# Isolation sismique et technologies parasismiques pour les ponts au Québec : Mise au point

Par : Lotfi Guizani, Ing., Ph.D.
ALG Groupe Conseil Inc.

**Résumé**

Ce papier présente une mise au point sur la technologie d'isolation sismique ainsi que les autres technologies parasismiques aoptées et mises en application pour protéger les ponts contre les séisme au Québec.

Après une brève revue de l'évolution du code candien sur le calcul des ponts routiers dans ses deux dernières éditions, l'article présente un résumé des principes de base de l'isolation sismique des ponts et les principaux systèmes utilisés au Canada et au niveau niveau provincial. Il présente également une procédure de conception préliminaire d'un système d'isolation pour les ponts, basée sur le code S6-06.

Dans sa dernière partie, l'article se consacre à présenter une revue des différents projets de ponts du MTQ réalisés ou à l'étude durant les quatre dernières années et ayant recours à la technologie de l'isolation sismique de la base.

## 1- Introduction

Des dommages parfois très sévères et causant la mise hors service ont touché plusieurs structures de ponts importants suite aux tremblements de terre de Northridge (Californie, 1994) et de Kobé (Japon, 1997).

Ils ont clairement indiqué que les ponts construits dans des zones à forte sismicité continuent, jusque lors et à différents degrés, à être vulnérables aux séismes et ce malgré les ajustements considérables apportés dans les normes de conception de ces ouvrages dans les années 1980, qui ont permis de corriger des lacunes majeures des éditions précédentes.

## 2- Évolution du code canadien sur le calcul des ponts routiers

L'expérience passée avec les tremblements de terre à aussi mis en évidence la nécessité de mieux protéger des structures de ponts à travers de règles de calcul et de détails plus complètes, plus élaborées mais aussi par le développement de spécifications et de lignes directrices de calcul permettant l'incorporation de technologies innovatrices qui ont émergé autour des années 1980. En Amérique du nord, cette volonté c'est reflétée clairement dans les éditions des normes de calcul des ponts des années 1990 à 2000 (AASHTO- LRFD 1998, CAN/CSA-S6-00).

Ainsi dans le chapitre du calcul sismique de l'édition 2000 du code canadien sur le calcul des ponts routiers (CAN/CSA-S6-00), comparativement à l'édition précédente, on constate notamment:

- Un accroissement considérable des charges sismiques spécifiées : le spectre de calcul du CAN/CSA-S6-00 est généralement plus sévère que celui préconisé par le CAN/CSA-S6-88.

- Des règles de calcul plus élaborées et plus en rationnelles concordant mieux avec les connaissances en accumulées en génie parasismique. En effet, ces règles tiennent compte, entre autres des caractéristiques dynamiques du pont tel que les périodes de vibration des modes propres, de la configuration géométrique de l'ouvrage et de son importance.

- L'adoption, pour la première fois, de spécifications relatives au calcul des ponts munis d'un système d'isolation sismique de la base. Ces spécifications couvrent le calcul des charges sismiques, les méthodes d'analyses, la conception des unités d'isolation et la mise à l'essai des unités pour valider les hypothèses de calcul.

A première lecture, la dernière édition du Code canadien de calcul des ponts routiers, parue fin 2006, a reconduit les mêmes spécifications que l'édition précédente (S6-00) en ce qui concerne la philosophie de conception, le calcul des charges sismiques et le calcul et la mise à l'essai relatives aux ponts utilisant l'isolation sismique de la base.

Néanmoins, il est à noter que le code des ponts S6-06 continue à ignorer la différence de sismicité entre les deux principales zones sismiques au Canada à savoir la région de la cote atlantique et celle de la cote pacifique. Il n'a pas imité non plus le code national du bâtiment 2005 qui a effectué un virage majeur dans le domaine du calcul parasismique et ce notamment au niveau de l'adoption d'un nouveau zonage sismique et d'un spectre de calcul avec risque uniforme (Réf. 11).

## 3- Philosophie et stratégies de conception parasismique au Canada

La philosophie adoptée par les deux dernières éditions du Code canadien de calcul des ponts routiers (CAN/CSA-S6-00 et S6-06) veut que tout les ponts doivent pouvoir être utilisés immédiatement après un séisme mineur ou modéré et qu'ils évitent l'effondrement après un séisme majeur (période de retour de 1000 ans). Toutefois, le seuil des dommages toléré après le séisme de calcul (période de retour de 475 ans) ou un séisme majeur dépend de l'importance du pont. À cet effet la norme introduit un facteur de majoration des charges de conception en fonction de l'importance du pont et qui vaut respectivement 3.0, 1.5 et 1.0 pour les trois catégories: (1) Ponts de secours, (2) ponts d'urgence et (3) autres ponts. Par exemple, un pont de secours doit demeurer ouvert à tout le trafic après le séisme de calcul et doit être accessible aux véhicules d'urgences après un séisme majeur alors qu'un pont d'urgence, peut subir des dommages de nature à nécessiter sa fermeture au trafic régulier après le séisme sans toutefois empêcher le passage des véhicules d'urgence. Pour ce type de pont, des dommages réparables (dans les zones relativement faciles d'accès) sont tolérés après un séisme majeur.

On peut classer les stratégies de conception parasismique des ponts en deux catégories :(1) une conception conventionnelle et (2) une conception utilisant des technologies parasismique.

***Conception conventionnelle***

La méthode conventionnelle de conception parasismique consiste à assurer à la structure et à sa fondation une résistance suffisante pour reprendre les charges sismiques de façon sécuritaire et économique. Pour y arriver, les structures sont conçues de façon pour dissiper l'énergie induite par le séisme de calcul à travers les déformations inélastiques concentrées dans des zones préalablement sélectionnées et détaillées à cet effet. Les zones de dissipation d'énergie par déformations inélastiques sont dites rotules plastiques. Elles sont typiquement situées à la base des unités de fondation au dessus du niveau du sol et sont détaillées pour avoir un comportement ductile (avoir une bonne capacité de déformation inélastique sans dégradation importante de la résistance ou de la rigidité). Parce qu'elles sont difficiles à inspecter et à réparer, les parties des fondations situées sous le niveau du sol sont calculées pour demeurer élastique.

De cette façon, la structure y compris les éléments de fondation accessibles est conçue à un niveau de résistance de plusieurs fois inférieur aux forces sismiques élastiques (Demande en force si la structure est assez résistante pour demeurer élastique). Ceci revient à transformer la demande en force à une demande en ductilité qui se veut plus économique à assurer. Dans le Code S6, la réduction des forces élastiques est représentée par le coefficient de modification de réponse R. Ce coefficient, variant entre 2 et 5, est fonction du type des éléments de fondation (redondance structurale, performance passée) et est directement et explicitement relié à des exigences concernant les détails des zones critiques de ces éléments de sorte à leur assurer un niveau de ductilité consistant avec la valeur de R utilisée.

***Conception avec des technologies parasismiques***

Le développement de techniques de calcul sur support informatique beaucoup plus puissantes qu'auparavant, la disponibilité d'installations d'essais tel que les simulateurs sismiques (tables vibrantes) ont favorisé l'émergence de ces technologies innovatrices dont les premières applications aux ponts rapportées en Amérique du Nord remonte seulement à la fin des années 80 et pour lesquelles des normes de calcul sont désormais en place.

Par ailleurs, la fin de la guerre froide vers le début des années 1990, a rendu possible le transfert de la technologie d'amortisseurs hydrauliques, initialement développés pour des besoins militaires, vers des applications de génie civil qui se voit soudainement profiter de progrès technologiques, accumulées pendant presque un demi siècle.

Trois principales technologies parasismiques sont des plus utilisées sur les ponts, soit :

1- L'isolation sismique de la base qui est décrite plus loin.
2- L'usage d'amortisseurs sismiques: Il s'agit d'ajouter à la structure qui comprend des appuis conventionnels (avec appuis fixes) un système de mécanisme de dissipation d'énergie afin d'absorber une partie importante de l'énergie sismique induite par le séisme et ainsi réduire l'étendue et la sévérité des dommages inélastiques dans celle-ci. On distingue trois familles principales d'amortisseurs à savoir les amortisseurs hydrauliques ayant un amortissement visqueux (la force d'amortissement est proportionnelle à la vitesse exposant un facteur $\alpha$), les amortisseurs à base de friction et les amortisseurs à base de comportement hystérétique dont l'amortissement est généralement de nature élasto-plastique (la force d'amortissement est fonction du déplacement).

3- L'usage de transmetteurs de chocs sismiques (TCS) : Même s'ils s'apparentent à la famille des amortisseurs hydrauliques visqueux, ils présentent un comportement fondamentalement différent et doivent être considérés comme une catégorie à part. L'idée derrière l'utilisation des TCS consiste à augmenter la résistance de la structure aux forces sismiques en faisant participer les unités de fondation comportant des appuis mobiles. Pour ce faire, le TCS est installé parallèlement aux appuis mobiles du pont. Il se comporte comme un appui mobile, en opposant une faible résistance aux mouvements lents tel que ceux induits par les variations thermiques ou le fluage mais il et transmet les forces, à la manière d'un appui fixe, lorsqu'il est sollicité par un mouvement rapide tel que celui engendré par un séisme.

Une combinaison d'amortisseurs sismiques aux culées et de transmetteurs de chocs sismiques aux piles, fournies par LCL ponts- Inc a été utilisée pour la réfection sismique de la voie sud du pont situé sur le boulevard Henri-bourassa au dessus de l'autoroute 440, à la ville de Québec en 2002-2003 (Réf. 9).

L'intérêt pour ces nouvelles technologies est grandement justifié par l'aspect économique. Au Canada, et plus particulièrement dans la province du Québec, les exigences plus sévères des deux dernières éditions du code S6 ont poussé les ingénieurs à chercher des solutions de rechange qui seraient plus économique qu'une conception conventionnelle.

En effet, en général, l'isolation sismique permet de réaliser des économies sur le coût de la construction de l'ouvrage en plus de présenter un avantage indéniable à long terme étant donné qu'elle préserve la fonctionnalité de l'ouvrage après séisme et élimine le coût de reconstruction. Cet avantage revêt une importance capitale pour un pont classé comme pont de secours qui doit demeurer en service après le séisme.

## 4- L'isolation sismique de la base

### *Historiques et Objectifs*

L'isolation sismique de la base est un concept simple qui remonte même au début du 20$^{ieme}$ siècle. Néanmoins les premières applications modernes dans le monde ont été réalisées dans les années 70 à 80. Au Canada s'est seulement aux années 90 que les premiers ponts dans les provinces de l'ouest ont été munis de système d'isolation sismique de la base. Au Québec, il a fallu attendre à l'an 2002 pour qu'un premier pont soit isolé à la base contre les séismes (Réf. 9).

L'isolation sismique à la base consiste à découpler le mouvement du sol du mouvement de la structure dans le but de réduire les forces transmises à cette dernière. Les forces sismiques exercées sur la structure isolée sont typiquement de l'ordre de 3 à 10 fois plus petites que la demande en force sur la structure non isolée. L'isolateur capte les déformations (inélastiques) et filtre les accélérations (hautes fréquences) de sorte que la superstructure isolée (au dessus) se déplace essentiellement selon un mode rigide subissant de faibles accélérations et presque pas de déformations. Par conséquent, les forces d'inertie transmises aux éléments de fondations sont limités et demeurent en deçà de la capacité élastique de tels éléments. Ce comportement se traduit par la limitation des dommages subis par la superstructure et les éléments de fondation et par la préservation de la fonctionnalité de la structure après le séisme.

### *Principe de base et fondements théoriques*

L'isolation à la base repose sur le principe que si la période de vibration est augmentée suffisamment pour s'éloigner de la période d'excitation prédominante du tremblement de terre, les accélérations transmises à la structure (et par conséquent les forces d'inertie) sont considérablement réduites. En revanche, l'augmentation de la période engendre des déplacements plus importants concentrés au niveau de l'isolateur. Dès lors l'incorporation aux unités d'isolation ou l'usage d'un dispositif parallèle et externe d'un dispositif de dissipation d'énergie (amortissement) est requise afin de contrôler les déplacements et réaliser un compromis satisfaisant entre la réduction de la force et l'accroissement du déplacement. La figure ci-après présente schématiquement l'effet de l'accroissement de la période et de l'amortissement sur les forces et déplacements sismiques.

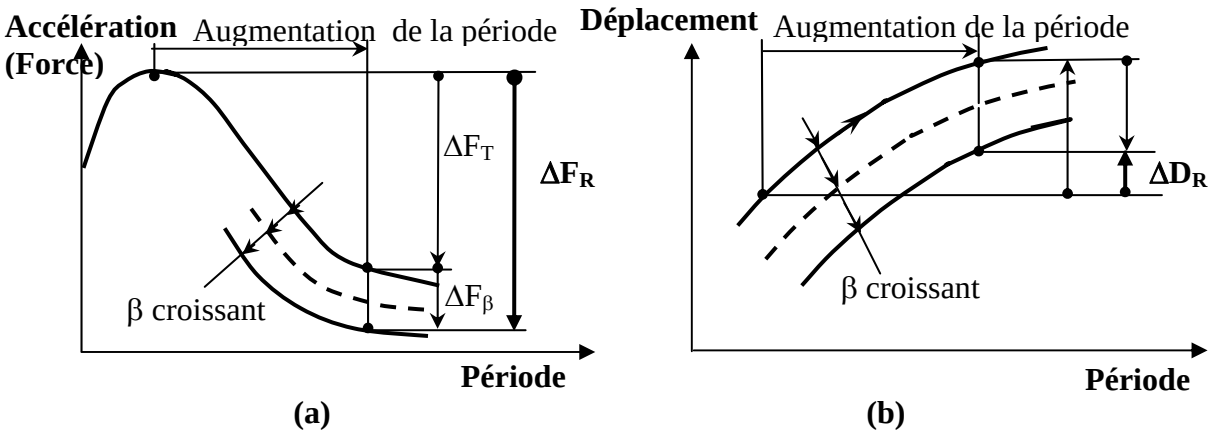


Figure 1 : Effet de l'augmentation de la période et du taux d'amortissement visqueux
**3.** sur l'accélération et les forces d'inertie ; (b) sur le déplacement sismique.

Les composantes (caractéristiques) essentielles d'un système d'isolation typique sont :

- Un appui capable de transmettre les charges verticales avec une faible rigidité horizontale (dans la direction isolée) : C'est le noyau de l'isolateur. La rigidité latérale de l'appui est le paramètre clé dans l'augmentation de la période et par conséquent dans la réduction des forces sismiques. De plus, la rigidité latérale de l'appui joue un rôle très important dans le déplacement sismique de l'ouvrage et son recentrage après le séisme (déplacement résiduel).

- Un mécanisme de dissipation d'énergie (amortisseurs sismique): Ce mécanisme peut être soit incorporé à l'appui soit installé en parallèle. Le but premier est de contrôler la déformation de l'isolateur et par conséquent le déplacement absolu de la superstructure située au dessus. La composante de dissipation d'énergie peut aussi amener une réduction des forces et accélérations dans la structure. Parmi les systèmes de dissipation d'énergie les plus répandus on retrouve (1) les amortisseurs hydrauliques, les amortisseurs à base de friction, les amortisseurs à base de comportement hystérésis (i.e. poutrelles en arc travaillant en flexion, le noyau de plomb au sein d'isolateurs à base d'élastomère), les appuis en élastomère frettés à haut taux d'amortissement, etc. Il faut mentionner que les systèmes de dissipation d'énergie du type hystérésis et friction ont le défaut de transmettre les accélérations des modes supérieurs à la structure et de produire des forces qui ne sont pas en opposition de phase avec les forces élastiques.

- Un système de retenue (fusible): le système d'isolation doit avoir une rigidité initiale élevée afin de minimiser les déplacements sous les charges de service tel que le freinage et le vent. Pour certains types d'isolateur, il peut s'avérer nécessaire d'incorporer un mécanisme de retenue sacrificiel (fuse) dont la résistance minimale est maximale sont établis avec soin.

## 5- Principaux systèmes d'isolation de la base utilisés au Canada

Il existe une multitude de systèmes d'isolation appliqués aux bâtiments et aux ponts à travers le monde. Au Canada, la plupart des ponts utilisant l'isolation sismique ont été réalisés dans les provinces de l'ouest canadien notamment en Colombie Britannique et le Youkon. Les premières applications remontent aux années 1990 (en 1990, réfection d'un pont sur l'autoroute 99, Richmond). Les principaux systèmes utilisés sont :

***Les systèmes à base d'élastomère***

Ces systèmes exploitent le principe de l'appui fretté et sa flexibilité latérale. Il existe plusieurs variantes dans cette catégorie d'appui tel que les appuis frettés avec élastomère à haut taux d'amortissement (par hystérésis interne). Néanmoins, le système d'isolateur à base d'élastomère est l'isolateur à base d'appui fretté avec un noyau de plomb intégré à l'intérieur de l'appui tel qu'illustré à la figure ci-après sont des plus utilisés.

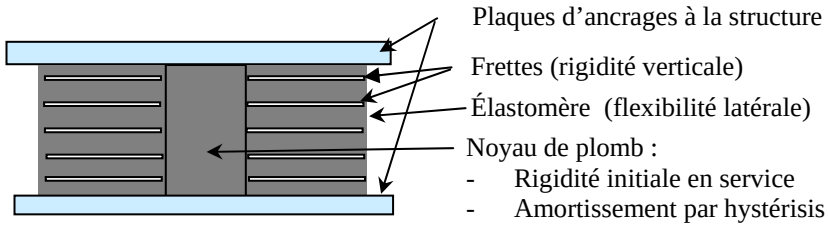


Figure 2 : Schémas isolateur à base d'appui en élastomère avec noyau de plomb

Les principales limitations des systèmes à base d'élastomère sont : (1) sensibilité aux variations thermiques (la rigidité de l'élastomère augmente avec la diminution de la température) ; (2) l'instabilité de l'appui (la résistance à la charge verticale diminue avec l'accroissement de la déformation latérale); (3) les dimensions de l'appui et particulièrement sa hauteur peuvent constituer une limitation pratique particulièrement pour les applications de réhabilitation (4) Le noyau de plomb à le défaut de transmettre des accélérations de haute fréquence et réduit l'efficacité de l'isolation .

***Les systèmes à base de glissement:***

Ces systèmes permettent le découplage des mouvements de la superstructure de ceux des éléments de fondation au moyen d'interface de glissement. De plus, l'interface de glissement permet de dissiper l'énergie sismique par friction. A titre d'exemple, le système de pendule à friction est un système qui utilise un interface de glissement sous forme de cuvette (portion d'une sphère) qui confère à la structure un mouvement global similaire à un pendule. Le rayon de courbure et le coefficient de frottement de l'interface sont les caractéristiques clé qui contrôlent la période d'isolation et la quantité d'énergie dissipée du système.

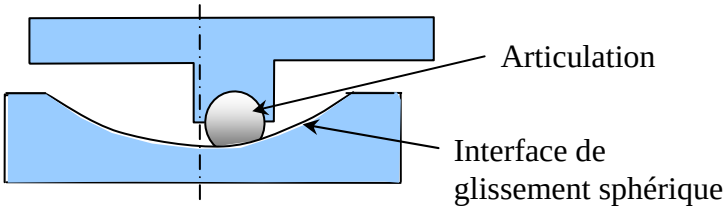


Figure 3 : Schémas de l'isolateur de type pendule à friction

L'ancienne firme Z-Tech, acquise récemment par Structal-ponts du groupe Canam et continuant à œuvrer désormais sous le nouveau nom Goodco-Ztech, a développé, en collaboration avec plusieurs partenaires canadiens, un système d'isolation sismique des ponts et viaducs à base d'interface de glissement. Tel que montré ci-dessous, le système est composé d'un appui de pont à élastomère confiné avec un système de recentrage à comportement élastique et un interface de glissement en acier inoxydable - Téflon pour la dissipation de l'énergie. Il s'agit du premier système d'isolation développé et fourni entièrement au Canada.

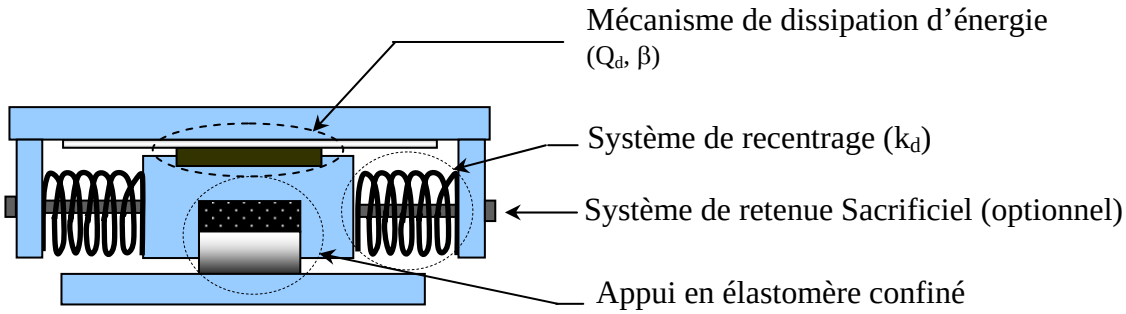


Figure 4 : Schémas de l'isolateur sismique Goodco-Ztech (Z-Tech).

Ce système a été appliqué au premier pont isolé au Québec, à savoir le pont d'Alma construit en 2002 sur la route 169 au dessus de la rivière grande décharge (Réf. 9). La figure ci-dessous, tirée des essais de qualification des prototypes d'isolateur installés sur ce pont montre le comportement typique observé du système.

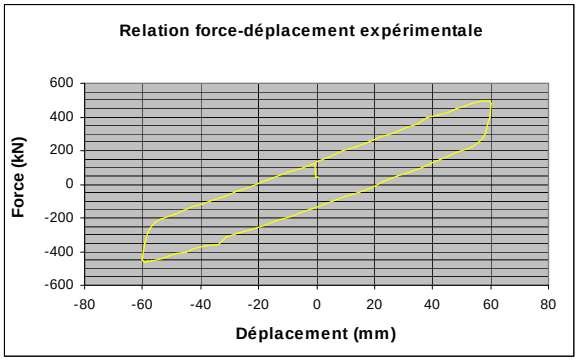


Figure 5 : comportement cyclique du système

Le comportement du système est du type bilinéaire et peut être idéalisé par la figure 6. L'interface de friction est conçu de sorte à générer la résistance initiale $Q_d$ et l'énergie dissipée par Cycle *EDC* requises. Le système de recentrage est conçu pour permettre de reprendre de façon sécuritaire le déplacement de calcul $\Delta_{max}$ tout en assurant la rigidité latérale $K_d$ requise (force de rappel)

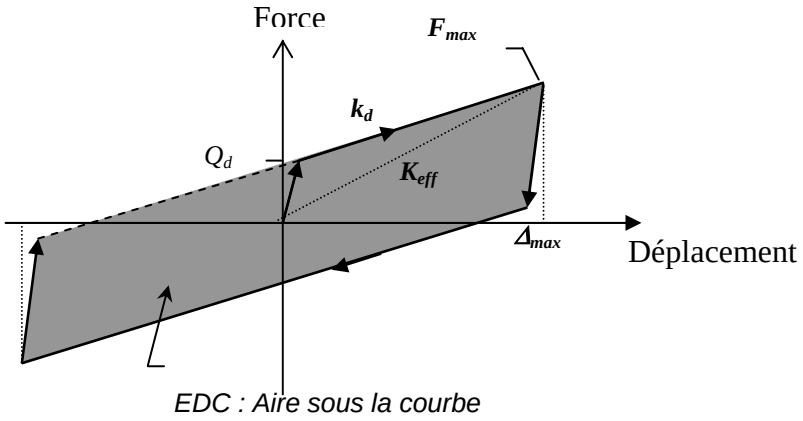


Figure 6 : comportement idéalisé (Bi-linéaire)

Un système similaire a été utilisé en 2003 et en 2005 sur au moins un pont et trois passerelles en Ontario (région d'Ottawa). Il s'agit du système commercialisé par la compagnie R.J. Watson, Inc sous le nom commercial "Eradiquake". Ce système, montré à la figure 7 ci-après, est composé d'un appui à disque (Disc Bearing) et muni de ressorts en polyéther uréthane. Le principal souci pour les ressorts en élastomère est la trop grande variation de leur rigidité avec la température ambiante ce qui a pour effet d'affecter la rigidité tangente et la période d'isolation. Or, selon les informations obtenues du fabricant ce système a été mis à l'essai à des basses températures (-34°C), a été approuvé par les autorités ontariennes (MTO). Toujours selon le fabricant, la rigidité du ressort augmente avec la baisse de la température mais de façon moins drastique que celle associée au caoutchouc naturel ou au néoprène.

Figure 7 : Système d'isolation à base d'un appui à disque "disc bearing" et de ressorts en élastomère.

## 6- Procédure de calcul préliminaire de l'isolation de la base d'un pont

Le calcul parasismique de la majorité des ponts candidats à l'isolation sismique peut se faire selon la méthode d'analyse spectrale uni-modale et à charge uniforme. Même si dans certains cas, la norme exige le recours à des méthodes plus poussées tel que l'analyse spectrale multimodale ou l'analyse dynamique non linéaire, la procédure présentée ci-dessous, basée sur le code S6-06, peut être utilisée pour le calcul préliminaire:

1- Déterminer les paramètres sismiques de l'ouvrage :A, I, Si ( à noter les coefficients de site Si sont différents de ceux des ponts conventionnels)
4- Déterminez la zone de rendement sismique et la méthode d'analyse minimale requise ;
5- Choisir une configuration des appuis et joints (Quels unités de fondation vont résister à l'essentiel des charges sismiques. Les rigidités les plus élevées leur sont allouées)
6- Choisir une période d'isolation, Te et un taux d'amortissement visqueux équivalent, β, pour le pont dans son ensemble (i.e. Te=2.0 sec et β de 15 à 20% comme valeurs de départ)
7- Déterminer la valeur de B en fonction du tableau 4.10.6.1.1 du code S6-06
8- Calculer le coefficient de réponse sismique : C'sm = ASi/ (B Te) <= 2.5 A/B
9- Calculer le déplacement sismique: di (mm) =250 ASiTe/B
10- Répéter les étapes 5 à 6 jusqu'à l'obtention d'un bon compromis sur C'sm et di.
11- Déterminer la force sismique totale sur le pont par : F=C'sm W
12- Attribuer une rigidité effective à chaque appui (isolateur) et répartir la force sismique totale sur les différents appuis ($Fi=K_{eff,i}$ di).
13- Finaliser la conception (évaluer les forces dues aux mouvements thermiques, retrait et freinage sur chaque unité de fondation, dresser un résumé des caractéristiques des unités d'isolation à chaque appui).

Il est à noter que si le taux d'amortissement équivalent global du système dépasse 30%, il faut recourir à une analyse dynamique non linéaire au moyen de diagrammes d'évolution à moins de limiter la valeur de B à 1.7.

## 7- Spécifications pour les unités d'isolation **(aux Plans et devis)**

Afin de s'assurer que les unités d'isolation ont des caractéristiques qui correspondent aux valeurs utilisées dans l'analyse du pont, les plans et devis du projet devraient spécifier, sans s'y restreindre, les éléments suivants :

- Les déplacements sismiques et hors séisme au sein de chaque unité d'isolation et les jeux requis aux joints.
- La rigidité effective de chaque unité d'isolation, calculée au déplacement sismique.
- Le taux d'amortissement visqueux équivalent βi pour chaque unité d'isolation ou pour chaque composante du système.
- Les forces maximales transmises aux unités de fondation pendant le séisme et hors séisme.
- Les essais de contrôle de qualité requis ainsi que les critères d'acceptation.

## 8- Récents projets d'isolation sismique de ponts au Québec

Durant les 2 dernières, le recours à l'isolation sismique a été considérée sur plusieurs projets de ponts et ce à différentes étapes de la conception.

**Construction d'un nouveau pont à la Tuque**

Dans le cadre du contournement de la ville de la Tuque par la route 155, un nouveau pont a été prévu au dessus de la rivière Petite Bostonnais. Les plans de ce pont prévoyaient l'usage d'isolateurs sismique unidirectionnels dans la direction longitudinale installés à une culée. Ce projet, sorti en appel d'offres en 2006, a été retiré et remis vraisemblablement à une date ultérieure.

**Construction d'un nouveau pont sur la rivière verte**

D'autres part, le ministère des transports du Québec projette la construction d'un nouveau pont sur le prolongement de l'autoroute 20, au dessus de la rivière verte (Rivière des loups) dont l'accélération au roc est de 0.4g. Actuellement les études sont à l'étape préliminaire et deux options sont à l'étude (1) une option à deux travées et (2) une option à trois travées. Les analyses préliminaires ont indiqué que l'usage de l'isolation sismique est de loin plus avantageux et moins coûteux qu'une conception conventionnelle pour les deux options.

**Réfection du pont Madrid**

Le projet récent le plus avancé qui implique l'isolation sismique est certainement le projet de réfection du pont sur l'autoroute 20 sud au dessus de la rivière Nicolet près des localités de St-Leonard-D'aston et de Ste-Eulalie. Les localités importantes les plus proches qui sont listées dans les zones sismiques du code S6-00 sont Drumondville et Victoriaville dont les paramètres de calcul sismique, pour une probabilité de dépassement de 10% en 50 ans, sont :

| | | | |
|---|---|---|---|
| Zone de vitesse : | Zv=2 ; | Rapport de vitesse : | V=0.1 (m/s) |
| Zone d'accélération : | Za=3 ; | Rapport d'accélération : | A=0.15 (g) |

En date de la rédaction de ce papier (13 avril 2007), ce projet vient de sortir en appel d'offres pour les appuis et les unités d'isolation sismique. La deuxième phase de l'appel d'offres pour la construction du pont est prévue dans quelques semaines et les travaux de construction sont planifiés pour l'été et l'automne 2007.

Le pont existant est montré à la figure 8 ci-dessous. Il comporte 4 travées: 2 travées extérieures de ±27.671m chaque et de deux travées intérieures de ±36.627m pour une longueur totale de ±128.802 m. La largeur hors tout du tablier est de ± 13.259m. La structure du tablier est faite de 4 poutres composées en acier d'une hauteur de ± 1903mm et d'une dalle en béton armé de ± 200mm d'épaisseur. Les poutres sont disposées à un espacement régulier de ± 3.454m de façon symétrique par rapport à l'axe central du pont (le restant du tablier est en porte à faux).

Figure 8 : Pont Madrid, sur la 20 sud au dessus de rivière Nicolet. Source : Génivar

Le tablier est supporté par les deux culées situées aux extrémités du pont et par trois piliers en béton armé orientés selon un biais de 18.46 dég. par rapport à la transversale à l'axe du pont (tablier). Deux joints de dilatation simples étaient prévus aux culées aux extrémités du tablier et l'appui fixe était situé au dessus du pilier central.

Les sections des piliers à la base mesurent 5.486 m plus deux biseaux de 787mm chaque par une largeur de 1.524m pour les piliers extérieurs (2 et 4) et de 1.829m pour le pilier central. Le haut des piliers a une section variable s'élargissant à 12.749m sous les chevets. Les hauteurs des trois piliers étaient originalement de ±10.8 et ±11.2 m pour les piliers extérieurs et de ±12.1 pour le pilier central.

Les piliers sont supportés par des fondations superficielles (radiers) qui à leurs tours sont supportées par des groupes de pieux forés dans le roc. Selon les informations obtenues de différents sondages, le roc est situé à un niveau variant entre 1.7 et 12m sous les fondations.

Les travaux projetés consistent notamment à remplacer entièrement le tablier (y compris la structure en acier les joints de dilatation, à remplacer les appuis, à remplacer une partie importante des deux culées et des approches, à renforcer et ancrer au roc les culées et à refaire les assises (chevêtres). La voie de roulement a été élargie passant de ±10.4 à ±12.6m mais la largeur hors tout du tablier n'a que très peu augmenté (±13.5m vs ±13.3m).

La firme de génie conseil Génivar, succursale de Québec, a été mandatée pour préparer les plans de réfection. L'auteur a agi à titre de consultant pour les analyses sismiques du pont.

L'étude d'avant projet effectuée par Génivar a montré que les capacités actuelles des piles et des culées sont très limitées et ne sauraient résister, sans renforcement majeur, aux charges sismiques prescrites dans la code canadien sur le calcul des ponts routiers actuellement en vigueur à savoir le code CAN/CSA-S6-00, ci-après appelé norme S6-00. Toutefois, une étude sismique préliminaire a indiqué que l'option de l'isolation sismique du pont dans les deux directions constitue l'alternative de loin plus avantageuse qu'une conception conventionnelle puisqu'elle permettait de réduire au minimum l'intervention sur la structure des piliers existants.

Au début 2006, une étude sismique élaborée au moyen de diagrammes d'évolution a été réalisée par l'auteur. Elle avait pour objectifs de valider les résultats des analyses préliminaires, d'établir les caractéristiques optimales du système d'isolation, de déterminer les forces sismiques de calcul et de rédiger des spécifications relatives au système d'isolation et les joints de tablier.

La solution retenue et les caractéristiques des unités d'isolation sont présentées aux tableaux 1 et 2 ci-après. Elle consiste à isoler le pont dans les deux directions. Dans la direction longitudinale, 4 unités d'isolation sont placées à une culée et un amortissement additionnel est requis à la pile adjacente à cette culée. Dans la direction transversale, 12 unités d'isolation sont requises à raison de 4 par pile, les appuis aux culées sont libres de se déplacer. Des joints de dilatation sont requis aux deux culées.

| | | Direction | |
|---|---|---|---|
| | | X : Longitudinale, // tablier | Y : Transversale, ⊥ tablier |
| Période d'isolation, Te (s) | | 1.87 | 1.0 |
| Taux d'amort. équivalent, β (%) | | 17.7 | 36.8 |
| Rigidité eff. Globale, $K_{eff}$ (KN/m) | | 18521 | 85684 |
| Déplacement de calcul (mm) | | 50.0 | 25 |
| Forces sismiques transmises du tablier aux têtes des unités de fondation (kN) | Culée axe 1<br>Pile axe 2<br>Pile axe 3<br>Pile axe 4<br>Culée axe 5 | 41<br>124<br>135<br>330<br>526 | 110<br>500<br>530<br>500<br>112 |
| | Total | 1156 | 1752 |

Tableau 1 : Caractéristiques globales du pont isolé et du système d'isolation.

| | **Propriétés / appui ou isolateur** | **Culée Axe 1** | **Pile Axe 2** | **Pile Axe 3** | **Pile Axe 4** | **Culée Axe 5** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Direction longitudinale** | Rigidité effective (kN/m) | 34 | 103 | 225 | 210 | 2 630 |
| | Rigidité tangente, $k_d$ (kN/m) | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 068 |
| | Taux d'amortissement visqueux Équivalent (%) | 63.7 | 63.7 | 63.7 | 63.7 | 13.6 |
| | Déplacement de calcul (mm) | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| **Direction transversale** | Rigidité effective (kN/m) | 1090 | 5 000 | 5 300 | 5 000 | 1120 |
| | Rigidité tangente $k_d$ (kN/m) | 0 | 1 700 | 1 700 | 1 700 | 0 |
| | Taux d'amortissement visqueux équivalent (%) | 63.7 | 42.0 | 43.2 | 42.0 | 63.7 |
| | Déplacement de calcul (mm) | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |

Tableau 2 : Caractéristiques dynamiques et spécifications relatives aux appuis.

Un programme d'essai basé sur les spécifications de la norme S6-00 a également été élaboré. Cependant, ce programme a été modifié pour inclure des essais cycliques à une température de -30°C afin de valider le comportement des unités d'isolation à basse température.

## 9- Conclusions

Les nouvelles technologies et particulièrement l'isolation sismique des ponts offre une alternative très attrayante permettant la réalisation d'économies à court et à long terme. Cette discipline est de plus en plus encadrée par les codes et normes notamment le code canadien S6-06. Malgré des conditions favorables et les progrès prometteurs réalisés durant les dernières années, le nombre d'applications des nouvelles technologies parasismiques dans le domaine des ponts au Québec demeure très restreint. L'ingénieur praticien devrait envisager plus souvent ces nouvelles technologies comme alternative à la conception conventionnelle à base fixe. Nous considérons que plusieurs facteurs contribuent à limiter l'utilisation plus répandue de ces nouvelles technologies au Québec dont :

- le jeune age relatif de ces technologies ;
- le manque d'informations spécifiques à ces technologies auprès de la plupart des ingénieurs praticiens;
- le nombre limité de compétiteurs et/ou l'insuffisance des compagnes de mise en marché de leurs fournisseurs;
- la nécessité dans certains cas de devoir recourir à des analyses sismiques plus poussées.

Pour tirer meilleur profit de ces technologies, une promotion plus soutenue de ces nouvelles technologies par les autorités responsables de la gestion des infrastructures, les fournisseurs de ces technologies et les différents organismes de recherche et d'éducation sont nécessaires auprès des ingénieurs praticiens et des futurs ingénieurs.

## Principales Références :


1– CAN-CSA-S6-06 : Code Canadien sur le calcul des ponts routiers, novembre 2006

2- CAN-CSA-S6.1-06 : Commentary on CAN/CSA-S6-06 Canadian Higway Bridge Design Code, novembre 2006

3– CAN-CSA-S6-00 : Canadian Higway Bridge Design Code, décembre 2000

4- CAN-CSA-S6.1-00 : Commentary on CAN/CSA-S6-00 Canadian Higway Bridge Design Code, décembre 2000

5- AASHTO Guide Specifications for Seismic Isolation Design, 1998

6- Guizani 2006: Rapport synthèses des analyses sismiques du pont PO-05328 (N/D : Z-0505), Rapport interne, ALG Groupe Conseil Inc., mars 2006.

7- Guizani 2005: Rapport sommaire préliminaire sur l'isolation sismique du pont (Madrid) A20E (N/D : Z-0505), Rapport interne, ALG Groupe Conseil Inc., août 2005.

8- Preliminary Report on the Northridge, California Earthquake of January 17, 1994, Association Canadienne de Génie sismique (équipe de reconnaissance), mars 1994.

9- Ministère des Transports du Québec 2003 : Comptes rendus des présentations au 10e colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, mai 2003.

10- Conversations téléphoniques et courriels avec différents intervenants.

11- CNRC 2003 : Revue canadienne de génie civil, Vol 30, avril 2003.