

Sur l'isolation sismique des ponts au Canada

Par : Lotfi Guizani, ing., M.Sc.A

Les Industries Z-Tech Inc.

Résumé

Ce papier traite de l'isolation sismique et d'autres technologies parasismiques modernes avec une attention particulière aux développements canadiens.

Ils y sont présentés une revue historique de l'isolation sismique à la base, les principes et fondements théoriques de cette discipline ainsi qu'une brève revue des principaux systèmes d'isolation utilisés notamment au Canada.

Le papier présente une application de ce système à un pont dans le nord du Québec. Finalement une procédure de calcul préliminaire de pont isolé et de son système d'isolation sur la base des spécifications de la norme S6-00 est présentée.

1- Introduction

Les ponts constituent des maillons très importants de l'infrastructure routière dont le coût et les délais de reconstruction sont très élevés et dont la rupture et la mise hors service suite à un séisme est de nature à occasionner des pertes considérables.

Le tremblement de terre de San Fernando (1971) a mis en évidence plusieurs lacunes majeures dans les règles de conception des ponts. En particulier, l'insuffisance des forces sismiques prescrites pour la conception des ponts construits dans des régions à forte sismicité. Plusieurs ajustements importants dans les spécifications des normes de calcul de ces ouvrages ont été apportées dans les éditions subséquentes (ATC 1981, AASHTO 1983). Néanmoins, les dommages très sévères subits par les ponts lors de récents tremblements de terre de Northridge (Californie) 1994 et celui de Kôbé (Japon) 1995 ont démontré la vulnérabilité des structures de pont, y compris celles conçues avec des normes modernes.

Or, depuis les années 1970, le domaine du génie parasismique a connu des percées importantes catalysées entre autres par le développement de techniques de calcul sur support informatique beaucoup plus puissantes qu'auparavant et les installations d'essais tel que les simulateurs sismiques (tables vibrantes). Ceci a favorisé l'émergence de plusieurs technologies innovatrices dont les premières applications aux ponts rapportées en Amérique du Nord remonte seulement à la fin des années 80 (réf.) et pour lesquelles des normes de calcul sont désormais en place. Dans sa plus récente édition, le code canadien des ponts S6-00, à l'instar d'autres codes tel que l'AASHTO-LRFD 1998, a adopté des spécifications élaborées couvrant la conception et la mise à l'essai des systèmes d'isolation sismique à la base pour les ponts. L'intérêt pour ces nouvelles technologies est grandement justifié par l'aspect économique. 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. Les principaux obstacles à leur utilisation ont été le jeune âge de ces technologies et l'absence de normes et de règles de calcul disponibles à l'ingénieur praticien.

2- Conception conventionnelle à base fixe (Stratégie d'encaisser le coup)

Les méthodes de calcul parasismique conventionnelles modernes reposent sur la dissipation de l'énergie induite par déformations inélastiques localisées dans des régions préalablement sélectionnées et détaillées à cet effet afin de leur assurer un comportement ductile et stable. Autrement dit, la structure 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) mais les régions critiques sont détaillées de sorte à pouvoir endurer plusieurs cycles de déformations inélastiques importantes sans dégradation importante de leur résistance ou rigidité.

Donc la demande en force est ramenée à une demande en ductilité qui se veut plus économique à assurer. Dans la norme S6-00, 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.

Afin de préserver les ponts vitaux et assurer certains services essentiels après séisme, la philosophie adoptée 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.

2- L'isolation sismique à la base (la stratégie d'esquiver le coup)

2.1 Objectifs

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.

2.2 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 d'un dispositif de dissipation d'énergie (amortissement) à l'isolateur est requise afin de contrôler les déplacement et réaliser un compromis satisfaisant entre la réduction de la force et l'accroissement du déplacement. La figure 3 présente, de façon idéalisée, l'effet de l'accroissement de la période et de l'amortissement sur les forces et déplacements sismiques.

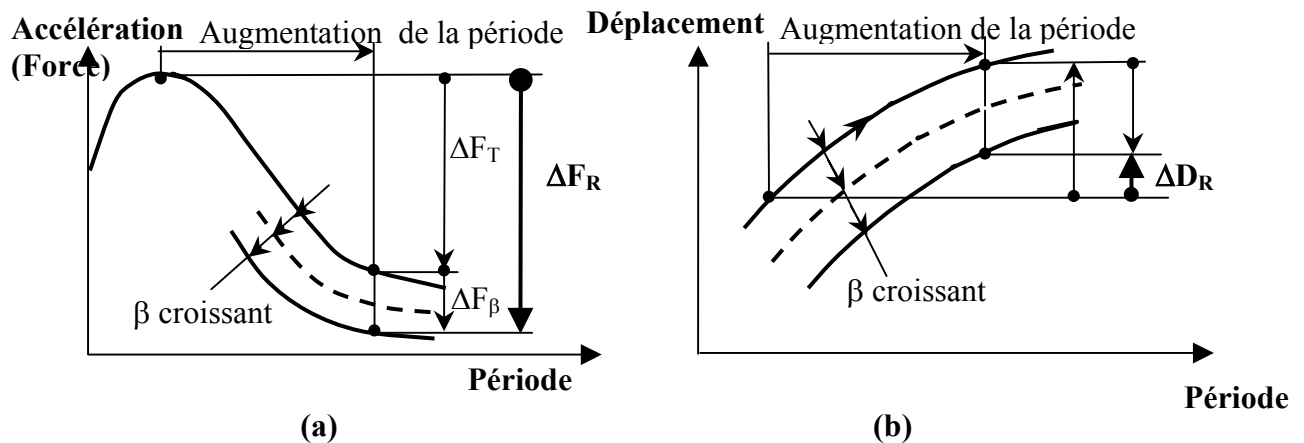


Figure 1 : Effet de l'augmentation de la période et du taux d'amortissement visqueux
3. l'accélération et les forces d'inertie ; (b) le déplacement

2.3 Composantes des systèmes d'isolation sismique à la base

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

- **Un appui capable de transmettre les charges verticales mais ayant 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. Une multitude de systèmes de dissipation d'énergie ont été mis au point avec un application plus au moins répandue. Les plus courants sont : (1) les amortisseurs hydrauliques (viscous dampers) et les amortisseurs à base de friction (comportement plastique ou élasto-plastique). Parmi les autres systèmes on peut citer les amortisseurs à base de comportement hystérésis (i.e. poutrelles en arc travaillant en flexion), élastomères 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.
- **Un système de retenue**: 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.

3- Revue historique de l'isolation sismique

Le principe de l'isolation à la base n'est pas nouveau en tant que tel et on rapporte que les premières expériences remontant au début du 20^{ème} siècle. La première application de la technologie moderne de l'isolation sismique à la base a été réalisée sur une école élémentaire à Skopje (ex-Yougoslavie) dont la construction a été achevée en 1969. En Amérique du Nord, la première application remonte à 1984. Actuellement des centaines de bâtiments et de ponts à travers le monde sont munis de systèmes d'isolation sismique. Au Canada, on

rapporte l'isolation sismique de plusieurs ponts essentiellement dans la province de la Colombie Britannique (réf: <http://nisee.berkeley.edu/prosys/usbridges.html>). À notre connaissance, la première application de l'isolation sismique des ponts au Canada a été réalisée à Richmond (C.B) lors de la réfection du pont sur l'autoroute 99 au dessus de la rivière Slough Dease. Au Québec la première application de l'isolation sismique est en cours de réalisation sur le nouveau pont en construction à Alma sur la route 169 au dessus de la rivière grande décharge.

4- Principaux types de systèmes d'isolation

Il existe une multitude de systèmes d'isolation dont l'application a été plus au moins répandue et une revue exhaustive de ces systèmes dépasse le cadre de ce papier. Néanmoins, on peut grossièrement classer les systèmes d'isolation sismiques en deux catégories :

4.1- 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-dessous.

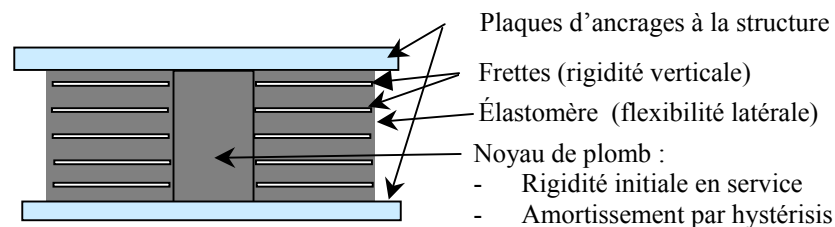


Figure 2 : Schémas isolateur élastomérique avec noyau de plomb

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 .

4.2- 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.

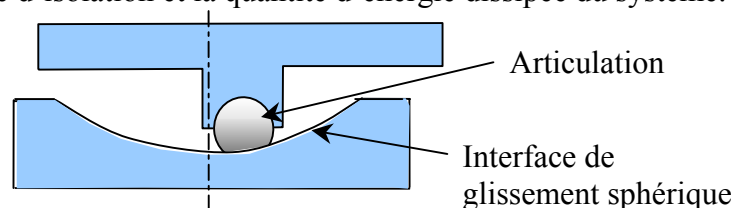


Figure 3 : Schémas de l'isolateur de type pendule à friction

5- Système d'isolation à base d'élastomère confiné

5.1 Description du système

Z-Tech, en collaboration avec plusieurs partenaires canadiens, a développé un système original destiné à l'isolation sismique des ponts et viaducs. 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.

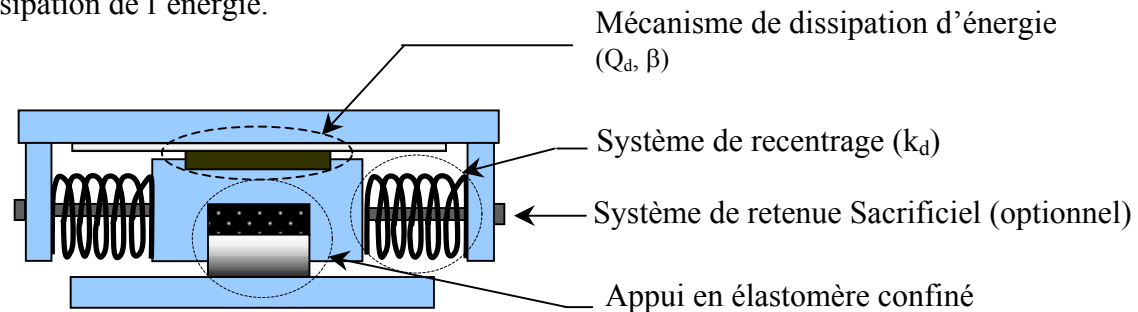


Figure 4 : Schémas de l'isolateur sismique Z-Tech

5.2 Revue du projet de développement

Le projet de développement a été monté et réalisé par Z-Tech en collaboration avec l'école Polytechnique de Montréal, le Conseil National des Recherches du Canada (CNRC) et le Ministère des Transports du Québec (MTQ). Les travaux ont débuté en 1994. La première phase de ce projet a couvert le développement du système de base et des outils analytiques sous-jacents. Elle a été réalisée dans le cadre de la thèse de doctorat de M. Gaël Bondonet sous la direction du professeur André Filiatrault qui a été complétée en 1997. Parmi les résultats de cette recherche mentionnons l'établissement de lois de comportement pour la composante de dissipation d'énergie et de recentrage. Ensuite deux prototypes ont été fabriqués et soumis à un protocole d'essai dérivant des principales spécifications des normes de ponts nord-américaines (AASHTO 1992, HITEC 1996, NISTR 1994 et le draft du code CHBDC 1997 (S6-00)). Parmi les essais réalisés dans le cadre de ce protocole, mentionnons les essais sur le simulateur sismique réalisés dans le but de valider le comportement du système vis à vis des sollicitations sismiques réelles. Sur le plan analytique, des outils de calcul dynamique non-linéaire incrémentales 1D et/ou 3D du pont sous sollicitation sismique et qui incorporant les lois de comportement dérivées ont été développés afin d'assister dans la conception du système d'isolation et de l'ouvrage (définir les caractéristiques optimales de l'isolateur et les paramètres de conception parasismique du pont).

La deuxième phase de développement a été pilotée par Z-Tech avec le soutien du CNRC et du MTQ. Les travaux de cette phase ont porté sur la validation du comportement à long terme et à basse température et sur le perfectionnement du système. L'influence du vieillissement climatique et de la basse température (-30°C) sur le comportement de la composante de dissipation d'énergie ont été établis grâce à la collaboration du Centre de Recherche Industrielle du Québec (CRIQ) et l'école de technologie supérieure (ETS). Ces essais ont établi que le comportement de l'interface de dissipation d'énergie est peu affecté par l'exposition prolongée au brouillard salin et/ou la variation de la température.

5.3 Comportement cyclique

La figure 5 montre le comportement typique observé du système.

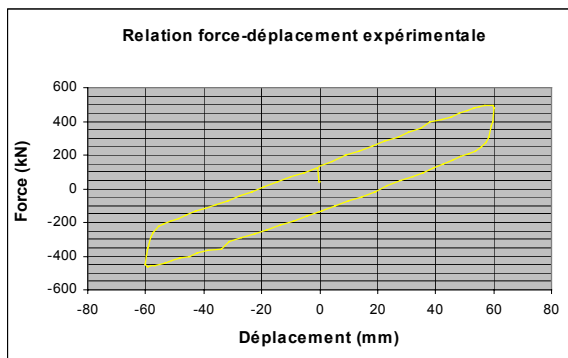


Figure 4 : comportement cyclique du système

Le comportement du système est du type bilinéaire et peut être idéalisé par la figure 5. 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 Δ_{max} tout en assurant la rigidité latérale K_d requise (force de rappel)

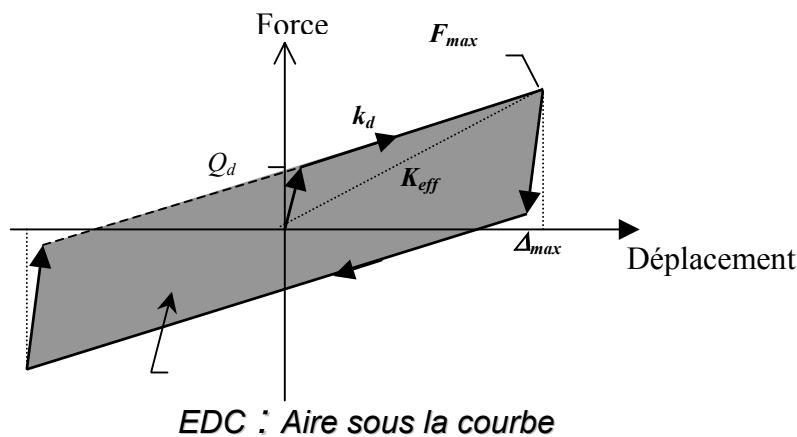


Figure 5: comportement idéalisé (Bi-linéaire)

5.4 Isolation du pont d'Alma

Le système d'isolation a été utilisé pour l'isolation sismique dans la direction longitudinale du nouveau pont d'Alma, actuellement en construction sur la route 169 au dessus de la grande décharge. Le site des travaux est zoné 3 en accélération et en vitesse ($Z_a=Z_v=3$, $A=0.15g$, $v=0.15m/s$) et les fondations de l'ouvrage reposent sur le roc. Le pont, d'une longueur totale de 318m et d'une largeur hors tout de 14.63m comprend deux voies de roulement et un trottoir. La superstructure est continue et est composée de 4 poutres d'acier longitudinales supportant un tablier en béton. La charge morte totale de la superstructure est estimée à 53000 kN. En dehors des culées, la superstructure est supportée par 5 piliers en béton armé d'une hauteur variant de 15 à 40m au dessus de leurs fondations superficielles. Le pont comporte un seul joint modulaire située à l'une des deux culées et tous les appuis sur les piliers sont de type élastomère confiné mobile dans la direction longitudinale. Le pont a été conçu par la firme Génivar et le contrat de construction a été accordé à Hamel Construction pour un montant autour de 14M\$.

A la culée " fixe", les 4 appuis 4 isolateurs sismique ont été prévus. La photo 1, ci-dessous montre trois de ces unités lors de l'assemblage final. Chaque unité mesure 1.4m de long x 568mm de haut x 750mm de large (incluant les plaques d'ancrage à la structure). Ces unités se comportent comme des appuis fixes sous les charges de freinage et de vent et ce grâce à la friction générée au niveau de l'interface de dissipation d'énergie et un système de retenue sacrificiel. La retenue longitudinale (fixité) à la culée a été conçue pour avoir une résistance minimale de 548kN (juste au dessus de la charge de freinage) et une résistance maximale de 943 kN.



Photo 1 : unités d'isolation du pont d'Alma en phase d'assemblage final

Le système d'isolation du pont a été conçu sur la base d'analyses dynamiques non-linéaires et a été conçu pour une rigidité effective globale de 21270kN/m et un amortissement global équivalent de 21.9%. Le déplacement sismique a été établi à 60mm mais les unités fournies ont une capacité de déplacement de 120mm. La période d'isolation est de 3.2 sec et la charge maximale à la culée ou sont situés les isolateurs (au déplacement de calcul) a été établie par analyse à 1004 kN soit de l'ordre de 2% de la charge morte. La force longitudinale s'exerçant sur l'ensemble des autres piliers et de la culée mobile a été estimée à 260kN. Il est à noter que les valeurs obtenues selon la méthode d'analyse uni modale de la norme S6-00 pour laquelle le déplacement de calcul est de 83mm tandis que la charge sismique longitudinale totale est de 1589kN (1328kN à la culée) et le système d'isolation fourni a été conçu pour pouvoir accommoder ces valeurs. Par ailleurs, il est utile de mentionner que la norme S6-88 (norme utilisée pour la conception du pont) spécifie une force sismique de 3339kN soit plus que deux fois les charges attendues pour le pont ainsi isolé sous le séisme de calcul.

Deux prototypes identiques aux unités fournies ont été soumis aux essais de conformité prescrites par la norme S6-00. Ces essais ont eu lieu à l'école polytechnique de Montréal et le rapport d'essais sera bientôt disponible. La force de retenue ultime obtenu par essai est de 770kN (au dessus de 548kN et en bas du 943 kN prévu). La relation force déplacement présentée à la figure 4 a été obtenue pour les deux unités superposées (diviser les forces par 2 pour une unité, multiplier par 2 pour toute la culée). L'étude de cette courbe reflète le degré de précision et de contrôle exercé lors de la conception des unités de l'isolation. Le coût du système d'isolation de ce projet, incluant les essais, représente moins que 1% du coût de la construction du pont.



Photo 2 : Essais de conformité à la norme S6-00 de deux prototypes

7. Procédure de calcul simplifiée basée sur la S6-00

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 peut être utilisée pour le calcul préliminaire:

- 1- Déterminer les paramètres sismiques de l'ouvrage : A , I , S_i (à noter les coefficients de site S_i sont différents de ceux des ponts conventionnels)
- 2- Déterminez la zone de rendement sismique et la méthode d'analyse minimale requise ;
- 3- 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)
- 4- Choisir une période d'isolation, T_e et un taux d'amortissement visqueux équivalent β , pour le pont dans son ensemble (i.e. $T_e=2.0$ sec et β de 15 à 20% comme valeurs de départ)
- 5- Déterminer la valeur de B en fonction du tableau 4.10.6.1.1
- 6- Calculer le coefficient de réponse sismique : $C'_{sm} = A S_i / (B T_e) \leq 2.5 A/B$
- 7- Calculer le déplacement sismique: d_i (mm) = $250 A S_i T_e / B$
- 8- Répéter les étapes 5 à 6 jusqu'à l'obtention d'un bon compromis sur C'_{sm} et d_i .
- 9- Déterminer la force sismique totale sur le pont par : $F = C'_{sm} W$
- 10- Attribuer une rigidité effective à chaque appui (isolateur) et répartir la force sismique totale sur les différents appuis ($F_i = K_{eff,i} d_i$).
- 11- 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)

8- Autres stratégies de conception sismique

D'autres stratégies combinant la méthode conventionnelle à base fixe avec des dispositifs parasismiques. Les plus courantes sont l'utilisation d'amortisseurs sismiques et l'utilisation des transmetteurs de choc sismique. Cette dernière a été retenue pour la réhabilitation du pont Henri Bourassa au dessus de l'autoroute 440 à Québec.

8.1 Conception à base fixe avec amortisseur sismique:

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.

8.2 Les Transmetteurs de Chocs Sismiques (TCS)

Ils sont souvent confondus à tort avec les amortisseurs hydrauliques alors qu'il présentent un comportement fondamentalement différent. L'idée de 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 transmetteur de choc sismique 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.

Conclusions

L'isolation sismique des ponts a émergé comme une alternative attrayante qui promet la réalisations d'économies à court et à long terme. Cette discipline est de plus en plus encadrée par les codes et normes notamment la norme canadienne S6-00. Avec l'accroissement des exigences de cette norme, et le lot important de ponts construits depuis plus de 40 ans au Québec et en Colombie britannique, l'ingénieur praticien devrait envisager sérieusement l'isolation sismique comme alternative à la conception conventionnelle à base fixe. La première application au Québec, démontre les bénéfices de cette technologie.

Principales Références

- 1-CAN-CSA-S6-00 : Canadian Highway Bridge Design Code, décembre 2000
- 2-CAN-CSA-S6.1-00 : Commentary on CAN/CSA-S6-00 Canadian Highway Bridge Design Code
- 3-Gael Bondonet, Élaboration d'un isolateur à la base original pour les ponts et viaducs du Canada
- 4-AASHTO Guide Specifications for Seismic Isolation Design, 1998
- 5-Preliminary Report on the Northridge, California Earthquake of January 17, 1994, Association Canadienne de Génie sismique (équipe de reconnaissance), mars 1994
- 6- <http://mceer.buffalo.edu> : Site du Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER), buffalo, N.Y.S.