

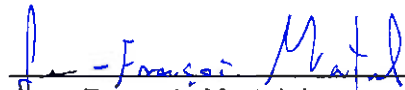
**MINISTÈRE DES TRANSPORTS**

**UTILISATION D'ÉQUIPEMENTS  
PARASISMIQUES SUR LES PONTS  
CONVENTIONNELS À MULTIPLES TRAVÉES**


**RAPPORT D'ÉTAPE**

**ÉTUDE PARAMÉTRIQUE**

Préparé par :

  
Jean-François Martel, ing.  
O.I.Q. : 146968

Vérfié par :

  
Yannick Maltais, ing. Ph. D.  
O.I.Q. : 113402

PROJET N° Q08783A  
Le 7 novembre 2011

## TABLE DES MATIÈRES

	PAGE
1. INTRODUCTION .....	1
2. OBJET DU PRÉSENT RAPPORT .....	1
3. MÉTHODOLOGIE .....	2
4. L'ISOLATION PARASISMIQUE .....	3
4.1 Rappel théorique .....	4
4.2 Systèmes d'isolation .....	5
4.3 Exemples d'applications au Québec .....	6
5. ÉTUDE PARAMÉTRIQUE (« VOLET 1 » DU MANDAT) .....	7
5.1 Objectifs spécifiques .....	7
5.2 Rappel théorique .....	8
5.3 Méthodologie détaillée .....	9
5.3.1 Calcul des forces sismiques.....	9
5.4 Hypothèses retenues .....	9
5.5 Présentation des résultats (volet 1 de l'étude) .....	11
5.5.1 Identification du potentiel de réduction de la taille de la pile du pont type considéré .....	12
5.5.2 Influence de l'isolation sismique sur les forces élastiques subies par la pile du pont type considéré .....	13
5.5.3 Évaluation de la rentabilité de l'isolation sismique en fonction des déplacements permis .....	14
5.5.4 Influence de la localisation de l'ouvrage sur la rentabilité de l'isolation sismique .....	15
5.6 Discussion des résultats du premier volet de l'étude.....	16
5.7 Perspectives de recherche pour l'étude détaillée à venir (volet 2 du mandat) ....	18
5.7.1 Plan de travail préliminaire de l'étude détaillée .....	19
6. LISTE DES RÉFÉRENCES .....	19

## TABLE DES FIGURES

Figure 1 –Influences de l'allongement de la période et de l'amortissement sur l'accélération et le déplacement d'une structure (graphiques DIS [7]) .....	4
Figure 2 – Isolateur en élastomère fretté avec noyau de plomb (photo DIS) .....	5
Figure 3 – Isolateur à friction avec système de recentrage (photo R.J. Watson [13]) .....	5
Figure 4 – Comportement de type bilinéaire (graphique DIS).....	6
Figure 5 – Pont théorique utilisé pour l'étude paramétrique.....	9

Figure 6 – Réductions maximale et minimale de la superficie de la semelle de la pile pour différents déplacements de la tête de la pile du pont considéré (combinaison de paramètres donnant les courbes extrêmes) .....	13
Figure 7 – Rapport des forces de calcul élastiques pour les ponts isolés ( $F_{EI}$ ) et conventionnels ( $F_{EC}$ ) .....	14
Figure 8 – Évaluation de la rentabilité de l'isolation sismique en fonction des déplacements permis .....	15
Figure 9 – Influence de la localisation de l'ouvrage sur la rentabilité de l'isolation sismique .....	16
Figure 10 – Modèle SAP2000 du pont type 1 .....	19

#### **TABLE DES TABLEAUX**

Tableau 1 – Paramètres d'étude sélectionnés pour le premier volet du mandat .....	7
Tableau 2 – Combinaison de paramètres où l'indicateur de performance (rapport I/C) est le plus élevé (cas 1 : bon potentiel pour l'isolation) et le plus faible (cas 2 : peu de potentiel pour l'isolation) .....	12
Tableau 3 – Type de ponts à considérer lors du second volet du mandat .....	18

#### **TABLE DES ANNEXES**

Annexe 1 – Exemple de calcul des forces sismiques avec la méthode de la charge uniforme .....	21
---	----

## 1. INTRODUCTION

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

L'utilisation d'équipements spécialisés pour atténuer les effets des séismes, tels que les isolateurs sismiques, représente une solution prometteuse pour réduire de façon appréciable l'envergure des systèmes structuraux conventionnels de résistance aux charges latérales. Bien que l'utilisation de tels systèmes soit déjà répandue aux États-Unis et ailleurs dans le monde, les exemples d'utilisation sont peu nombreux au Québec, et leur potentiel, de même que les règles inhérentes à leur conception, sont méconnus de la plupart des ingénieurs concepteurs.

## 2. OBJET DU PRÉSENT RAPPORT

Le mandat confié à CIMA+ par le ministère des Transports du Québec vise à orienter ce dernier dans l'utilisation de systèmes d'isolation sismique visant à atténuer les effets des séismes sur des ponts à multiples travées, de catégories urgence et secours, projetés par ce dernier. Chacun des ponts considérés dans ce mandat sera dimensionné sans équipement parasismique puis redimensionné en considérant ce type d'équipement. Un maximum de trois (3) différents types d'isolateurs sismiques devra être considéré à chacun des ponts. Selon le nombre de paramètres retenu dans cette étude, et en accord avec le Ministère, entre trois (3) et cinq (5) ponts différents seront traités. Enfin, une étude comparative des coûts relatifs à l'utilisation de différents systèmes d'isolation sismique complétera ce mandat.

De façon plus spécifique, les principaux paramètres de la présente étude se définissent comme suit :

- Deux conditions différentes de fondation (semelles sur roc, semelles sur pieux);
- Ponts à trois (3) et cinq (5) travées;
- Ponts à poutres en acier (travées de l'ordre de 30 à 40 mètres) et ponts à poutres NEBT (travées de l'ordre de 35 mètres);
- Piles à poteaux simples ou colonnes multiples avec hauteur de 6 et 12 mètres;
- Catégories d'importance sismique pont de secours et pont d'urgence.

Pour chacun des ponts considérés, l'étude devra établir les coûts de construction, d'entretien et de réparation normalement nécessaires sur la durée de vie de l'ouvrage (75 ans), et les coûts à prévoir pour la réparation du pont (appareil d'appui, unités de fondation, etc.) suite à un séisme.

### 3. MÉTHODOLOGIE

Afin d'en arriver à évaluer le potentiel des systèmes d'isolation sismique sur les ponts de type courant du Ministère, le présent mandat est divisé en deux grands volets, soit :

- une **étude paramétrique** réalisée à l'aide de la méthode de la charge uniforme (partie du mandat réalisée entre les mois d'avril et juin 2011);
- une **étude détaillée** réalisée à l'aide des méthodes d'analyse proposées dans le devis de travail du Ministère (partie du mandat à réaliser entre l'automne 2011 et le printemps 2012).

L'objectif de **l'étude paramétrique** est de cibler les paramètres susceptibles d'avoir un impact significatif sur la conception parasismique des ponts munis ou non d'isolateurs sismiques. Pour ce faire, l'étude paramétrique a été réalisée à l'aide d'une méthode d'analyse simple et rapide d'exécution (méthode de la charge uniforme) qui permet d'établir les caractéristiques que devrait avoir un pont pour être considéré comme un bon candidat à l'isolation sismique. Une fois l'importance relative de chacun des paramètres d'analyse établie, ceux-ci ont été combinés afin de proposer un certain nombre de scénarios où l'utilisation d'un système d'isolation sismique pourrait vraisemblablement conduire à une réduction de l'envergure des systèmes structuraux (diaphragmes d'extrémité, appareils d'appui, unités de fondation, etc.) et, par le fait même, à une réduction des coûts de construction des structures. À l'opposé, cette étude paramétrique a aussi permis d'identifier des cas où l'utilisation d'un système d'isolation sismique ne permet pas de réduire de façon significative l'envergure des systèmes structuraux.

Ce sont les scénarios les plus prometteurs (ou tout autre scénario jugé pertinent par le Ministère) qui seront retenus pour la seconde partie du mandat, soit **l'étude détaillée** des structures à l'aide de la (ou des) méthode(s) d'analyse propre(s) au devis de travail (analyse dynamique temporelle, etc.). Tel que mentionné précédemment, cette étude sera initiée au cours de l'automne 2011. Notons enfin que lors de cette étude, une analyse coûts-bénéfices, combinée à une courbe d'endommagement permettant d'évaluer approximativement les réparations nécessaires suite à des séismes de différentes probabilités d'occurrence, pour le cas isolé comme pour la conception conventionnelle, sera aussi réalisée pour les ponts considérés.

**Mentionnons que ce rapport d'étape présente les résultats de l'étude paramétrique complétée au cours des derniers mois.**

#### **4. L'ISOLATION PARASISMIQUE**

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

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

#### 4.1 Rappel théorique

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.

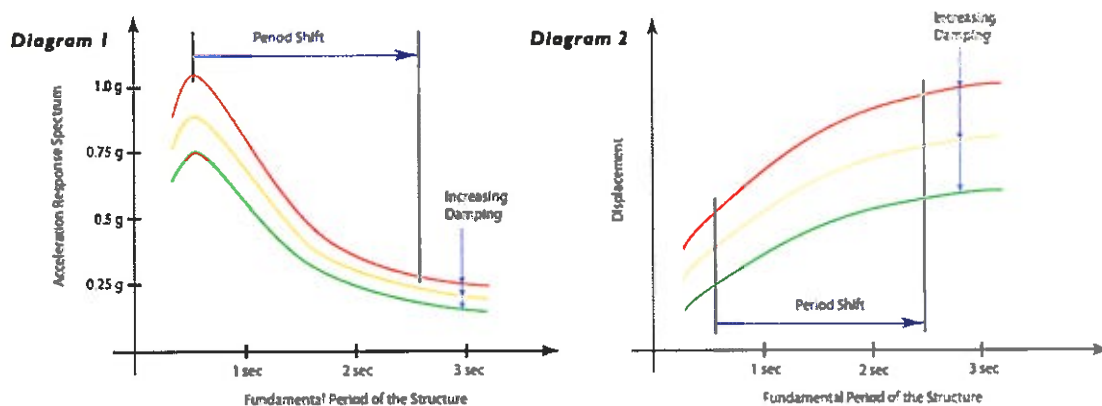


Figure 1 – Influences de l'allongement de la période et de l'amortissement sur l'accélération et le déplacement d'une structure (graphiques DIS [7])

## 4.2 Systèmes d'isolation

Les systèmes d'isolation sismique considérés dans ce mandat sont ceux habituellement employés dans des applications similaires, notamment en Amérique du Nord et au Japon. Il s'agit des systèmes en élastomère fretté, avec noyau de plomb (voir figure 2) et de l'isolateur à base de friction (voir figure 3). Notons que pour ajouter de l'amortissement au système d'isolation, lorsque nécessaire, des amortisseurs visqueux peuvent aussi être utilisés en combinaison avec les deux types de système d'isolation considérés dans ce mandat.

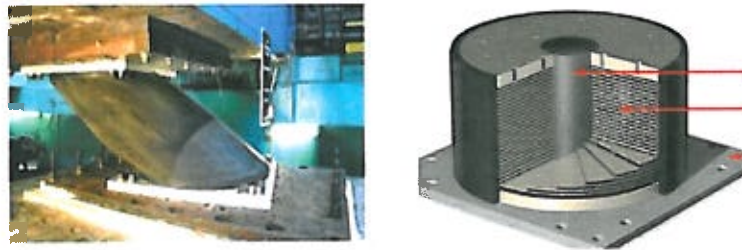


Figure 2 – Isolateur en élastomère fretté avec noyau de plomb (photo DIS)

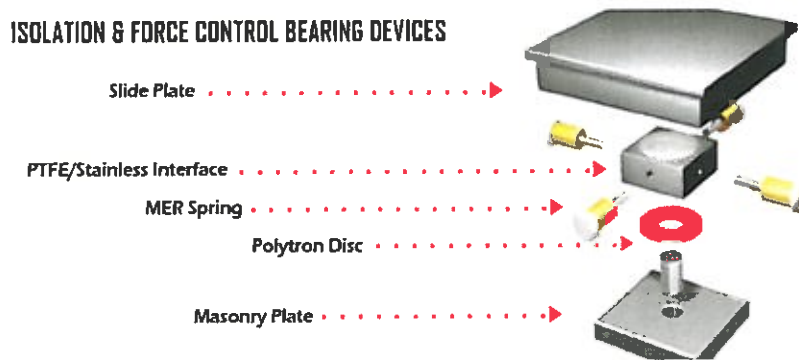


Figure 3 – Isolateur à friction avec système de recentrage (photo R.J.Watson [13])



Les isolateurs considérés dans le cadre de cette étude (élastomère fretté et système à friction) ont un comportement idéalisé de type bilinéaire qui s'apparente à celui illustré à la figure 4. Ce comportement, caractérisé par les paramètres illustrés sur cette figure, est expliqué en détail par Dion (2010). Retenons simplement, pour la suite, que la rigidité latérale du système est fonction du module de cisaillement de l'élastomère et du diamètre du noyau de plomb, pour le système en élastomère, et de la rigidité du système de recentrage (ressorts métalliques ou polyétheruréthanes) une fois le glissement amorcé, dans le cas du système à friction. Aussi, notons que la dissipation d'énergie associée à un cycle de mouvement correspond à la surface comprise à l'intérieur de la boucle d'hystérésis (figure 4).

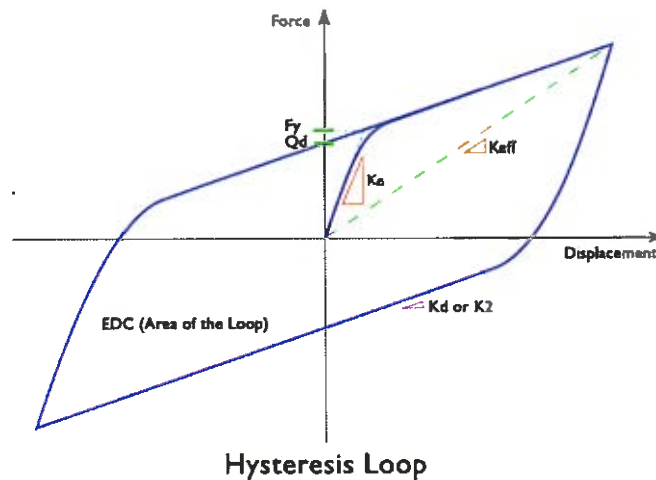


Figure 4 – Comportement de type bilinéaire (graphique DIS)

### 4.3 Exemples d'applications au Québec

Tel que mentionné précédemment, l'utilisation des systèmes d'isolation parasismique est très peu répandue au Québec. Il existe toutefois quelques exemples d'utilisation, dont les deux suivants :

- Pont Madrid (A-20) (système d'isolation sismique dans les deux directions – projet de réhabilitation parasismique réalisé en 2007);
- Pont d'Alma (le seul pont neuf conçu avec un système d'isolation sismique au Québec – projet réalisé en 2002).

Ces deux exemples d'utilisation sont bien documentés et ils peuvent être consultés dans deux articles techniques publiés par Guizani (2003, 2007).

## 5. ÉTUDE PARAMÉTRIQUE (« VOLET 1 » DU MANDAT)

### 5.1 Objectifs spécifiques

Tel que mentionné précédemment, ce rapport présente les résultats obtenus dans le premier volet du mandat (étude paramétrique) qui vise à cibler les paramètres susceptibles d'avoir un impact significatif sur la conception parasismique des ponts munis (ou non) d'isolateurs sismiques.

L'ouvrage étudié dans cette partie du mandat est un pont conventionnel à deux travées continues. Les caractéristiques du pont (la masse linéaire du tablier, la hauteur des unités de fondation, le type de joints, etc.) sont variables en fonction des différents paramètres suivants :

- Paramètres sismiques du site (rapport d'accélération de la zone et type de sol);
- Paramètres sismiques de l'ouvrage (importance et poids de la structure) ;
- Fixité des appuis en regard du transfert des charges sismiques;
- Rigidité des unités de fondation (hauteur des piles);
- Ductilité des unités de fondation (facteur R);
- Caractéristiques du système d'isolation ( $\beta$ ).

Les paramètres sélectionnés pour l'étude paramétrique sont donnés au tableau 1.

Tableau 1 – Paramètres d'étude sélectionnés pour le premier volet du mandat

I	A (g)	S	w (kN/m)	$\beta$ (% crit)	H (m)	$\Delta$ (mm) permis
1,5	0,10	I	155	15	6,0	50,0
3,0	0,20	II	215	25	12,0	80,0
	0,30	III				120,0
	0,40	IV				160,0

- I : Facteur d'importance;  
A : Rapport d'accélération de la zone;  
S : Coefficient de site;  
W : Poids linéaire du tablier;  
 $\beta$  : Rapport d'amortissement visqueux du système d'isolation;  
H : Hauteur de l'unité de fondation;  
 $\Delta$  : Déplacement maximum permis du haut de l'unité de fondation.

## 5.2 Rappel théorique

Cette section présente les équations prescrites par le Code canadien de calcul des ponts routiers (CAN/CSA S6-06) en matière de conception parasismique, et ce, pour la méthode de la charge statiquement équivalente (méthode de la charge uniforme).

### Conception traditionnelle

$$C_{sm} = \frac{1,2AIS}{T_m^3} \leq 2,5AI \quad [1]$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{gK}} \quad [3]$$

$$P_e = \frac{C_{sm}W}{L} \quad [5]$$

### Conception isolée

$$C'_{sm} = \frac{AS_i}{BT_e} \leq 2,5 \frac{A}{B} \quad [2]$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{\sum k_{eff}g}} \quad [4]$$

$$P_e = \frac{C'_{sm}W}{L} \quad [6]$$

où

$C_{sm}$  = Coefficient de réponse sismique élastique des ponts conventionnels;

$C'_{sm}$  = Coefficient de réponse sismique élastique des ponts isolés;

$T_m$  = Période de l'ouvrage du  $m^{\text{e}}$  mode (non isolé);

$T_e$  = Période de l'ouvrage muni d'isolateurs dans la direction considérée;

$k$  = Rigidité latérale du pont;

$k_{eff}$  = Rigidité effective d'un isolateur;

$B$  = Coefficient d'amortissement effectif du système d'isolation;

$L$  = Longueur du tablier;

$g$  = Accélération due à la gravité.

Pour le calcul des coefficients de réponse sismique élastiques, on observe d'abord que la catégorie d'importance du pont ne majore pas l'effort sismique de calcul des ponts isolés, alors qu'il multiplie ce dernier pour les conceptions conventionnelles. Cependant, pour le calcul des déplacements subits par le tablier, la catégorie d'importance du pont n'a pas d'influence. La période de vibration et la charge statique équivalente se calculent de la même façon pour une conception isolée que pour une conception conventionnelle. Pour une conception conventionnelle, le calcul de la période de vibration est fait en considérant la rigidité du système comme étant la somme des rigidités des éléments composant les piles, alors que pour la conception isolée, ce sont les rigidités effectives des systèmes d'isolation qui sont utilisées.

### 5.3 Méthodologie détaillée

Aux fins de la présente étude paramétrique, un pont à deux travées est utilisé (voir la figure 5), puisque seul le comportement dans la direction longitudinale est étudié. Les calculs avec un pont à deux travées sont représentatifs du comportement du système de résistance aux forces latérales dans la direction longitudinale, étant donné que les rigidités des piles peuvent être additionnées de manière linéaire pour modéliser un pont comportant plus de deux travées. Tel que souligné précédemment, l'étude est réalisée avec la méthode de la charge uniforme (MCU).

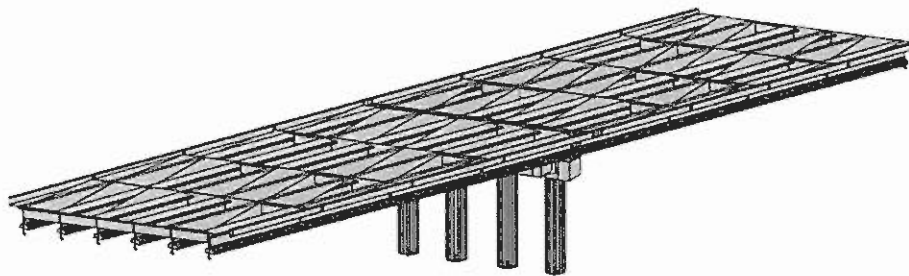


Figure 5 – Pont théorique utilisé pour l'étude paramétrique

#### 5.3.1 Calcul des forces sismiques

Un exemple de calcul des forces sismiques avec la méthode de la charge uniforme est donné à l'annexe 1. Les équations utilisées, de même que leurs références, y sont aussi indiquées.

### 5.4 Hypothèses retenues

Afin de réaliser l'analyse simplifiée à l'aide de la méthode de la charge uniforme (MCU), les hypothèses suivantes ont été retenues :

- Pour les conceptions conventionnelles, les unités de fondation ont été principalement dimensionnées avec une ductilité correspondant à  $R = 3$ , bien qu'une comparaison ait été faite dans certains cas avec un facteur de ductilité de  $R = 5$ ;
- Pour les conceptions isolées, les unités de fondation ont été dimensionnées de manière à demeurer dans le domaine élastique. L'étude détaillée à venir (volet 2 du mandat) permettra de valider si, sur le cycle de vie de l'ouvrage, il est plus économique de dimensionner les fondations d'un pont isolé avec une réserve en ductilité correspondant à  $R = 2$ ;

- La comparaison des déplacements subits par l'ouvrage a été faite en utilisant des valeurs limites associées aux mouvements que peuvent accommoder les joints de dilatation usuels (joints simples : 100 mm, joints doubles : 160 mm, joints triples : 240 mm, joints quadruples : 320 mm);
- Les déplacements dus aux effets thermiques ne sont pas combinés aux déplacements dus aux sollicitations sismiques. Bien que des travaux soient en cours dans le but d'élaborer des règles à cet effet pour les prochaines éditions de la norme CAN/CSA S6, il n'est pas précisé dans l'édition actuelle de cette norme de quelle manière ces deux types de charges doivent être combinés. En pratique cependant, les ingénieurs utilisent différentes combinaisons basées sur les performances requises de l'ouvrage et sur leur expérience. Pour le prochain volet du mandat, une combinaison pourrait être choisie en collaboration avec le Ministère de sorte que l'analyse des coûts à faire prenne en compte cet élément;
- À des fins de simplification, l'étude paramétrique a été réalisée pour la direction longitudinale seulement. Il a été considéré qu'il n'y avait pas de gain significatif à faire sur le dimensionnement des unités de fondation en isolant la direction transversale.

En plus des hypothèses qui précèdent, mentionnons les limitations suivantes :

- La méthode d'analyse simplifiée utilisée n'a pas permis d'établir si la variabilité de la rigidité longitudinale des piles est un paramètre susceptible de donner un avantage sensible à l'utilisation d'isolateur sismique. Un pont avec des piles de rigidités différentes dans la direction longitudinale sera analysé lors de l'étude détaillée à venir;
- L'évaluation des paramètres de cette partie du mandat exclut les fondations profondes. Toutefois, ce paramètre sera traité dans le second volet du mandat;
- Un sol infiniment rigide est assumé pour les calculs avec la méthode de la charge uniforme. Ce paramètre sera aussi traité dans le second volet du mandat.

## 5.5 Présentation des résultats (volet 1 de l'étude)

Afin d'atteindre les objectifs discutés précédemment (voir la section 5.1 du présent rapport), les paramètres donnés au tableau 1 ont été combinés les uns avec les autres. Un total de cent cinquante-six (156) combinaisons a été traité afin d'identifier celles qui présentent un intérêt relativement à la rentabilité de l'isolation parasismique, et celles qui n'en présentent que peu ou pas. Différentes courbes ont donc été tracées afin de visualiser l'importance des paramètres étudiés et de permettre d'établir des tendances générales.

Afin d'établir l'influence des isolateurs sismiques sur le dimensionnement du pont, un indicateur de performance est proposé, ce dernier permettant d'évaluer l'importance relative de chacun des paramètres de conception et de comparer les différentes combinaisons considérées. Comme les charges sismiques ne sont reprises longitudinalement que par la pile sur laquelle est fixé le tablier du pont considéré, l'indicateur de performance retenu est la superficie de la semelle qui constitue la pile. En considérant que la dimension des colonnes supportant le tablier ne varie généralement pas significativement (comparativement aux semelles) en fonction des charges sismiques - les charges de gravité et l'esthétisme de l'ensemble de l'ouvrage dictant pour l'essentiel la dimension de ces éléments - , la superficie de la semelle est une mesure jugée représentative de l'envergure de la pile. C'est donc cette variable qui est retenue pour mesurer, dans le cadre de ce premier volet de l'étude, la performance des systèmes d'isolation sismique. Ainsi, plus l'isolation sismique sera performante, plus la superficie (comme le coût de construction) de la semelle de la pile sera réduite.

Dans ce qui suit, la superficie de la semelle (exprimée en mètres carrés) est déterminée en faisant, pour chaque cas considéré, la somme des moments au point de renversement, et ce, tout en limitant la surface de la semelle à une valeur minimale qui vise à éviter la rupture du sol de support. Cet indicateur de performance, présenté sous forme du **rapport I/C** (mètres carrés de semelle pour la conception isolée, sur mètres carrés de semelle pour la conception conventionnelle), permet donc de prendre en compte les paramètres de conception, en plus d'être directement lié aux quantités d'excavation et de béton nécessaires pour la construction des piles. Les autres éléments susceptibles de subir l'influence de la sollicitation sismique (diaphragmes d'extrémité, etc.) n'ont pas été considérés pour l'étude paramétrique.

### 5.5.1 Identification du potentiel de réduction de la taille de la pile du pont type considéré

Dans un premier temps, les différents paramètres de conception ont été combinés afin d'établir les gains potentiels maximal et minimal sur la réduction de la superficie de la semelle de la pile du pont considéré. Les combinaisons de paramètres donnant les réductions de superficie maximale et minimale sont présentées au tableau 2. Les extremums de l'indicateur de performance sont montrés sur la figure 6. Cette dernière permet de constater que l'isolation sismique d'un pont à deux travées peut se traduire par **une réduction de la dimension de la semelle de la pile allant jusqu'à près de 75 %** (voir le cas 1 sur la figure 6) alors que la réduction minimale obtenue est d'environ 5 % (voir le cas 2 sur la figure 6).

Les résultats présentés au tableau 2 permettent donc d'établir que l'isolation d'un pont de secours en béton armé (poutres et dalle) avec une pile peu élancée dans une zone à forte sismicité appuyée sur le roc constitue un excellent candidat à l'isolation sismique. À l'opposé, le même type de pont (béton armé), mais de catégorie urgence et constitué d'une pile plus élancée, et localisé dans une zone de plus faible activité sismique, ne constitue pas un candidat de premier choix pour l'isolation sismique.

**Tableau 2 – Combinaison de paramètres où l'indicateur de performance (rapport I/C) est le plus élevé (cas 1 : bon potentiel pour l'isolation) et le plus faible (cas 2 : peu de potentiel pour l'isolation)**

Cas 1	Cas 2
$l = 3,0$	$l = 1,5$
$A = 0,4$	$A = 0,1$
Sol type I	Sol type IV
$H = 6,0\text{m}$	$H = 12,0\text{ m}$
Tablier lourd (215 kN/m)	Tablier lourd (215 kN/m)
$\beta = 25\%$	$\beta = 15\%$

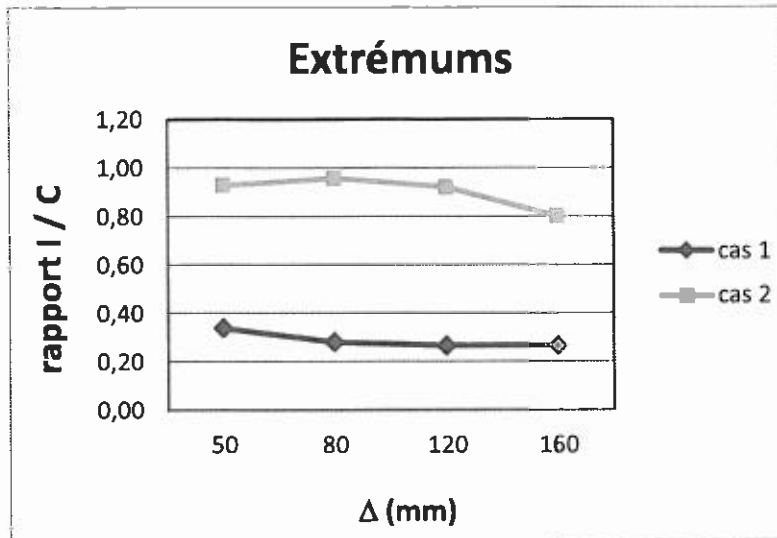


Figure 6 – Réductions maximale et minimale de la superficie de la semelle de la pile pour différents déplacements de la tête de la pile du pont considéré (combinaison de paramètres donnant les courbes extrémums)

### 5.5.2 Influence de l'isolation sismique sur les forces élastiques subies par la pile du pont type considéré

Dans un second temps, l'influence de l'isolation sismique sur les forces élastiques subies par l'ouvrage en cas de séisme a été évaluée pour la moyenne des paramètres de sol et de poids linéaire indiqués au tableau 1, un amortissement de 15 % et une hauteur de pile de 6 mètres. En considérant un déplacement permis de 50 mm sous un rapport d'accélération de la zone (A) de 0,1 ou 0,2, et de 100 mm sous un rapport de 0,3 ou 0,4, on obtient les résultats montrés à la figure 7. Les forces de calcul élastiques données par la méthode de la charge uniforme pour une conception isolée ( $F_{EI}$ ), selon les paramètres énoncés précédemment, sont donc limitées à environ 50 % de celles calculées pour une conception conventionnelle ( $F_{EC}$ ) dans le cas d'un pont d'urgence. **Pour un pont de secours, les forces de calculs élastiques transmises aux ponts isolés sont encore davantage réduites, celles-ci étant alors de l'ordre de seulement 25 % de celles obtenues pour une conception conventionnelle.** Cette comparaison n'est toutefois faite qu'à titre indicatif, puisqu'en réalité, la partie hors sol des unités de fondations des ponts de conception conventionnelle est rarement conçue pour demeurer élastique. Mentionnons, à titre comparatif, que la réduction des forces élastiques transmises aux unités de fondations anticipée par les fabricants de systèmes d'isolation est de l'ordre de 75 % (DIS, 2011).



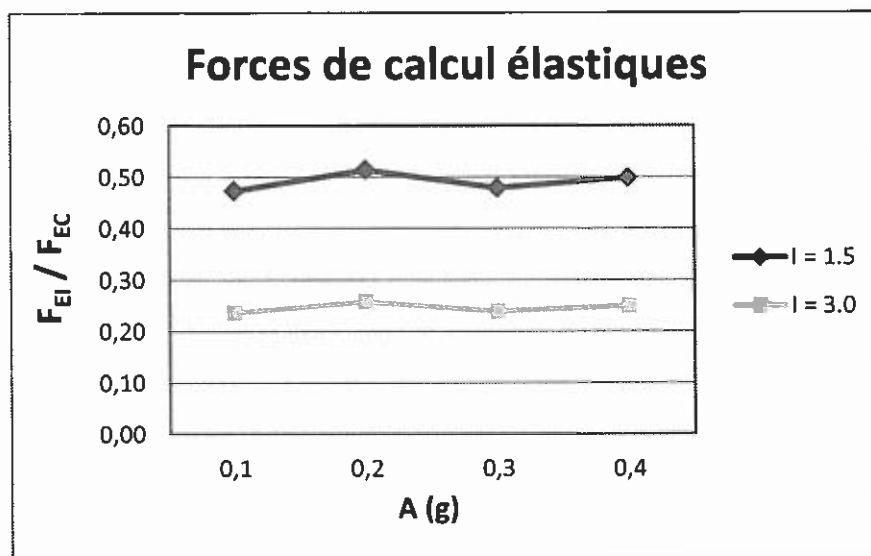


Figure 7 – Rapport des forces de calcul élastiques pour les ponts isolés (F<sub>EI</sub>) et conventionnels (F<sub>EC</sub>)

### 5.5.3 Évaluation de la rentabilité de l'isolation sismique en fonction des déplacements permis

Étant donné que l'isolation parasismique d'un pont vise à allonger la période de vibration de l'ouvrage afin de réduire les charges qui solliciteront les unités de fondation en cas de séisme, il est normal que le déplacement relatif du tablier par rapport à la pile (obtenu de l'analyse simplifiée, pour le pont type à deux travées décrit précédemment) soit plus important dans une conception isolée que dans le cas d'une conception conventionnelle. Par conséquent, on peut s'attendre à ce que l'isolation des ponts présente un intérêt d'autant plus important que les déplacements permis en cas de séisme sont importants. C'est d'ailleurs précisément cette tendance qui est montrée à la figure 8. En effet, cette figure permet de constater que l'intérêt pour l'isolation sismique augmente de 90 %, pour le pont à pile rigide, lorsque le déplacement permis en cas de séisme est augmenté de 50 à 160 mm. Par ailleurs, mentionnons que la figure 8 montre aussi que, toutes autres choses étant égales, le rapport I/C est plus faible pour un pont de faible hauteur que pour un pont dont les piles sont élancées. Cette observation rejoint celle qui avait été faite précédemment (voir la section 5.5.1).

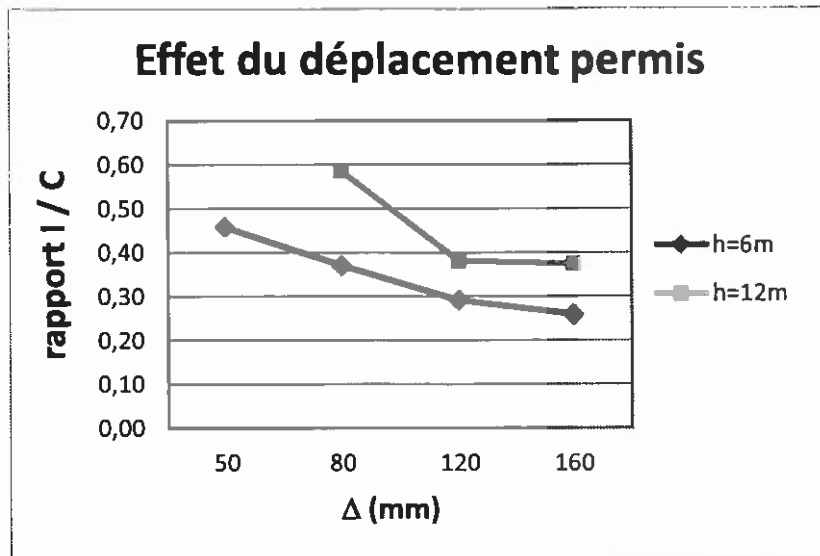


Figure 8 – Évaluation de la rentabilité de l'isolation sismique en fonction des déplacements permis

#### 5.5.4 Influence de la localisation de l'ouvrage sur la rentabilité de l'isolation sismique

Parmi les paramètres d'étude énumérés précédemment au tableau 1, l'accélération de la zone est un paramètre imposé par la localisation de l'ouvrage et exerce une influence linéaire sur la force sismique élastique à considérer, et ce, pour une conception conventionnelle comme pour une conception isolée. La figure 9 illustre l'influence de ce paramètre sur la rentabilité potentielle de l'isolation sismique pour un même pont, de catégorie secours ( $I = 3,0$ ) ou urgence ( $I = 1,5$ ), construit dans des zones de rendement sismique différentes. L'examen des résultats montrés sur la figure 9 montre d'abord que le rapport  $I/C$  ne varie pas de manière proportionnelle à la force élastique subie par le pont (en effet, plus les charges horizontales sont grandes, moins les charges de gravité contrôlent le dimensionnement). Aussi, la figure 9 illustre que l'intérêt de l'isolation sismique semble généralement croître comme le rapport d'accélération et l'importance du pont augmentent. Il convient de noter que si l'isolation sismique semble devenir moins intéressante dans la zone de rapport d'accélération plus importante, c'est en raison du déplacement maximal de 80 mm (joint double) considéré pour ce cas. Tel que mentionné précédemment, l'allongement de la période est nécessaire à la rentabilité de l'isolation, et elle nécessite un déplacement plus important de la structure par rapport à ses appuis.

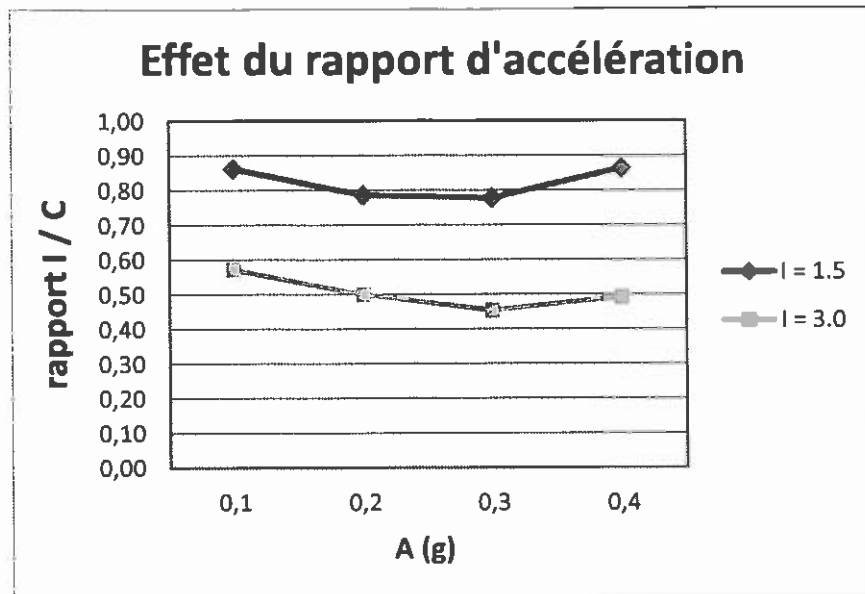


Figure 9 – Influence de la localisation de l'ouvrage sur la rentabilité de l'isolation sismique

### 5.6 Discussion des résultats du premier volet de l'étude

L'analyse de l'ensemble des résultats obtenus à ce jour permet d'établir que les conditions favorables à la rentabilité de l'isolation parasismique des ponts sont les suivantes :

- Zone de sismicité élevée;
- Ouvrage rigide, donc généralement de faible hauteur;
- Pont de secours;
- Déplacements permis suffisamment importants pour augmenter significativement la période de vibration;
- Sol de bonne qualité;
- Amortissement élevé du système;
- Tablier lourd (poutres en béton armé ou précontraint).

La rigidité des unités de fondation, les déplacements acceptés entre le tablier et les fondations, l'importance du pont, le rapport d'accélération de la zone et le poids linéaire du tablier sont les paramètres clés du dimensionnement. En effet, la rigidité des piles et le déplacement accepté sont des paramètres directement liés aux gains potentiels sur l'allongement de la période de vibration. Quant au rapport d'accélération de la zone et au poids linéaire du tablier, ils ont une influence relativement linéaire sur les forces et les déplacements subits par la structure, alors que l'importance du pont multiplie linéairement les forces, mais n'a pas d'impact sur les déplacements. Cependant, l'importance du pont amène des contraintes additionnelles, notamment celle de ne pas endommager le garde-grève pour un pont de secours. Les paramètres d'amortissement et de type de sol sont également à prendre en considération. Ils pourront d'ailleurs être modélisés et étudiés de manière plus satisfaisante dans le second volet de ce mandat.

Il convient de noter que l'hypothèse selon laquelle les déplacements dus aux effets thermiques ne sont pas combinés aux déplacements dus à la sollicitation sismique favorise, lorsqu'une conception isolée et une conception conventionnelle sont comparées, la conception isolée, puisque les joints de dilatation du pont isolé doivent généralement accommoder de plus grands déplacements afin que l'isolation soit intéressante.

Quelques observations ou limitations liées à l'utilisation de la méthode de la charge uniforme ont été notées lors de l'étude paramétrique :

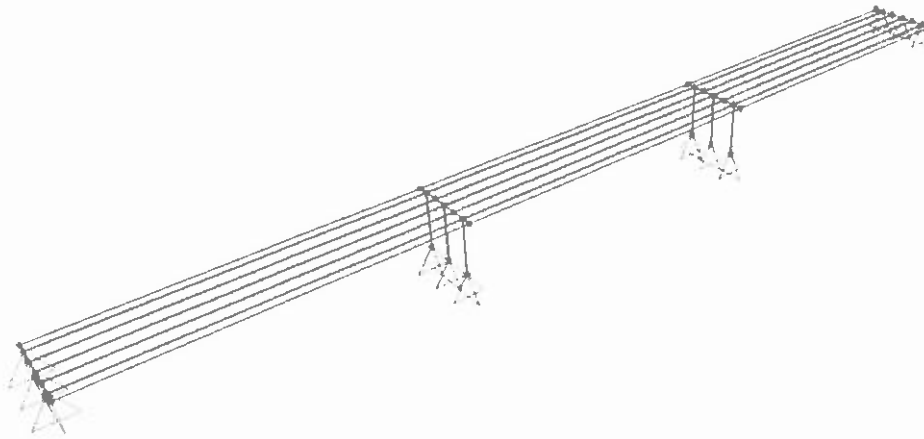
- La méthode prévoit l'addition des rigidités effectives des isolateurs d'une pile, mais il n'est pas clairement établi dans cette méthode si la rigidité de la pile (dans les systèmes isolés) doit être considérée dans le calcul de la période de vibration de l'ouvrage;
- Il est difficile d'évaluer comment l'amortissement intrinsèque de la structure se combine à celui des systèmes d'isolation;
- Lorsque les efforts sont grands et le déplacement accepté est faible, la conception des piles se trouve grandement influencée par les maximums imposés aux paramètres  $C_{sm}$  et  $C'_{sm}$ .

## 5.7 Perspectives de recherche pour l'étude détaillée à venir (volet 2 du mandat)

Les résultats obtenus dans le cadre du premier volet de cette étude ont permis d'établir les combinaisons de paramètres qui font en sorte qu'un pont peut être considéré (ou non) comme étant un bon candidat à l'isolation sismique. Par conséquent, à partir des résultats obtenus à ce jour, et dans le but d'étudier de manière plus approfondie les combinaisons de paramètres où l'isolation sismique serait vraisemblablement la plus rentable, il est proposé que certains types de ponts soient analysés en détail lors du second volet de ce mandat, soit ceux donnés au tableau 3. Notons enfin que contrairement au travail réalisé pour l'étude paramétrique, les combinaisons possibles des paramètres donnés au tableau 3 ne seront pas toutes étudiées, mais plutôt choisies en fonction de leur intérêt. Une quarantaine de combinaisons pourront être étudiées, et ce, à l'aide du logiciel d'analyse SAP 2000 (voir la figure 10).

**Tableau 3 – Type de ponts à considérer lors du second volet du mandat**

Paramètres	Pont type 1	Pont type 2	Pont type 3
Nombre de travées	3	5	5
Hauteur piles (m)	6	12	6 à 18
Déplacements permis (mm)	50, 80, 120	120, 160	120, 160
Importance (I)	1,5 et 3,0	1,5 et 3,0	1,5 et 3,0
Rapport d'accélération (A)	0,2, 0,3, 0,4	0,2, 0,4	0,2, 0,4
Ductilité fondation (R) conception conv.	3,0 et 5,0	3,0	3,0
Ductilité fondation (R) conception isolée	Élastique	2,0	Élastique
Poids tablier	Lourd	Lourd	Léger
% charge aux culées (cas isolé)	30, 80	50	30, 80
Appui des fondations	Roc	Roc, Pieux	Pieux



**Figure 10 – Modèle SAP2000 du pont type 1**

### **5.7.1 Plan de travail préliminaire de l'étude détaillée**

Pour l'étude détaillée, les principales étapes et points abordés seront :

- Objectifs particuliers;
- Méthodologie;
- Conception et modélisation;
- Réponse sismique des ouvrages;
- Analyse des coûts sur le cycle de vie;
- Revue des objectifs et synthèse.

## **6. LISTE DES RÉFÉRENCES**

- [1] Aviram, Ady et al. (2010). Structural response and cost characterization of bridge construction using seismic performance enhancement strategies, University of California, Berkeley;
- [2] Chen, W-F (2003). Earthquake Engineering Handbook. Hawaii;
- [3] Chopra, A. K. (2007). Dynamics of structures – Theory and applications to earthquake engineering, third edition, Californie;

- [4] CSA. (2006a) Canadian Highway Bridge Design Code. CAN/CSA S6-06 Standard;
- [5] CSA. (2006b) Commentary on CAN/CSA S6-06, Canadian Highway Bridge Design Code;
- [6] Dion, Cassandra (2010). Étude numérique et expérimentation du comportement dynamique des ponts avec isolateurs et amortisseurs sismiques;
- [7] Dynamic Isolation Systems (2011), Site internet : [www.dis-inc.com/](http://www.dis-inc.com/), date consulté : avril 2011;
- [8] Goodco Z-Tech (2011). Site internet : <http://www.goodcoztech.ws>, date consulté : avril 2011;
- [9] Guizani, L. (2003). Sur l'isolation sismique des ponts au Canada. 10<sup>e</sup> colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, Québec;
- [10] Guizani, L. (2007). Isolation sismique et technologies parasismiques pour les ponts au Québec : Mise au point. 14<sup>e</sup> colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, Québec;
- [11] LCL Bridge (2011), Site internet : [www.lcl-bridge.com/](http://www.lcl-bridge.com/), date consulté : avril 2011;
- [12] Massicotte, Bruno (2001). Notes de cours sur le calcul des ponts routiers. Montréal;
- [13] RJ Watson (2011). Site internet : [www.rjwatson.com/](http://www.rjwatson.com/), date consulté : avril 2011;
- [14] Taylor devices (2011), Site internet : [www.taylordevices.com/](http://www.taylordevices.com/), date consulté : avril 2011.

**ANNEXE 1**  
**FEUILLES DE CALCUL**



Calcul de la charge statique équivalente, méthode de la charge uniforme (CU) (CSA S6-06) (sans isolation de la base)

PARAMÈTRES		RÉFÉRENCE
A = 0,40	Rapport d'accélération de la zone	[CSA S6-06 tab A.3.1.1]
I = 1,5	Coefficient de priorité du pont	[CSA S6-06 Art. 4.4.7.1]
S = 1,0	Coefficient de site	[CSA S6-06 Art. 4.4.6.1]
w = 215 kN / m	Poids linéaire du pont	
W = 13244 kN	Poids du pont	
L = 61,6 m	Longueur totale du tablier	
H = 6,0 m	Hauteur de la pile	
<i>Hypothèses de calcul :</i> Rigidité du tablier dans son plan = infinie Rigidité du sol = infinie		
$f_c$ béton = 35 MPa	Résistance du béton	
$\gamma_b$ = 2400 kg/m <sup>3</sup>	Densité du béton	
$E_c$ béton = 26273 MPa	Module élastique béton	[CSA S6-06 Art. 8.4.1.7]

**DIRECTION LONGITUDINALE**

Rigidité longitudinale de l'ouvrage

Dans cette direction, la rigidité de l'ouvrage est celle de la pile

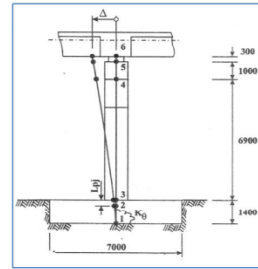
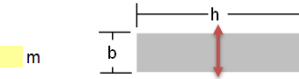
D = 1,45 m	$I_{g-poteau} = 0,217 \text{ m}^4$	$I_{g-poteau}$
$I_{g-poteau} = 0,217 \text{ m}^4$	$I_{g-poteau}$	
$I_{g-poteau} = 0,217 \text{ m}^4$	$I_{g-poteau}$	
$V_{s-max} = 2,10E-08 \text{ m/N}$		
$K_{long. - poteau} = 47,5 \text{ kN/mm}$		
$K_{long. - pile} = 190,0 \text{ kN/mm}$		

b = m h = m

Inertie d'un poteau dans la direction longitudinale  
Réduction de l'inertie selon potentiel de fissuration

Déplacement par unité de force au haut de la ou des pile(s)

Rigidité longitudinale d'un poteau  
Nombre de poteaux  
Rigidité longitudinale de la ou des pile(s)



rect. :  $(b \cdot h^3) / 12$   
circ. :  $(\pi \cdot D^4) / 64$   
[B. Massicotte, p.4-20]

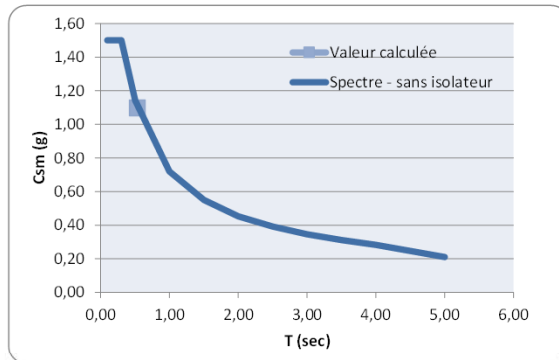
$[H^3 / 3E_c]$

$[1 / V_{s-max}]$

[CSA S6-06 art. 4.4.7]

Calcul du coefficient de réponse sismique élastique

T = 0,53 seconde	Période de vibration de la structure
$C_{sm} = 1,100 < 2,5 A I = 1,500$	
$C_{sm} = 1,100 \text{ g}$	



Calcul de la charge statique équivalente et du déplacement correspondant

$P_e = 236,49 \text{ kN/m}$	Charge statique équivalente
$P_{élastique} = 14568 \text{ kN}$	Charge sismique élastique
$\Delta_{pile} = 76,7 \text{ mm}$	Déplacement statique équivalent
R = 5,0	Facteur de modification de réponse
$P_{total} = 2914 \text{ kN}$	Charge sismique de calcul

[CSA S6-06 Art. 4.4.8.1]

**DIRECTION TRANSVERSALE**

Calcul de la rigidité transversale de l'ouvrage

(Modélisation numérique)

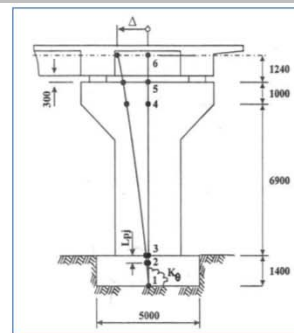
Étude de la rigidité transversale - tablier, pile(s), culée(s)

K = 1000 kN/mm	$K = p_o L / V_{s-max}$
----------------	-------------------------

[CSA S6-06 art. 4.5.3.1]

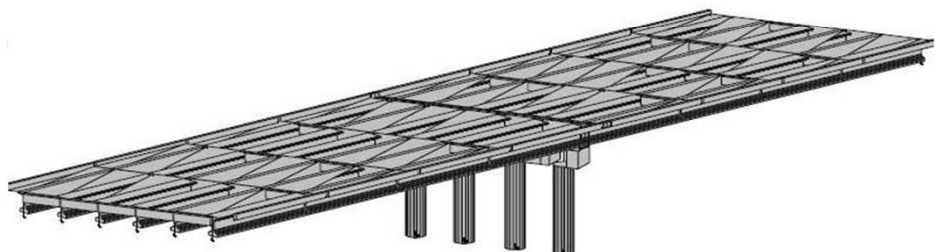
Calcul du coefficient de réponse sismique élastique

T = 0,23 seconde	Période de vibration
$C_{sm} = 1,913 < 2,5 A I = 1,500$	
$C_{sm} = 1,500$	



Calcul de la charge statique équivalente et du déplacement

$P_e = 323 \text{ kN/m}$	Charge statique équivalente (ADA)
Déplacement transversal de la pile = mm	
Charge sismique transversale sur la pile = kN	
Charge culée 1 = kN	
Charge culée 2 = kN	



Calcul de la charge statique équivalente, méthode de la charge uniforme (CU) (CSA S6-06) (avec isolation de la base)

PARAMÈTRES			RÉFÉRENCE
A = 0,40	Rapport d'accélération de la zone	Hypothèses de calcul :	[CSA S6-06 tab A.3.1.1]
l = N/A		Rigidité du tablier dans son plan = infinie	
S <sub>i</sub> = 1,0	Coefficient de site modifié	Rigidité du sol = infinie	[CSA S6-06 Art. 4.10.4]
w = 215 kN / m	Poids linéaire du pont		
W = 13244 kN	Poids du pont	f <sub>c béton</sub> = 35 MPa	Résistance du béton
L = 61,6 m	Longueur totale du tablier	γ <sub>b</sub> = 2400 kg/m <sup>3</sup>	Densité du béton
H = 6,0 m	Hauteur de la pile	E <sub>c béton</sub> = 26273 MPa	Module élastique béton
			[CSA S6-06 Art. 8.4.1.7]

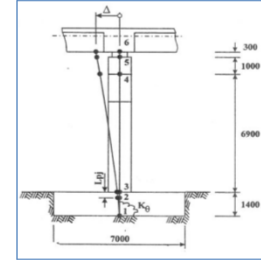
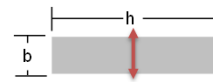
**DIRECTION LONGITUDINALE - isolée**

Rigidité longitudinale de l'ouvrage sous le système d'isolation

Rigidité de la pile

D = 1,60 m	
I <sub>g-poteau</sub> = 0,322 m <sup>4</sup>	
I <sub>effectif-poteau</sub> = 0,60 I <sub>g-poteau</sub>	
V <sub>s-max</sub> = 1,42E-08 m/N	
K <sub>eff (poteau)</sub> = 70,4 kN/mm	
K <sub>eff (pile)</sub> = 281,7 kN/mm	

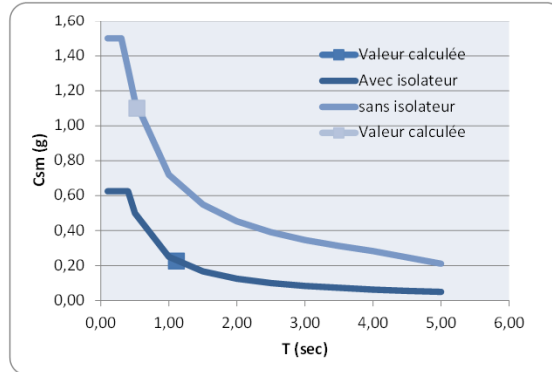
b = [ ] m	
Inertie d'un poteau dans la direction longitudinale	
Réduction de l'inertie selon potentiel de fissuration	
h = [ ] m	
Déplacement par unité de force	
Rigidité longitudinale d'un poteau	
Nombre de poteaux	
Rigidité longitudinale de la ou des pile(s)	



rect. : (b\*h<sup>3</sup>)/12  
circ. : (pi\*D<sup>4</sup>)/64  
[H<sup>3</sup> / 3EI<sub>g</sub>]  
[1 / V<sub>s-max</sub>]

Calcul du coefficient de réponse sismique élastique

β = 25 %	% de l'amortissement critique
B = 1,60	Coefficient d'amortissement
T <sub>e</sub> = 1,11 seconde	Période de vibration du pont isolé
C <sub>sm</sub> = 0,225 < 2,5 A / B = 0,625	
C <sub>sm</sub> = 0,225 g	



[CSA S6-06 cl. 4.10.6.2.1]

[CSA S6-06 tab. 4.8]

[CSA S6-06 cl. 4.10.6.2.1]

Calcul de la charge statique équivalente et du déplacement du haut de la pile

P <sub>e</sub> = 48,42 kN/m	Charge statique équivalente
P <sub>élastique</sub> = 2983 kN	Charge sismique élastique
Δ <sub>pila</sub> = 10,6 mm	Déplacement statique équivalent du haut de la pile
Δ <sub>isolateur</sub> = 69,4 mm	Déplacement du système d'isolation - entre le haut de la pile et le tablier
Δ <sub>total</sub> = 80,0 mm	Déplacement total du tablier
R = 1,0	Facteur de modification de réponse
P <sub>total</sub> = 2983 kN	Charge sismique de calcul

R = 1,0 pour pont de secours ou pont d'urgence	
--	--

[CSA S6-06 art. 4.10.5]

**DIRECTION TRANSVERSALE - non isolée**

Calcul de la rigidité transversale du tablier

(Modélisation numérique)

Étude de la rigidité transversale - tablier, pile(s), culée(s)

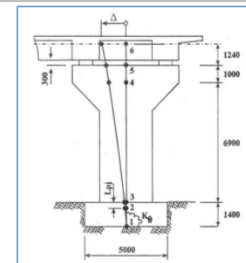
K = 1000 kN/mm      K = p<sub>o</sub> L / V<sub>s-max</sub>

Calcul du coefficient de réponse sismique élastique

T = 0,23 seconde	Période de vibration
C <sub>sm</sub> = 1,083 < 2,5 A / B = 0,625	
C <sub>sm</sub> = 0,625	

Calcul de la charge statique équivalente et du déplacement

P <sub>e</sub> = 134 kN/m	Charge statique équivalente (ADA)
Déplacement transversal de la pile = [ ] mm	
Charge sismique transversale sur la pile = [ ] kN	
Charge culée 1 = [ ] kN	
Charge culée 2 = [ ] kN	



[CSA S6-06 art. 4.5.3.1]

[CSA S6-06 cl. 4.10.6.2.1]

