

Isolation sismique des ponts en région froide

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

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

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, incluant les unités de fondation. Dans certains cas, ces équipements permettent aussi de réduire les délais de construction. Toutefois, le comportement des isolateurs sismiques dans les climats nordiques demeure toujours méconnu et peut constituer un frein à leur utilisation. Après un bref rappel des principes de l'isolation sismique, cet article discute de l'impact des températures froides sur la conception des ponts équipés d'isolateurs sismiques de type «élastomère fretté à noyau de plomb». Cet article discute également de l'effet des températures froides sur les propriétés de ce type d'isolateur, dont la rigidité effective et l'énergie dissipée par cycle, tout comme sur les éléments qui les composent. Finalement, différentes solutions visant à diminuer les incertitudes associées à la conception de ponts avec isolateurs sismiques en région nordique sont discutées.

1. INTRODUCTION

Au fil des ans, de nombreux codes de conception, dont le *Code canadien sur le calcul des ponts routiers (CAN / CSA S6)*, ont considérablement augmenté leurs exigences en regard de la conception parasismique des ponts, ce qui rend la conception de ces ouvrages beaucoup plus exigeante pour les ingénieurs, particulièrement lorsque les coûts de construction doivent être minimisés. Considérant ces exigences, les charges sismiques peuvent être, dans bien des cas, les forces gouvernant la conception des éléments structuraux principaux, notamment pour les éléments de fondations comme les piles. En fait, le respect des exigences des codes de conception peut alors mener à la construction de systèmes de résistance aux charges sismiques qui sont imposants et très coûteux. Dans de tels cas, l'isolation sismique apparaît être une solution à considérer pour atténuer les effets des tremblements de terre et réduire la taille et le coût des systèmes structuraux normalement requis pour résister à de tels événements. Cependant, jusqu'à présent, même si plusieurs ponts ont fait l'objet d'une isolation sismique à travers le monde, peu d'information est disponible sur l'influence des températures froides sur le comportement des systèmes d'isolation. Cette question s'avère importante dans un pays comme le Canada, où les températures peuvent être aussi basses que -30 degrés Celsius (et parfois même moins) en hiver.

Cet article présente d'abord la théorie derrière l'isolation sismique, les principaux types de dispositif d'isolation sismique disponibles sur le marché et les divers paramètres à considérer afin d'établir si un pont donné (neuf ou existant) est un bon candidat pour l'isolation sismique. L'influence des températures froides sur la conception des systèmes d'isolation sismique est ensuite discutée afin de guider les ingénieurs lors de la conception parasismique d'un pont. Enfin, une étude de cas (pont à travées multiples récemment construit dans l'est du Canada) est présentée afin de donner une idée aux concepteurs des défis auxquels ils sont susceptibles de faire face au cours d'un projet d'isolation d'un pont. Entre autres, la conception et les exigences des essais pour les systèmes exposés à de faibles températures sont discutées.

2. ISOLATION SISMIQUE – RAPPEL THÉORIQUE

2.1 Principe de fonctionnement

Les isolateurs sismiques sont des systèmes qui découplent les mouvements du sol et de la structure isolée. En fait, l'isolation d'un pont augmente la flexibilité de la structure en allongeant la période des modes fondamentaux de vibration de l'ouvrage, tout en fournissant un amortissement approprié.

Les dommages à une structure lors d'un tremblement de terre surviennent principalement lorsque la période naturelle de vibration de la structure et la période dominante de la secousse sismique sont similaires. En conséquence, le principe de l'isolation d'un pont vise à introduire un équipement (isolateur généralement placé entre le dessus des unités de fondation et le dessous du tablier) qui permet de modifier la période de vibration du pont afin de l'éloigner de la période dominante du séisme.

L'allongement de la première période de vibration d'un pont est donc un paramètre important qui permet de réduire significativement les forces d'accélération auxquelles la structure doit résister, en particulier pour une structure située dans les zones où le mouvement du sol est caractérisé par des accélérations maximales à de hautes fréquences. Cependant, puisque l'allongement de la période implique de plus grands mouvements, le contrôle des déplacements de l'ouvrage devient alors un facteur important à considérer dans sa conception.

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.

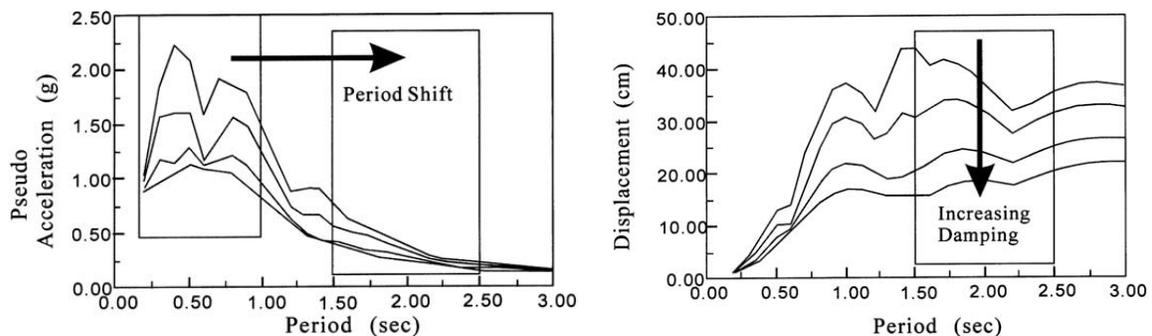


Figure 1. Influence de l'allongement de la période et de l'amortissement sur l'accélération et le déplacement d'une structure (Chen, 2003)

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 post-élastique K_d . L'énergie dissipée au cours de chaque cycle est donnée par l'aire de la boucle d'hystérésis, qui est essentiellement définie par Q_d , K_d , et le déplacement de conception.

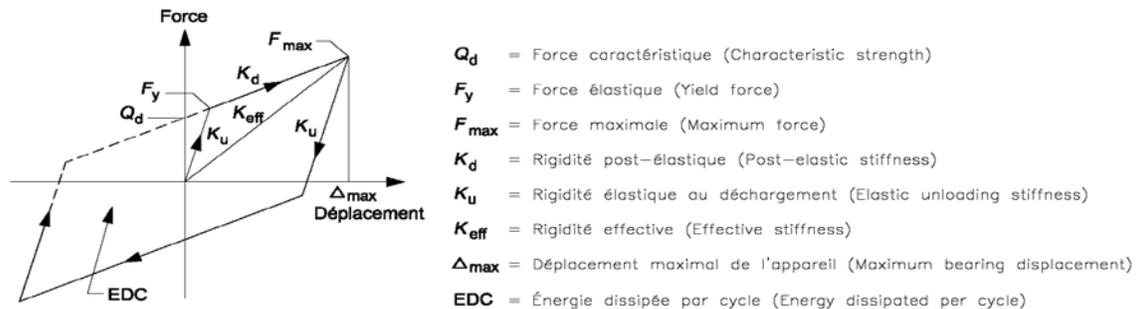


Figure 2. Comportement bilinéaire des isolateurs sismiques

Les isolateurs sismiques sont habituellement divisés en deux principales catégories, soit les élastomères frettés à noyau de plomb et les systèmes à friction. Des exemples typiques de ces systèmes sont présentés à la figure 3. Si nécessaire, les hautes fréquences contenues dans les mouvements de tremblement de terre peuvent être atténuées par couplage d'amortisseurs visqueux aux systèmes d'isolation sismique décrits précédemment; cependant, ce sujet dépasse le cadre du présent article. À température ambiante, la force caractéristique Q_d de l'isolateur à noyau de plomb est en fonction de la surface du noyau de plomb (Eq. 1), et la rigidité plastique k_d est en 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. ISOLATION SISMIQUE EN RÉGION FROIDE

Les propriétés des systèmes d'isolation sismique peuvent être affectées de façon importante par la température (Constatinou, 2007). Par conséquent, ce paramètre doit être considéré lors de la conception de ponts équipés de tels dispositifs. Toutefois, jusqu'à présent, il n'y a pas de consensus parmi les chercheurs et praticiens sur la façon de prédire le comportement des isolateurs sismiques à basse température :

- Les équations actuellement présentées dans les codes et les normes permettent la caractérisation des isolateurs à température ambiante, mais il y a aucune information à basse température;

- Les fabricants d'isolateurs sismiques ont peu d'information sur l'effet des températures froides sur le comportement dynamique de leurs produits;
- Il y a peu de publications sur ce sujet et ceux-ci contiennent des informations variables relativement à l'impact des basses températures sur les différentes propriétés des systèmes d'isolation. Les paramètres généralement utilisés pour comparer les propriétés à température ambiante et celles à basse température sont la rigidité effective (k_{eff}), la force caractéristique (Q_d), la rigidité pos-télastique (K_d). Cette comparaison peut aussi inclure l'énergie dissipée par cycle (EDC) et la force maximale (F_{max}).

Au Canada, le *Code canadien sur le calcul des ponts routiers (CAN / CSA S6-06)* ne contient pas de facteurs de modification des propriétés des isolateurs pour les basses températures. Aux États-Unis, la norme AASHTO (*Guide Specification for Seismic Isolation Design, Appendix A*) contient cependant des facteurs de modification pour différents composants et différents éléments susceptibles d'influer le comportement des systèmes d'isolation, y compris la température. Tel que mentionné dans cette norme, ces facteurs peuvent être utilisés pour la conception (avec prudence évidemment) si aucune donnée plus précise n'est disponible. Des recherches récentes suggèrent également quelques équations pour prédire les propriétés des isolateurs sismiques à basse température (Feng et al., 2004 et Kalpakidis et al., 2009).

3.1 Examen de la documentation - Essais et modification des propriétés des matériaux à basse température pour les élastomères frettés à noyau de plomb

Le programme d'essais mené par le Highway Innovative Technology Evaluation Center (HITEC) à la fin des années 90 a permis une première caractérisation complète et bien documentée du comportement des isolateurs sismiques à basse température. Ce programme visait à augmenter le niveau de connaissance et de confiance dans l'utilisation d'équipements spécialisés, tels que les isolateurs sismiques et les amortisseurs, et ce, tant à température ambiante qu'à basse température. Les essais du HITEC ont été conduits conformément au *Guidelines for the testing of seismic isolation and energy dissipation devices* développé antérieurement par cet organisme. Certains résultats (pour les élastomères à noyau de plomb seulement) sont donnés au tableau 1. Ceux-ci montrent que la rigidité effective (k_{eff}) des isolateurs avec élastomères à noyau de plomb augmente à basse température jusqu'à environ 60 %.

Le comportement des élastomères à noyau de plomb à basse température a aussi été analysé par quelques auteurs dans les 30 dernières années. Kim, Mander et Chen (1996) ont rapporté une augmentation d'environ 80 % pour la force caractéristique (Q_d) et 40 % pour la rigidité postélastique (K_d) lorsque les isolateurs sont exposés aux basses températures. La figure 4a montre les résultats des effets de la température sur la force caractéristique (Q_d) pour un appui en élastomère haute densité (HDRB) selon cette même étude. Les résultats des essais obtenus par Robinson et al. (1982) montrent que l'augmentation de la rigidité effective à basse température peut être d'environ 40 % à -35 °C, et 20 % à -15 °C. Constantinou et al. (2007) ont démontré comment la performance des différents systèmes est généralement affectée par la température. Quant à eux, Feng et al. (2004) ont remarqué une augmentation d'environ 25 % de la valeur de la force caractéristique (Q_d) à -10 °C et ont suggéré des équations pour prédire le comportement des isolateurs (LRB) à basse température.

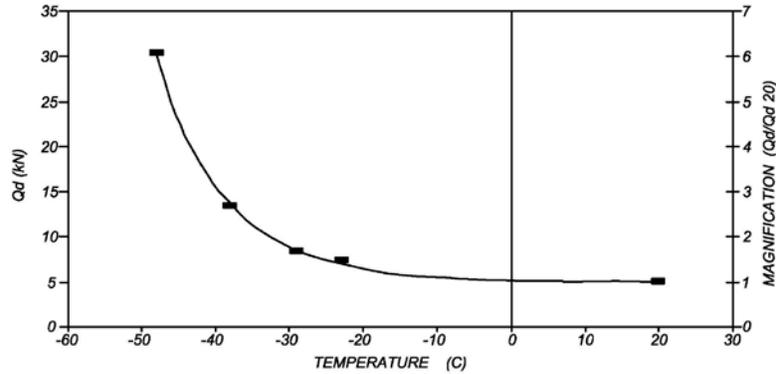
Tableau 1 : Résultats des essais cycliques à basse température sur des isolateurs de type LRB

Référence / rapport	Température (°C)	Q_d	k_d	k_{eff}
Kim, Mander, Chen	-32	+80 %	+40 %	
Robinson et al.	-15			+ 20 %
	-35			+ 40 %
Feng et al.	-10	+25 %	+5 %	
Constantinou et al.	-26	+50 %	+30 %	+ 40 %
HITEC (DIS)	-26			+ 23 %
HITEC (Skellerup)	-29			+ 56 %
HITEC (Tekton)	-29			+ 22 %
HITEC (Scougal)	-40			N/A*

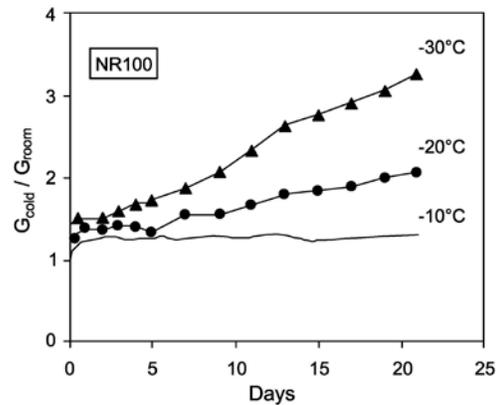
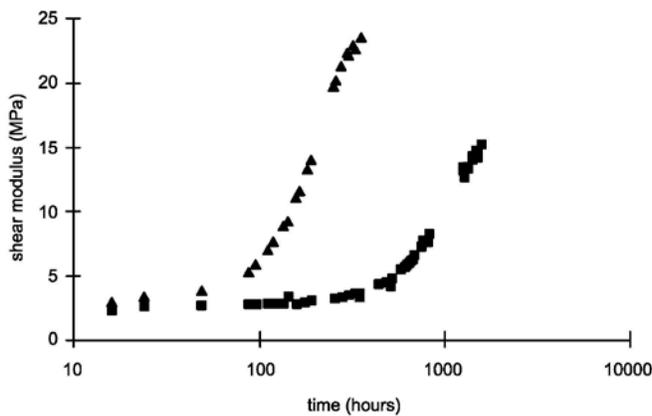
* Aucune donnée disponible. La capacité maximale atteinte (300 kips à 50 mm, ce qui correspond à une augmentation de + 400 % du k_{eff})

Afin de mieux comprendre les résultats donnés au tableau 1, il est pertinent de revoir la façon dont les composantes individuelles des élastomères avec noyau de plomb (élastomères et plomb) sont affectées par l'exposition aux basses températures. Une revue de ces éléments est donc effectuée dans les paragraphes suivants.

Les recherches menées ces dernières années ont démontré que les mélanges d'élastomères utilisés dans les systèmes d'isolation, fabriqués soit à partir de caoutchouc naturel, de néoprène ou de polychloroprène, affichent un comportement très variable lorsqu'ils sont soumis à des tests à basse température. Selon Constantinou (2007), le caoutchouc naturel fournit généralement de meilleures performances à basse température que le néoprène. Fuller et al. (2003) ont démontré que la composition chimique des élastomères affecte le module de cisaillement à basse température et décrit le phénomène de cristallisation y étant associé. Les résultats obtenus indiquent que de bonnes performances peuvent être obtenues en modifiant les composantes chimiques de l'élastomère, tel que montré à la figure 4b. Cardone et al. (2011) ont démontré que l'exposition prolongée aux basses températures résulte en une augmentation significative de la rigidité de l'isolateur, due à la cristallisation de l'élastomère et, ainsi, à des forces transmises à la structure plus élevées. Il est important de noter que la durée du processus de refroidissement des tests à basse température est d'une importance majeure afin caractériser correctement le comportement des isolateurs sismiques dans de telles conditions. À ce sujet, Yakut et Yura (2002) présentent l'effet de la période de conditionnement à basse température sur le module de cisaillement d'un élastomère à base de caoutchouc naturel (Figure 4c).



a) Force de cisaillement à différentes températures - Effet de la cristallisation sur le module de cisaillement de l'élastomère (Kim, Chen & Mander)



b) Formule alternative pour une meilleure performance à basse température (-20 °C). ▲ : Caoutchouc naturel, ■ : 85 % de caoutchouc naturel + 15 % high vinyl BR (Fuller et al.)

c) Caoutchouc naturel pour différentes durées et températures de conditionnement (Yakut and Yura)

Figure 4. Variation du module de cisaillement d'élastomères à basse température

La limite élastique du plomb est l'autre paramètre clé qui influence le comportement des isolateurs sismiques. Elle varie en fonction d'un certain nombre de paramètres, incluant la température, la vitesse de chargement et l'historique de chargement (Kalpakidis et Constantinou, 2008). La figure 5 montre l'influence de la température et de la vitesse de chargement sur la relation contrainte-déformation du plomb. La figure 6 montre un modèle de réchauffement progressif d'un noyau de plomb soumis à plusieurs cycles de déformation.

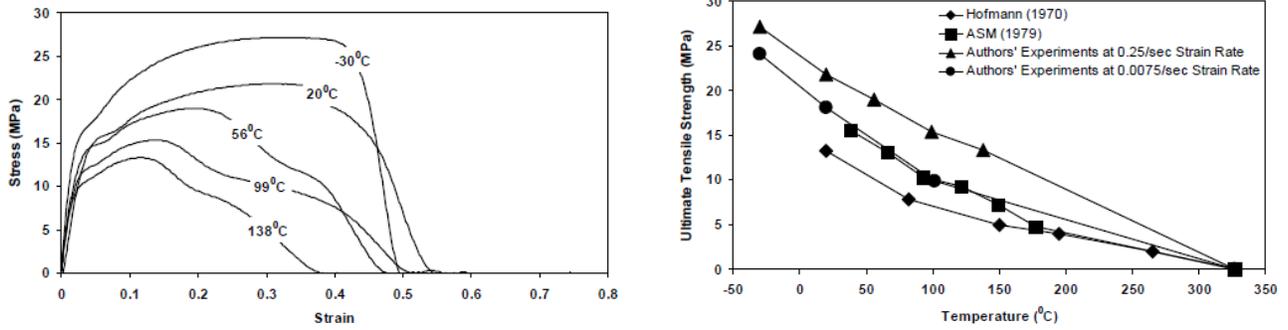


Figure 5. Influence de la température et de la vitesse de chargement sur la relation contrainte-déformation du plomb (Kalpakidis et Constantinou, 2008)

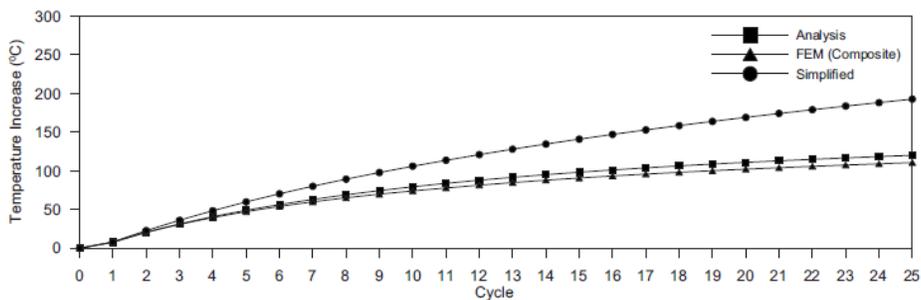


Figure 6. Modélisation du réchauffement du noyau de plomb à divers cycles de chargement (Kalpakidis et Constantinou, 2008)

3.2 Discussion

Tel que mentionné précédemment, la caractérisation du comportement à basse température des isolateurs de type élastomère fretté à noyau de plomb dépend fortement des paramètres intrinsèques de l'isolateur, mais également aux procédures d'essais. Par conséquent, les ingénieurs doivent considérer différents scénarios lorsqu'ils évaluent les forces et les déplacements à utiliser lors de la conception d'un pont.

Une évaluation précise des propriétés des élastomères et du plomb exposés à de basses températures, sans la réalisation d'essais de laboratoire, représente un défi important à relever. L'AASHTO GSSID donne des facteurs de modification qui peuvent être utilisés pour différents paramètres. Toutefois, la sélection de ces facteurs pour concevoir des systèmes structuraux doit être faite avec prudence, car les facteurs de l'AASHTO GSSID ne sont pas nécessairement conservateurs pour certains types d'élastomère fretté à noyau de plomb (Cardone et al., 2011). De plus, ces facteurs sont basés sur les données d'essais très limités, qui n'incluent pas l'exposition aux basses températures pendant plus de 48 heures, et ne sont valables que pour une rigidité d'élastomère donnée (Constantinou, 2013).

Le protocole d'essais de qualification a également une grande influence sur les propriétés des systèmes d'isolation mesurées (Q_d , K_d , K_{eff}). Les paramètres clés affectant les résultats des essais sont le conditionnement des isolateurs (température et durée du conditionnement), la vitesse de chargement et l'amplitude (constante ou variable) des déplacements imposés. L'influence de la vitesse de chargement sur les propriétés mesurées au cours des essais de qualification est essentiellement liée à l'influence qu'à ce paramètre (vitesse de chargement) sur la limite élastique du plomb (Constantinou et al., 2007). Quant à l'amplitude de déplacement imposée, une attention devrait être apportée pour s'assurer de représenter adéquatement les caractéristiques de séisme probables où le pont sera implanté. Par exemple, si le mouvement du sol n'est pas caractérisé par des accélérations maximales à de hautes fréquences, la procédure appropriée serait de commencer par des cycles de faible amplitude de déplacement pour ensuite atteindre les amplitudes de déplacement maximum (Cardone et al., 2011). En fait, cette façon de faire permet le réchauffement de l'isolateur et réduit l'augmentation de sa rigidité (due aux températures froides) lorsque celui-ci est sollicité de façon plus significative (soit au moment où l'amplitude des déplacements est plus importante).

Par ailleurs, le choix du protocole d'essai de qualification est très important pour être en mesure de comparer adéquatement les propriétés des isolateurs à basse température et celles à température ambiante. En effet, il est important de définir s'il est préférable de comparer l'énergie dissipée par cycle, pour un même déplacement imposé, ou s'il est mieux de comparer la force maximale, pour une même énergie dissipée par cycle. Ces deux types de protocole peuvent donner des résultats relativement différents. Le deuxième protocole où l'essai doit être fait pour une même énergie dissipée par cycle est toutefois très difficile à réaliser, car il est ardu de prédire le déplacement qui correspondra à l'énergie dissipée par cycle désiré.

Malheureusement, les normes actuelles donnent peu de détails sur les protocoles d'essais de qualification à utiliser. De plus, les méthodes de conditionnement ne sont pas prescrites ou clairement définies dans ces mêmes normes. C'est pourquoi il est important de s'interroger sur la valeur de la température et de la durée de conditionnement appropriée à utiliser pour les essais de qualification. Ces paramètres devraient être établis en considérant des conditions climatiques normales et extrêmes attendues dans la zone où le pont doit être construit, sur une période de temps choisie, et ce, afin d'évaluer le comportement sur une base statistique raisonnable.

3.3 Approches pour surmonter les incertitudes associées à l'isolement sismique des ponts en climat nordique

En raison de l'absence d'information dans la version du *Code canadien sur le calcul des ponts routiers 2006*, les ingénieurs doivent s'appuyer sur la documentation technique pour évaluer comment les basses températures affectent la conception des ponts isolés. Cependant, les incertitudes sur la performance des systèmes d'isolation à basse température restent entières jusqu'à ce que les résultats des tests de qualification soient connus. Toutefois, des options sont disponibles pour l'ingénieur concepteur d'un pont isolé afin d'atténuer l'impact de ces incertitudes sur le projet à réaliser.

Dans un projet typique, il est probable que les fondations soient construites avant que le protocole d'essais de qualification des isolateurs ne soit terminé, n'offrant ainsi aucune possibilité réelle de modifier la conception. Ainsi, la possibilité que des isolateurs, en cours de qualification pour un projet donné, ne rencontrent pas les spécifications attendues pour ce même projet peut donc constituer une préoccupation majeure pour l'équipe de conception. Une bonne pratique pourrait alors consister à concevoir des fondations (colonnes, etc.) ayant une capacité élastique suffisante pour couvrir les incertitudes relatives au comportement des systèmes d'isolation sous de basses températures. Cette option est toutefois moins intéressante pour le propriétaire en regard des avantages que doit conférer l'isolation sismique. De plus, le non-respect des critères de conception peut aussi entraîner des retards dans le processus de qualification afin de revoir et même refaire des essais sur les isolateurs avant que des résultats satisfaisants soient obtenus.

Une autre option peut être d'opter pour le préachat et la présélection des isolateurs sismiques dès le début du processus de conception d'un pont où l'isolation sismique est considérée. Avec cette option, l'essai des isolateurs a lieu pendant la phase de conception, ce qui permet d'utiliser les propriétés réelles de ceux-ci dans les modèles et calculs à réaliser. Il demeure toutefois impératif, dans une telle situation, de porter attention à l'utilisation de procédures d'essai appropriées.

Une dernière option pourrait être d'utiliser l'isolation sismique, mais en concevant tout de même les fondations pour rencontrer les exigences de ductilité (rotule plastique) imposées aux ponts conventionnels. Selon cette approche, le pont ne subirait pas d'endommagement à température ambiante, mais il pourrait subir un certain endommagement par temps froid, cet endommagement étant lié à l'incertitude associée aux propriétés des isolateurs à basse température. Une telle approche (qui pourrait être appelée la conception basée sur la performance) devrait être utilisée au moment jugé opportun par le concepteur et le propriétaire. Notons que la norme 2014 du *Code canadien sur le calcul des ponts routiers*, qui vient tout juste de paraître, inclut maintenant la conception sismique basée sur la performance.

4. CONCEPTION D'UN PONT AVEC ISOLATEURS SISMIQUES DANS L'EST DU CANADA

La construction d'un pont courbe de 6 travées à l'aide d'isolateurs sismiques, d'une longueur totale de 316 mètres, a récemment été complétée dans la région de Québec (figure 7). Le tablier du pont est constitué d'une dalle de béton soutenue par six poutres en acier en forme de I. Le site sur lequel ce pont est construit est composé de matériaux granulaires et argileux lâches d'une épaisseur variant entre 5 et 15 mètres reposant sur le socle rocheux. Des pieux caissons avec emboîtures au roc ont donc été retenus comme système de fondations.

La configuration retenue pour la fixité des unités de fondation dans la direction longitudinale est la suivante : culées mobiles, piles 2 et 6 mobiles, piles 3-4-5 fixes. Dans la direction transversale, les appuis sont tous fixes. La configuration retenue dans la direction longitudinale est nécessaire puisqu'une seule pile fixe ne suffit pas à reprendre les charges sismiques longitudinales. L'interaction sol-structure a été prise en compte par l'intégration au modèle d'analyse structurale de ressorts équivalents dont la constante de réaction a été déterminée par la méthode des différences finies. Le pont, sans l'utilisation d'isolateurs sismiques, avait une période de vibration dans la direction longitudinale de 1,3 seconde. Avec les isolateurs sismiques, la période du mode principal dans la direction longitudinale est augmentée à 2,9 secondes.

L'utilisation d'isolateurs sismiques dans ce projet a amené une réduction importante (par un facteur de 3) des charges longitudinales appliquées sur les piles fixes en cas de tremblement de terre majeur.

Dans ce cas, l'isolation sismique du pont a permis des économies découlant notamment de la réduction de la longueur des emboîtures au roc, de la durée réduite des travaux et de la simplification des appareils d'appui et des détails d'armature des piles. Notons également que l'emploi d'isolateurs sismiques permet une réduction des efforts thermiques subis par les piles 3 et 5.

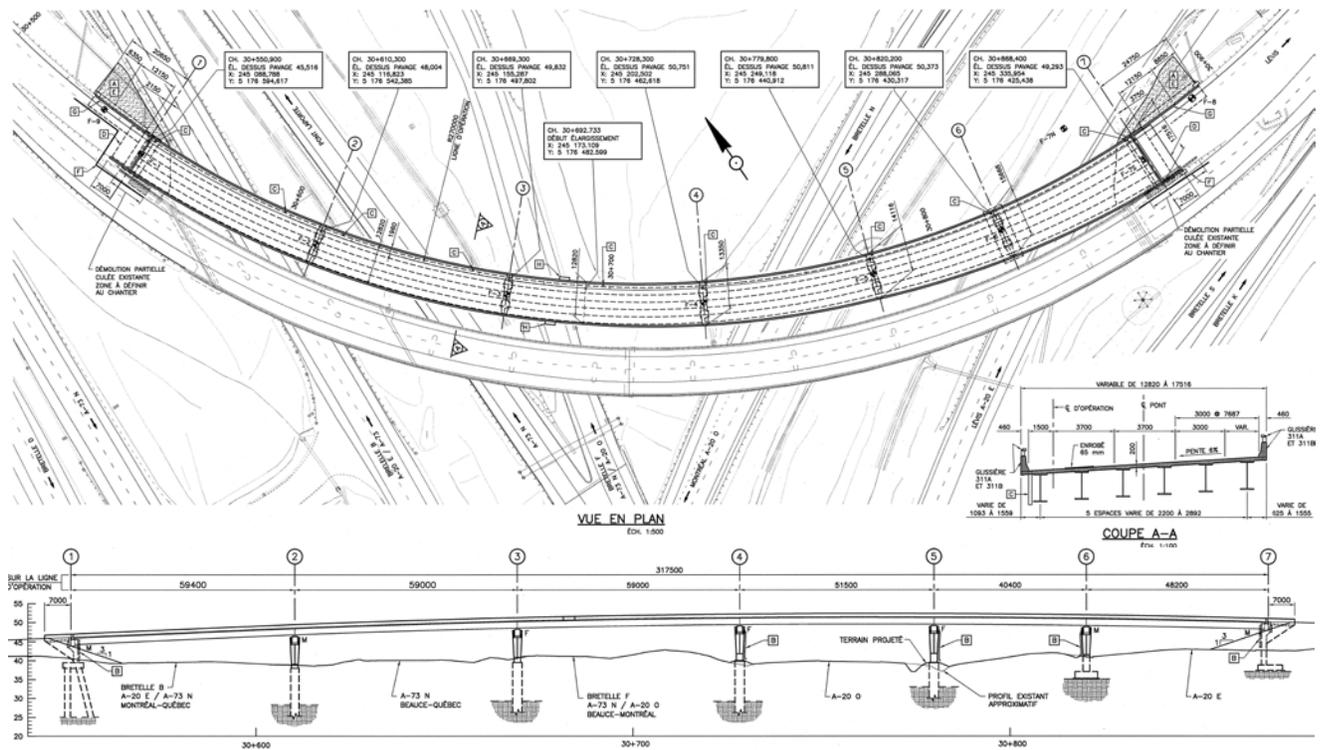


Figure 7. Vue en plan, coupe transversale et élévation du pont construit à Québec

4.1 Essais de qualification des isolateurs sismiques

Les essais de qualification sont requis par la norme CAN/CSA S6-06 afin de confirmer que les isolateurs sismiques respectent les propriétés spécifiées afin d'assurer que le pont se comportera, en cas de séisme, tel qu'attendu par les concepteurs. Les essais de qualification prévus pour ce projet comprenaient ceux décrits dans la norme CAN/CSA S6-06, complétés par les dispositions de la norme AASHTO GSSID, et comprenaient des tests à basse température. Les procédures pour les essais de qualification incluait des cycles sinusoïdaux effectués à une vitesse correspondant au premier mode de la période de vibration (3 sec.), à température ambiante et à basse température. Les isolateurs ont été conditionnés à basse température à une température de -30 °C pendant une période de 3 jours.

Les résultats des essais de qualification à la température ambiante étaient conformes aux exigences des plans et devis. Toutefois, le premier prototype testé à basse température a produit des résultats insatisfaisants, ayant une rigidité effective de 400 % supérieure à celle mesurée à température ambiante. Ce premier prototype a donc été rejeté. Ces résultats ont conduit à effectuer des modifications à la formulation de l'élastomère et à se questionner sur le protocole d'essai. Ces deux sujets ont été largement étudiés. De nouveaux isolateurs, avec les mêmes dimensions, mais avec des formulations d'élastomères différentes, ont alors été conçus par l'équipe en charge de la construction du pont. Le fabricant des élastomères a testé, à petite échelle, le comportement à température ambiante et à basse température près de 20 formulations d'élastomère. Suite à ces essais réduits, trois formulations d'élastomère ont été choisies pour effectuer des essais grandeur nature. Suite aux essais sur ces trois prototypes, une conception a été finalement retenue.

La figure 8 présente une boucle d'hystérésis des essais effectués à basse température après que la formulation des élastomères ait été modifiée par le fabricant. En utilisant la moyenne des trois premiers cycles de pleine amplitude, avec un conditionnement à -30 °C pendant une période de trois jours, l'augmentation de la rigidité effective (k_{eff}) était de 1,80 fois la rigidité à température ambiante. Ce résultat représente une augmentation plus importante que la valeur attendue par les concepteurs, mais qui se traduit uniquement par une légère demande en ductilité des piles, dans le cas où il se produirait un séisme majeur à une température extrêmement basse. Les fondations ont d'ailleurs été conçues et construites afin de résister à des forces (demande en ductilité) plus grandes que prévu avec les isolateurs en place.

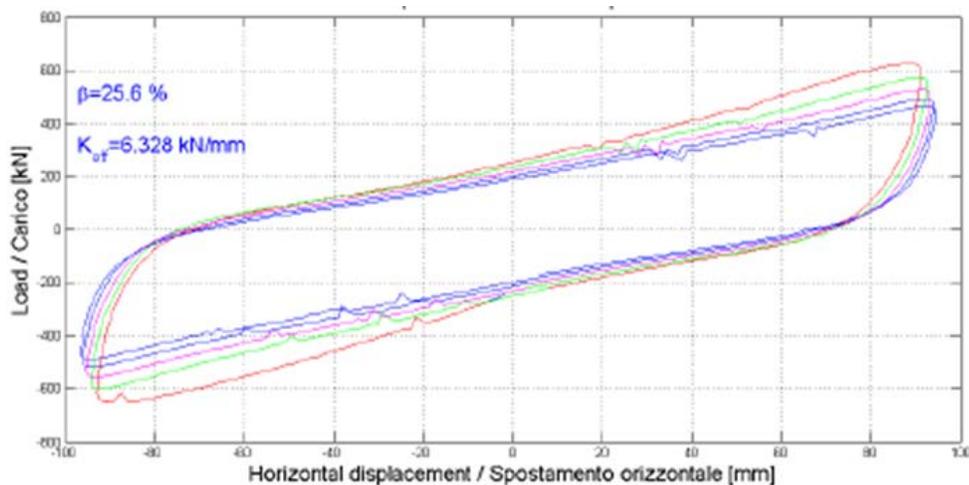


Figure 8. Courbe charge-déplacement d'un isolateur sismique à basse température

5. CONCLUSION

L'utilisation de matériel spécialisé, tel que les isolateurs sismiques, peut améliorer le comportement des ponts lors de tremblement de terre majeur et peut permettre des économies de coûts et réduire le temps de construction. Dans l'étude de cas présentée dans cet article, les charges sismiques sur les piles du pont ont été réduites de près de 3 fois, et les avantages liés à l'utilisation de ces équipements ont été démontrés.

Dans les pays nordiques, une attention particulière doit cependant être portée au comportement à basse température des isolateurs sismiques. Les principaux facteurs influençant les propriétés des isolateurs à basse température sont : le type d'élastomère et sa formulation, le temps de conditionnement et la température des essais. Le taux de chargement et l'amplitude de déplacement imposé ou des forces au cours des essais influencent également les propriétés des isolateurs. Le protocole d'essai doit également être développé pour représenter adéquatement à la fois, le tremblement de terre probable et les basses températures attendues dans la région où le pont doit être implanté. De tels tests de qualification permettent la conception basée sur la performance pour la construction de structures isolées dans les pays nordiques, et permettent aux concepteurs de faire des choix responsables en lien avec les niveaux d'endommagement acceptables reliés à la catégorie d'importance du pont.

Le nouveau *Code canadien sur le calcul des ponts routiers* qui vient juste de paraître tient d'ailleurs compte de la plupart des questions abordées dans le présent article. La conception sismique des ponts est donc maintenant basée sur la performance et pourra favoriser l'utilisation adéquate d'isolateurs sismiques en région froide. Toutefois, les essais de qualification à basse température pour les prototypes resteront essentiels pour évaluer le comportement complexe des isolateurs sismiques, particulièrement à basse température.

6. RÉFÉRENCES

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

Cardone, D., Gesualdi, G., Nigro, D., 2011, *Effects of air temperature on the cyclic behaviour of elastomeric seismic isolators*, Bull Earthquake Eng. Italy. 9 : 1227-1255

Chopra, A. K., 2007. *Dynamics of structures*, 3rd edition, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA

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

Constantinou, M. C. 2013. personal communication

Canadian Highway Bridge Design Code (CSA S6-06), 2010

Chen, Scawthorn, 2003. *Earthquake Engineering Handbook*

Feng, D., Chen, C., Liu, W., Tanaka, K., 2004, *A performance test study on Chinese G4 Lead Rubber Bearings*, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada

Fuller, K.N.G., Gough, J., Thomas, A.G., 2003, *The Effect of Low-Temperature Crystallization on the Mechanical Behavior of Rubber*, London

Kalpakidis, I. O., Constantinou, M. C., 2009, *Effects of Heating on the Behavior of Lead-Rubber Bearings, Part I : Theory*, Journal of Structural Engineering,

Kalpakidis, I. O., Constantinou, M. C. 2008. *Effect of Heating and Load History on the Behavior of Lead-Rubber Bearings*, Technical report MCEER-08-0027

Kim, Mander, Chen, 1996, *Temperature and Strain rate effects on the seismic performance of Elastomeric and Lead-Rubber bearings*

Paradis F., Martel J-F, Dandois P., Maltais, *Conception parasismique d'un pont courbe à l'aide d'isolateurs sismiques dans l'échangeur A20/A73*, 21e colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, mai 2014

Robinson, W.H. 1982. *Lead-Rubber hysteretic bearings suitable for protecting structures during earthquakes*, Earthquake engineering and structural dynamics, 10 : 593-604

Yakut, A. Yura, J. A. 2002. *Parameters Influencing Performance of Elastomeric Bearings at Low Temperatures*. Journal of Structural Engineering, 128 : 986-994