

CONCEPTION PARASISMIQUE DU PONT ST-CHARLES EN UTILISANT DES TECHNIQUES D'ISOLATION PARASISMIQUE

Nikolay Velev¹, Christian Lemay¹, Frédéric Légeron²

¹DESSAU, Montréal, Québec, Canada

²Département De Génie Civil, Université De Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada

RÉSUMÉ

Cet article examine l'utilisation d'isolateurs sismiques pour la construction d'un nouveau pont d'étagement sur le Chemin St-Charles au-dessus de l'autoroute 40 à Terrebonne, Québec, décrit le système utilisé dans la cadre de ce projet, les difficultés rencontrées et les procédures de conception employées.

Les deux méthodes de conception parasismiques, la méthode « standard » avec le développement de rotules plastiques à la base des colonnes et l'isolation sismique, sont présentées et comparées. La philosophie de conception, la méthode spectrale et la procédure itérative impliquées dans la conception des ouvrages isolés sont décrites brièvement. Cet article présente également une discussion sur d'autres questions concernant l'utilisation et la conception des isolateurs sismiques comme les essais à grande échelle, les détails constructifs, la durabilité et la conception préliminaire des isolateurs pour appuyer la procédure itérative entre le concepteur et le fabricant d'appui.

1. Introduction

La protection sismique des ponts est l'un des défis parmi les plus intéressants pour les ingénieurs en structure. Le 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 systèmes de protection sismiques, ceux combinant isolation et amortissement est une technique très intéressante. Les avantages de cette technique ont été démontrés par de nombreux travaux expérimentaux et aussi par leur bon comportement lors des séismes passés.

L'idée de base de l'isolation sismique est de réduire les efforts en découplant les mouvements du sol et des appuis de ceux du tablier. Ceci conduit à un déplacement relatif entre la structure et le sol, qui peut être minimisé par la dissipation d'énergie par amortissement. Dans les ponts, notamment les ponts d'urgence, les fondations sont généralement dimensionnées pour résister aux efforts élastiques où légèrement moins si la conception à la capacité conduit à légèrement réduire les efforts sismiques. L'isolation peut réduire les efforts élastiques jusqu'à 75% et ceci se traduit dans les économies de coûts directs. De plus, dans le cas d'un tremblement de terre, même très 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 sismique. Malgré ces avantages, l'isolation sismique est rarement incorporée dans la pratique courante au Québec et plus généralement au Canada.

2. Principes de l'isolation parasismique

Le principe de l'isolation sismique est de découpler les mouvements du tablier de ceux des appuis, afin de limiter les efforts sur les appuis. En pratique, l'isolation complète est difficile à réaliser, et on utilise des dispositifs flexibles qui permettent d'augmenter la période de vibration

de l'ouvrage. En augmentant la période, l'accélération spectrale de conception est réduite comme on le voit sur la figure 1 présentant le spectre de design tel que montré dans les commentaires de la norme S6-06.

En diminuant les efforts, les déplacements différentiels entre la structure et les appuis deviennent importants. Ceci conduit à une conception d'isolateurs à grande course ainsi que des joints de chaussée et des repos sismiques de grande dimension et donc à des surcoûts importants. Le comportement typique d'isolateur est représenté à la figure 2. On observe sur cette courbe que les systèmes d'isolation procurent aussi assez souvent un amortissement non négligeable. Cet amortissement conduit à réduire encore les efforts, et aussi à mieux contrôler les déplacements.

Si ces déplacements différentiels importants peuvent être contrôlés en augmentant l'amortissement, le pont doit être suffisamment rigide sous les charges de service, comme le freinage et le vent et le système d'isolation doit aussi être capable d'assurer le rôle des appuis classiques au jour le jour, c'est-à-dire transmettre les efforts du tablier aux fondations.

De nombreux systèmes d'isolation permettent également recentrage du tablier pendant et après le séisme. Le but de cette exigence n'est pas uniquement de réduire les déplacements résiduels après le séisme, mais surtout de prévenir les déplacements cumulatifs durant le tremblement de terre.

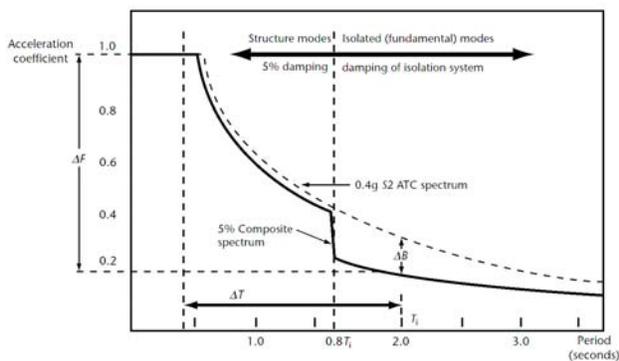


Figure 1: Principes d'isolation sismique (CCPR, ACNOR 2006)

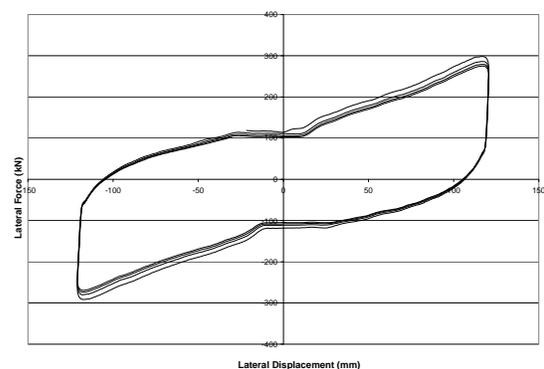


Figure 2: Comportement typique d'isolateur

Le Chapitre 4, article 10 du Code canadien sur le calcul des ponts routiers (ACNOR, S6-06) donne les exigences spécifiques de conception et les méthodes de conception à ce type de structure, mais sans donner de procédures et de directives pour aider les concepteurs. L'un des défis majeurs du concepteur voulant isoler un ouvrage, c'est que chaque fabricant a développé des technologies spécifiques et que le comportement des isolateurs est variable d'un fabricant à l'autre. Ceci est un problème lors de l'attribution des marchés publics qui doit laisser une saine concurrence entre les fabricants sans pour autant pénaliser l'optimisation de l'ouvrage. Le concepteur doit donc évaluer plusieurs systèmes disponibles pouvant être utilisés sur l'ouvrage étudié et des gammes de réductions d'efforts en fonction des technologies disponibles. Une fois la technologie sélectionnée (généralement suite à l'appel d'offres), le concepteur et le fabricant d'isolateurs doivent coordonner leurs efforts pour assurer une conception optimale de l'ouvrage.

3. Cas du viaduc St-Charles

3.1 Description de la structure

Le nouveau pont d'étagement passe au-dessus de l'Autoroute 40 en biais de 50°. La géométrie de la route, l'autoroute à franchir et les positions des piliers du pont existant ont été les éléments déterminants dans le choix des portées (voir figure 3). Le nouveau pont a été construit à côté du pont existant et ses piles ont été alignées avec les piles existantes. Les piles existantes ont déjà été renforcées par l'ajout des supports latéraux pour créer une forme en V (voir figure 4a). Pour uniformiser l'apparence des deux ponts, la géométrie des nouvelles piles a été choisie pour reproduire les piles existantes (voir figure 4b). Selon ces considérations, le tablier du pont est formé d'une structure composite continue de quatre travées de 24 m, 43.5 m, 43.5 m et 24 m, pour une longueur totale de 135 m.

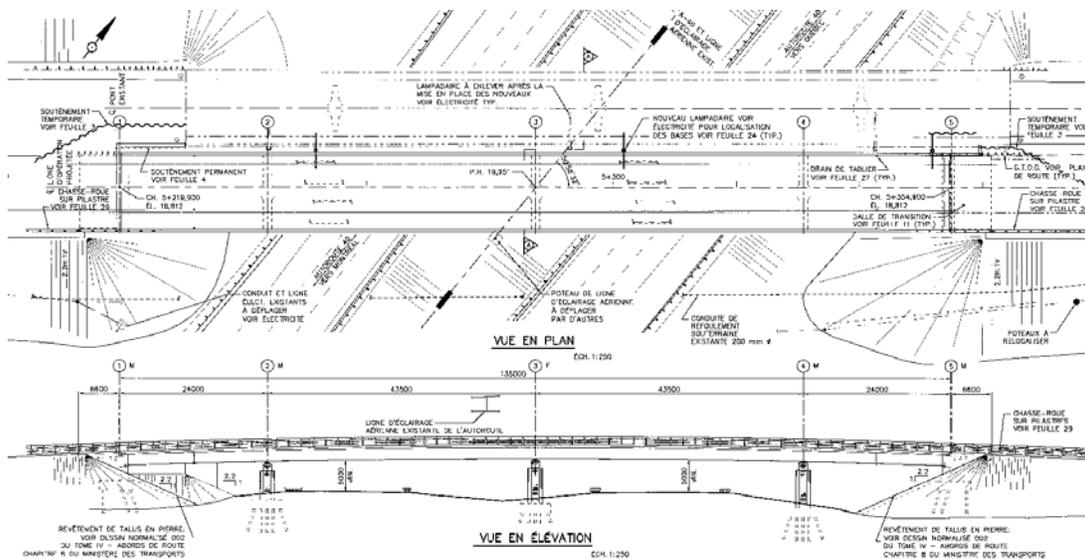
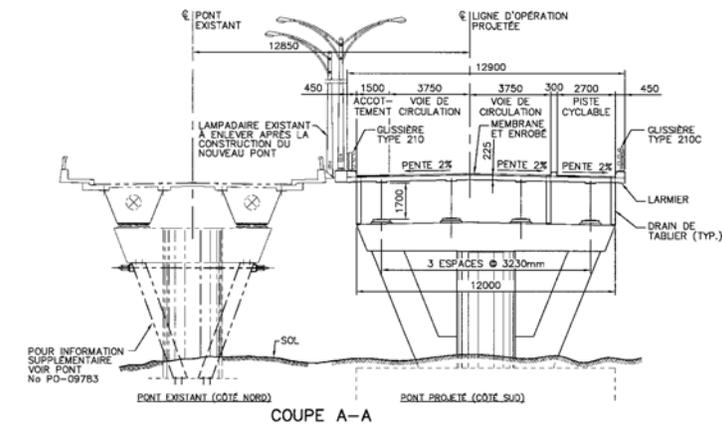


Fig. 3: Viaduc St-Charles, Ville de Terrebonne, QC



a) pont existant b) nouveau pont St-Charles

Fig. 4: Viaduc St-Charles – coupe transversale

Les poutres sont appuyées sur des appareils d'appui unidirectionnels en élastomère confiné sur les piles latérales et sur les culées. Des isolateurs sismiques sont installés sur la pile centrale. L'isolation a été favorisée pour ce projet malgré la relative nouveauté de ce système, car les conditions géotechniques auraient conduit à des fondations très dispendieuses et difficiles à réaliser. L'isolation permettait de limiter les efforts sur les fondations et ceci permettait de rentabiliser largement le surcoût des isolateurs par rapport à des appuis traditionnels. Seule la direction longitudinale de l'ouvrage a été isolée. Dans la direction transversale, l'ouvrage se comporte comme un ouvrage classique avec toutes les piles fixes transversalement, de même que les culées. Ce choix a été imposé par la proximité du nouveau pont par rapport au pont existant et la volonté de limiter les déplacements relatifs du pont pour réduire la possibilité d'impact entre les deux structures et les dommages possibles qui en résulteraient.

3.2 Isolateurs de pont St-Charles

La difficulté majeure liée à ce projet a été de faire face au manque d'informations et d'expérience québécoise en matière de conception et de construction de ponts isolés. Les composantes principales d'appuis antisismiques du pont St-Charles sont les assemblages multi-rotationnels avec des surfaces de glissement (figure 5). Les charges verticales et la demande de rotation sont transférées à la pile à travers des appuis à disque. La capacité latérale est assurée par un goujon en acier ancré dans la plaque de maçonnerie.

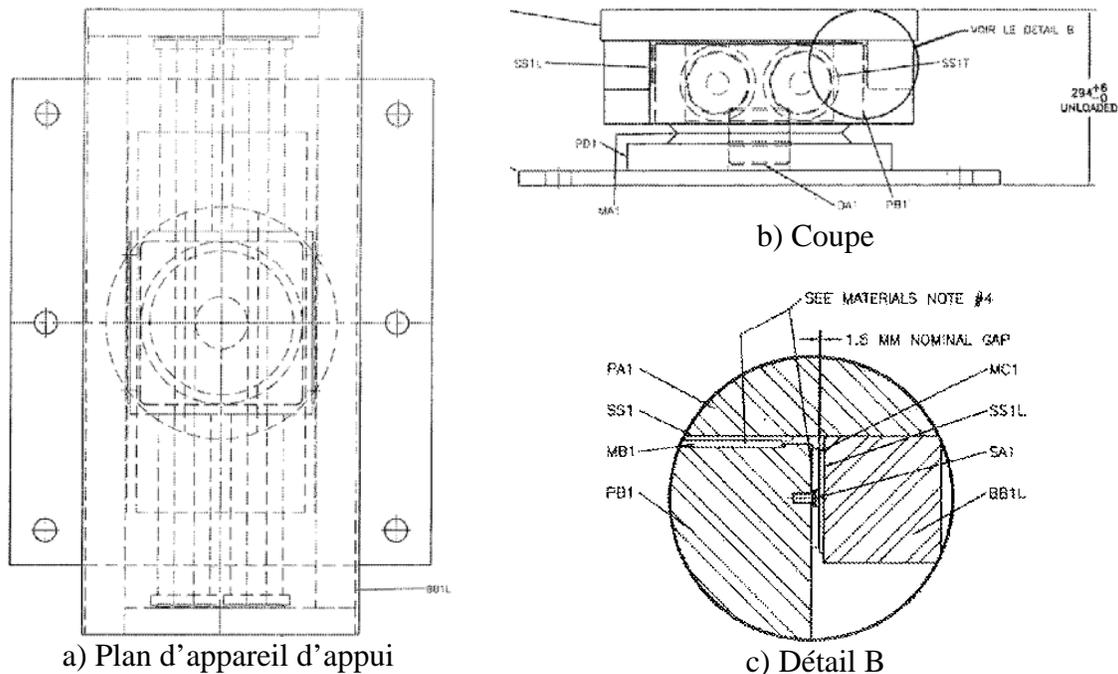


Fig. 5: Appareils antisismiques – pont St-Charles

Dans ce projet, les isolateurs choisis combinaient l'isolation à des ressorts en élastomère et à un dissipateur d'énergie par friction entre les plaques supérieures d'appareil d'appui connectées aux poutres et les surfaces de glissement sur les appuis (voir figure 5). Les deux éléments, les propriétés des ressorts ainsi que le coefficient de friction, peuvent être ajustés pour rencontrer le niveau de réponse sismique désiré pour la structure.

La surface de glissement développe une force de friction Q_d , qui dépend du produit de la force verticale du poids mort (D) et du coefficient de friction. Le coefficient de friction du PTFE utilisé sur la surface d'inox dépend de la pression et de la surface de contact et varie de 0,06 à 0,10. La rigidité post-élastique des ressorts K_d varie de $0.0002D$ à $0.001D$ (kN/mm), avec une valeur typique de conception de $0.0015D$. La valeur initiale de rigidité de 1.5 kN/mm, correspondant à $0,001D$, par appui a été utilisée. La force développée par les ressorts est égale au produit de la rigidité poste-élastique K_d et le déplacement d'appui d_i , ($K_d \times d_i$). La force sismique F_{EQ} développée par l'appui est la somme de la force de friction et la force dans les ressorts est calculée avec l'équation 1 :

$$[1] \quad F_{EQ} = Q_d + K_d \times d_i$$

La rigidité effective d'appui correspond au rapport de la force sismique avec le déplacement maximal :

$$[2] \quad K_e = F_{EQ} / d_i$$

La capacité de dissipation d'énergie (EDC) d'appui représente l'énergie dissipée par le système d'isolation qui est équivalente à l'aire sous la courbe d'hystérésis (figure 2), déterminée par 4 fois le produit de la force de friction (Q_d) et le déplacement (d_i):

$$[3] \quad EDC = 4 \times Q_d \times d_i$$

L'amortissement du système β est évalué selon le S6-06, article 4.10.11.3.3. Il est calculé en divisant l'énergie dissipée (EDC) par le produit de (2π) et $(K_e \times d^2)$, où le d est le déplacement total du système :

$$[4] \quad \beta = \frac{EDC}{2\pi \times K_e \times d^2}$$

Finalement, selon S6-06, article 4.10.6.2.1, la période effective (T_e) est calculée comme:

$$[5] \quad T_e = 2\pi \times \sqrt{\frac{W}{\Sigma K_{eff} \times g}},$$

où ΣK_{eff} et la somme de tous les ressorts en série avec la rigidité de la fondation, W est le poids sismique de pont et g le peseur de gravité.

4. Conception parasismique de pont

4.1 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). Selon les critères socio-économiques de la zone géographique du pont, la performance requise du pont est classifiée comme un pont d'urgence. Cela nécessite que le pont demeure accessible pour les véhicules d'urgence immédiatement après le séisme de conception et d'avoir des dommages réparables suite un important séisme. Le pont est situé dans une zone de performance sismique 3 et dans un site de type III. Selon les critères de l'article 4.4.5.3.1 de S6-06, le pont a été considéré « régulier » et a été analysé avec la méthode multimodale spectrale, tel que décrit dans l'article 4.5.3.3. Le rapport d'accélération de la zone A, correspondant à la zone 3, est de 0,2 g. 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. Cependant, dans notre cas la présence des pieux inclinés réduit les déplacements latéraux de la fondation et l'interaction sol-structure a été représentée par des séries de ressorts élastiques sur la longueur des pieux.

Tel que spécifié précédemment, le pont a été isolé uniquement dans la direction longitudinale avec des isolateurs à la pile centrale et des appuis unidirectionnels aux autres piles et aux culées. Dans ce cas, la réponse longitudinale du pont a été étudiée en utilisant le modèle de « pile unique » assumant le tablier infiniment rigide (figure 6).

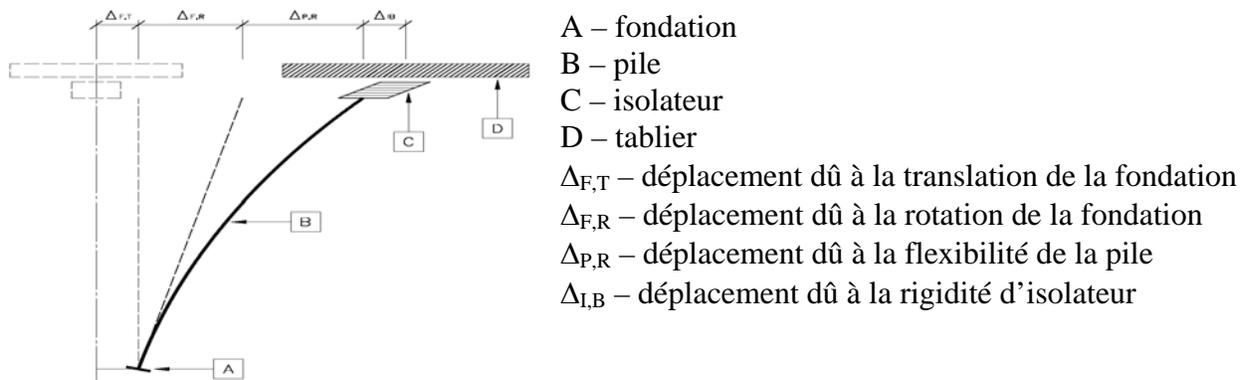


Fig. 6: Modèle de calcul

Pour les ponts isolés, le code exige utilisation de l'une des méthodes suivantes : méthode multimodale spectrale, analyse temporaire linéaire ou non linéaire. La méthode multimodale demande des valeurs linéaires effectives de la rigidité et d'amortissement d'appuis. Ces valeurs dépendent des déplacements relatifs d'isolateur. La rigidité effective des ressorts (K_{eff}) est égale à la force maximale divisée par le déplacement maximal. Généralement, un déplacement initial est assumé et les propriétés du système sont calculées. Cependant, après le premier set de calculs le déplacement ne sera pas exactement le même. Une nouvelle rigidité est calculée et toutes les propriétés du système sont recalculées. Après quelques itérations la convergence est atteinte et les valeurs finales sont utilisées pour la conception finale de la fondation. Le paragraphe suivant décrit en détail cette procédure.

4.2 Procédure de conception

Comme il a été décrit précédemment, en raison de la non-linéarité des isolateurs, le calcul des efforts sismiques est une procédure itérative requérant quelques itérations lorsque la méthode multispectrale est utilisée. Les valeurs des propriétés d'appui sont données par le fabricant et sont basées sur leur expérience. Dans le cas d'isolateurs du pont St-Charles, la force de friction Q_d a été égale à 110 kN, correspondant au coefficient de friction de 8% et un coefficient d'amortissement supposé à 30%. La rigidité post-élastique des ressorts à 15°C est égale à 1,5 kN/mm par appuis, correspond à 0,001D. La rigidité de la fondation incluant l'interaction sol-structure était estimée à 60 kN/mm. Le poids total du tablier est de 16000 kN. Dans le cas d'utilisation d'isolateurs, le coefficient élastique C'_{sm} est directement relié au spectre élastique donné par l'équation 6 :

$$[6] \quad C'_{sm} = \frac{A \times S_i}{T_e \times B} \leq 2,5 \frac{A}{B}$$

Dans cette équation, A est l'accélération de la zone, S_i est le coefficient de site pour des ponts isolés, T_e est la première période de vibration et B est un coefficient tenant compte de l'amortissement effectif de l'appui isolé différent de 5% utilisé pour construire le spectre de conception. Comme dans la conception standard, le C'_{sm} est limité à $2.5A$. Par contre, cette équation n'inclut pas le facteur d'importance. La philosophie de conception des ponts isolés assure une performance comparable aux ponts de secours et aux ponts d'urgence sans avoir recours à un facteur d'importance. Pour le pont St-Charles, le coefficient du site $S_i = 2,0$, et le facteur d'amortissement $B = 1,7$, ce qui correspond à un amortissement de 30%. Un exemple de calcul utilisant la procédure de conception est décrit dans le tableau 1.

Tableau 1: Procédure itérative de conception avec isolateurs – pont St-Charles

d_i	Q_d	K_d	K_e	K_{sub}	$K_{eff,3}$	T_e	C'_{sm}	D_i	d_i
75.0	110	1.5	11.9	60	9.9	2.5	0.092	150.0	125.2
125.2	110	1.5	9.5	60	8.2	2.8	0.084	164.7	142.2
142.2	110	1.5	9.1	60	7.9	2.9	0.082	168.0	145.9

La procédure itérative a été arrêtée quand la convergence entre le déplacement initial et final est atteinte. Dans notre cas, l'itération est arrêtée quand la différence entre les deux déplacements était moins de 2,5%. Dans ce tableau, D est le déplacement total du tablier et d_i est le déplacement relatif dans l'appareil d'appui. La rigidité effective d'appui a été calculée égale à 2,25 kN/mm et la force sur la pile et la fondation est de 1315 kN. La contribution des modes nonisolés était inférieure à 2,5%. Par simplification cette contribution a été négligée dans la conception finale. La force sismique sur la pile a été réduite à 8,2% du poids de tablier. La pile a été conçue élastiquement, tel que requis par le code. Pour assurer une performance adéquate durant un séisme plus important que celui de calcul, et des détails assurant une ductilité suffisante ont été appliqués pour les piles dans les zones potentielles de rotules plastiques. Un autre avantage important de la conception élastique de la pile est que la fondation a été conçue avec la force élastique et le principe de capacité protégée n'a pas été appliqué, contrairement du cas de conception standard avec des piles développantes des rotules plastiques.

5. Essais sur les isolateurs

5.1 Procédure d'essais

Cette section résume les résultats des essais dynamiques sur les isolateurs. L'article 4.10.11 de S6-06 requiert que la conception finale des unités de fondation doit être basée sur les vraies propriétés d'isolateurs, provenant des essais sur des prototypes identiques ou similaires aux appuis installés sur place. Ces propriétés doivent être évaluées pour vérifier les forces et les déplacements maximaux 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 requis par le Ministère des Transports du Québec..

Des prototypes de taille réelle, identiques aux appuis à installer, ont été testés dans le « Structural Engineering and Earthquake Simulation Laboratory » (SEESL) de l'Université de Buffalo à Amherst, NY. Tous les essais ont été réalisés par le fabricant et étaient surveillés par une tierce partie, qui a soumis un rapport de conformité à la fin des essais. Le système d'essais, présenté à la figure 7, comprend des éléments hydrauliques et mécaniques qui appliquent simultanément le chargement vertical, répliquant les charges de gravité, et horizontal, le déplacement relatif du tablier par rapport à la pile.

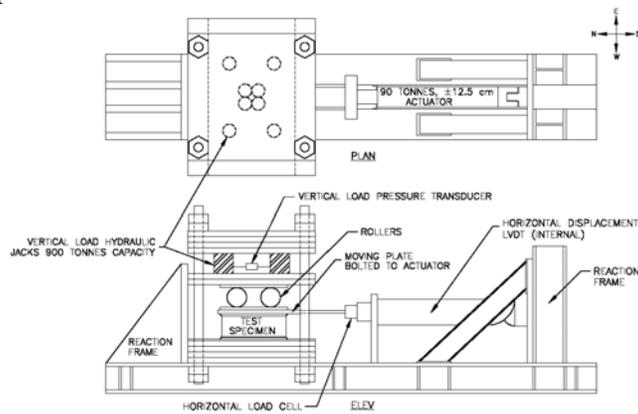


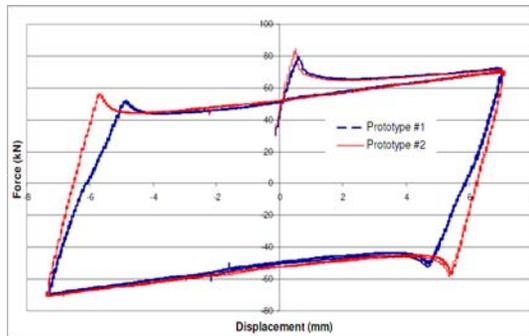
Fig. 7: Montage d'essai

La force verticale est appliquée par plusieurs vérins connectés en parallèle à une pompe hydraulique. Les vérins sont installés entre les plaques d'acier pour distribuer la charge uniformément sur l'appui. La force horizontale est appliquée par un vérin servo-hydraulique connecté à la plaque supérieure d'appui. La force horizontale est mesurée par une cellule de force connectée 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 un capteur de déplacement (LVDT) installé à l'intérieur de vérin hydraulique. Deux thermomètres, un type K - thermocouple pour mesurer la température de noyau et un type T sur les ressorts, ont été installés pour contrôler la température avant, durant et après les essais.

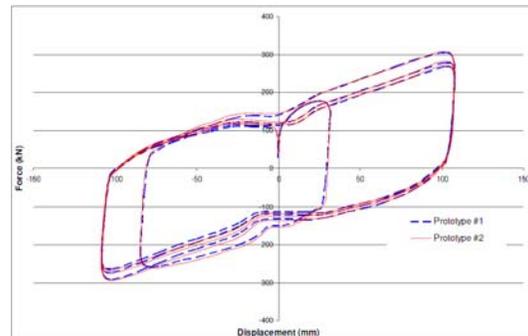
5.2 Résultats d'essais

Les deux prototypes ont démontré un comportement très similaire pendant les essais. Quelques résultats sont présentés à la figure 8. À cause de la limitation d'équipement, les prototypes ne pouvaient pas être testés jusqu'aux déplacements de calcul. Donc, une extrapolation mathématique des résultats des essais a été utilisée pour vérifier que les appuis auront le comportement satisfaisant en accord avec la conception.

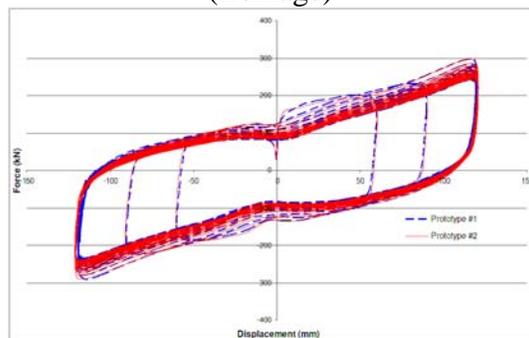
Les paramètres d'isolateurs utilisés pour la conception ont été vérifiés selon l'article 4.10.11.3. Les relations force-déplacement obtenus montrent une capacité portante positive incrémentale. La variation maximale de la rigidité effective moyenne de chacun des prototypes donnée au cours des trois cycles d'essais requis est inférieure à 6%, ce qui est inférieur au 10% permis par le code. Les rigidités moyennes pendant les essais de trois cycles étaient identiques pour les deux prototypes et égales à 2.5 kN/mm.



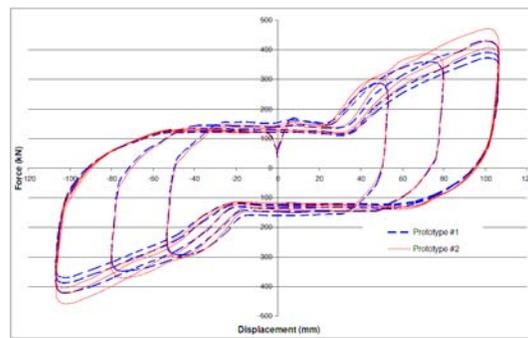
a) Essai sous les charges de service (freinage)



b) essai de 3 cycles - déplacement de calcul*



c) essai de 20 cycles*



d) essai à basse température (-30°C)

* les déplacements à la capacité maximale d'équipement.

Fig. 8: Résultats d'essais

L'augmentation ou la réduction maximale de la rigidité effective entre le premier cycle et l'un des cycles subséquents de chaque prototype au cours des essais de 20 cycliques était de 19%, moins que les 20% permis par le code. La rigidité moyenne durant ces essais est de 1,99 kN/mm pour le premier prototype et de 2,01 kN/mm pour le deuxième. Ces valeurs, comparées au 2,25 kN/mm utilisé dans la conception ont été jugés acceptable. La capacité de dissipation d'énergie diminue avec l'augmentation du nombre des cycles effectués au niveau de déplacement sismique maximum. La moyenne d'amortissement effective pour les deux prototypes était

calculée à 25% d'amortissement critique. L'amortissement diminue avec chaque cycle, avec une réduction inter-cycle maximale de 8%, soit moins de 20% permis par le code.

À basse température, la rigidité effective a augmentée jusqu'à 4,0 kN/mm et l'amortissement diminue. La réaction moyenne pour le premier prototype est de 398 kN et pour le deuxième – 428 kN. Donc, la valeur moyenne pour les deux prototypes est de 413 kN, laquelle est légèrement plus grande que le 402 kN prévue dans la conception. Cependant, cette valeur est d'environ 3% plus grande que la valeur de conception qui était jugée acceptable.

6. Comparaison des méthodes de conception

Pour voir l'avantage de l'isolation sismique, la conception avec des isolateurs a été comparée avec les résultats de la conception standard, assumant le développement de rotule plastique à la base de la pile. Les valeurs suivantes ont été utilisées : facteur d'importance $I = 1,5$ et coefficient de site de $S = 1,5$. La rigidité effective de la pile de 60 kN/mm ce qui donne une période de vibration de 1,06 seconde, correspondant à une force élastique de 8648 kN. Le développement de rotule plastique permet la réduction des efforts élastique dans la colonne par le facteur de modification R . Pour la pile dans la direction longitudinale, le facteur R de 3 réduit la force sur la pile à 2883 kN. Cependant, les dommages sont limités dans la rotule plastique. Les autres éléments de la structure, telle que la fondation, doivent rester élastiques et pour faire cela, la procédure de capacité protégée doit être appliquée. Donc, les forces pour la conception de la fondation sont calculées en multipliant les forces sur la pile par le facteur de surcapacité, égal dans ce cas à 1,8, résultant à 5189 kN. En comparant les forces de conception standard, 2883 kN pour une pile et 5189 kN pour la fondation, avec la force dans le cas de la conception avec un tablier isolé, 1315 kN, on note que l'utilisation des isolateurs réduit la flexion de la pile avec un facteur de 2 et les forces sur la fondation de 4 à la température ambiante. Des calculs similaires conduisent à des efforts 3,2 fois moins importants sur le tablier isolé que sur le tablier non isolé à basse température.

7. Conclusions

L'application des isolateurs sismiques au pont St-Charles a permis de réduire les coûts de la conception parasismique de l'ouvrage par rapport à une conception classique. Les résultats analytiques et expérimentaux ont démontré que les appuis antisismiques ont réduit de manière significative les forces d'inertie en comparaison d'un pont non-isolé, ce qui permet une conception plus économique des unités de fondation. En général, l'isolation sismique a réduit les charges sur la fondation par un facteur de 3,2 à 4 suivant la température, ce qui a amené à une réduction considérable des coûts de construction.

Les essais expérimentaux conduits sur les prototypes ont confirmé le comportement prévu des isolateurs sismiques. Cependant, un certain conservatisme devrait être utilisé pendant la conception initiale pour anticiper les variations des caractéristiques possibles durant les essais, surtout pour le comportement à basse température pour lequel les fabricants ont moins d'expérience.

L'implication des fabricants d'appuis antisismiques au début du projet, et l'assistance technique du fabricant retenu pendant la conception et la construction ont assuré le succès du projet. L'ouvrage a été inauguré en 2009 et se comporte bien depuis.

8. References

Association Canadienne de Normalisation 2006. *CAN/CSA-S6-06 Code canadien sur le calcul des ponts routiers*. Association canadienne de normalisation, Mississauga, Canada

MCEER/ATC-49. *Recommended LRFD Guidelines for the Seismic Design of Highway Bridges, 2003*. ATC/MCEER JOINT VENTURE.