

Conception parasismique d'un pont courbe à l'aide d'isolateur sismique dans l'échangeur A20/A73

F. Paradis, J-F Martel, P. Dandois et Y. Maltais

CIMA+, 1145 boul. Lebourgneuf, bureau 300, Québec, Canada, G2K 2K8

RÉSUMÉ

Cet article présente la conception parasismique d'un pont courbe à l'aide d'isolateur sismique de type élastomère fretté avec noyau de plomb. Le pont à l'étude, situé dans la région de Québec, relie l'autoroute 73 nord à l'autoroute 20 est. Le tablier de type dalle sur poutres en acier comporte 6 travées totalisant 318 mètres de longueur et repose sur des piles encastrees au roc à l'aide de pieux caissons. Le pont est considéré « pont de secours » au niveau de la catégorie d'importance sismique.

Après un bref rappel théorique des principes de l'isolation sismique, l'article énonce les raisons qui ont mené les concepteurs à considérer l'isolation sismique comme méthode de mitigation des effets des tremblements de terre. Les principaux avantages de l'isolation sismique pour cette structure sont une diminution des coûts des unités de fondation, un échéancier de réalisation plus court et une amélioration du comportement du pont en cas de séisme majeur.

La démarche de conception du système d'isolation retenue pour le pont est ensuite présentée. L'analyse du comportement sismique du pont a été réalisée selon différentes méthodes d'analyse, soit la méthode de la charge uniforme, la méthode spectrale multimodale, l'analyse statique de poussée et la méthode des diagrammes d'évolution (analyse temporelle non linéaire). Le comportement du pont isolé a été évalué pour différents scénarios desquels les résultats utilisés pour dimensionner les unités de fondation et les joints de tablier ont été extraits. Parmi les paramètres considérés se trouvent les températures d'exposition minimales et maximales définies par le code canadien de calcul des ponts routiers.

L'article explique également le choix du type d'isolateur sismique préconisé et la configuration retenue. Les exigences de performance à basse température ainsi que le processus des essais de qualifications sont finalement décrits.

1. Introduction

Plusieurs propriétaires d'ouvrage ont constaté au cours des dernières années une hausse importante des coûts des systèmes structuraux conventionnels de résistance aux charges latérales (unités de fondation, butoirs, diaphragmes d'extrémité, etc.). Cette hausse serait principalement attribuable à l'augmentation des charges sismiques données dans les deux dernières éditions (2000 et 2006) du code canadien sur le calcul des ponts routiers (CAN/CSA-S6) comparativement aux éditions antérieures de cette même norme. Dans ce contexte, il est aujourd'hui devenu essentiel de rechercher des solutions visant à réduire l'envergure et le coût de ces systèmes de résistance aux charges latérales.

L'utilisation d'équipements spécialisés pour atténuer les effets des séismes, tels que les isolateurs sismiques, représente une solution prometteuse pour réduire de façon appréciable l'envergure des systèmes structuraux conventionnels de résistance aux charges latérales. Dans certains cas, ces équipements permettent aussi de réduire le délai de construction ou de réduire la grosseur des fondations.

C'est dans cette optique que des isolateurs sismiques ont été utilisés dans le cadre du projet de construction d'un pont, situé dans la région de Québec, qui relie l'autoroute 73 nord à l'autoroute 20 est. Le tablier de type dalle sur poutres en acier comporte 6 travées totalisant 318 mètres de longueur et repose sur des piles encastrees au roc à l'aide de pieux caisson. Le pont est considéré « pont de secours » au niveau de la catégorie d'importance sismique.

Cet article présente d'abord un bref rappel théorique des principes de l'isolation sismique et énonce les raisons qui ont mené les concepteurs à considérer l'isolation sismique comme méthode de mitigation des effets des tremblements de terre. Ensuite, la conception parasismique du pont à l'aide d'isolateurs sismiques de type élastomère fretté avec noyau de plomb est présentée. L'article explique également le choix du type d'isolateur sismique préconisé et la configuration retenue. Les exigences de performance à basse température ainsi que le processus des essais de qualifications sont finalement décrits.

2. Isolation sismique – rappel théorique

2.1 Principe de fonctionnement

Les isolateurs sismiques sont des systèmes qui découplent la structure des mouvements du sol et/ou de ses appuis en augmentant la flexibilité de la structure, en d'autres termes en allongeant la période des modes fondamentaux de vibration, tout en fournissant un amortissement approprié.

Puisque les dommages induits à une structure par l'effet des tremblements de terre sont essentiellement dus à la concordance entre la période naturelle de vibration d'une structure et la période dominante de la secousse sismique, l'allongement de la période de vibration de la structure permet, pour un séisme qui produit des accélérations maximales à de hautes fréquences (caractéristique propre aux séismes de l'Est canadien), de réduire considérablement l'amplitude des accélérations, et par conséquent des forces qui lui sont transmises.

En cas de séisme, un isolateur permet de diminuer la force transmise à une structure, d'abord en augmentant sa période de vibration, et ensuite, mais dans une moindre mesure, en dissipant une certaine quantité d'énergie par amortissement. Le contrôle des déplacements devient alors le premier enjeu, puisqu'il est lié de près à l'allongement de la période. C'est en variant l'amortissement du système que la conception des ouvrages peut être optimisée. Ces phénomènes sont illustrés de façon schématique à la figure 1. Notons que la section 4.10 de la norme CAN/CSA S6-06 présente les équations et exigences nécessaires pour la conception d'un système d'isolation sismique.

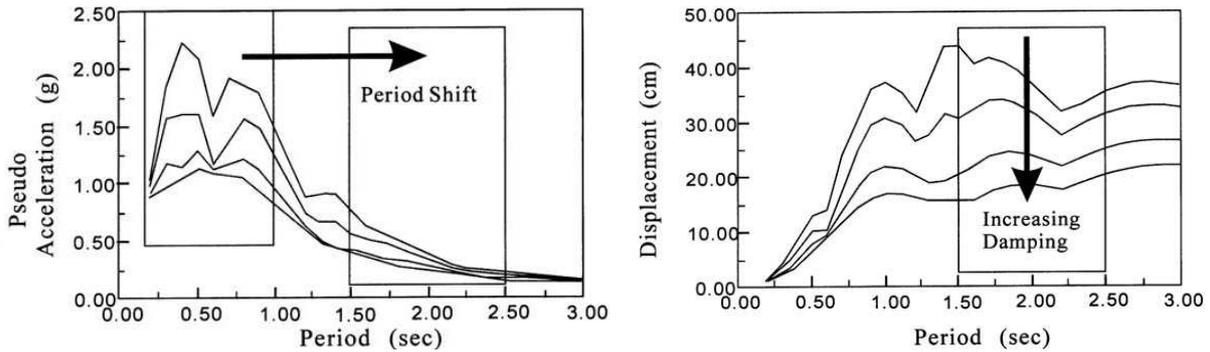
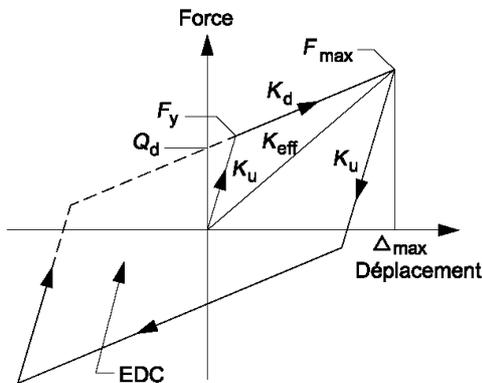


Figure 1. Influences de l'allongement de la période et de l'amortissement sur l'accélération et le déplacement d'une structure (Chen, 2003)

2.2 Comportement théorique des isolateurs

La plupart des isolateurs ont un comportement idéalisé de type bilinéaire qui s'apparente à celui illustré à la figure 2. Ce comportement est caractérisé par une rigidité élastique k_u (avant d'atteindre la force caractéristique (Q_d)) et par une rigidité postélastique k_d . Ces paramètres sont expliqués en détail par Dion (2010). Retenons simplement que la rigidité latérale du système est fonction du module de cisaillement de l'élastomère et du diamètre du noyau de plomb, pour le système en élastomère, et de la rigidité du système de recentrage (ressorts métalliques ou polyéther-uréthanes) une fois le glissement amorcé, dans le cas du système à friction. Aussi, notons que la dissipation d'énergie associée à un cycle de mouvement correspond à la surface comprise à l'intérieur de la boucle d'hystérésis.



- Q_d = Force caractéristique (Characteristic strength)
- F_y = Force élastique (Yield force)
- F_{max} = Force maximale (Maximum force)
- K_d = Rigidité post-élastique (Post-elastic stiffness)
- K_u = Rigidité élastique au déchargement (Elastic unloading stiffness)
- K_{eff} = Rigidité effective (Effective stiffness)
- Δ_{max} = Déplacement maximal de l'appareil (Maximum bearing displacement)
- EDC = Énergie dissipée par cycle (Energy dissipated per cycle)

Figure 2. Comportement bilinéaire des isolateurs sismiques

Les isolateurs sismiques sont habituellement divisés en deux principales catégories, soit les élastomères à noyau de plomb et les systèmes à friction. Des exemples typiques de ces systèmes sont présentés sur la figure 3. À température ambiante, la force caractéristique Q_d de l'isolateur à noyau de plomb est fonction de la surface du noyau de plomb (Eq. 1) et la rigidité plastique k_d est fonction du module de cisaillement et de l'aire de caoutchouc (Eq. 2). Pour les systèmes à friction, Q_d et k_d dépendent du coefficient de friction et de la rigidité du système de recentrage (ressorts ou rayon de courbure) une fois que le déplacement est initié.

$$[1] \quad Q_d = \sigma_{yl} \times A_l$$

$$[2] \quad k_d = \frac{G_r \times A_r}{T_r}$$

où :

σ_{yl} : limite élastique du plomb

A_l : aire du noyau de plomb

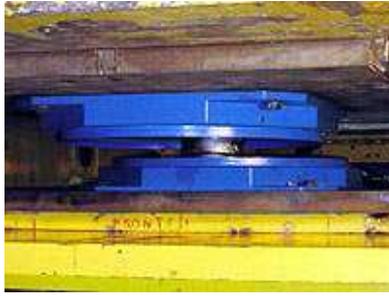
G_r : module de cisaillement du caoutchouc

A_r : surface du caoutchouc

T_r : épaisseur du caoutchouc



a)



b)



c)

Figure 3. Isolateur sismique a) élastomère à noyau de plomb (DIS), b) pendule à friction (EPS), c) isolateur à friction avec système de recentrage (RJ Watson)

3. Description de la structure

La construction d'un pont courbe de 6 travées d'une longueur de 318 mètres a été complétée à l'automne 2013 (voir la figure 4). Le tablier du pont est constitué d'une dalle sur 6 poutres en acier et des joints de dilatation à quatre garnitures sont présents aux deux extrémités du pont. Le tablier a une largeur variable de 12,8 à 17,5 mètres et possède un rayon de courbure de 270 mètres pour créer un angle d'ouverture de 67 degrés entre les deux extrémités du pont.

Les conditions géotechniques montrent que le sol sous la structure est constitué d'une couche de matériaux granulaires reposant sur du roc de bonne qualité. Le roc est situé à une profondeur de 5 à 15 mètres par rapport au terrain naturel (voir la figure 5). La couche de sol est composée

principalement de sable silteux, silt et silt argileux de compacité très lâche. Compte tenu des caractéristiques du terrain naturel de faible capacité, les unités de fondation doivent être appuyées sur le roc ou encastrées dans celui-ci. Le tablier repose donc sur des piles encastrées dans le roc à l'aide de pieux caissons de 2,5 mètres de diamètre. Les piles sont composées de deux colonnes qui s'encastrant dans des pieux caissons au niveau du terrain naturel où des rotules plastiques sont considérées. La longueur des colonnes et des pieux caissons à partir de l'encastrement au roc jusqu'au-dessous des appareils d'appui varie de 10 à 18 mètres. De plus, comme les matériaux granulaires sont très lâches, leur contribution à la retenue latérale des pieux caissons est faible.

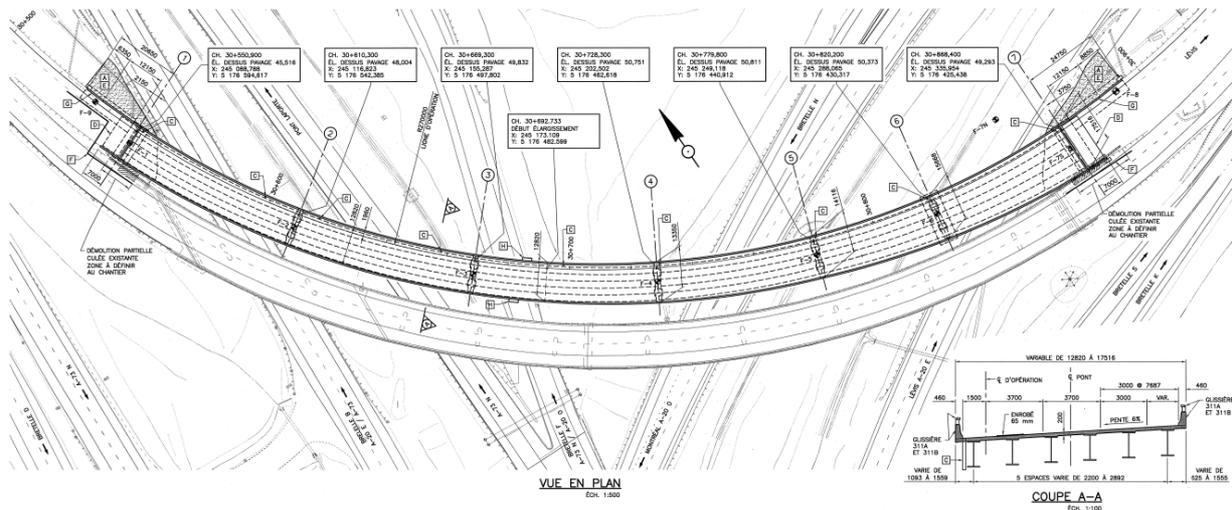


Figure 4. Vue en plan du pont

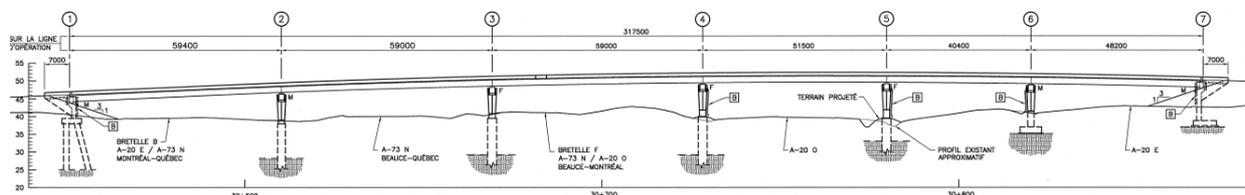


Figure 5. Vue en élévation du pont

Au niveau sismique, le pont a la catégorie d'importance « pont de secours ». Les efforts sismiques dans la direction longitudinale étant trop importants pour être repris à une ou deux unités de fondation, les unités de fondation 3, 4 et 5 ont été fixées. Dans la direction transversale, toutes les unités de fondation sont fixes. De plus, le pont a été isolé à l'aide d'isolateur sismique de type élastomère avec noyau de plomb aux trois unités de fondation fixe longitudinalement afin d'améliorer le comportement sismique. Notons que la direction longitudinale suit l'arc de cercle du pont.

4. Conception conventionnelle et avantages de l'isolation sismique

Dans un premier temps, le pont a été conçu à l'aide d'un système conventionnel de résistance aux charges latérales. Cette première conception a permis de constater que les efforts horizontaux dans la direction longitudinale étaient extrêmement élevés. Ces efforts nécessitaient entre autres des appareils d'appui d'une très grande dimension et comportant des systèmes de retenus

longitudinale particuliers et indépendants des appuis. La mise en place de ces systèmes contrôlait la largeur des chevêtres, soit plus de 2,2 mètres. Par ailleurs, les efforts à la base des colonnes et des pieux caissons étaient également très élevés. La conception initiale nécessitait des caissons de plus de 3 mètres de diamètre, ce qui est peu commun. La longueur d'encastrement des pieux caissons dans le roc était alors d'environ 10 mètres. De plus, une grande quantité d'armatures était nécessaire, particulièrement dans les rotules plastiques, dans la partie haute des colonnes et dans les chevêtres. Cette congestion de barres d'armature était annonciatrice de problèmes de réalisation en chantier. Notons que la période du pont était de 1,3 seconde pour cette conception conventionnelle.

Suite à cette première conception qui a mis en lumière différentes problématiques et l'envergure des coûts associés à celles-ci, il a été décidé d'évaluer la faisabilité et la rentabilité de mettre en place un système d'isolation sismique. Les premières analyses ont montré un potentiel de gains intéressant à l'utilisation d'isolateurs sismiques. En effet, puisque la période longitudinale du pont est relativement faible, l'isolation sismique permet une réduction des efforts par un facteur d'environ 3. Ainsi, dans le cadre du présent projet, les avantages suivants ont été identifiés :

- Réduction de la longueur de l'emboîture de chaque pieux caisson d'environ 3 à 4 mètres dans un roc très dur;
- Diminution de la durée des travaux de l'ordre de 2 à 3 mois;
- Éviter la mise en place d'appareils d'appui de très grande dimension ou non standard ainsi que des butoirs longitudinaux;
- Diminution de la quantité d'armatures dans les unités de fondation évitant des congestions d'armature et facilitant ainsi la mise en place des ancrages des appareils d'appui;
- Élimination de l'endommagement des rotules plastiques dans les unités de fondation qui doivent être réparées suite à un séisme majeur;
- Diminution globale des coûts de construction de l'ordre de 350 000 \$.

Notons par ailleurs que l'utilisation d'isolateurs sismiques nécessite la réalisation d'essais de qualification et ce processus prend plusieurs mois. Dans ce projet, l'échéancier des travaux permettait un délai suffisamment important pour la réalisation des essais de qualification des isolateurs avant leur installation au chantier.

5. Conception du système d'isolation

La conception du système d'isolation sismique a été réalisée en utilisant les résultats de diverses analyses. Afin de bien comprendre le comportement sismique du pont, 4 méthodes d'analyse ont été utilisées, soit la méthode de la charge uniforme, la méthode spectrale multimodale, l'analyse statique de poussée et l'analyse temporelle non linéaire. Ces méthodes d'analyse ont permis l'optimisation du niveau d'énergie investi à chaque étape de même que la vérification des résultats obtenus.

Dans un premier temps, la méthode de la charge uniforme a montré l'intérêt probable de l'isolation sismique en donnant l'ordre de grandeur des gains potentiels sur la réduction des efforts, et ce, en utilisant les prescriptions de la norme CSA S6-06 pour la description du comportement hystérétique des isolateurs de type bilinéaire (voir la figure 6).

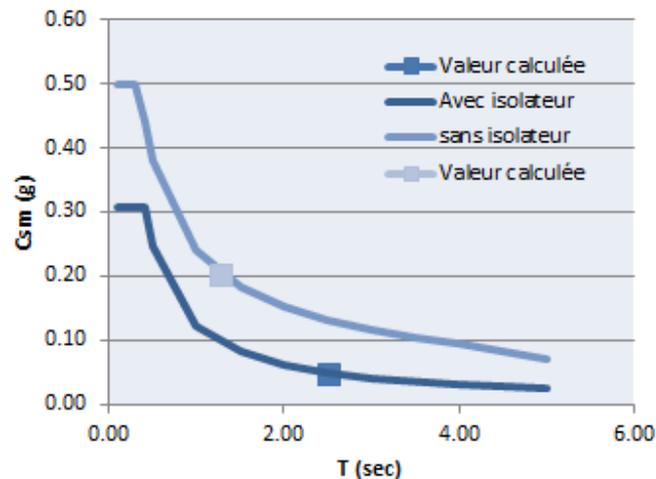


Figure 6 – Spectres de réponse avec et sans isolateurs sismiques – méthode de la charge uniforme

Des analyses spectrales multimodales ont ensuite été réalisées sur des modèles numériques tridimensionnels définis dans deux différents logiciels d'analyse des structures. Ces analyses ont permis la vérification des modes principaux de l'ouvrage, en tenant compte notamment de la forte courbure de la structure et de l'élargissement progressif du tablier du pont. Pour ces analyses, une rigidité linéaire effective a été considérée pour les isolateurs et l'amortissement anticipé a été inclus à l'analyse modale. L'intégration de l'interaction sol-structure pour les conditions du site a également été faite par le moyen de ressorts linéaires équivalents dont la constante a été déterminée par la méthode des différences finies.

L'effet du comportement dynamique non linéaire des isolateurs sismiques a par la suite été vérifié par les analyses temporelles non linéaires réalisées avec des mouvements du sol ajustés au spectre de réponse du site. Pour la réalisation de telles analyses, les normes en vigueur, incluant le Guide Specifications for Seismic Isolation Design (GSSID) de l'AASHTO, recommandent d'utiliser, pour le dimensionnement, les résultats maximums de 3 ou les résultats moyens de 7 analyses réalisées avec des paires de mouvements orthogonaux. Pour ce pont, 8 paires de mouvements orthogonaux ont été ajustées au spectre de réponse. Puisque le pont présente une forte courbure lui conférant un angle d'ouverture de 67 degrés, ces mouvements ont été appliqués selon 6 angles d'incidence (pour un total de 48 cas d'analyses temporelles non linéaires) afin de capter adéquatement l'effet de la courbure sur la réponse dynamique du pont. Ces analyses ont été conduites à l'aide du logiciel CSiBridge. Les isolateurs sismiques ont été modélisés par des éléments de type « links » selon le modèle *Plastic (Wen)*. Pour la réalisation des analyses temporelles non linéaires, un comportement linéaire a été assumé pour tous les éléments des modèles numériques à l'exception des isolateurs sismiques dans la direction longitudinale.

L'évaluation de la performance structurale basée sur les analyses décrites précédemment a permis d'optimiser les propriétés requises du système d'isolation sismique à température ambiante. Les propriétés ainsi déterminées sont $Q_d=150\text{kN}$, $k_d=1,50\text{ kN/mm}$, $\beta=29\%$, $\text{EDC}=50,3\text{ kN-m}$ pour un déplacement de 95 mm. La période fondamentale du mode isolé obtenu avec ces propriétés est de l'ordre de 2,90 secondes. En plus d'offrir un haut niveau d'amortissement, l'isolation sismique a permis pour ce cas une diminution de l'accélération spectrale (voir la figure 6) telle que les efforts sismiques dans la direction longitudinale furent réduits d'un facteur trois.

Étant donné la géométrie du pont, le choix des points « fixes » dans la direction longitudinale s'est arrêté sur les unités de fondation 3, 4 et 5. Cette configuration permet notamment la minimisation des efforts en raison des mouvements thermiques. Il convient de noter que seule la direction longitudinale du pont est isolée, c'est-à-dire que les appareils d'appuis de toutes les unités de fondations sont guidés parallèlement à l'arc de cercle décrit par le pont. Cette configuration a pour but premier un comportement adéquat sous les sollicitations sismique et thermique, tant aux appareils d'appuis qu'aux joints d'expansion. Pour ces deux cas de chargement, les analyses détaillées ont effectivement montré que le pont inscrit une translation selon l'arc de cercle correspondant à sa courbure.

À basse température, une revue des facteurs de modification des propriétés apparaissant au GSSID de l'AASHTO a permis de chiffrer l'augmentation de la rigidité effective anticipée à 40 %. Une réserve en ductilité permise par le détaillage de rotules plastiques et une légère surcapacité des éléments sous-jacents fut néanmoins prévue aux piles 3, 4 et 5 pour accommoder une demande supérieure à celle ainsi évaluée.

Étant donné les fixités du tablier précédemment énoncées, les isolateurs sismiques aux piles 3 et 5 subissent des déplacements imposés par les variations de température. Selon la température à laquelle se produit un séisme, un isolateur sismique se trouvant à ces piles est donc susceptible d'amorcer sa translation à partir d'un point qui diffère de son point d'équilibre. Des analyses temporelles non linéaires ont été réalisées avec des conditions initiales correspondant au déplacement imposé par les effets thermiques aux piles 3 et 5 et ont permis de vérifier le comportement de l'ouvrage dans un tel cas. Les résultats ont été inclus au dimensionnement.

Parallèlement à la conception du système d'isolation, une revue des isolateurs sismiques se trouvant sur le marché a été réalisée afin de choisir le type le plus approprié pour le projet. Une particularité du pont à l'étude est que les charges gravitaires supportées par les appareils d'appuis des unités de fondations 3, 4 et 5 diffèrent les unes des autres, les travées étant de longueurs relativement différentes. Or, la conception des systèmes d'isolation basés sur un principe de friction est directement liée à la charge supportée. Cette charge étant différente pour les trois unités de fondation, il eût été nécessaire, à l'emploi d'un système à friction, de concevoir trois isolateurs avec des propriétés différentes et de réaliser des essais de qualification pour chacun. Les isolateurs de type élastomère fretté avec noyau de plomb sont en contrepartie très peu influencés par la charge verticale, permettant l'emploi d'un seul type d'isolateur et la réalisation d'une seule série d'essais de qualification. Étant donné les délais et les coûts associés aux essais de qualification des isolateurs sismiques, l'emploi d'un système dont les propriétés sont peu affectées par les charges de gravité présente un net avantage. Le système à élastomère fretté à noyau de plomb a donc été choisi. De plus, ce type d'isolateur est relativement simple, durable, et nécessite peu d'entretien, en plus d'être peu dispendieux.

6. Essais de qualification des isolateurs sismiques

6.1 Exigences

La norme canadienne exige des essais de qualification pour des isolateurs sismiques. Ces essais doivent être réalisés sur des prototypes grandeur nature afin de valider leur conception et leur fabrication.

Pour ce faire, les essais de qualification ont été exigés au devis. Les essais et les analyses des résultats pour confirmer les caractéristiques des isolateurs doivent être réalisés en conformité à l'article 4.10.11 de la norme CAN/CSA S6-06 et aux exigences applicables de l'article 13 du document « Guide Specifications for Seismic Isolation Design, Third Edition, 2010 » de l'AASHTO. Ces essais sont réalisés à température de la pièce, soit 20 degrés Celcius.

En plus des essais mentionnés dans la norme, un essai à basse température a été exigé pour bien représenter les conditions climatiques du Québec. Pour ce faire, un essai sur les prototypes conditionnés à -30 degrés Celcius pendant trois jours a été exigé. Les propriétés du système d'isolation obtenues à partir des essais effectués à basse température (-30 °C) devaient être telles que la rigidité effective de l'isolateur ne diffère pas de plus de 40 % de celle calculée suite aux essais à température ambiante.

Cet essai est particulièrement important, car la température peut avoir un impact majeur sur le comportement des matériaux des isolateurs si ce dernier n'est pas bien conçu. Les propriétés des isolateurs varient de façon importante selon le type de caoutchouc, la géométrie de l'isolateur, le type de conditionnement, etc. (F. Paradis et coll, 2014). Bien que l'utilisation de tels systèmes soit déjà répandue ailleurs dans le monde, les exemples d'utilisation en climat nordique sont peu nombreux.

6.2 Résultats

Les résultats obtenus des essais réalisés à température ambiante sur les prototypes ont donné des résultats rencontrant les exigences des plans et devis. Cependant, les essais réalisés sur les premiers prototypes à basse température n'ont pas donné les résultats escomptés puisque l'augmentation de la rigidité effective des isolateurs était de plus de 400 %. Ces premiers prototypes ont donc été rejetés.

Ces résultats ont mené à l'analyse du protocole d'essai et de la formulation de l'élastomère. Ces deux sujets ont été investigués en profondeur par le fabricant et le concepteur. Le fabricant a ensuite conçu trois nouveaux prototypes à l'aide de différentes formulations d'élastomère et refait les essais de qualification. Un des prototypes a donné des résultats acceptables et a été sélectionné. La figure 7 présente les résultats d'essais à basse température réalisés sur un des prototypes.

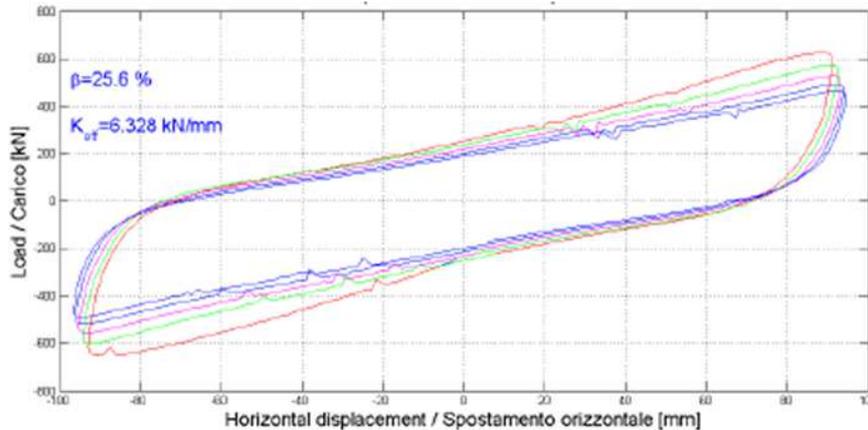


Figure 7. Courbe charge-déplacement d'un isolateur sismique à basse température

Par ailleurs, l'étude du protocole d'essai et de l'analyse des résultats qui en découle démontrent certaines imprécisions qui mènent à une interprétation des résultats variables. Suite à ce projet, plusieurs commentaires ont été faits et seront adressés dans le prochain code canadien de calcul des ponts routier (CAN/CSA S6). F. Paradis et coll. (2014) présentent plusieurs facteurs qui influencent les essais et l'analyse des résultats.

Les résultats à basse température ont été analysés en faisant une moyenne des trois premiers cycles de chargement à pleine amplitude suivant un chargement sinusoïdal. Suivant cette procédure, la rigidité effective à basse température est 1,8 fois plus importante que la rigidité exigée à température ambiante. Cette valeur représente une augmentation significative de la valeur spécifiée, mais elle a été acceptée par le concepteur pour différentes raisons. En fait, après vérification de la conception, il y avait une réserve de capacité des unités de fondation. De plus, l'augmentation de rigidité de l'élastomère fait en sorte que l'énergie dissipée par cycle est plus importante, ce qui fait en sorte que pour une même énergie dissipée, le déplacement est moindre et la force résultante s'apparente à la force maximale exigée aux plans et devis. Notons également la faible probabilité qu'un séisme majeur survienne suite à trois jours consécutifs à -30 degrés Celcius. Considérant ces raisons, ce prototype a été accepté.

7. Conclusion

En conclusion, l'utilisation d'un système d'isolation dans le cadre de ce projet a été avantageuse pour le client particulièrement au niveau du délai et des coûts de construction, et ce, tout en facilitant la construction principalement par des éléments de dimension plus conventionnels.

Notons également que le projet s'est bien déroulé, et ce, malgré que les essais de qualification ont nécessité une reprise. De plus, la structure construite est de grande qualité et ne s'endommagera pas en cas de séisme majeur contrairement à une conception conventionnelle où les rotules plastiques dans les unités de fondation doivent être réparées.

Finalement, ce projet a permis de faire avancer les connaissances dans le domaine de l'isolation sismique des ponts au Québec et ailleurs dans le monde. L'utilisation d'isolation sismique dans le cadre de construction de ponts d'envergure s'avère très prometteuse pour les prochaines années.

8. Références

Chen, Scawthorn, *Earthquake Engineering Handbook*, 2003

Dion, Cassandra, *Étude numérique et expérimentation du comportement dynamique des ponts avec isolateurs et amortisseurs sismiques*, Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, 2010

Paradis F., Martel J-F, Maltais Y. et Dandois P., *Seismic Isolation of Bridges in Cold Climate*, 9th International Conference on Short and Medium Span Bridges, Calgary, Alberta, juillet 2014

AASHTO, *Guide Specifications for Seismic Isolation Design*, Third Edition, 2010, 47 p.