues pour la pile du pont de type 1-A (i).

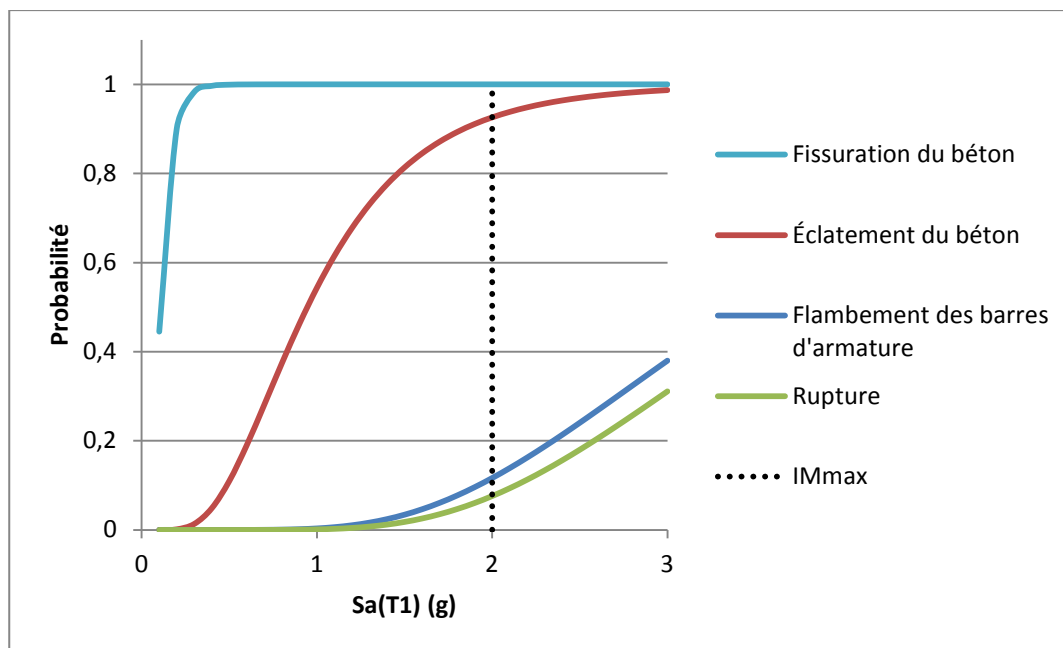


Figure 4 : Courbes de fragilité de la pile du pont de type 1-A (i)

Évaluation des travaux de réparation anticipés suite aux séismes probables

Selon la nature des dommages résultant de l'analyse précédente, plusieurs types d'interventions et de méthodes de réparation ont été tirés de la littérature sur le sujet, notamment du travail de Mackie et coll. (2007). Les réparations présentées dans ce qui suit ont pour objectif de sécuriser les ouvrages, les remettre en état et assurer leur durabilité. Les méthodes choisies sont des méthodes conventionnelles faisant partie des types de réparations usuellement mises en œuvre par le MTQ.

Les quantités à réparer, lesquelles sont associées à des critères d'endommagement engendrés par les séismes, ont été établies en prenant comme référence les travaux de Mackie et coll. (2007). Ces quantités sont propres aux différents éléments structuraux du pont de type 1-A (i).

L'estimation du coût de chaque méthode de réparation a été effectuée à l'aide de la *Liste des prix suggérés 2014 – Construction et réparation* fournie par le MTQ. Certains prix figurant à cette liste ont été adaptés pour les appliquer directement aux éléments structuraux à réparer. Les dimensions de l'ouvrage de type 1-A (i) ont été utilisées pour évaluer les coûts de réparation pour chaque critère d'endommagement, et ce, selon les dimensions des éléments structuraux de ce pont.

Pour chaque élément considéré (piles, murs garde-grèves, appareils d'appui, joints de dilatation), une combinaison de méthodes de réparation a été liée aux critères d'endommagement retenus (voir tableau 4). Ces combinaisons sont en fonction des dommages anticipés.

Tableau 4 : Exemple de méthodes de réparation liées aux critères d'endommagement retenus en fonction des dommages anticipés - Pile (1)

Critère d'endommagement	Méthode de réparation	Quantité à réparer
Dommages moyens	Injection des fissures avec époxy	4 x hauteur de la colonne
	Réparation du béton de recouvrement	10 % de la surface de la colonne
Dommages importants	Injection des fissures avec époxy	4 x hauteur de la colonne
	Réparation du béton de recouvrement	25 % de la surface de la colonne
	Chemisage de la colonne en acier	Masse de la colonne d'acier
	Barres d'armature galvanisée	25 % de la masse des barres d'armature de la colonne
	Béton	Volume du béton entre chemise d'acier et diamètre existant
	Excavation	1 200 mm autour de la colonne
	Remblai	1 200 mm autour de la colonne
	Étaieiment	Longueur tributaire x largeur du tablier

Courbe de l'aléa sismique du site

La courbe de l'aléa sismique propre à un site permet de décrire la probabilité de dépasser une valeur d'intensité de secousse sismique donnée en fonction des valeurs de ce même paramètre ($P(ISS > x)$) pour un site donné. Rappelons que la valeur d'intensité choisie est l'accélération spectrale à la période fondamentale de la structure ($S_a(T_1)$).

Pour l'exemple illustré dans cette section, et tel qu'expliqué précédemment, le pont de type 1-A (i) est localisé à Montréal sur un site de type C. La CGC fournit donc les valeurs de $S_a(T_1)$ pour des probabilités d'occurrence de 2 %, 5 %, 10 % et 40 % en 50 ans, et ces quatre points de référence peuvent être reliés par une courbe décrite par une fonction exponentielle et donnant ainsi la relation liant les paramètres d'intensité de secousse sismique et la probabilité de dépassement. Cette fonction est décrite par l'équation 2.

$$[2] \quad (P(ISS > x)) = \beta \cdot x^{-\alpha}$$

Dans cette équation, les coefficients β et α ont été déterminés par régression de la courbe liant les paramètres d'intensité de secousse sismique et la probabilité de dépassement de ceux-ci.

Utilisation des courbes de fragilité pour déterminer le coût des réparations probables sur le cycle de vie

Rappelons que les courbes de fragilité des éléments structuraux du pont de type 1-A (i) ont été obtenues antérieurement. Tel que mentionné précédemment, elles constituent une distribution de la probabilité qu'un élément structural atteigne ou dépasse un critère d'endommagement précis à l'occurrence d'une secousse sismique d'une intensité donnée ($P(CE|ISS)$). Des méthodes de réparation associées aux critères d'endommagement ont ensuite été définies.

En combinant les données obtenues précédemment aux séismes probables pouvant survenir sur la durée de vie d'un pont (probabilité de dépasser une valeur d'intensité de secousse sismique donnée en fonction des valeurs de ce même paramètre $P(ISS > x)$) il est possible de chiffrer les coûts de réparation à anticiper sur celui-ci suite aux séismes probables sur la durée de vie de l'ouvrage. Notons que la démarche décrite dans cette section est basée sur le travail de Padgett et coll. (2010). Celle-ci consiste à combiner les deux distributions de probabilité ($P(CE|ISS)$ et $P(ISS > x)$) pour obtenir l'équation 3 qui correspond à la probabilité annuelle d'atteindre un critère d'endommagement donné :

$$[3] \quad P_{Af}(CE | ISS > x) = \int_{x_{min}}^{x_{max}} P(CE | ISS)(x) \cdot P(ISS > x)(x) \cdot dx$$

Dans cette équation, x_{min} représente la valeur d'intensité de secousse sismique minimale étudiée, x_{max} représente la valeur d'intensité de secousse sismique maximale étudiée et x la valeur d'intensité de secousse sismique donnée. Il est à noter que cette intégration a été approximée par une sommation dans le processus numérique.

Ensuite, la distribution de $P_{Af}(CE|ISS > x)$ par rapport au temps (f_{Tfj}) est obtenue de l'équation 4 qui correspond à la probabilité d'excéder un critère d'endommagement pour un temps de service restant (T) à la structure donnée.

$$[4] \quad f_{Tfj} = 1 - (1 - P_{Af}(CE | ISS > x))^T$$

où j représente le critère d'endommagement étudié.

En combinant la distribution donnée par l'équation 6 avec les coûts des méthodes de réparation définies au tableau 4 et aux quantités à réparer (qui sont fonction de la méthode de réparation et du critère d'endommagement atteint) on obtient un coût de réparation C_{rij} , où i représente le numéro d'identification de l'élément structural étudié.

La valeur présente du coût associée aux sollicitations sismiques (VP) estimée sur la durée de vie du pont a été définie par l'équation 5.

$$[5] \quad VP_{ij} = \left(\frac{1}{\alpha T}\right) \cdot (1 - e^{\alpha T}) \cdot -C_{rij} \cdot (\ln(1 - f_{Tfj}) - \ln(1 - f_{Tfj+1}))$$

où α est un taux d'inflation.

En réalisant la sommation des coûts de réparation associés à chaque critère d'endommagement pour chaque élément structural (la figure 5 montre un exemple, pour une colonne de l'élément « pile »), on peut quantifier la valeur présente globale (*VPG*) des coûts associés aux dommages causés par les sollicitations sismiques probables sur la durée de vie du pont. L'intégration de ces coûts à l'analyse des coûts sur le cycle de vie d'un ouvrage donné est ensuite possible.

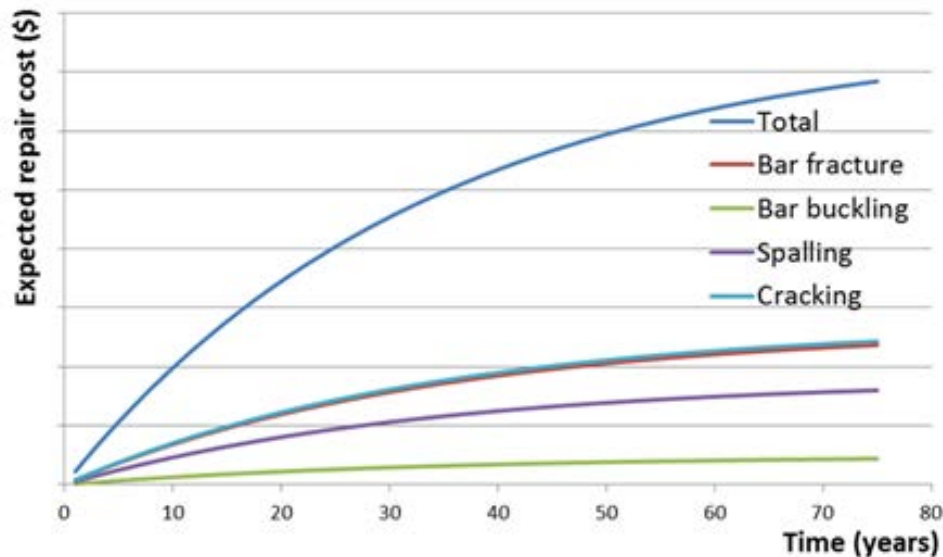


Figure 5 : Distribution des coûts probables de réparation par critères d'endommagements d'une colonne de la pile 2 du pont de type 1-A (i)

ESTIMATION DES COÛTS DE RÉPARATION SUITE AUX SÉISMES PROBABLES

Comme pour la section précédente, et toujours avec l'objectif d'illustrer l'approche développée dans cette étude, cette section présente la méthode d'estimation des coûts de réparation des ponts suite aux séismes probables. Pour ce faire, les ponts de types 1-A (i), 1-B (i) et 1-C (i) sont donnés en exemple. Rappelons que le dimensionnement du pont de type 1-A (i), et notamment le dimensionnement des piles, a été fait préalablement à l'exécution des analyses dynamiques incrémentales (IDA) utilisées pour la construction des courbes de fragilité des éléments structuraux du pont 1-A (i), de conception conventionnelle, à tablier léger. Ces analyses IDA ont été faites sur le modèle numérique du pont dont la conception a été faite pour la localité de Montréal. Les secousses sismiques utilisées pour les analyses IDA ont également été ajustés à l'aléa sismique de Montréal préalablement à l'application des facteurs 0,1 à 2,0, tel que décrit précédemment. En considérant que le ratio de la demande (DS) sur la capacité (CS) utilisé pour le dimensionnement des piles des ponts 1-A (i), 1-B (i) et 1-C (i) est constant pour chaque cas, les courbes de fragilité des éléments du pont 1-A (i) peuvent être couplées aux courbes d'aléa sismique des deux autres localités (La Malbaie, pont 1-B (i) et Rivière-du-Loup, pont 1-C (i)) pour estimer les coûts de réparation anticipés suite aux séismes probables dans ces localités.

Pour les ponts de types 1-A(i), 1-B(i) et 1-C(i), conçus de manière conventionnelle avec tabliers légers, le résultat de la sommation des coûts de réparation anticipés suite aux séismes probables, réalisée selon la méthode décrite précédemment, est donné au tableau 5. Notons que les résultats obtenus pour les ponts 1-A(i), 1-B(i) et 1-C(i) sont également valables pour les cas à tablier lourd, en considérant que le ratio de la demande (DS) sur la capacité (CS) utilisé pour le dimensionnement des piles des ponts est constant.

Tableau 5 : Coûts de réparation suite aux séismes probables

Cas *	1-A(i)	1-B(i)	1-C(i)
Coûts de réparation (\$ 2014) **			

* Ponts de construction conventionnelle, à tablier léger ou lourd.

** Coûts arrondis au millier de dollars près et excluant l'organisation de chantier, la mobilisation/démobilisation de l'entrepreneur, et le maintien de la circulation, le cas échéant

Différentes géométries de ponts ont été étudiées dans le cadre de cette étude, mais l'analyse simplifiée présentée précédemment a été réalisée sur une seule géométrie de pont (la géométrie 1). Les résultats présentés dans cette section s'appuient donc sur les conclusions de l'analyse probabiliste détaillée pour estimer les coûts de réparation suite aux séismes probables, sur une vie utile de 75 ans, pour chacun des ponts étudiés. Une méthode dite « rationnelle » est utilisée pour généraliser les résultats obtenus de l'analyse probabiliste détaillée aux ponts conçus selon les géométries 2 et 3.

Méthode « rationnelle »

Les coûts des réparations nécessaires suite aux séismes probables, pour les ponts n'ayant pas fait l'objet d'une analyse probabiliste détaillée, ont été estimés pour chacun des quatre éléments structuraux (pile, joint d'expansion, appareils d'appui, murs garde-grèves). L'estimation a été faite en utilisant le ratio des coûts de construction de chacun des éléments, pour les variantes de géométries 2 et 3, aux coûts de construction des éléments de la variante de géométrie 1 étudiée de manière détaillée. Les coûts de réparation anticipés suite aux séismes probables sont le produit de ce ratio par le coût de réparation d'un élément donné (voir l'exemple à la figure 6, spécifique au pont 1-B (i)) et sont donnés au tableau 6.

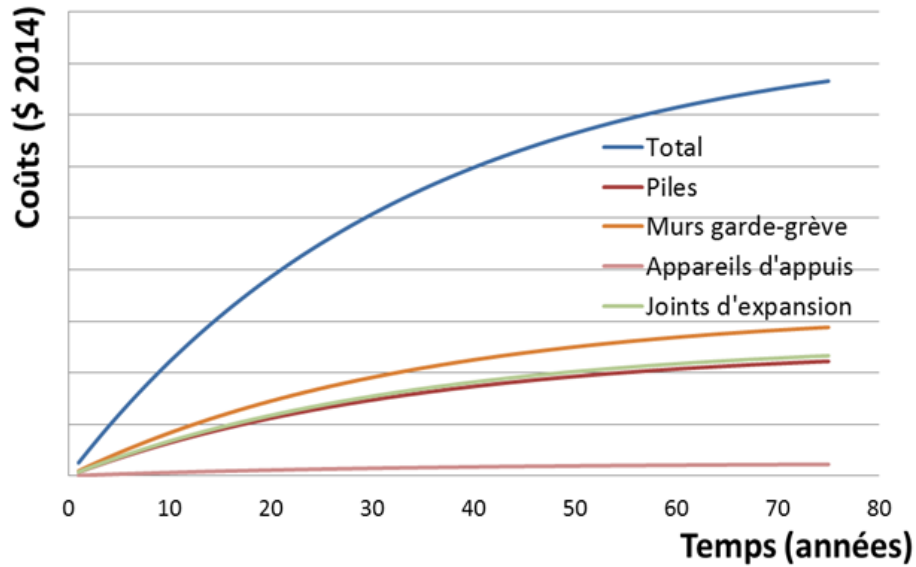


Figure 6 : Distribution des coûts probables de réparation par éléments – pont de type 1-B (i)

Tableau 6 : Coûts de réparation des ponts de secours suite aux séismes probables, estimés par la méthode « rationnelle »

Cas *	Coûts de réparation ** (\$ 2014) cas conventionnels	Coûts de réparation ** (\$ 2014) cas isolés
1-A (i)		
1-B (i)		
1-C (i)		
2-A (i)		
2-B (i)		
3-A (i)		
3-B (i)		
3-C (i)		

* Ponts à tabliers légers ou lourds.

** Coûts arrondis au millier de dollars près et excluant l'organisation de chantier, la mobilisation/démobilisation de l'entrepreneur, et le maintien de la circulation, le cas échéant.

Les critères de performance utilisés pour le dimensionnement des ponts de secours se résument comme suit :

- Pour les ponts conçus de manière conventionnelle, l'endommagement des piles, des appareils d'appui, des joints d'expansion et des murs garde-grèves est permis sous le séisme d'occurrence 1 : 2475 ans. Les ponts sont conçus pour que la demande en déplacement causée par le séisme de récurrence 1 : 975 ans n'endommage pas les joints d'expansion et les murs garde-grèves.

- Pour les ponts conçus en utilisant l'isolation sismique, l'endommagement des joints et des murs garde-grèves est permis sous le séisme d'occurrence 1 : 2475 ans. La pile demeure élastique. Les ponts sont conçus pour que la demande en déplacement causée par le séisme de récurrence 1 : 975 ans n'endommage pas les joints d'expansion et les murs garde-grèves.

Les critères de performance utilisés pour le dimensionnement des ponts de catégorie « urgence » sont analogues à ceux utilisés pour les ponts de catégorie « secours », mais en diminuant la demande sismique d'un niveau (pas d'endommagement des joints d'expansion et des murs garde-grèves pour le séisme de récurrence 1 : 475 ans).

Pour les ponts de catégorie « autres », la même procédure est appliquée, toujours dans l'esprit de la conception basée sur la performance, en diminuant la demande sismique d'un niveau supplémentaire pour la conception des unités de fondations.

Mentionnons que les coûts indirects associés aux travaux de réparation nécessaires suite aux séismes probables n'ont pas été comptabilisés. Cette hypothèse est conséquente avec l'ensemble de l'étude, laquelle ne considère que les coûts assumés par le propriétaire de l'ouvrage. Selon les méthodes généralement admises dans la littérature, les coûts indirects représentent en moyenne de 10 à 15 fois les coûts directs estimés par la méthode utilisée dans cette étude. Les coûts indirects sont, sommairement, les coûts associés à l'augmentation du temps de voyage des usagers et à la perte de capacité du réseau routier.

ANALYSE COMPARATIVE DES COÛTS SUR LE CYCLE DE VIE

L'analyse des coûts sur le cycle de vie d'un pont comprend essentiellement les **coûts de construction** de l'ouvrage, et les coûts récurrents, soit les coûts nécessaires à **l'exploitation et l'entretien** courant, et les coûts associés aux **réparations** de moyenne et grande envergures. La méthode utilisée pour évaluer les coûts récurrents anticipés sur une durée de vie de 75 ans, incluant ceux associés aux réparations des dommages causés par les séismes probables, est discutée dans cette section. À titre d'exemple, les coûts récurrents pour le pont de géométrie 1-B (i) construit selon une conception conventionnelle avec tablier léger sont donnés au tableau 7. Notons que pour les ponts conçus avec isolateurs sismiques, il a été considéré que les essais de qualification sont reconduits au moment de remplacer les isolateurs sismiques, étant donné que les charges sismiques prévues par la norme sont susceptibles d'être différentes au terme de la durée de vie des isolateurs (50 ans).

Tableau 7 : Coûts récurrents anticipés pour le pont de type 1-B (i) à tablier léger de construction conventionnelle sur la durée de vie de 75 ans*

Intervention	Intervalle des interventions (années)	Coût de l'intervention (\$ 2014)	Coût moyen annuel (\$ 2014)
Exploitation et entretien courant	1	5 000	5 000
Éclairage et supersignalisation	25	25 000	1 000
Planage et pose de nouvel enrobé **	30	45 000	1 500
Remplacement de la membrane (incluant planage et nouvel enrobé)	30	105 000	3 500
Remplacement des joints de dilatation (1 module)	30	75 000	2 500
Remplacement des appareils d'appui (incluant levage et support du tablier)	50	115 000	2 300
Remplacement des dispositifs de retenue	50	70 000	1 400
Travaux de peinture des poutres d'acier	50	25 000	500
Sommation des coûts de réparation des dommages probables suite aux séismes sur la durée de vie	75		
Coût annuel moyen total :			

Coûts excluant l'organisation de chantier, le maintien et la gestion de la circulation, les coûts d'ingénierie et de surveillance.

** En alternance avec l'activité Remplacement de membrane. Globalement, la pose de nouvel enrobé est donc prévue aux 15 ans.

Les coûts récurrents anticipés, évalués selon la méthode présentée au tableau 7, représentent annuellement environ 1,0 % des coûts de construction évalués en dollars constants.

La sommation des coûts de construction et des coûts récurrents évalués selon la méthode présentée dans cette section permet la comparaison des coûts sur le cycle de vie des ponts. Le tableau 8 présente quelques résultats de cet exercice complété pour chacune des variantes de pont étudiées dans ce mandat.

Tableau 8 : Résumé des coûts sur le cycle de vie de quelques variantes de ponts considérées dans cette étude

Géométrie (voir figure 1)	Ensemble de paramètres propres à un projet				Paramètres choisis par le concepteur				Coûts					
	(voir tableau 1)	Localité	Importance de la structure	Fondations	Type de tablier	Fixités du tablier	Nombre modules joints	SRFS ⁽¹⁾	Coût de construction (\$ 2014)	Coût moyen annuel (\$ 2014)	Sommation des coûts récurrents	Coût sur le cycle de vie (\$ 2014)	ratio coûts construction isolé / conv	ratio coûts cycle de vie isolé / conv
									A	B	(75 ans*B)	A+(75 ans)*B		
1	B	La Malbaie	Secours	Pieux	lourd	pile 2	1	conv	2 477 085					
1	B	La Malbaie	Secours	Pieux	lourd	pile 2	1	isolé	X ⁽²⁾	X ⁽²⁾	X ⁽²⁾	X ⁽²⁾	0,73	0,85
1	B	La Malbaie	Secours	Pieux	lourd	pile 2	2	isolé	1 811 068					
3	B	La Malbaie	Secours	Pieux	lourd	piles 2 et 3	3	conv	9 455 035				0,82	0,89
3	B	La Malbaie	Secours	Pieux	lourd	piles 2 et 3	3	isolé	7 775 099					

(1) : SRFS : Système de Résistance aux Forces Sismiques.

(2) : X : Ensemble de paramètres pour lequel il n'a pas été possible de réaliser une conception.

DISCUSSION

Les résultats obtenus ont permis de constater qu'à déplacement équivalent (joint comptant le même nombre de modules), l'isolation sismique peut entraîner une diminution allant jusqu'à 15 à 20 % des coûts de construction des ponts neufs considérés dans cette étude (voir le tableau 8). Pour ce même cas, la diminution des coûts anticipés sur l'ensemble du cycle de vie de l'ouvrage est de l'ordre de 10 à 15 %. Les résultats obtenus permettent aussi de constater que la rentabilité potentielle de l'isolation sismique est très variable, pouvant même être nulle dans certains cas.

Par ailleurs, les résultats obtenus démontrent que la rentabilité de l'isolation sismique est maximisée lorsque le déplacement permis de l'ouvrage est important. En effet, lorsqu'on permet une augmentation appréciable du déplacement du tablier d'un pont isolé (en utilisant, par exemple, un joint d'expansion ayant un module de plus que le joint d'expansion utilisé pour le cas conventionnel), la diminution des coûts du concept avec isolateurs sismiques est alors importante. Par exemple, pour le pont à tablier lourd de type 1-B (ii), l'économie associée à un concept isolé avec joints doubles, comparativement à un concept conventionnel avec joints simples, peut alors dépasser la diminution de 15 à 20 % mentionnée précédemment et atteindre 25 à 30 % pour les coûts de construction. Pour ce même ouvrage isolé, la diminution des coûts anticipés sur l'ensemble de son cycle de vie est alors de l'ordre de 15 à 20 %.

Sur la base du travail réalisé, les scénarios pour lesquels l'utilisation d'équipements spécialisés de type **isolateurs sismiques** semble la plus avantageuse se résument comme suit :

- Pont de catégorie « secours » sur fondations profondes à Montréal;
- Pont de catégorie « secours » sur fondations profondes à Rivière-du-Loup;
- Pont de catégorie « secours » sur fondations superficielles ou profondes à La Malbaie.

Mentionnons que les particularités relatives à un projet donné, telles que les contraintes environnementales, l'encombrement du site, une durée d'exécution réduite, etc. peuvent également rendre l'isolation sismique intéressante pour un ensemble de paramètres ne correspondant pas à ceux décrits aux lignes précédentes. Notons également que, dans tous les cas considérés dans cette étude, il a été démontré que l'isolation sismique des ponts constitue une opération rentable sur le cycle de vie de ces ponts que si cette rentabilité est obtenue dès la construction des ouvrages. En effet, les coûts récurrents associés au remplacement des isolateurs sismiques et aux essais de qualifications requis sont, dans tous les cas, plus importants que les coûts de réparation des piles suite aux séismes probables.

Rappelons finalement que les coûts indirects (comme les coûts sociaux découlant de la fermeture d'un pont suite à un séisme) n'ont pas été pris en compte dans les analyses comparatives présentées aux sections précédentes. Lorsque ces derniers sont comptabilisés dans une analyse comparative de coûts, il devient alors beaucoup plus intéressant de concevoir les nouveaux ponts de manière à réduire les dommages causés par les séismes probables. La réalisation d'une étude intégrant ces coûts aurait donc avantage à être entreprise par le Ministère.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à souligner la contribution et l'accompagnement offerts par les chercheurs de Polytechnique Montréal. Le travail présenté dans cet article n'aurait pas été possible sans l'aide précieuse de Messieurs Poulad Daneshvar, Najib Bouaanani et Robert Tremblay. Les auteurs tiennent également à remercier la Direction des structures du ministère des Transports du Québec pour le soutien offert tout au long de cette étude.

RÉFÉRENCES

Maltais et coll. (2012), Utilisation d'équipements parasismiques sur les ponts conventionnels à multiples travées : étude paramétrique, 19^e colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art.

CSA (2006a), Canadian Highway Bridge Design Code, CAN/CSA S6-06 Standard;

Ministère des Transports du Québec (2014), Manuel de Conception des Structures;

CSA (2014), Canadian Highway Bridge Design Code. CAN/CSA S6-14 Standard; section 4 soumise à CSA le 8 juillet 2013;

Ministère des Transports du Québec (2014), Liste des prix suggérés 2014 – Construction et réparation;

Mackie, Kevin et Stojadinovic, Bozidar (2003), Seismic Demands for Performance-Based Design of Bridges, PEER report;

Mackie, Kevin et coll. (2007), Integrated Probabilistic Performance-Based Evaluation of Benchmark Reinforced Concrete Bridges, PEER report;

Mackie, Kevin et coll. (2007), Comparison of Post-Earthquake Highway Bridge Repair Costs, Structural Congress 2007;

Berry, Michael et Eberhard, Marc (2003), Performance Models for Flexural Damage in Reinforced Concrete Columns, PEER report;

Aviram, Ady et coll. (2010), Structural Response and Cost Characterization of Bridge Construction Using Seismic Performance Enhancement Strategies, PEER report;

Vamvatsikos, Dimitrios et Fragiadakis, Michalis (2009), Incremental Dynamic Analysis for Estimating Seismic Performance Sensitivity and Uncertainty, Earthquake engineering and structural dynamics 2009;

Nielson, Reginald et DesRoches, Bryant G. (2006), Seismic fragility methodology for highway bridges using a component level approach, Earthquake engineering and structural dynamics 2007;

Padgett, Jamie E. et coll. (2010), Risk-based seismic life-cycle cost-benefit (LCC-B) analysis for bridge retrofit assessment; Structural Safety 32 (2010);

Chen, W-F (2000). Bridge Engineering Handbook, CRC Press LLC;

NEHRP Consultants Joint Venture (2012). Soil-Structure Interaction for Building Structures, NIST CGR 12-917-21;

AASHTO Guide Specification for Seismic Isolation Design, third edition, July 2010

Constantinou, M. C., Whittaker, A. S., Kalpakidis, Y., Fenz, D.M., Warn, G. P. 2007. Performance of Seismic Isolation Hardware under Service and Seismic Loading, Technical Report MCEER-07