

## **Microzonage et vulnérabilité sismique des ponts de la Ville de Québec**

Marie-José Nollet, ing. Ph.D., Professeure,  
Département de génie de la construction, École de technologie supérieure

Denis LeBoeuf, ing. Ph.D., Professeur,  
Département de génie civil, Université Laval

Amar, Khaled, ing. M.Sc.A., Professeur,  
Département de génie de la construction, École de technologie supérieure

### **Résumé**

Une gestion rationnelle du risque sismique dans une agglomération urbaine doit s'appuyer sur une démarche rigoureuse de caractérisation de l'aléa, comprenant un microzonage sismique et une quantification de la vulnérabilité des structures et infrastructures. C'est cette problématique, appliquée à la ville de Québec, qui fait l'objet d'un projet conjoint entre la sécurité civile de la Ville de Québec, l'Université Laval et l'École de technologie supérieure. Le but poursuivi par ce projet est de définir les priorités d'intervention afin d'améliorer le niveau de préparation en cas de séisme, et d'en arriver à délimiter des zones où le risque sismique est significatif. Les outils développés dans la première phase de ce projet s'intègrent dans un système de gestion de l'information à trois niveaux conçus pour traiter et modéliser l'ensemble des données géotechniques et structurales (bâtiments, ponts, viaducs et infrastructures). Les cartes de microzonage sismique produites dans le cadre de ce projet ont permis de vérifier la présence d'unités géologiques susceptibles aux effets de site d'origine sismique. Ce travail de microzonage s'est concentré sur l'inventaire de l'information géotechnique, l'élaboration d'une classification sismique du territoire de la Ville de Québec, selon la nouvelle approche du CNBC 2005 (classes A, B, C, D, E) et l'évaluation des rapports d'amplification spectrale. L'évaluation de la vulnérabilité sismique des ponts repose sur l'identification de paramètres caractérisant la structure et les déficiences sismiques et sur l'identification des effets de site. Deux méthodes d'évaluation (celle du MTQ et du NYDOT) ont été appliquées aux ponts et viaducs de la Ville de Québec.

### **1. Introduction**

Les catastrophes naturelles, dont les tremblements de terre, posent des défis aigus aux gestionnaires de sécurité civile et de grands systèmes urbains. Elles font de plus en plus partie de la nouvelle réalité avec laquelle les décideurs publics doivent maintenant composer. Plusieurs facteurs expliquent cette nouvelle situation. Parmi ceux-ci, citons la fragilisation croissante du parc immobilier et d'infrastructures, en raison principalement de son vieillissement, l'évolution constante des codes du bâtiment, incluant le CNBC (2005), généralement vers un plus grand degré de protection par l'introduction de critères parasismiques de plus en plus sévères et, finalement, l'accroissement remarquable des connaissances en génie parasismique et en sismologie depuis une vingtaine d'années. En relation avec ce dernier facteur, l'expérience acquise lors des récents grands tremblements de terre, notamment Mexico (1985), Loma Prieta (1989) et Kobe (1995), ont tragiquement démontré l'impact énorme des effets de site (tels que la présence de dépôts alluvionnaires, la topographie et les propriétés mécaniques des sols).

Cette nouvelle réalité a amené les gestionnaires de la Ville de Québec à s'interroger sur la vulnérabilité sismique de son parc immobilier et des infrastructures et les a conduit à vouloir se doter de nouveaux outils méthodologiques et informatiques pour leur permettre de composer rationnellement et efficacement avec le risque sismique

Cette communication a pour but de présenter les grands éléments d'une méthodologie simple et pratique développée pour évaluer rapidement la vulnérabilité sismique d'un parc important d'infrastructures urbaines. Le but de la méthodologie est de développer un système d'évaluation qui rendra possible une priorisation rationnelle des différentes interventions.

La méthodologie comporte deux volets fondamentaux, à savoir, d'une part, un microzonage sismique du territoire de la Ville de Québec et, d'autre part, le développement d'une nouvelle approche d'identification des ouvrages les plus vulnérables aux séismes. Ce projet a été réalisé dans le cadre du programme conjoint de protection civile Canada et s'adresse en particulier à la problématique des structures que sont les ponts et viaducs.

Une des caractéristiques de cette méthode est de s'appuyer sur des données structurales et géotechniques facilement accessibles. Les deux volets de cette méthode seront successivement présentés et leur application dans le contexte de la Ville de Québec sera également discutée.

## **2. Microzonage sismique**

### **2.1 Considérations générales**

Le microzonage sismique est une technique qui vise à prendre en compte de façon plus réaliste et précise les effets de site sur l'aléa sismique local. Plusieurs approches sont disponibles et le choix ultime dépendra de la finalité du processus d'évaluation, dans lequel le microzonage s'inscrit, et des données et ressources disponibles.

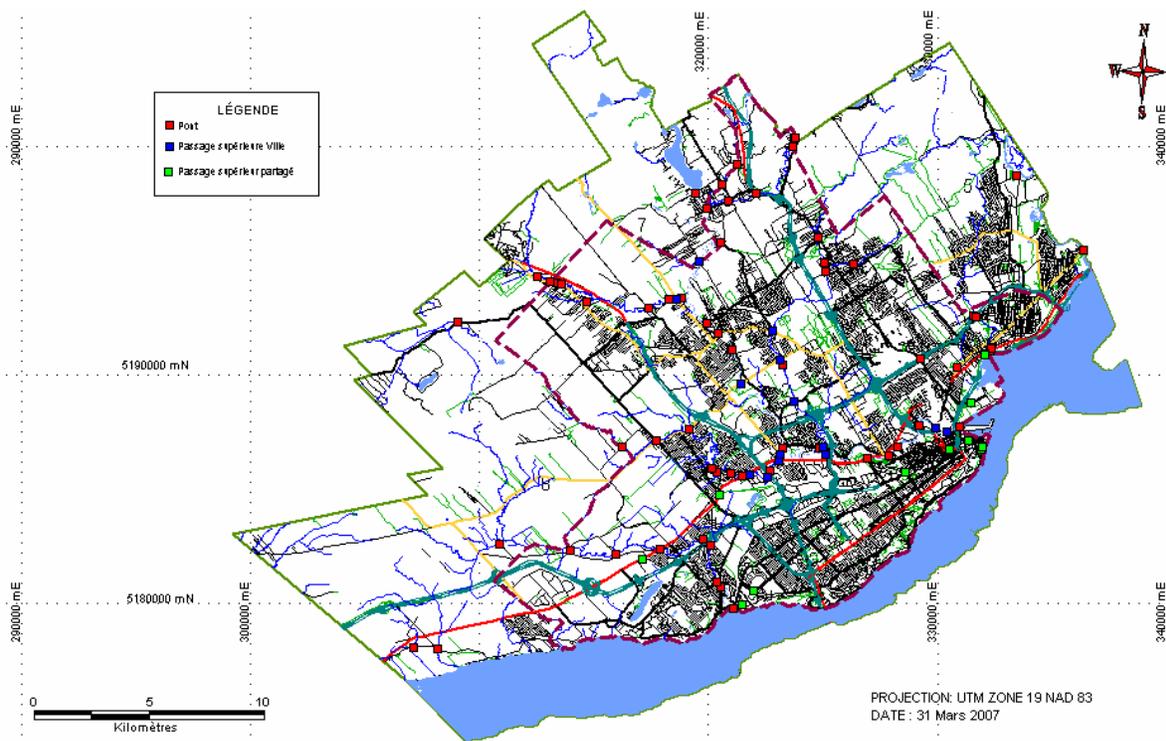
Les effets de site se catégorisent en fonction des conséquences potentielles qu'auront les vibrations sismiques sur le roc ou les dépôts de sols locaux. En pratique, pour simplifier, on regroupe les effets de site en «*déplacements permanents*» et «*déplacements transitoires*». Les «*déplacements permanents*» des sols regroupent les cas de rupture de sol par liquéfaction ou glissements de terrain de même que les problèmes de tassements et de fissurations. Les «*déplacements transitoires*» concernent les modifications des signaux sismiques (positives, comme l'amplification, ou négatives) et sont généralement reliées aux contrastes d'impédance. Ces évaluations d'effets de site sont complexes et l'effort s'est porté, dans un premier temps, vers l'aléa «*déplacements transitoires*», caractérisé ultimement par la détermination des facteurs d'amplification.

Les problématiques de liquéfaction et de stabilité des pentes seront évaluées séparément. Le microzonage sismique se fait à l'échelle locale et s'appuie sur les données du nouveau zonage sismique régional canadien (CNBC 2005) pour la Ville de Québec.

## 2.2 Méthodologie

La procédure de microzonage développée pour la Ville de Québec visait également des objectifs fonctionnels de rapidité et de simplicité de mise en œuvre ainsi que d'optimisation de l'information géologique et géotechnique déjà acquise par la Ville de Québec. Le projet a aussi tiré profit de l'expérience acquise antérieurement par des collègues de l'Université Laval lors de la cartographie géotechnique et sismique de la Ville de Québec (équipe du Pr. Chagnon). Les paramètres de base du microzonage sont l'épaisseur et les caractéristiques lithologiques et mécaniques des dépôts de sols rencontrés ainsi que les caractéristiques du socle rocheux. Les principales étapes de la démarche de microzonage sont: (i) la délimitation du domaine à l'étude, (ii) la modélisation et la caractérisation de site permettant de représenter la topographie du roc et de produire des images 2D ou même 3D de modèles géotechniques, et (iii) l'analyse des effets de site reliés au phénomène d'amplification et permettant de produire des cartes de susceptibilité aux aléas sismiques.

Le territoire étudié est illustré sur la carte de Figure 1. La faible disponibilité de données géotechniques dans certains secteurs a limité l'envergure de la couverture cartographique.



**Figure 1** – Carte du territoire à l'étude et localisation des ponts et viaducs

La caractérisation et la modélisation des sites utilisent l'ensemble des données environnementales (aléa sismique régional, topographie, données hydrologiques, routes et infrastructures) et géotechniques (puits, forages, essais in-situ, etc.) disponibles. Les données

géotechniques n'étaient disponibles qu'en format papier et ont donc dû être d'abord saisies et numérisées pour être ensuite intégrées dans une base de données relationnelles et un SIG (système d'informations géographiques).

L'analyse des effets de site s'est concentrée uniquement, pour ce projet-ci, sur l'aléa amplification et a procédé en deux temps. Tout d'abord, une cartographie locale des catégories de site du CNBC 2005 (A, B, C, D et E) a été préparée à partir d'une analyse des données géotechniques. Le potentiel d'amplification de l'emplacement a ensuite été estimé en utilisant les facteurs d'amplification  $F_a$  et  $F_v$  dérivant des catégories de site (ou emplacement) du CNBC. Les catégories sismiques de site du CNBC 2005 sont présentées au Tableau I et sont basées sur le calcul d'un paramètre mécanique moyen  $\bar{Y}_{30}$  jusqu'à une profondeur de 30 m sous la surface (incluant même le socle rocheux, s'il est rencontré). Le paramètre  $\bar{Y}_{30}$  peut être évalué à partir de trois paramètres mécaniques : 1)  $\bar{V}_{s-30}$ , la vitesse moyenne des ondes de cisaillement, 2)  $\bar{N}_{1-30}$ , où  $N_1$  est l'indice de pénétration standard, obtenu lors de l'essai SPT, normalisé à une pression effective verticale de 100 kPa, et, pour les sols argileux, 3)  $\bar{S}_{u-30}$ , la résistance au cisaillement non drainé généralement mesuré au scissomètre de chantier. Le paramètre  $V_s$  est, idéalement, mesuré en forage, par des méthodes de type cross-hole ou down-hole. Pour une approche en cartographie régionale ou locale, une estimation de  $V_s$  à partir de relations empiriques bien établies, entre certains paramètres géotechniques et  $V_s$ , a été considérée satisfaisante.

**Tableau I**  
**Catégorisation sismique des emplacements (CNBC, 2005)**

CLASSIFICATION DU SITE	DESCRIPTION GÉOLOGIQUE DU SOL AU SITE	DESCRIPTION GÉOTECHNIQUE DU SOL AU SITE
<b>A</b>	<i>Roc sain</i>	$\bar{V}_{s-30} > 1\ 500\ m/s$
<b>B</b>	<i>Roc</i>	$760\ m/s < \bar{V}_{s-30} < 1\ 500\ m/s$
<b>C</b>	<i>Sol très compact ou roc fracturé</i>	$360\ m/s < \bar{V}_{s-30} < 760\ m/s$ ou $\bar{N}_{1-30} > 50$ ou $\bar{S}_{u-30} > 100\ kPa$
<b>D</b>	<i>Sol raide</i>	$180\ m/s < \bar{V}_{s-30} < 360\ m/s$ ou $15 < \bar{N}_{1-30} < 50$ ou $50\ kPa < \bar{S}_{u-30} < 100\ kPa$
<b>E</b>	<i>Sol argileux ou argile molle</i>	$\bar{V}_{s-30} < 180\ m/s$ ou $I_p > 20$ , $w > 40\%$ et $\bar{S}_{u-30} < 25\ kPa$
<b>F</b>	Sites nécessitant une analyse géotechnique particulière : 1. Sols vulnérables à la rupture ou à l'effondrement sous chargement sismique 2. Tourbe ou argile très organique d'une épaisseur supérieure à 3 mètres 3. Argile très plastique d'une épaisseur supérieure à 8 mètres et $I_p > 75$	

Le CNBC a introduit également une catégorie spéciale F qui comprend les sols difficiles, liquéfiables ou sensibles (argiles sensibles ou extra-sensibles). Ces sites doivent faire l'objet d'une étude géotechnique particulière. L'identification de site de catégorie F exige donc une évaluation spéciale et, pour ces raisons, n'a pas fait partie de ce projet.

Notons que le processus de microzonage est extrêmement flexible et puissant car l'informatisation des données, par leur intégration dans une base de données et un système d'informations géographiques, rend possible un grand nombre de manipulations mathématiques pouvant servir à produire diverses cartes géotechniques dérivées, comme une cartographie des iso-valeurs de  $\bar{V}_s$  sur l'épaisseur du dépôt.

### 2.3 Données géotechniques

Les données géotechniques utilisées dans ce projet proviennent des archives de Ville de Québec, d'Hydro-Québec et du Ministère des transports du Québec. Ces données sont regroupées dans une base de données qui constitue un outil de gestion et de consultation. La grande majorité des données géotechniques utilisées dans ce projet proviennent d'études géotechniques réalisées sur le territoire de la ville de Québec. Au total, les données de 2 283 forages ont été compilées.

Les données géotechniques recueillies sont de deux types : celles provenant d'essais de terrain et celles provenant d'essais en laboratoire. Dans la première catégorie sont regroupés les essais les plus fréquemment utilisés dans le domaine au Québec. On retrouve l'essai de pénétration standard (SPT), le scissomètre de chantier et le piézocône. Les essais en laboratoire pouvant fournir des données géotechniques sur les sols en place sont l'essai au cône suédois, l'essai de scissomètre de laboratoire ( $V_l$ ) ainsi que la masse volumique du sol et les limites d'Atterberg (limites liquides et plastiques).

Par ailleurs, sept sondages au piézocône sismique ont été réalisés par la firme Techmat Inc., de Saguenay en décembre 2006. La sonde de type *Conetec* utilisée est équipée d'un géophone permettant la mesure directe du paramètre  $V_s$ . Ces sondages ont été réalisés près de ponts et viaducs à l'étude et ont permis de déterminer les conditions d'aléa local auxquelles ces ouvrages sont exposés et d'évaluer le potentiel de liquéfaction des sols.

### 2.4 Résultats

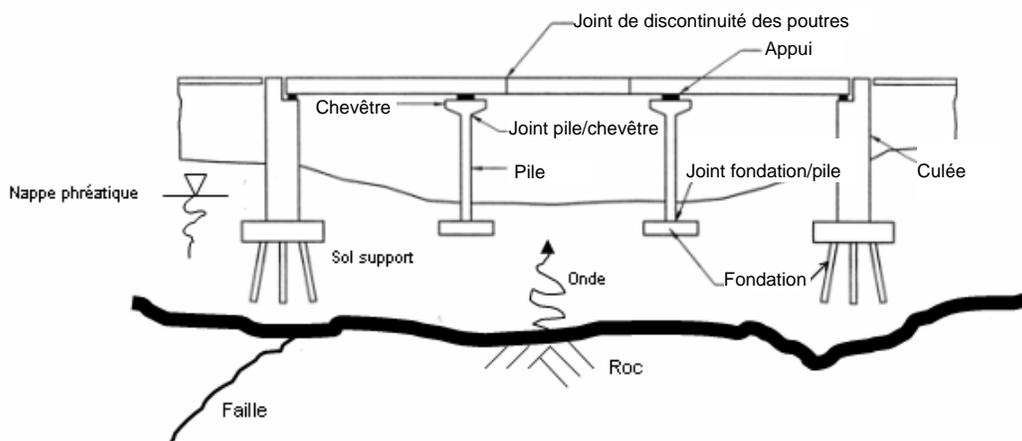
Différentes versions des cartes de microzonage sismique seront présentées lors de la présentation orale à la conférence.

## 3. Évaluation de la vulnérabilité sismique des ponts

### 3.1 Paramètres sismiques

L'étude des dommages subis à la suite des derniers tremblements de terre aux États-Unis (San Fernando 1971, Loma Prieta 1989, Northridge 1994), au Japon (Kobé 1995), au Canada (Saguenay 1988) et dans d'autres régions à travers le monde (El-Asnam 1980, Costa Rica 1991, Kocaeli 1999) a permis de mieux comprendre la nature des mouvements sismiques et d'identifier les faiblesses des éléments structuraux des ponts et le comportement des fondations et des sols

sur lesquels elles reposent (Mitchell et Tinawi 1992, Priestley et coll. 1994, CAEE 1995, Anderson et coll. 1996, Yashinski 1998, Kawashima 2000, Saatcioglu et coll. 2001, Priestley et coll. 1996). Au niveau des structures, l'expérience a démontré que les dommages subis par les ponts et les viaducs les plus fréquemment observés sont : (i) la perte d'appuis des travées, (ii) la rupture des colonnes et des piles, (iii) la rupture des culées servant de murs de soutènement, et (iv) l'effondrement ou l'affaissement du remblai situé aux accès des ponts. Il est reconnu que la dissipation de l'énergie induite par les vibrations sismiques dépend des principaux éléments structuraux d'un pont, soient : le tablier, le système d'appui, les piles, les culées et les fondations. Par ailleurs, la nature du sol et les effets de sites qui en résultent contribuent grandement à augmenter la vulnérabilité sismique des ouvrages. (Figure 2).



**Figure 2** – Parties constitutives d'un système sol-pont

### 3.2 Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique

Dans le cadre de ce projet, l'objectif de l'évaluation de la vulnérabilité sismique des ponts et viaducs est d'identifier les ouvrages les plus vulnérables sur la base de données facilement accessibles. Cet objectif est atteint par le biais d'un classement indiciel et d'un classement par classe (quatre) des ponts et viaducs en fonction de leur vulnérabilité sismique. Trois méthodes ont été retenues : (i) la méthode du Ministère des transports du Québec, modifiée pour tenir compte des nouvelles dispositions du CNBC 2005 en matière de sismicité (MTQ modifiée), et (ii) la méthode du *New York Department of Transportation* (NYDOT) permettant un classement sommaire en quatre classes et, (iii) une nouvelle méthode développée dans le cadre du projet. Les étapes principales de l'évaluation des ponts et viaducs sont les suivantes :

1. Cueillette de l'information disponible sur les ponts (localisation, année de construction, matériau, etc.)
2. Inspection sommaire pour obtenir les caractéristiques générales (paramètres structuraux et non-structuraux) qui permettront d'attribuer un indice de vulnérabilité sismique à l'ouvrage (voir Tableau II).

3. Évaluation de la sismicité régionale et de la classe sismique de site permettant d'attribuer un indice de susceptibilité à l'amplification sismique du site.

**Tableau II -  
Caractéristiques générales des ponts et viaducs servant à l'évaluation de la vulnérabilité sismique**

Types de caractéristiques	Description
Générales	Type de pont selon le matériau (bois, acier, béton) et la configuration structurale (portique, poutres, à béquilles, poutres-caissons, etc..) et selon la classification du MTQ (MTQ 2007a)
	Présence de services publics (aucun, éclairage, électricité, gaz naturel, aqueduc, etc...)
Reliées au tablier	Présence de discontinuités structurales
	Présence d'un biais entre les axes principaux du pont et les axes des appuis
	Rigidité du tablier (reliée au nombre de poutres ou à la présence d'une dalle)
Reliées au système d'appui	Complexité structurale (pont avec ou sans piles à hauteur variable)
	Type de pile : à colonne unique, à colonnes multiples, banc, fût ou caisson
	Type d'appareil d'appui (appui à pendule ou autres)

### 3.3 Méthode du MTQ modifiée

La méthode MTQ s'appuie sur l'aléa sismique régional, les conditions de sol et des caractéristiques structurales et non structurales d'un pont ou d'un viaduc (MTQ 2007b). À noter que cette méthode a été élaborée sur la base des travaux de recherche réalisés à l'École Polytechnique de Montréal et que sa version officielle n'est pas encore disponible.

Dans le cadre de ce projet, la méthode du MTQ a été modifiée afin d'être conforme aux nouvelles données d'aléa sismique régional et à la nouvelle catégorisation sismique des sites du CNBC 2005. Elle permet de calculer un indice de vulnérabilités numérique désigné *IVS*. Cet indice *IVS* varie entre 0 et 100, 100 représentant le plus haut niveau de vulnérabilité (pour la ville de Québec la valeur minimale de l'*IVS* est de 40). L'*IVS* est donné par l'expression suivante :

$$[1] \quad IVS = 100 - \left[ RS \times FF \times FA \times \sum_{i=1}^{i=8} \omega_i \times C_i \right]$$

où les variables sont définies par :

**RS** : Facteur de risque sismique qui dépend de l'aléa sismique régional déterminé par le CNBC 2005 exprimé en termes de niveau de sismicité défini selon les critères du FEMA 310 (ASCE, 1998) et décrit au Tableau III.

**Tableau III -  
Critères d'identification du niveau de sismicité (ASCE 1998)**

NIVEAU DE SISMICITÉ	Sa <sub>0,2</sub>	Sa <sub>1,0</sub>
<i>Élevé</i>	> 0,500 g	> 0,200 g
<i>Modéré</i>	0,167 g à 0,500 g	0,067 g à 0,200 g
<i>Faible</i>	< 0,167 g	< 0,067 g

- FF*** : Facteur de fondation qui s'appuie sur la catégorisation sismique des sites du CNBC 2005 décrite au Tableau I allant de roc sain (classe A) à un sol mou (classe E). Pour un sol de classe F, pour lequel une étude géotechnique spéciale est nécessaire, un avis de risque géotechnique doit être émis à la place d'un calcul de l'indice *IVS*.
- FA*** : Facteur d'âge qui prend en considération la date de la construction de l'ouvrage.
- C<sub>i</sub>*** : Coefficient d'influence sismique qui tient compte de la vulnérabilité des éléments structuraux et non structuraux décrits au Tableau II.
- ω<sub>i</sub>*** : Coefficient qui représente la pondération de chaque éléments (*i*).

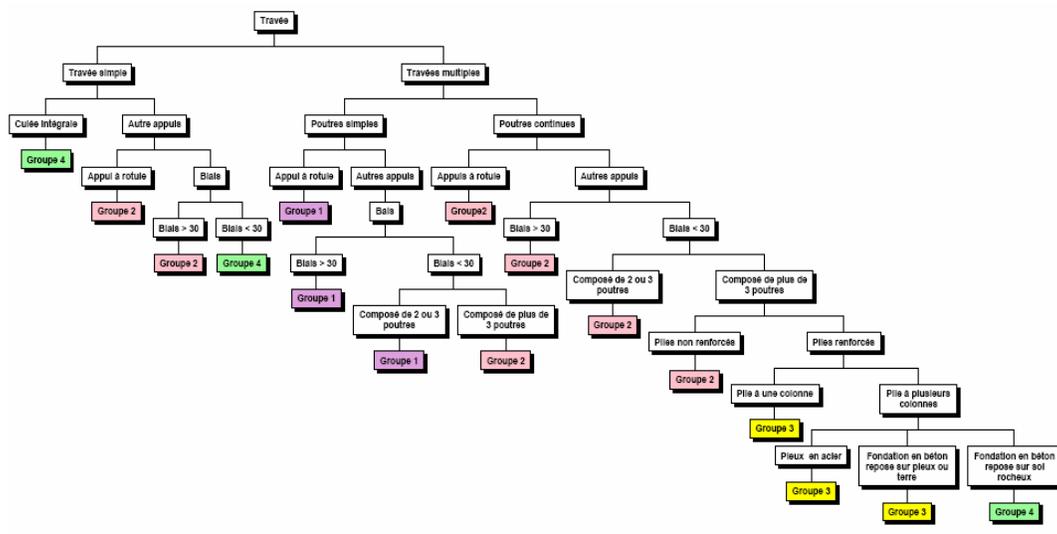
Les valeurs attribuées aux différents facteurs et coefficients d'influence sismique servant à calculer l'indice de vulnérabilité sismique dépendent de leur contribution relative à la vulnérabilité sismique générale de l'ouvrage. Le facteur de risque sismique *FS* représente un élément clé pour le calcul de la vulnérabilité sismique des ponts puisqu'il représente la probabilité d'occurrence d'un événement sismique majeur en un lieu donné, pour une intensité donnée. Cependant, lorsqu'on considère les ouvrages situés sur un même territoire, par exemple sur le territoire de la ville de Québec, l'aléa sismique régional est le même et ne constitue donc pas un facteur discriminant. La prise en compte des conditions du sol local par le biais du facteur *FF* permet d'évaluer la vulnérabilité des ponts en relation avec l'effet d'amplification des mouvements sismiques (aléa sismique local).

### 3.3 Méthode du NYDOT

La méthode NYDOT a été développée par le *New York Department of Transportation* (NYDOT 1995). Cette méthode ne considère pas l'aléa sismique régional ou local et utilise un algorithme de classification des ponts et viaducs pour regrouper les ouvrages selon leurs caractéristiques structurales (travées simples ou multiples, appuis à rotules, biais, nombre de poutres, etc.) et les fondations (pieux) (voir Figure 3). À chaque groupe d'ouvrage, la méthode associe une classe de vulnérabilité sismique à laquelle correspond un niveau de priorité d'intervention, tel que présenté au Tableau IV.

**Tableau IV -  
Classement de la vulnérabilité sismique selon le NYDOT**

<b>GROUPE DE PONTS</b>	<b>CLASSE DE VULNÉRABILITÉ</b>	<b>NIVEAU DE PRIORITÉ D'INTERVENTION</b>
<i>Groupe 1</i>	<i>Classe 1</i>	<i>Très élevé</i>
<i>Groupe 2</i>	<i>Classe 2</i>	<i>Modérée à élevée</i>
<i>Groupe 3</i>	<i>Classe 3</i>	<i>Faible à modéré</i>
<i>Groupe 4</i>	<i>Classe 4</i>	<i>Faible</i>



**Figure 3** – Algorithme de classification des ponts selon le NYDOT

### 3.3 Évaluation des ponts et viaducs de la Ville de Québec

Au total, 124 ponts et viaducs, répartis sur l'ensemble du territoire à l'étude, ont été étudiés dans le cadre de ce projet (voir Figure 1). Les résultats généraux obtenus pour ces ponts et viaducs par le calcul de l'indice de vulnérabilité sismique de la méthode MTQ modifiée et la classe de vulnérabilité du NYDOT, seront présentés lors de la communication orale. Ces résultats permettent d'identifier les ouvrages dont la vulnérabilité sismique est la plus critique.

Par ailleurs, l'analyse des résultats obtenus a permis d'établir les bases d'une nouvelle méthode d'évaluation. L'objectif de cette nouvelle méthode est de refléter la prépondérance du rôle de certains éléments structuraux dans l'évaluation de la vulnérabilité sismique et de mettre en évidence l'influence de l'effet de site amplification. L'indice de vulnérabilité est établi en fonction des cinq facteurs suivants : (i) l'aléa sismique, (ii) les conditions de sol, (iii) la vulnérabilité du tablier, (iv) la vulnérabilité du système d'appuis, qui incluent tous les éléments qui supportent la structure y compris les appuis, les piles et les fondations, et (v) la vulnérabilité liée aux éléments généraux caractérisant la structure. Cette nouvelle méthode d'évaluation vise à permettre plus facilement l'identification des ouvrages les plus vulnérables aux séismes et est actuellement en cours de validation.

## 4. Système de gestion de l'information

Le développement d'un système de gestion des informations a permis la réalisation du microzonage et l'évaluation d'un nombre important d'ouvrages sur une grande partie du territoire de la Ville de Québec. La numérisation des données géotechniques (forages, puits, etc.) et sur les infrastructures (bâtiments, ponts et viaducs) et leur structuration dans un système d'information géographique et une base de données relationnelles constitue un des aspects novateurs et important de ce projet. Le système d'information facilite grandement la manipulation des données et le développement de représentations ou de modèles géotechniques du sous-sol de la Ville de Québec et la représentation des résultats des évaluations des ouvrages. L'architecture du système de traitement de l'information est à trois niveaux, ou 3-tier, et a été conçu pour traiter et modéliser l'ensemble des données (géotechniques et structurales). L'intérêt de ce type

d'architecture est qu'il sépare l'application en trois niveaux de services distincts et s'intègre facilement à une topologie de réseau de type Internet.

- **Niveau I ou niveau Client** : l'affichage et les traitements locaux (contrôles de saisie, mise en forme de données, etc.) sont pris en charge par le poste client, généralement un micro-ordinateur avec navigateur.
- **Niveau II ou niveau applicatif** : un serveur prend en charge les applications, incluant les services Web (serveur Apache) et les échanges avec le SGBDR.
- **Niveau III ou niveau accès aux données** : un système de gestion de base de données (MySQL pour ce projet) gère l'accès aux données géotechniques (DbGeo) et structurales (DbBat pour les bâtiments et DbPont pour les ponts et viaducs).

Ce type d'architecture offre une excellente performance, une flexibilité maximale et la possibilité de mise à jour. La Figure 4 illustre la forme que prend l'interface web pour la base de données géotechnique et la base de données sur les ponts.

(a)

(b)

**Figure 4** - Accès web typique à (a) la base de données géotechnique, et (b) la base de données des ponts

## 5. Conclusion

Cet article a décrit le projet d'évaluation de la vulnérabilité sismique des ponts et viaducs réalisé pour la Ville de Québec dans le cadre du programme conjoint de protection civile du Canada (PCPC). Le projet comportait deux volets fondamentaux, à savoir le microzonage sismique de certains territoires de la Ville ainsi que le développement d'une nouvelle approche d'évaluation. La communication a montré comment les données géotechniques provenant de forages et d'essais in-situ ont été utilisées pour réaliser le microzonage sismique de la ville de Québec et comment ce microzonage est ensuite combiné à l'évaluation de la vulnérabilité sismique des ponts et viaducs de la ville. Un système de gestion de l'information a aussi été développé dans le cadre de ce projet. Il vise à offrir aux gestionnaires et aux ingénieurs de la ville de Québec un outil puissant et flexible pour la gestion du risque sismique. Le projet réalisé sur les bases d'une analyse exhaustive des différentes phases du processus d'évaluation et de microzonage a permis d'identifier l'aléa sismique local par le biais de la production de cartes de susceptibilité à l'amplification.

L'approche d'évaluation proposée est pratique et permet de combiner l'aléa sismique local et la vulnérabilité structurale des ponts et viaducs. Les résultats peuvent ensuite être utilisés dans le cadre de la planification de programme de protection sismique et pour le développement des stratégies de mitigation.

## Remerciements

Les auteurs remercient la Ville de Québec et Protection civile Canada pour l'appui financier accordé à ce projet. Ils remercient également M. Alain Moreau, Directeur de la sécurité civile, M. Luc Jolicoeur, Directeur de la gestion des immeubles à la Ville de Québec, M. Martin Talbot de la Direction des structures au Ministère des transports du Québec et les étudiants diplômés de l'Université Laval et de l'École de technologie supérieure pour leur précieuse collaboration.

## Références

- American Society of Civil Engineers (ASCE). (1998). *Handbook for the Seismic Evaluation of Buildings - A Prestandard (FEMA 310)*. Washington D.C.
- Anderson, D. L., Mitchell, D., et Tinawi, R. (1996). *Performance of concrete bridges during the Hyogo-ken Nanbu (Kobé) earthquake on January 17,1995.* Can. J. Civ. Eng., 23(3) : p. 714-726.
- CAEE. (1995). *The Hyogo-Ken Nanbu, (Kobé) Earthquake of 17 January 1995 – Preliminary reconnaissance report*. Can. Ass. Earthq. Eng., Vancouver, Canada, 257 p.
- IRC-CNRC (2005). *Code national du bâtiment - Canada 2005.*. Ottawa : Institut de recherche en construction - Conseil national de recherche Canada.
- Kawashima, K. (2000). *Seismic performance of RC bridge piers in Japan : An evaluation after the 1995 Hyogo-ken Nambu earthquake.* Prog. Struct. Eng. Mater., John Wiley & Sons, 2 : p. 82-91.
- Michaud, V. (2004). *Microzonage sismique préliminaire de la Ville de Québec: Cartographie des effets de site et développement d'une méthodologie utilisant les SIG.* Mémoire de maîtrise M.Sc., Département de génie civil, Université Laval, Qc.

- Ministère des Transports du Québec (MTQa). (2007). *“Direction générale des infrastructures et des technologies, Tome III - Ouvrages d'art, Classification des ouvrages d'art.”* (Inclut la mise à jour 52).
- Ministère des Transports du Québec (MTQb). (2007). *“Direction des structures, Devis pour le développement du système de gestion des structures (GSQ-6026) – Annexe 3.”* (En développement), Québec.
- Mitchell, D. et Tinawi, R. (1992). *“Structural damage due to the April 22, 1991, Costa Rican earthquake”*. Can. J. Civ. Eng., 19(4) : p. 586-605.
- New York State Department of Transportation (NYDOT). (1995). *“Seismic Vulnerability Manual. Structure Design and Construction Division – Bridge Safety Assurance Unit.”* Octobre 1995 (révisé en 2004), 44 p.
- Priestley, M. J. N., Seible, F., et Calvi, G. M. (1996). *“Seismic design and retrofit of bridges.”* Wiley, New York, 686 p..
- Priestley, M. J. N., Seible, F., et Vang, C. M. (1994). *“The Northridge earthquake of January 17, 1994, damage analysis of selected freeway bridges.”* University of California at San Diego, San Diego, Calif.
- Saatcioglu, M., Mitchell, D., Tinawi, R., Gardner, J. N., Gillies, A. G., Ghobarah, A., Anderson, D. L., et Lau, D. (2001). *“The August 17, 1999, Kocaeli (Turkey) earthquake – damage to structures.”* Can. J. Civ. Eng., 28 : p. 715-737.
- Yashinsky, M. (1998). *“Performance of bridge seismic retrofits during Northridge earthquake.”* J. Bridge Eng., ASCE, 3(1) : p. 1-14.