

RÉHABILITATION SISMIQUE D'UN PONT EXISTANT AVEC DES PENDULES À FRICTION

Nikolay Velev¹, Jimmy Fortier¹, Christian Lemay¹

¹DESSAU, Montréal, Québec, Canada

RÉSUMÉ

Cet article examine l'utilisation d'isolateurs sismiques à grande capacité de dissipation d'énergie pour la réhabilitation sismique d'un pont existant sur l'autoroute 10 au-dessus de la rivière Richelieu à Chambly (Québec). L'article décrit les analyses réalisées afin d'établir les critères de performance minimaux requis pour des isolateurs sismiques en vue d'atteindre le niveau « pont de secours » défini par la CAN/CSA S6-06.

Pour répondre au devis de performance du projet, des appareils d'appui de type « pendules à friction » ont été utilisés. La conception du système utilisé dans le cadre du projet est présentée. Des essais de qualification ont été réalisés sur les isolateurs sismiques et une partie des résultats est présentée. Suite à l'expérience acquise lors de ce projet, des recommandations sont données quant à la réalisation de futurs projets d'isolation sismique au Québec.

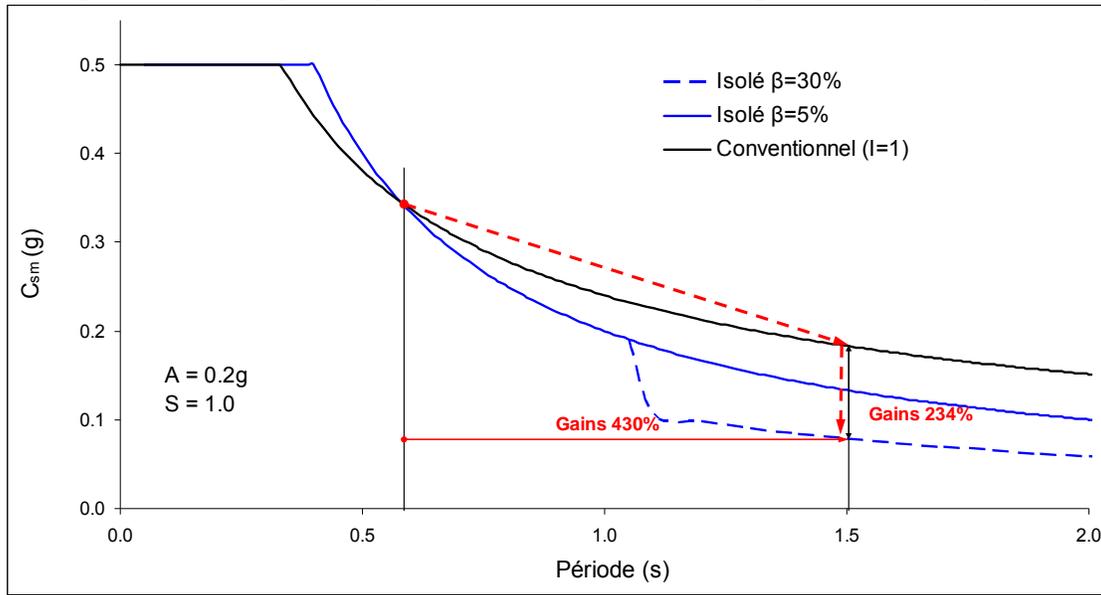
1. Introduction

La technique de protection sismique des ponts avec des isolateurs sismiques est de plus en plus utilisée dans la pratique au Québec. Un système de protection sismique doit permettre de contrôler les mouvements de la structure sous séisme, réduire le plus possible les efforts sismiques et assurer une fonctionnalité à l'ouvrage en fonction des besoins d'exploitation post-sismique. Parmi les techniques de protection sismique, celle qui combine l'isolation et l'amortissement s'avère particulièrement efficace.

La technique d'isolation n'est pas réservée aux nouveaux ouvrages, au contraire, un de ses principaux avantages est qu'elle s'applique très bien à la réhabilitation sismique des ponts existants. Pour les ponts de secours, les piliers sont généralement dimensionnés pour résister de façon élastique au séisme de conception (période de retour de 475 ans), tandis que les semelles (et/ou les pieux) demeurent dans le domaine élastique jusqu'à un séisme possédant une période de retour de 1000 ans. L'isolation peut réduire les efforts élastiques de 75 %, ce qui se traduit par une économie directe sur les coûts de construction. De plus, dans le cas d'un tremblement de terre important, un système isolé a une fonctionnalité post-sismique supérieure à un pont conçu en utilisant des rotules plastiques qui doivent s'endommager pour dissiper l'énergie. Pour les ponts existants, l'isolation permet d'améliorer la performance du pont jusqu'à un certain niveau, et ce, sans intervenir sur les unités de fondation.

L'idée de base derrière l'isolation sismique est de découper les mouvements du sol et des appuis de ceux du tablier. En pratique, on utilise des appareils d'appui flexibles qui permettent d'augmenter la période de vibration de l'ouvrage. En augmentant la période, l'accélération spectrale de conception est réduite tel qu'illustré sur la figure 1. Par contre, même si les efforts diminuent, les déplacements différentiels entre le tablier de la structure et les appareils d'appui deviennent importants, d'où vient l'intérêt d'introduire de l'amortissement pour les réduire à un

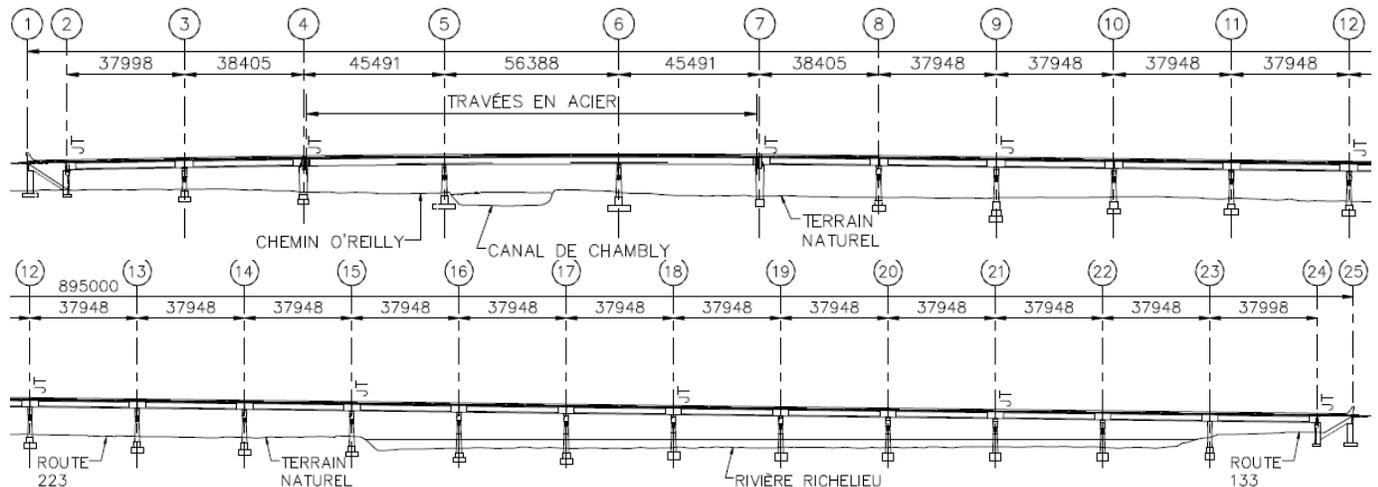
niveau acceptable. D'autre part, le pont doit être suffisamment rigide sous les charges de service.



2. Cas du pont de l'autoroute 10 est au-dessus de la rivière Richelieu (pont nord)

2.1 Description de la structure et mise en contexte

Le pont P-09836N possède vingt-deux (22) travées et deux (2) culées creuses pour une longueur totale de 895 mètres. La longueur importante de cet ouvrage se justifie par les cinq (5) obstacles qu'il franchit : la rivière Richelieu, le canal de Chambly, les routes 133 et 223 ainsi que le chemin O'Reilly (figure 2). À cet endroit, chaque direction de l'autoroute 10 possède un pont indépendant (voir la figure 3), le pont présenté ici est celui de l'autoroute 10 ouest, soit le pont nord.



Le pont a été construit en 1963 et possède deux (2) types de tablier (figures 3 et 4). Dix-neuf (19) travées simplement appuyées sont composées d'une dalle en béton armé reposant sur quatre (4) poutres en béton précontraint et possèdent une portée 37,9 mètres. Les trois (3) autres travées sont continues et composées de deux (2) poutres-caissons en acier supportant une dalle de béton. Les poutres-caissons possèdent une portée centrale de 56,4 mètres permettant de franchir le canal de Chambly et deux (2) travées d'extrémité possédant 45.5 mètres. À l'exception de trois (3) piles où le tablier est supporté par quatre (4) colonnes, les piles sont composées d'un fût unique avec chevêtre. La hauteur des piles varie entre 7 mètres et 14 mètres.

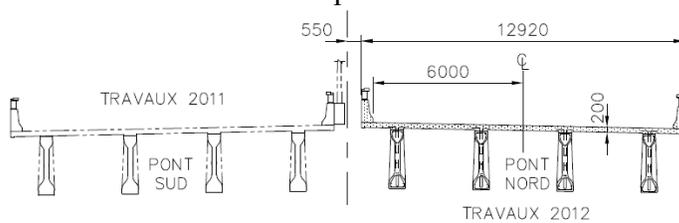


Figure 3: Coupe du pont sud et du pont nord, travées à poutres en béton précontraint

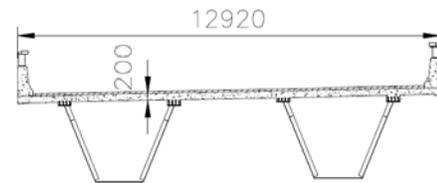


Figure 4 : Coupe du pont sud, travées à poutres-caissons en acier

La structure est supportée par des fondations superficielles, sans ancrage au roc. La majorité des semelles de fondation s'appuie directement sur le roc, un schiste fracturé et altéré sur une profondeur moyenne d'un (1) mètre et devenant sain par la suite. Les autres s'appuient sur un till dense à très dense d'une épaisseur moyenne de deux (2) mètres suivi d'un roc schisteux possédant les mêmes caractéristiques que celui décrit ci-dessus, sans potentiel de liquéfaction. Le sol est de type I et le rapport d'accélération de la zone (A), est de 0,2 g.

La réhabilitation sismique a été effectuée dans le cadre des travaux de réfection de la structure. Ces travaux consistaient principalement à remplacer la dalle de tablier, remplacer les appareils d'appui et réparer les poutres en béton précontraint endommagées par les joints de dilatation non étanches. Pour s'approcher le plus près possible du comportement d'un pont de secours, la solution retenue a été d'utiliser des isolateurs multidirectionnels à grande capacité de dissipation d'énergie. Des joints de tablier ont été éliminés afin d'améliorer la durabilité de l'ouvrage; ceci crée aussi un diaphragme entre les travées simples simplement appuyées (continuité de la dalle).

2.2 Modélisation et analyse

La réponse sismique du pont a été étudiée selon la dernière version du Code canadien sur le calcul des ponts routiers (ACNOR S6-06). Puisque le niveau de performance visé par la réhabilitation sismique est « pont de secours », une étude spéciale a été réalisée afin de bien évaluer le rendement sismique de la structure (article 4.11.2). Considérant que le pont est irrégulier en raison de ses vingt-deux (22) travées et qu'il se situe dans une zone de performance sismique de niveau 3, la méthode spectrale multimodale (MM) ainsi que la méthode des diagrammes d'évolution (MD) ont été utilisées.

Tel que demandé par le code, l'interaction sol-structure a été également étudiée. En raison de son comportement non linéaire, l'interaction sol-structure devient un phénomène très complexe. Les semelles du pont sont encastrées à une profondeur variant entre 3 et 7 mètres, et reposent soit sur du till dense, soit sur du roc schisteux. De façon conservatrice, étant donné les petits déplacements attendus, des ressorts élastiques équivalents respectivement à quarante (40) et quatre-vingt (80) fois la résistance ultime ont été utilisés pour le till et le roc schisteux.

Les semelles de fondation et les fûts des piles ont été modélisés selon les dimensions aux plans. Des sections peu fissurées ont été considérées pour la partie inférieure des fûts. Pour les analyses linéaires, la rigidité effective des isolateurs est utilisée dans le modèle. Cette dernière n'est pas constante, elle dépend du déplacement que l'isolateur subit. Puisque le déplacement que subit l'isolateur est déterminé par une analyse dynamique linéaire (exemple : méthode MM), quelques itérations sont nécessaires afin de converger sur une rigidité effective et un déplacement compatibles. Dans les analyses temporelles non linéaires (MD), la courbe de comportement de l'isolateur est utilisée.

2.3 Interaction entre les deux ponts

Une particularité des ponts jumeaux de l'autoroute 10 est que les piles 4 et 7 ainsi que toutes les piles en rivière, soit celles des axes 16 à 23, du pont nord et du pont sud s'appuient sur une semelle de fondation commune (figure 5). Une complexité supplémentaire pour la conception des isolateurs du pont nord est la différence dans les performances visées des deux ponts; pour le pont sud, une amélioration du comportement sismique tandis que pour le pont nord, le niveau « pont de secours » était visé. L'interaction entre les deux structures pendant un tremblement de terre s'avère être la situation critique et par conséquent, elle a été prise en compte et étudiée en détail. Plus précisément, l'étude vise à s'assurer que le comportement dynamique du pont sud ne limite pas la performance sismique du pont nord. Par exemple, un renversement de la semelle de fondation commune en raison des efforts plus importants engendrés par le pont sud limiterait le niveau de réhabilitation possible. La conception des isolateurs du pont nord a donc été gouvernée par cette spécificité du projet.

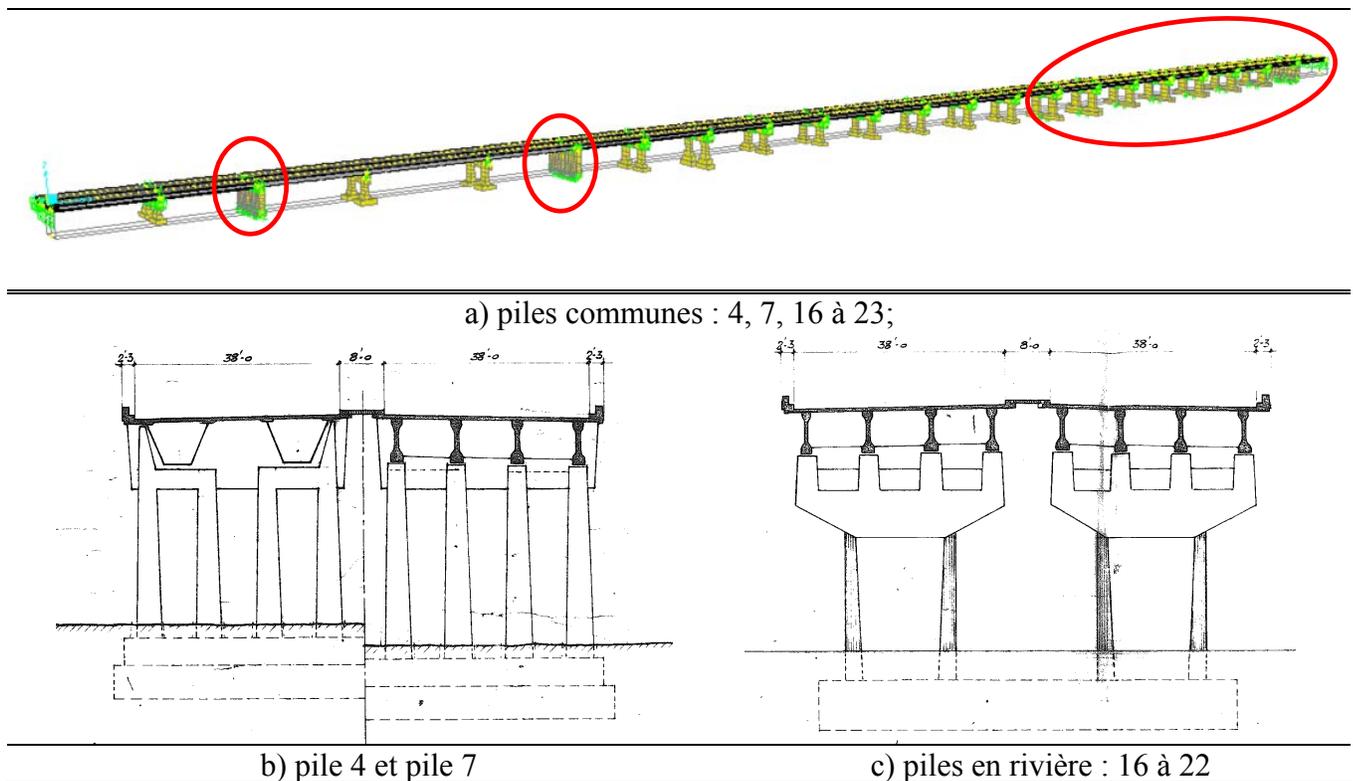


Figure 5: Piles communes pour les deux ponts – Nord et Sud

Le tablier du pont sud est isolé à l'aide d'appareils d'appui en élastomères frettés (Velev, Fortier et Lemay, 2011). Ces derniers ont fait l'objet d'essais de qualification en 2010 et par conséquent, leur comportement est connu. À température ambiante et à basse température, la rigidité des élastomères est respectivement de 2,5 kN/mm et 4,4 kN/mm, l'amortissement (β) est de 5 % et 10 % et la période fondamentale de vibration est de 1,4 s et de 1,1 s.

Les courbes de comportement des isolateurs sismiques du pont nord ne sont pas connues puisque les analyses dynamiques visent à établir les propriétés requises. La section 2.5 présente la méthodologie utilisée pour les déterminer. Au déplacement de calcul, le devis de performance exigeait une rigidité effective comprise entre 1,5 et 3,0 kN/mm ainsi qu'un amortissement minimal de 30 %. Ces propriétés ont été déterminées à l'aide de plusieurs itérations et ont été utilisées dans les analyses. La période fondamentale de vibration est comprise entre 1,3 et 1,7 s.

L'analyse des deux ponts ensemble, dans un même modèle, cause certaines complications. Par exemple, dans ce cas particulier, la méthode spectrale multimodale (MM) ne fonctionne pas. Premièrement, les modes de vibrations sont trop rapprochés. Une partie de la masse du tablier du pont sud se retrouve dans la masse modale d'un mode de vibration du pont nord, et ce, avec l'amortissement prévu pour le pont nord. Deuxièmement, une partie de la masse des piles participe dans les modes isolés (ceux du tablier), et inversement, une partie de la masse du tablier participe dans les modes non-isolés (ceux des piles). Ainsi, les sollicitations trouvées avec la méthode MM pour les deux ponts ne sont donc pas adéquates et ne peuvent être utilisées.

L'utilisation de la méthode des diagrammes d'évolution linéaire (MD) pose la même problématique car dans cette méthode, une analyse modale est effectuée. En effet, chaque mode de vibration est intégré dans le temps, de façon indépendante, avec un amortissement et une masse modale associés. Seulement deux solutions pouvaient être utilisées pour analyser les ponts jumeaux de l'autoroute 10 : analyser les deux ponts séparément et additionner les résultats ou bien réaliser des analyses temporelles non-linéaires avec intégration directe dans le temps.

Considérant l'envergure du projet, la conception des isolateurs sismiques a été réalisée, dans un premier temps, en étudiant les deux ponts séparément. Des analyses dynamiques linéaires (MM et MD) ont été utilisées pour trouver les sollicitations probables des deux ponts à chaque unité de fondation. En dynamique des structures, il n'est pas recommandé d'utiliser la sollicitation probable d'un élément afin de déterminer une autre sollicitation probable (exemple : renversement d'une semelle de fondation commune). Par conséquent, les résultats des deux ponts ont simplement été additionnés. Ce choix donne un certain facteur de sécurité, ce qui, dans le cas de l'évaluation sismique d'un pont existant, est très souhaitable.

Dans un deuxième temps, des analyses temporelles non-linéaires ont été réalisées afin de vérifier le transfert des efforts provenant du pont sud au pont nord ainsi que la possibilité d'un renversement des fondations communes. Ces analyses, qui ont été réalisées avec le logiciel SAP 2000 en utilisant l'intégration directe dans le temps, ont démontré que le comportement du pont nord n'est pas contrôlé par le mode de renversement des unités de fondation communes. En fait, lors d'un événement sismique majeur, une fissuration importante se développe dans les fûts du pont sud, ce qui limite les efforts transmis. De plus, la différence entre les périodes de vibration des deux ponts fait en sorte que les sollicitations maximales ne surviennent pas en même temps.

2.4 Évaluation de la performance sismique du pont nord

Pour évaluer la performance sismique de la structure, quatre (4) paramètres ont été étudiés : le rapport entre l'excentricité maximale et la limite de $0,4B$ fixé par la S6-06 (art. C6.7.3.4) où B est la largeur de la semelle, le rapport entre les contraintes imposées au sol et la résistance géotechnique calculée avec l'excentricité du chargement ainsi que les rapports demande/capacité en flexion et en cisaillement aux sections critiques des semelles et des fûts.

Pour l'évaluation sismique des ponts d'urgence et des autres ponts, l'article 4.11.6 de la S6-06 permet de ne pas considérer l'accélération verticale dans les calculs de résistance. Dans ce cas particulier, elle a été considérée puisqu'un niveau de performance « pont de secours » était visé.

Pour déterminer les résistances géotechniques des semelles de fondation, des forages ont été réalisés au travers des semelles de béton existantes, ce qui a permis de vérifier la qualité du béton mais surtout, de prendre en compte la consolidation du sol survenu sous la semelle durant la vie du pont. Ce choix judicieux a permis d'obtenir des résistances géotechniques ultimes comprises (q_u) entre 3800 kPa et 8000 kPa. Un coefficient de tenue égal à 0,5 a été appliqué sur ces résistances conformément à la S6-06.

Un échantillonnage du béton (semelles et fûts) et de l'acier d'armature (fûts) a été réalisé afin de valider la résistance des matériaux utilisés dans l'évaluation sismique. Pour les fins d'évaluation, des résistances à la compression du béton (f'_c) de 32,6 MPa et 27,4 MPa ont été déterminées tandis qu'une limite d'élasticité de l'acier d'armature (f_y) de 275 MPa a été utilisée.

2.5 Détermination des critères de performance des isolateurs sismiques

Pour un pont existant, les propriétés des isolateurs sismiques doivent être établies en comparant les enveloppes de résistance du pont (structurale et géotechnique) aux résultats des analyses dynamiques. Il s'agit d'un processus itératif qui vise à établir la rigidité maximale des isolateurs sismiques ainsi que l'amortissement minimal requis.

Un dégagement égal à 125 % du déplacement maximum est requis pour les ponts d'urgence et de secours (article 4.10.7, S6-06). Cette exigence vise à s'assurer que le tablier isolé soit en mesure de se déplacer librement pendant un tremblement de terre. Par conséquent, une rigidité minimale des isolateurs sismiques ainsi qu'un déplacement sismique maximum doivent être spécifiés. Ce point s'avère particulièrement critique pour les ponts existants où les dégagements existants sont souvent restreints (joint de tablier, extrémité de poutres avec le mur garde-grève).

Dans le cas à l'étude, en plus des deux joints de tablier situés à chaque extrémité du pont, sept (7) joints de tablier sont présents sur la structure. Des analyses temporelles ont donc été réalisées afin de valider les déplacements relatifs à ces joints. Puisque les unités de fondation possèdent une rigidité similaire et que la rigidité des isolateurs sismiques est identique à chaque pile, les différentes sections de tablier vibrent en phase. Il est intéressant de noter que les déplacements relatifs s'avèrent plus importants lorsqu'ils sont calculés avec la rigidité maximale des isolateurs. En effet, bien que les déplacements absolus soient plus faibles, une rigidité plus importante des isolateurs « filtre » moins bien les différences de rigidité entre les piles. Enfin, les tolérances de fabrication concernant la rigidité des isolateurs sismiques ont été intégrées dans ces analyses. À

ce propos, des essais de qualité ont été exigées sur tous les isolateurs sismiques fournis pour installation sur le pont. Ces essais comprennent notamment un essai dynamique de cinq (5) cycles au déplacement de calcul qui vise à vérifier la rigidité effective. À ce sujet, la tolérance admise sur la moyenne des isolateurs est de $\pm 10\%$ (AASHTO 2010).

Les principaux critères de performance pour les isolateurs sismiques du pont nord sont présentés au tableau ci-dessous. Le fabricant conçoit l'isolateur sismique de façon à ce qu'il respecte l'ensemble des caractéristiques présentées dans le tableau, et ce, pour le spectre isolé de la S6-06. Évidemment, il n'est pas de la responsabilité du fabricant de réaliser des analyses complexes pour vérifier la performance des isolateurs sismiques. Le fabricant effectue donc la conception à l'aide de la méthode spectrale unimodale (MU), qui ne considère que la masse du tablier et la rigidité de l'isolateur sismique. Il est donc de la responsabilité des concepteurs de conserver une marge suffisante pour les modes non-isolés, et ce, par rapport à la force maximale pouvant être transmise à l'unité de fondation par l'isolateur sismique. Idéalement, une optimisation avec le fabricant pendant l'évaluation sismique de la structure serait souhaitable, or, ce n'est pas possible lorsqu'un devis de performance est utilisé dans le cadre d'un appel d'offres public.

Type d'appareil d'appui →	Appareils d'appui aux poutres de béton	Appareils d'appui aux extrémités des poutres-caissons (axes 4&7)	Appareils d'appui intermédiaires aux poutres-caissons (axes 5&6)
Nombre d'appareils d'appui	152	4	4
Rigidité maximale (kN/mm)	3.1	3.2	12.0
Rigidité minimale (kN/mm)	1.5	1.5	3.0
Amortissement minimum (β)	30%	30%	30%
Charge verticale moyenne (kN)	900	930	3400
Force maximale pouvant être transmise aux unités de fondation (kN)	90	90	375
Déplacement sismique maximum (mm)	45	55	55

3. Isolateurs sismiques du pont nord – pendules à friction

Un devis de performance pour les isolateurs sismiques a été utilisé dans le cadre d'un appel d'offres public pour les travaux de réfection du pont nord. Aucun type de système d'isolation n'était indiqué, le système proposé devait seulement respecter les critères de performance. Le système choisi par l'entrepreneur pour répondre aux exigences est de type « pendule à friction ». Les rigidités minimale et maximale prévues par le système proposé aux poutres de béton sont de 1,5 kN/mm et de 2,5 kN/mm, et ce, avec un amortissement minimal de 31 %. L'interface de glissement est munie d'un rayon de courbure afin de jouer le rôle de système de recentrage. Ce système n'a pas que pour but la réduction des déplacements résiduels, il permet aussi d'éviter l'accumulation de déplacements lors d'un séisme. Enfin, sous les charges de service (vent, freinage), les appareils d'appui doivent être suffisamment rigides pour limiter les déplacements. Un déplacement maximal de 3 mm a été imposé dans le cadre de ce projet. Pour répondre à ce critère, des fusibles transversaux ont été utilisés aux isolateurs sismiques des poutres-caissons considérant la grande surface exposée au vent.

4. Essais sur les isolateurs

4.1 Procédure d'essais

Conformément à l'article 4.10.11 de la S6-06, deux (2) prototypes (grandeur nature) de chaque type d'isolateur doivent être soumis à des essais dynamiques afin de valider les forces et les déplacements sous les charges thermiques, les charges de service et les charges ultimes. Ils servent également à vérifier la réponse dynamique sous différents déplacements, la capacité de survie après un séisme important et la stabilité d'appui sous un déplacement de 1,5 fois le déplacement maximal de calcul. Des essais supplémentaires à basse température (-30°C) ont également été conduits, tel que demandés par le Ministère des Transports du Québec.

Les essais de qualification sont réalisés au laboratoire des structures de l'université de Sherbrooke. Ces essais sont réalisés et supervisés par l'équipe du département de génie civil qui soumettra un rapport de conformité à la fin des essais de qualification. Le système d'essais, présenté à la figure 6, comprend des éléments hydrauliques et mécaniques qui appliquent simultanément la charge verticale, représentant les charges de gravité, et un déplacement horizontal, représentant le déplacement relatif du tablier par rapport à la pile.



Figure 6 : Montage d'essai

La force verticale est appliquée par deux vérins servo-hydrauliques en parallèle. Ce type de vérin est requis pour conserver la charge verticale constante lors des essais. En effet, un déplacement horizontal d'un isolateur de type « pendule à friction » engendre un déplacement vertical. Le déplacement horizontal est appliqué par un vérin servo-hydraulique attaché à la plaque supérieure d'appui. La force horizontale est mesurée par une cellule de force reliée au système de contrôle. Les mesures de la cellule de charge sont enregistrées dans le système d'acquisition de données. Les déplacements sont mesurés par deux capteurs de déplacement (LVDT), un installé sur la plaque supérieure et l'autre sur la plaque inférieure du spécimen. Le déplacement horizontal est obtenu en soustrayant les deux mesures.

La dissipation d'énergie varie en fonction de la vitesse de chargement des prototypes. Ainsi, les essais dynamiques ont été réalisés à une fréquence approximativement égale à l'inverse de la période de vibration des isolateurs. Avec les forces et les déplacements en jeu, cette exigence nécessite des équipements à la fine pointe de la technologie.

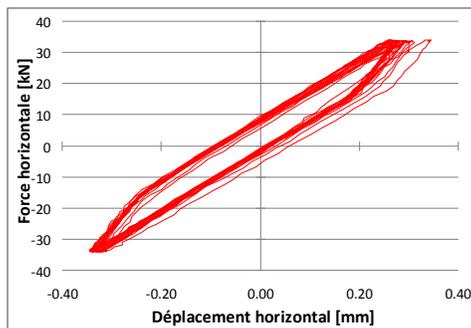
4.2 Résultats d'essais

Au moment de publier cet article, les essais de qualification avaient été réalisés sur un seul spécimen. Quelques résultats sont présentés à la figure 7. Sous les charges de service, l'isolateur possède une rigidité élevée, de l'ordre de 190 kN/mm, et reste à toute fin pratique immobile.

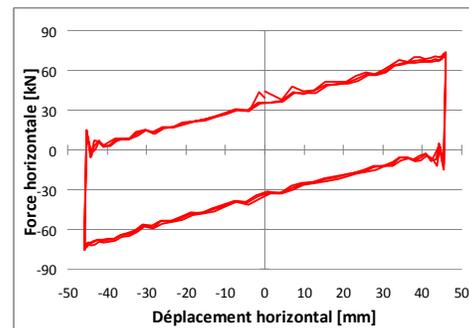
L'article 4.10.11.3 de la S6-06 spécifie la méthode à suivre pour déterminer les caractéristiques des isolateurs. Les relations force-déplacement obtenues montrent une capacité portante positive incrémentale. La variation maximale de la rigidité effective moyenne au cours des essais de trois (3) cycles a été inférieure à 2 % (respectant la tolérance de 10 %), et ce, avec une rigidité moyenne de 1.61 kN/mm.

Pendant l'essai de vingt (20) cycles, la variation de rigidité a été de 19 %, ce qui est inférieur à la variation maximale de 20 % permise par la S6-06. On note également une diminution de la capacité du spécimen à dissiper de l'énergie avec l'augmentation du nombre de cycles. À l'exception du premier cycle, la réduction inter-cycle maximale observée a été de 19 % (limite de 20 %). Pour cet essai, la rigidité moyenne observée a été de 1,61 kN/mm avec un amortissement effectif moyen de 33 %. L'amortissement pendant le premier cycle est évalué à 39 %, ce qui est supérieur aux cycles subséquents et à l'amortissement minimal spécifié dans le devis (30 %).

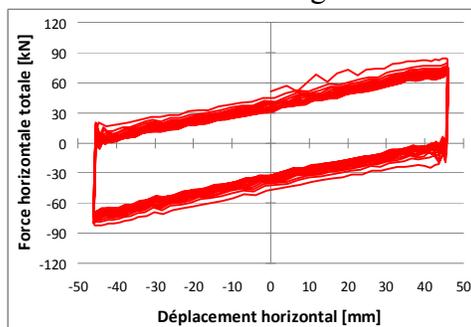
Pour vérifier le comportement de l'isolateur sous les effets thermiques, un essai supplémentaire de trois cycles (AASHTO, 2010) a été rajouté. Il valide la force que l'isolateur développe lors des mouvements thermiques.



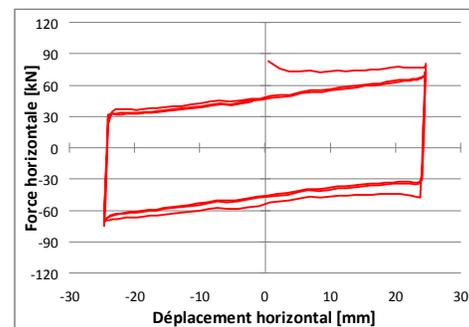
a) essai sous les charges de service - vent et freinage



b) essai de 3 cycles - déplacement de calcul



c) essai de 20 cycles



d) Essai sous les charges de service - déplacements thermiques

Figure 7: Résultats d'essais de qualification

5. Recommandations pour les futurs projets d'isolation sismique au Québec

Pour la réhabilitation sismique d'un pont existant, l'isolation est intéressante puisqu'elle permet d'améliorer la performance du pont jusqu'à un certain niveau, sans intervenir sur les unités de fondation. Pour les nouveaux ponts importants, cette technique est aussi intéressante puisqu'elle permet une réduction des coûts et, généralement, une fonctionnalité post-sismique supérieure.

Basée sur notre expérience actuelle, nous ne recommandons pas l'isolation sismique pour les nouveaux ponts de petite et moyenne envergure. D'une part, parce que la S6-06 exige que des essais de qualification soient réalisés pour chaque projet et que peu de laboratoires possèdent les équipements nécessaires pour effectuer les essais dynamiques. Ainsi, il y a un délai important à prévoir pour ces essais et, par conséquent, un risque important de retard des travaux. D'autre part, parce que le nombre d'isolateurs requis est faible pour ces ponts, et que le prix unitaire des isolateurs augmente significativement puisque le coût des essais de qualification doit être amorti sur un petit nombre d'appareils d'appui. Ceci est d'autant plus vrai que la S6-06 ne permet pas l'installation des prototypes utilisés lors de ces essais sur le pont, contrairement à l'AASHTO.

Dans le projet à l'étude, un devis de performance a été utilisé pour les isolateurs sismiques à l'intérieur de l'appel d'offres public pour les travaux de réfection du pont. Une liste de fournisseurs potentiels a été fournie dans le devis puisque les entrepreneurs québécois travaillent rarement avec ce type d'appareil d'appui. Ce choix a été bénéfique; la compétition entre les différents fabricants a diminué, de façon importante, le prix des isolateurs sismiques. Certains des systèmes d'isolation disponibles requièrent une hauteur de construction importante. Pour les ponts existants, un rehaussement important des approches peut entraîner des coûts importants. Il est donc important de valider avec les différents fournisseurs la hauteur approximative du système qu'ils proposent. Il est préférable de spécifier une hauteur maximale dans les documents d'appel d'offres et de préparer les plans et devis avec cette valeur (profil aux approches du pont).

Les exigences de la S6-06 sont basées sur l'ancienne version (1999) du document « *Guide Specifications for Seismic Isolation Design* » publié par l'AASHTO. La version publiée en 2010 apporte des clarifications à la conception des isolateurs sismiques. Un point particulièrement important à considérer est d'exiger que les isolateurs sismiques soient conçus pour une durée de vie de 75 ans. Plus précisément, le fabricant et le concepteur doivent prendre en compte l'effet causé par les facteurs extérieurs (température, fatigue, contamination, etc.) sur les caractéristiques de l'isolateur sismique. Des valeurs sont suggérées dans le guide de l'AASHTO.

6. Conclusions

La réhabilitation sismique du pont nord de l'autoroute 10 au-dessus de la rivière Richelieu à l'aide d'isolateurs sismiques à grande capacité de dissipation d'énergie a amélioré de façon significative la performance de l'ouvrage. Puisque cette technique ne nécessite aucune intervention sur les unités de fondation, elle s'avère beaucoup plus économique qu'une réhabilitation classique par renforcement. Les résultats analytiques et expérimentaux ont démontré que les isolateurs de type « pendule en friction » ont réduit de manière significative les forces d'inertie en comparaison avec un pont non isolé. Enfin, l'utilisation d'un devis de performance, sans imposer un type de système d'isolation, a permis de réduire de façon importante le prix des isolateurs sismiques.

7. Références

- 1 Association Canadienne de Normalisation (2006). *CAN/CSA-S6-06 Code canadien sur le calcul des ponts routiers*. Association canadienne de normalisation, Mississauga, Ontario.
- 2 AASHTO (2010). *Guide Specifications for Seismic Isolation Design*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- 3 AASHTO (2010). *Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- 4 MCEER/FHWA (2006). *Seismic Isolation of Highway Bridges*, Federal Highway Administration, Buffalo, NY.
- 5 MCEER/FHWA (2006). *Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures: Part 1 – Bridges*, Federal Highway Administration, Buffalo, NY.
- 6 Priestley, Seible and Calvi (1996). *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley & Sons, New York, NY.
- 7 Velev, Fortier, Lemay (2011). *Réhabilitation sismique d'un pont existant avec des appuis en élastomères frettés, retour vers l'avenir*, 18e Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art.