

RAPPORT DE RECHERCHE

**ÉTUDE DE SENSIBILITÉ DES PARAMÈTRES POUR L'ÉVALUATION  
DE LA VULNÉRABILITÉ SISMIQUE DES PONTS EN VUE DE LA  
CALIBRATION DE LA MÉTHODE**

PROJET : R628.1

RAPPORT PRÉSENTÉ À

M. DANIEL BOUCHARD, ING.  
DIRECTION DES STRUCTURES  
MINISTÈRE DES TRANSPORT DU QUÉBEC  
930, CHEMIN SAINTE-FOY, 6E ÉTAGE  
QUÉBEC (QUÉBEC) G1S 4X9

PAR

AMAR KHALED, ING. PH.D.  
PROFESSEUR AGRÉGÉ

MARIE-JOSÉ NOLLET, ING. PH.D.  
PROFESSEUR TITULAIRE

ANNA LEMAIRE  
CANDIDATE À LA MAÎTRISE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE DE LA CONSTRUCTION  
ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

## REMERCIEMENTS

La réalisation de ce projet a été possible grâce à l'appui financier de la Direction des Structures du Ministère des Transports du Québec. Les auteurs adressent leurs sincères remerciements aux partenaires en particulier à Monsieur René Gagnon, ing. et Monsieur Daniel Bouchard, ing. de la Direction des Structures pour leur appui et leur collaboration à toutes les étapes du projet.

Ils souhaitent également souligner la contribution de M. Jean-François Belleau, étudiant au doctorat à l'ÉTS, au recensement des écrits sur les dommages aux ponts suite à des événements sismiques et sur les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité.

## SOMMAIRE

Ce rapport présente les résultats d'une étude sur la formulation d'un indice de vulnérabilité sismique (IVS) pour les ponts de la province de Québec gérés par le Ministère des Transports du Québec (MTQ). Au Québec, l'activité sismique est généralement modérée, à l'exception de la région de Charlevoix où elle est plus élevée. Les méthodes indicielles d'évaluation de la vulnérabilité sismique des ponts permettent de classer les ouvrages selon leur vulnérabilité relative afin d'identifier rapidement ceux pouvant subir des dommages durant un séisme et ainsi planifier les interventions. Au même titre, les indices de vulnérabilité permettent de planifier les mesures de mitigation du risque à moyen et long terme.

L'application de la méthode indicielle utilisée actuellement par le MTQ (Méthode MTQ95), a permis de constater que l'IVS<sub>MTQ95</sub> ne répond pas aux exigences du contexte de gestion des risques liés aux ouvrages d'art. Ce dernier utilise une cartographie du risque combinant plusieurs indices (variant de 0 à 100), dont l'IVS et un indice socio-économique (ISE), qui caractérise l'importance du pont comme bien et service au sein de la société. Ce projet de recherche, réalisé à l'École de technologie supérieure, vise à proposer une formulation pour l'indice de vulnérabilité sismique des ponts plus discriminante et intégrant les dernières connaissances en matière de sismicité et de vulnérabilité des ponts.

Le MTQ gère près de 8 500 ponts sur l'ensemble des 14 directions territoriales (DT). L'analyse des données sur 733 ponts de la DT de la Capitale-Nationale (échantillon jugé représentatif de l'ensemble des ponts de la Province) a relevé qu'environ 70% des ouvrages sont des ponts à travée unique. L'IVS<sub>MTQ95</sub> ne permet pas d'obtenir une répartition nette entre les ouvrages moyennement et très vulnérables, en particulier les ponts à travée unique. La nouvelle formulation proposée pour l'IVS<sub>MTQ2013</sub> offre une répartition plus représentative de la vulnérabilité relative des ouvrages face à un événement sismique et permet d'identifier les ponts les plus vulnérables. L'IVS<sub>MTQ2013</sub> intègre les paramètres identifiés comme les plus influents sur la vulnérabilité des structures et considère les particularités des ponts du MTQ. La calibration de ce nouvel indice a été faite par l'étude de scénarios de déficiences théoriques et par son application sur les 733 ponts de la DT de la Capitale-Nationale. L'IVS<sub>MTQ2013</sub> permet d'identifier autant les ponts les plus vulnérables à travée unique que ceux à travées multiples. La formulation proposée considère également l'application de l'IVS à l'intérieur d'une Direction Territoriale où l'aléa est constant ou peu variable, modérément variable et très variable, en modulant le facteur d'aléa sismique. Son application dans le contexte de gestion des risques est illustrée par une cartographie du risque qui combine l'ISE et l'IVS. L'IVS<sub>MTQ2013</sub> donne une répartition des ponts dans quatre quadrants de priorité avec 11% des ponts à l'intérieur du quadrant I (ouvrages à traiter en priorité) et 23% à l'intérieur du quadrant II (ouvrages en priorité modérée).

Les méthodes indicielles d'évaluation de la vulnérabilité sismique des structures doivent être révisées régulièrement afin d'intégrer les dernières connaissances en génie parasismique. Ainsi, il est recommandé de : (i) comparer l'IVS avec les données d'évaluations détaillées déjà réalisées, (ii) faire des relevés additionnels de longueurs d'appui pour déterminer la pertinence du coefficient de longueur d'appuis, (iii) réaliser des analyses théoriques plus poussées pour évaluer l'impact de la demande

sismique sur les déplacements aux appuis des ponts typiques, et (iv) intégrer l'utilisation de l'IVS dans un système de positionnement géographique.

## AVANT-PROPOS

L'équipe de recherche est composée des professeurs Marie-José Nollet et Amar Khaled du Département de génie de la construction de l'École de technologie supérieure et de Mme Anna Lemaire, étudiante à la maîtrise.

Le projet de maîtrise de Mme Lemaire a été réalisé exclusivement sur le projet de recherche décrit dans ce rapport. Sa contribution au développement de l'IVS<sub>MTQ2013</sub> est significative et l'ensemble des études et analyses réalisées pour parvenir à la formulation finale présentée est décrit dans son rapport de projet de maîtrise.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	I
SOMMAIRE .....	II
AVANT-PROPOS .....	IV
TABLE DES MATIÈRES .....	V
LISTE DES TABLEAUX .....	VIII
LISTE DES FIGURES.....	IX
1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Contexte .....	1
1.2 Problématique.....	1
1.3 Objectifs du projet.....	2
1.4 Méthodologie et organisation du rapport .....	2
1.5 Documentation.....	3
2 PARAMÈTRES INFLUENTS LA VULNÉRABILITÉ ET LE RISQUE SISMIQUE.....	4
2.1 Risque sismique : Aléa et vulnérabilité .....	4
2.1.1 L'aléa sismique et effets de site .....	4
2.1.2 La vulnérabilité structurale.....	5
2.1.3 La valeur socio-économique.....	5
2.2 Dommages aux ponts dus aux séismes .....	5
2.2.1 Perte d'appui et effondrement des travées .....	6
2.2.2 Liquéfaction des sols et tassements.....	8
2.2.3 Rupture des piles en béton .....	9
2.2.4 Rupture des culées .....	10
2.3 Paramètres influençant la vulnérabilité sismique des ponts .....	11
2.4 Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique .....	13
2.4.1 Méthodes indicielles.....	13
2.4.2 Méthode MTQ95 .....	13
2.4.3 Méthode VdQ2007 .....	14
2.4.4 NYDOT .....	15
2.4.5 SISMOA .....	16
2.4.6 Analyses de fragilité.....	16

3	CRITÈRES ET CADRE D'UTILISATION DE LA MÉTHODE D'ÉVALUATION DU MTQ .....	18
3.1	Gestion des risques liés aux ouvrages d'art .....	18
3.2	Paramètres pour l'évaluation des IVS et données de la BDD-GSQ .....	19
3.2.1	Paramètres considérés pour le calcul de l'IVS <sub>MTQ95</sub> .....	19
3.2.2	Paramètres additionnels .....	19
4	ANALYSE DE LA FORMULATION DE L'IVS MTQ95 DANS SON CONTEXTE D'UTILISATION .....	20
4.1	Objectifs .....	20
4.2	Méthodologie .....	20
4.3	Résultats de l'analyse des formulations des IVS MTQ95 et VdQ2007 .....	21
4.3.1	Ponts à travée unique.....	22
4.3.2	Ponts à travées multiples continues.....	24
4.4	Résultats de l'analyse de la formulation simplifiée de l'IVS <sub>MTQ95</sub> .....	26
4.4.1	Introduction.....	26
4.4.2	Ponts à travée unique.....	27
4.4.3	Ponts à travées multiples continues.....	28
4.4.4	Bilan pour l'ensemble des ponts .....	29
4.5	Conclusions.....	30
5	FORMULATION PROPOSÉE POUR LE CALCUL DE L'IVS <sub>MTQ2013</sub> .....	32
5.1	Rappel des objectifs et critères .....	32
5.2	Recommandations tirées des études et analyses .....	32
5.3	Procédure et formulation générale de l'IVS <sub>MTQ2013</sub> .....	33
5.3.1	Tri préliminaire .....	33
5.3.2	Développement de la nouvelle formulation de l'IVS <sub>MTQ2013</sub> .....	34
5.3.3	Priorisation avec l'ISE.....	35
5.4	Formulation de l'IVS <sub>MTQ2013</sub> .....	35
5.4.1	Formulation et définitions.....	35
5.4.2	Facteur d'amplification du site $F_{Site}$ .....	36
5.4.3	Facteur d'aléa sismique.....	37
5.4.4	Facteur de vulnérabilité générale $V_{Générale}$ .....	39
5.4.5	Facteur de vulnérabilité de la superstructure $V_{Superstructure}$ .....	41
5.4.6	Facteur de vulnérabilité de l'infrastructure $V_{Infrastructure}$ .....	44

6	VALIDATION DE LA FORMULATION $IVS_{MTQ2013}$ ET APPLICATION AUX PONTS DE LA DT CAPITALE NATIONALE .....	48
6.1	Introduction.....	48
6.2	Validation par l'étude de scénarios de déficiences.....	48
6.2.1	Ponts à travée unique.....	48
6.2.2	Ensemble des ponts.....	50
6.3	Application aux ponts de la DT de la Capitale Nationale .....	52
6.3.1	Comparaison des IVS des formulations MTQ2013 et MTQ95.....	52
6.3.2	Cartographie du risque .....	54
6.3.3	Longueur d'appui.....	55
7	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	56
	ANNEXES.....	57
	Annexe 1 – Méthode MTQ95 .....	57
	Annexe 2 – Méthode VdQ2007 .....	60
	Annexe 3 – Classification des sols et catégories d'emplacement .....	62
	Annexe 4 – Méthode NYDOT.....	63
	Annexe 5 – Méthode SISMOA .....	66
	Annexe 6 – Paramètres de vulnérabilité et données de la BDD.....	67
	Annexe 7 – Hypothèses pour le Calcul des IVS.....	70
	Annexe 8 – Calibration facteur d'amplification de site $F_{Site}$ .....	73
	Annexe 9 – Calibration du facteur l'aléa sismique $F_{aléa}$ .....	74
	Annexe 10 – Définition des Facteurs de vulnérabilité et coefficients d'influence .....	77
	Annexe 11 – Calcul de la longueur d'appui critique à partir des informations de la base de données .....	82
	RÉFÉRENCES .....	84

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 – Résultats statistiques des valeurs d'IVS pour les ponts à travée unique.....	23
Tableau 2 – Résultats statistiques des valeurs d'IVS pour les ponts à travers multiples continues .....	25
Tableau 3 – Valeurs limites des facteurs Faléa et Fsite et du facteur global de vulnérabilité .....	34
Tableau 4 – Définition des facteurs et coefficients de la formule MTQ2013 .....	36
Tableau 5 – Valeurs reprises de FSite selon la rigidité de l'ouvrage .....	36
Tableau 6 – Valeurs du FAléa pour une utilisation sur l'ensemble de la Province .....	37
Tableau 7 – Valeurs du facteur d'aléa FAléa calibré sur les DT.....	38
Tableau 8 – Définition des coefficients pour le calcul du facteur de vulnérabilité générale.....	39
Tableau 9 – Définition des coefficients pour le calcul du facteur de vulnérabilité de la superstructure .....	41
Tableau 10 – Relations entre le nombre de travées, le nombre de joints et le nombre de discontinuités.....	43
Tableau 11 – Définition des coefficients pour le calcul du facteur de vulnérabilité de l'infrastructure .....	45
Tableau 12 – Distribution des 733 ponts de la DT Capitale Nationale entre les 4 quadrants de la cartographie du risque.....	54

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 – Effondrement de travée dû à une perte d’appui (Kobé 1995).....	6
Figure 2 – Perte d’appui due au biais.....	7
Figure 3 – Déplacement du tablier d’un pont courbe.....	7
Figure 4 – Exemples d’effondrement de travée suite à une liquéfaction ou à un tassement sévère du sol.....	8
Figure 5 – Effondrement de ponts suite à la rupture des piles.....	9
Figure 6 – Effets du tassement du remblai sous les culées.....	10
Figure 7 – Glissement et rotation de la culée, Costa Rica 1990.....	11
Figure 8 – Illustration de la méthode d’évaluation du MTQ95 et MTQ2005.....	14
Figure 9 – Illustration de la méthode d’évaluation du VdQ2007.....	15
Figure 10 – Courbes de fragilité Hazus pour les ponts d’une longueur de travée supérieure à 150 m.....	17
Figure 11 - Quadrant utilisé pour la gestion des risques.....	19
Figure 12 – Valeurs des IVS <sub>MTQ95</sub> selon les approches 1 et 2.....	22
Figure 13 – Répartition des IVS <sub>MTQ95</sub> pour les ponts à travée unique selon l’approche 2.....	23
Figure 14 – Répartition des IVS <sub>VdQ2007</sub> pour les ponts à travée unique selon l’approche 2.....	24
Figure 15 - Répartition des IVS <sub>MTQ95</sub> pour les ponts à travée multiples continues selon l’approche 2.....	25
Figure 16 - Répartition des IVS <sub>VdQ2007</sub> pour les ponts à travée multiples continues selon l’approche 2.....	26
Figure 17 – Valeur d'IVS pour les ponts à une travée, avant et après classement selon le coefficient C1.....	27
Figure 18 – Type de ponts à culées intégrales (Ministère des Transports du Québec, 2012).....	28
Figure 19 – Valeur d'IVS pour les ponts à travées multiples continues, avant et après classement selon le coefficient C1.....	29
Figure 20 – Classement des IVS des ponts à une travée et à plusieurs travées continues selon le coefficient $C_l$ , puis selon le nombre de travée.....	30
Figure 21 – Valeurs d'ICS des ouvrages de la DT de la Capitale Nationale.....	40
Figure 22 – Valeurs des ICS en fonction de la date de construction des ponts.....	40
Figure 23 – Nombre de discontinuités.....	42
Figure 24 – Scénarios de ponts à une travée.....	49
Figure 25 – Illustration du classement attendu des scénarios de déficiences.....	49
Figure 26 – Illustration du classement avec les IVS <sub>MTQ2013</sub> calculés pour les scénarios de déficiences.....	50
Figure 27 – Variation de l’IVS <sub>MTQ2013</sub> selon l’aléa pour des ponts en béton sur sol C.....	51
Figure 28 – Variation de l’IVS <sub>MTQ2013</sub> selon la catégorie sismique de site pour des ponts en béton en aléa modéré.....	51
Figure 29 – Variation de l’IVS <sub>MTQ2013</sub> selon le type de structure pour des ponts sur site C en aléa modéré.....	52
Figure 30 – Comparaison de l’IVS <sub>MTQ2013</sub> et de l’IVS <sub>MTQ95</sub> pour les 733 de la DT Capitale Nationale.....	53

Figure 31 – Variation de l'IVS<sub>MTQ2013</sub> pour les 733 de la DT Capitale Nationale selon le nombre de travée(s) .....53

Figure 32 – Cartographie du risque avec l'IVS<sub>MTQ2013</sub> et l'ISE pour les 733 de la DT Capitale Nationale .....54

## 1 INTRODUCTION

### 1.1 CONTEXTE

L'Est du Canada est considéré comme une région sismique active. Dans les vallées de l'Outaouais et du Saint-Laurent, régions les plus densément peuplées<sup>1</sup>, l'aléa sismique est considéré comme modéré alors qu'il est élevé dans la région de Charlevoix. Selon Ressources Naturelles Canada<sup>2</sup>, on recense dans l'Est du Canada environ 450 séismes chaque année. De ce nombre, quatre en moyenne dépassent une magnitude de 4,0 et trente dépassent une magnitude de 3,0. Au cours d'un cycle de 10 ans, trois séismes en moyenne ont une magnitude supérieure à 5,0. Des événements sismiques d'une magnitude supérieure à 5,0 ayant causé des dommages importants sont survenus dans le passé (Saguenay 1988, M5,9; Témiscamingue 1935, M6,1; Charlevoix-Kamouraska 1925 et 1663, M6,2 et M7,0). Le 23 juin 2010, un séisme de magnitude M5,0 à Val-des-Bois, au Québec, a été ressenti dans une vaste partie de l'Ontario et du Québec, causant des dommages aux structures et des glissements de terrain.

Par ailleurs, les constats effectués sur les sites après des événements sismiques majeurs à travers le monde ont mis en évidence les éléments contribuant à augmenter la vulnérabilité des ponts face aux tremblements de terre (Mitchell *et al.* 1991, Basoz *et al.* 1999).

Le Ministère des Transports du Québec (MTQ) dispose actuellement d'une méthode d'évaluation de la vulnérabilité sismique des ponts (identifiée ci-après Méthode MTQ95) (MTQ 2007). Cette méthode indiciaire, permet d'attribuer un pointage aux ouvrages dans le but de les classer selon leur vulnérabilité relative. Ce classement vise à identifier rapidement les ouvrages pouvant subir des dommages durant un séisme et permet ainsi de planifier les interventions par priorité suite à un événement sismique. Au même titre, les indices de vulnérabilité permettent de planifier les mesures d'intervention à moyen et long terme.

### 1.2 PROBLÉMATIQUE

Dans sa forme actuelle, la méthode MTQ95 présente certaines lacunes. L'étude réalisée conjointement par l'ÉTS et l'Université Laval sur la vulnérabilité sismique des ponts de la Ville de Québec a démontré entre autres qu'elle ne permet pas d'obtenir une répartition nette entre les ouvrages moyennement et très vulnérables (Hida 2009, Nollet *et al.* 2008). À titre d'exemple, l'indice de priorité de ponts présentant 3 déficiences varie de 82 à 97 et celui de ponts présentant 5 déficiences de 75 à 92. Considérant qu'un indice de 100 est calculé pour un pont sans déficience, ces résultats ne permettent pas d'identifier clairement les ouvrages devant être priorisés. Afin de palier à cette lacune, une nouvelle méthode d'évaluation, dite Méthode VdQ2007, a été développée. En plus d'utiliser les mêmes

---

<sup>1</sup> 68% de la population totale du Québec

<sup>2</sup> <http://earthquakescanada.nrcan.gc.ca/zones/eastcan-fra.php>

paramètres d'évaluation que la méthode MTQ95, la méthode VdQ2007 considère le type de fondations et l'endommagement des ponts. Elle repose aussi sur une approche probabiliste pour la définition de l'indice de vulnérabilité. Par ailleurs, des études récentes (Guider 2011) et les constats des dommages subis par les ponts lors des récents tremblements de terre (Chili 2010, Christchurch 2010) ont démontré que d'autres paramètres ont une influence significative sur la vulnérabilité sismique des ponts. Au Chili, la perte d'appui des tabliers, la retenue latérale inadéquate, l'affaissement du sol sous les dalles d'approche et la directivité des ondes sismiques ont été identifiés comme les principales causes des dommages subis par les ponts (Mitchell *et al.* 2012). Ces constats démontrent la pertinence d'inclure dans une méthode d'évaluation rapide l'ensemble des paramètres pouvant avoir une influence significative sur la vulnérabilité sismique des ponts.

### 1.3 OBJECTIFS DU PROJET

L'objectif général de ce projet de recherche est de proposer une méthode d'évaluation de la vulnérabilité sismique des ponts avec une formulation d'un indice plus discriminant et intégrant les dernières connaissances en matière de sismicité et de vulnérabilité des ponts.

Les objectifs spécifiques visés par ce projet de recherche sont:

- I. Évaluer la formulation actuelle de l'indice de vulnérabilité sismique (IVS) de la Méthode MTQ95 et son application dans le contexte de gestion des risques des ouvrages d'art.
- II. Identifier l'ensemble des paramètres influents et mesurables pouvant être considérés dans le calcul de l'IVS.
- III. Proposer une nouvelle formulation pour le calcul de l'IVS répondant au contexte de gestion des risques des ouvrages d'art et intégrant les paramètres les plus influents.

### 1.4 MÉTHODOLOGIE ET ORGANISATION DU RAPPORT

Le rapport est structuré autour d'une méthodologie en cinq étapes :

- 1) Identification des paramètres à intégrer dans la formulation d'un indice de vulnérabilité :
  - Recensement des écrits sur les dommages observés sur les ponts lors des derniers séismes et sur les méthodes d'évaluation existantes;
  - Définition du cadre d'utilisation de la méthode d'évaluation en fonction des données disponibles et du contexte de gestion des risques liés aux ouvrages d'art;
- 2) Analyse de la formulation de l'IVS<sub>MTQ95</sub> dans son contexte d'utilisation pour les ponts de la direction territoriale (DT) de la Capitale Nationale : cette analyse vise à faire ressortir les lacunes et les améliorations à apporter à la formulation.
- 3) Développement et calibration d'une nouvelle formulation pour l'IVS :
- 4) Application de la nouvelle formulation de l'IVS<sub>MTQ2013</sub> aux ponts de la DT de la Capitale Nationale.
- 5) Recommandations pour l'application de la Méthode MTQ2013 et l'interprétation des IVS.

## 1.5 DOCUMENTATION

Ce projet de recherche s'appuie sur une revue de littérature décrite à la Section 2 et sur les documents suivants :

- ❑ Extraits de la base de données du système de gestion des structures du Québec (GSQ)
- ❑ Plans de dix (10) ponts et relevés des longueurs d'appuis existantes
- ❑ Manuel d'inventaire des structures (MTQ 2012)
- ❑ Manuel de gestion des risques liés aux ouvrages d'art (MTQ 2008 – *Version en projet*)
- ❑ Manuel sur les Ouvrages d'art -Tome III (MTQ 2013)
- ❑ Devis pour le développement du système de gestion des structures (GSQ-6026) – Annexe 3 (*Description de la méthode MTQ95*) (MTQ 2007 – *Version en projet*)

## 2 PARAMÈTRES INFLUENTS LA VULNÉRABILITÉ ET LE RISQUE SISMIQUE

### 2.1 RISQUE SISMIQUE : ALÉA ET VULNÉRABILITÉ

Le risque est une mesure estimative qui dépend, d'une part de la probabilité d'occurrence d'un évènement et, d'autre part, des conséquences de cet évènement. Dans un contexte d'évaluation du risque sismique, on définit généralement le risque par le produit de l'aléa sismique par les conséquences d'un séisme sur les ouvrages exposés. L'estimation de ces conséquences est déterminée par le produit de la vulnérabilité de la structure, ou la probabilité de dommages en cas de séismes, et de la valeur socio-économique des ouvrages exposés. La relation ainsi obtenue est :

$$\text{Risque} = \sum \left[ (\text{Aléa sismique}) \times \underbrace{(\text{Vulnérabilité}) \times (\text{Valeur socio-économique})}_{(\text{Conséquences})} \right] \quad (1)$$

Selon cette définition, le risque sismique associé à des ponts s'exprime par le coût socio-économique (en dollars) des conséquences d'un séisme d'une intensité donnée ayant une probabilité d'occurrence donnée. De façon simplifiée, le risque sismique peut être exprimé par un indice de risque, déterminé en considérant l'ensemble des paramètres contribuant à l'aléa sismique, la vulnérabilité de la structure et la valeur socio-économique de l'ouvrage.

#### 2.1.1 L'aléa sismique et effets de site

L'aléa sismique est couramment défini comme la probabilité d'occurrence d'une intensité sismique donnée pendant une période de temps donnée. Les données les plus récentes d'aléa sismique au Québec, et au Canada, sont fournies par Ressources naturelles Canada sous forme d'un spectre d'accélération pour des périodes de récurrence de 2% et 10% en 50 ans. Des valeurs d'accélération spectrales sont données en fonction des coordonnées géographiques d'une localité pour l'accélération maximale au sol (AMS) et les accélérations à 0,2s, 0,5s, 1,0s et 2,0s.

Les effets de site comprennent les effets vibratoires (déformations transitoires du sol et amplification) et les déformations permanentes induites par les vibrations (liquéfaction, glissements de terrain, tassement et fissuration du sol). En général, lors de la conception ou de l'évaluation d'une structure l'effet d'amplification est pris en compte par un facteur d'amplification appliqué à l'accélération spectrale de calcul ou au paramètre aléa sismique. Les risques reliés aux glissements de terrain ou à la liquéfaction sont souvent considérés parallèlement aux risques reliés à la structure et intégrés dans une approche globale d'évaluation des risques (Davi *et al.* 2010).

### 2.1.2 La vulnérabilité structurale

La vulnérabilité d'une structure à un séisme est définie par la probabilité pour un ouvrage d'atteindre un niveau de dommage lors d'un séisme d'une intensité donnée. D'une façon générale et sans égard aux matériaux, on peut dénombrer trois systèmes affectant la réponse sismique du pont, et sa vulnérabilité, soit : (a) le système structural général, (b) le système de tablier et les appuis et (c) le système de fondations (culées et piles).

### 2.1.3 La valeur socio-économique

La valeur socio-économique prend en compte l'impact de la mise hors service d'un pont sur le réseau routier. Plus particulièrement, ce paramètre évalue l'impact de la perte d'un pont sur un territoire (libre circulation et liaison territoriale), sur la sécurité de la population (accès aux hôpitaux, acheminement des secours, etc.), sur la société (transport de personnes) et sur l'économie (dégât matériel et transport de marchandise).

Le paramètre socio-économique peut être intégré directement dans l'évaluation de l'indice de risque par le biais d'un ou plusieurs paramètres, parmi lesquels on peut citer les équipements et services publics ou le facteur d'importance du pont sur le réseau. Alternativement, l'évaluation globale du risque relié à l'ouvrage peut se faire en considérant deux indices : un indice de risque sismique associé à la structure et un indice socio-économique.

## 2.2 DOMMAGES AUX PONTS DUS AUX SÉISMES

Les tremblements de terre qui ont frappé les États-Unis (San Fernando 1971, Loma Prieta 1989, Northridge 1994), le Japon (Kobé 1995), et d'autres régions à travers le monde (El-Asnam 1980, Costa Rica 1990, Kocaeli 1999, Taiwan 1999, Chili 2010) ont causé des dommages très significatifs aux structures de ponts, révélant ainsi leur vulnérabilité aux séismes importants (Mitchell *et al.* 1991, Priestley *et al.* 1994, CAEE 1995, Anderson *et al.* 1996, Yashinski 1998, Kawashima 2000, Mitchell *et al.* 2012). Suite à ces tremblements de terre, un grand nombre de ponts en béton armé et en acier ont été lourdement endommagés ou se sont effondrés. L'étude des dommages subis à la suite de ces événements a non seulement permis de mieux comprendre la nature des mouvements sismiques mais aussi d'identifier les faiblesses qui ont mené à l'endommagement et à l'effondrement des structures de ponts.

L'action sismique résultant des séismes a pour effet d'induire dans les structures des oscillations ou des vibrations forcées, auxquelles succèdent, lorsque le séisme prend fin, des oscillations libres qui s'amortissent plus ou moins rapidement. Au cours de ces mouvements, les éléments structuraux des ponts subissent des déplacements importants qui peuvent créer des problèmes au niveau des jonctions entre les éléments verticaux et horizontaux ainsi qu'au niveau des appuis. Il est reconnu que la dissipation de l'énergie induite par les vibrations sismiques dépend des principaux éléments structuraux qui constituent un pont, soient : le tablier, le système d'appuis, 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.

Parmi les dommages importants subis par les structures de ponts durant les séismes, on rapporte entre autres (Priestley *et al.* 1996, Mitchell *et al.* 2012) : (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.

### 2.2.1 Perte d'appui et effondrement des travées

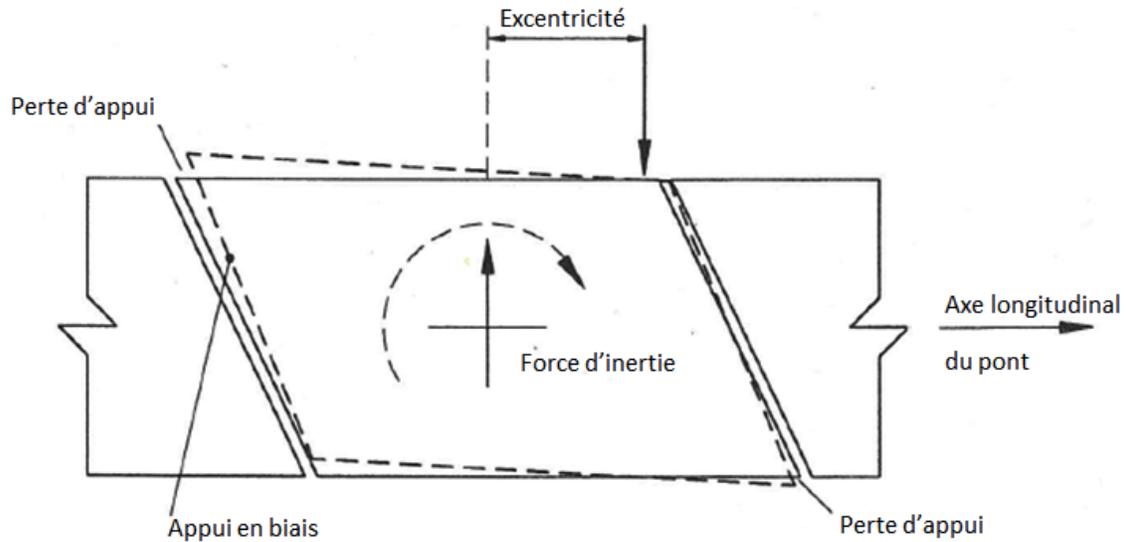
Les cas d'effondrement de travées de ponts suite à une perte d'appui sont très nombreux. Cette déficience, qui a souvent des conséquences dramatiques, a été observée lors de plusieurs séismes modérés ou importants passés, particulièrement lors des séismes de San Fernando 1971 et du Costa Rica 1991 (Mitchell *et al.* 1991, Priestley *et al.* 1996), de Kobé 1995 (Anderson *et al.* 1996, Bruneau 1998), et tout récemment, lors du séisme du Chili en 2010 (Mitchell *et al.* 2012). Le problème d'effondrement suite à une perte d'appui a surtout été observé dans les ponts à une ou plusieurs travées simplement appuyées mettant ainsi en évidence la vulnérabilité de ce type de pont aux mouvements sismiques (Figure 1). Cette vulnérabilité est d'autant plus élevée en présence d'un biais (Priestley *et al.* 1996, Mitchell *et al.* 2012). En effet, sous l'effet des mouvements sismiques, les ponts ayant un biais ont subi des déplacements plus importants que les ponts droits du fait de la rotation du tablier (Figure 2). L'amplification des déplacements dans les ponts en biais est attribuable principalement au couplage des réponses longitudinale et transversale et peut entraîner une perte d'appui des poutres extérieures du tablier (Figure 2).

Ce comportement complexe se manifeste aussi dans les ponts courbes (Figure 3). Les axes des appuis étant différents des axes du pont, les déplacements des travées adjacentes provoquent l'ouverture du joint d'un côté et la fermeture du joint situé à l'autre extrémité de l'assise. Dans le cas où la longueur d'appui est insuffisante, il peut y avoir perte d'appui.



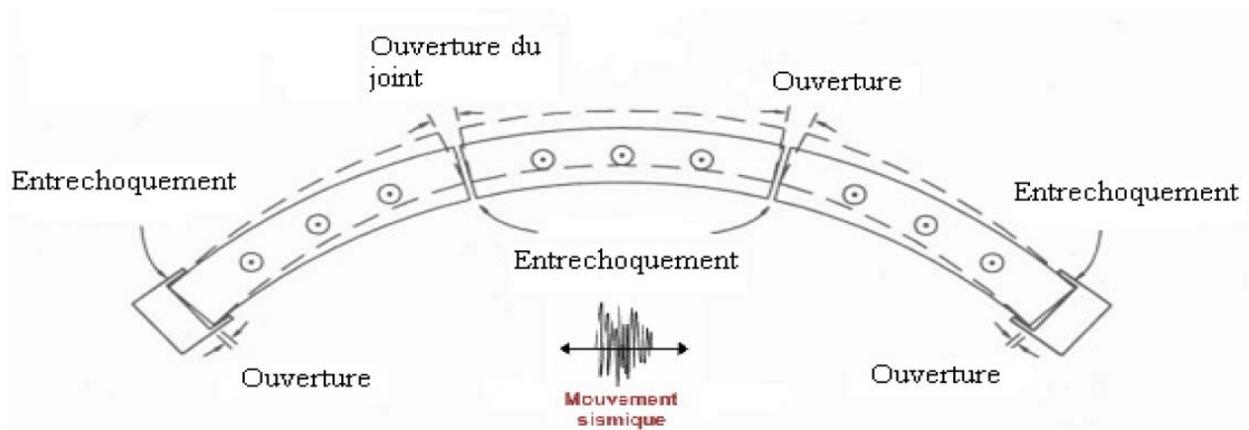
**Figure 1 – Effondrement de travée dû à une perte d'appui (Kobé 1995)**

(Tiré de SML, 2002)



**Figure 2 – Perte d'appui due au biais**

*(Adapté de Priestley et al. 1996)*



**Figure 3 – Déplacement du tablier d'un pont courbe**

*(Adapté de Priestley et al. 1996)*

Les pertes d'appuis ont été aussi observées dans les ponts à plusieurs travées semi-continues lors du séisme du Chili en 2010 (Mitchell *et al.* 2012). Dans ce type de ponts, la continuité des travées est assurée uniquement par la dalle du tablier.

Le risque de perte d'appui et d'effondrement est aussi très présent dans le cas des ponts reposant sur des systèmes de piles élancées pour lesquels les déplacements dus aux mouvements sismiques sont très élevés dans les deux directions principales du pont. Ce risque est d'autant plus élevé dans le cas des ponts âgés ayant une longueur d'assise insuffisante.

Si dans le cas des ponts à plusieurs travées continues, le risque d'effondrement de travées dû à la perte d'appui est très faible, voire même absent, les déplacements, longitudinal et transversal, importants

peuvent néanmoins entraîner l'échappement des appuis (perte partielle des appuis). Ce dommage peut entraver l'accessibilité aux ponts de secours suite à un séisme important.

### 2.2.2 Liquéfaction des sols et tassements

Le comportement du sol face à un séisme est très complexe. L'amplification des ondes sismiques par des sols mous contribue généralement à augmenter la vulnérabilité sismique d'un pont. Par ailleurs, les effets d'un sol liquéfiable ou d'un glissement de terrain induit des déplacements importants permanents et irréversibles compromettant ainsi la stabilité de l'ouvrage et entraînant dans bien des cas sa ruine par perte d'appui (Figure 4). Des tassements différentiels importants dans les fondations peuvent résulter en des dommages significatifs dans les piles et entraîner une perte totale du tablier et ce, peu importe les caractéristiques structurales du pont. Ces dommages ont été observés lors de plusieurs événements sismiques, ex. : Costa Rica 1991, Chichi Taiwan 1999, Chili 2012, pour ne citer que ceux-là (Priestley *et al.* 1996, Mitchell *et al.* 2012).



(a) Chi-Chi, Taiwan 1999  
([http://gees.usc.edu/GEER/Chi-Chi/bridges\\_taiwan.htm](http://gees.usc.edu/GEER/Chi-Chi/bridges_taiwan.htm))



(b) Rio Viscaya, Costa Rica 1991  
(Priestley *et al.* 1996)



(c) Rio Bananito, Costa Rica 1991  
(Chen *et Duan*, 2003)



(d) Chili 2010  
(Mitchell *et al.* 2012)

**Figure 4 – Exemples d'effondrement de travée suite à une liquéfaction ou à un tassement sévère du sol**

### 2.2.3 Rupture des piles en béton

Plusieurs cas de rupture de piles de ponts en béton ont été rapportés (Figure 5). Ce type de dommage peut conduire à l'effondrement total du pont, comme en témoignent les nombreux cas identifiés lors des séismes passés (Priestley *et al.* 1996, Chen and Duan 2003, Mitchell *et al.* 2012). Les déficiences reliées à ces dommages sont multiples (différence de rigidité élevée des piles, confinement inadéquat, chevauchement d'armature inapproprié, etc.). Ces déficiences, observées le plus souvent dans les ponts conçus et construits avant les années '70, sont la conséquence directe : (a) d'une conception basée sur la théorie élastique et la rigidité non fissurée, (b) d'une sous-estimation du niveau de charge latéral, et (c) de détails inadéquats des zones critiques de dissipation d'énergie sismique.



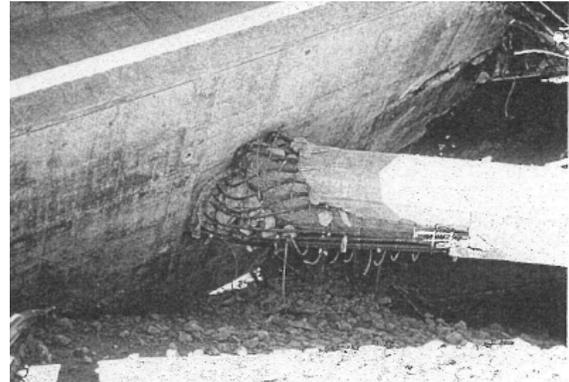
(a) Rupture due à la terminaison prématurée de l'armature, Kobé 1995 (Chen and Duan 2003)



(b) Rupture due à un ancrage inadéquat 1991 San Fernando 1971 (Priestley *et coll.* 1996)



(c) Rupture par cisaillement-compression Chili 2010 (Mitchell *et al.* 2012)



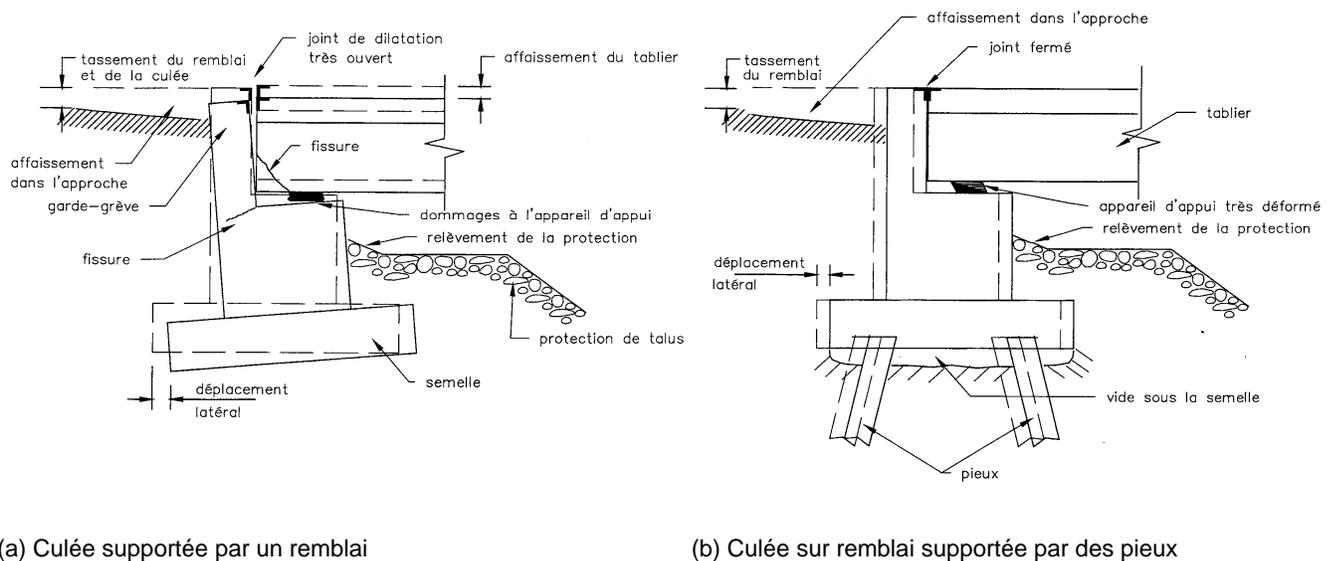
(d) Rupture due à un manque de confinement San Fernando 1971 (Priestley *et al.* 1996)

**Figure 5 – Effondrement de ponts suite à la rupture des piles**

## 2.2.4 Rupture des culées

Les culées sont des éléments structuraux massifs qui servent d'assises aux tabliers de ponts. Situées aux extrémités du pont, elles jouent aussi le rôle de mur de soutènement pour les remblais d'approches. Il existe principalement deux types de culées : (i) les culées intégrales construites monolithiquement avec le tablier et, (ii) les culées séparées du tablier par un joint et offrant des appuis simples.

En vertu de leur géométrie et de leur rigidité latérale élevée, les culées peuvent attirer des forces d'inertie importantes. De plus, les remblais d'approches exercent des poussées dynamiques qui peuvent agir en phase avec les forces d'inertie. Il peut alors en résulter des efforts horizontaux très élevés générant des déplacements importants lesquels peuvent entraîner la rupture des culées (Figure 6). Les ponts à culées intégrales sont peu vulnérables aux séismes puisqu'ils se déplacent de façon monolithique. Les ponts à culées séparées sont plus vulnérables car les mouvements du tablier sont indépendants de ceux des culées.



**Figure 6 – Effets du tassement du remblai sous les culées**

Source : MTQ 2002

Il est cependant peu probable que la rupture d'une culée entraîne l'effondrement total d'un pont, à moins qu'elle soit associée à une rupture généralisée des fondations ou du sol support. Par contre, la rupture de culées servant de murs de soutènement peut rendre le pont inaccessible suite à un tremblement de terre et entraver le cheminement des secours. On notera que ces dommages aux culées peuvent être rapidement réparés après un séisme pour permettre le passage des véhicules d'urgence. Les récents tremblements de terre ont montré que le glissement des culées est survenu surtout dans des sols mous, mal consolidés ou sensibles au phénomène d'amplification et de résonance. La vulnérabilité sismique des culées est par conséquent liée principalement au type de sol et à la hauteur des remblais adjacents. La Figure 7 illustre un cas typique de rupture d'une culée observée lors du séisme du Costa Rica en 1990.



**Figure 7 – Glissement et rotation de la culée, Costa Rica 1990**

*Source : Chen et Duan 2003*

## **2.3 PARAMÈTRES INFLUENÇANT LA VULNÉRABILITÉ SISMIQUE DES PONTS**

Le recensement des écrits sur les dommages subis par les structures de ponts, durant les séismes survenus dans plusieurs régions du monde au cours des trente dernières années, montre que plusieurs paramètres peuvent influencer la vulnérabilité sismique des ponts. Parmi les paramètres qui peuvent avoir une influence significative et qui ressortent le plus, on retrouve :

### L'ÂGE DU PONT

L'année de construction et de conception d'un pont donne une indication du niveau de détails parasismiques dont l'ouvrage est pourvu et peut ainsi affecter sa vulnérabilité.

### LA NATURE DU SOL

La présence de sols mous ou de sols liquéfiables contribue généralement à augmenter considérablement la vulnérabilité sismique d'un pont.

### LA DISCONTINUITÉ DES TRAVÉES

Le piètre comportement sismique des ponts à une ou plusieurs travées simplement appuyées et des ponts semi-continus (dont la continuité est assurée uniquement par la dalle du tablier) démontre que ce type de ponts présente une vulnérabilité élevée, dont les conséquences résultent le plus souvent en l'effondrement du pont.

### LES IRRÉGULARITÉS EN PLAN

La présence d'un biais ou d'une courbure en plan contribue à augmenter la vulnérabilité du pont du fait du couplage des réponses dans les deux directions longitudinale et transversal.

### LES IRRÉGULARITÉS VERTICALES

Les irrégularités verticales, tels que les piles à hauteurs variables ou les piles de grande hauteur, contribuent à l'augmentation de la vulnérabilité sismique des ponts.

Dans un pont comportant des piles à hauteurs variables, les forces sismiques peuvent solliciter les piles les plus courtes (colonnes trapus) au-delà de leur capacité en cisaillement. Les tabliers des ponts ayant des piles élancées de grande hauteur peuvent subir des déplacements très importants.

#### LA LONGUEUR D'APPUI

---

Étant donné l'amplitude des déplacements anticipés du tablier lors des séismes importants, une longueur d'appui insuffisante entraînerait un grand risque d'effondrement des travées dans les ponts à travées simplement appuyées ou semi-continues et d'échappement des appuis dans le cas des ponts à travées continues.

#### LA REDONDANCE DU SYSTÈME DE PILES

---

Les piles constituent généralement le système de contreventement principal à l'action sismique. Aussi, lors de séismes, l'intégrité des ponts repose principalement sur leur comportement. On retrouve principalement deux types de piles : (i) les piles à colonne unique et, (ii) les piles à colonnes multiples. Du point de vue vulnérabilité sismique, le système à colonnes multiples offre un meilleur comportement que le système à colonne unique grâce à sa redondance qui permet de répartir la dissipation d'énergie entre plusieurs colonnes.

#### AUTRES PARAMÈTRES

---

D'autres paramètres peuvent contribuer, plus ou moins, à augmenter la vulnérabilité sismique des ponts. Parmi ces paramètres, on peut citer :

- ❑ Le type de structure (pont intégral, pont en bois, pont en arc, pont à poutres en acier, ponts à poutres en béton, pont à dalle épaisse en béton, pont à câbles);
- ❑ Le type de culée (pleine, creuse, ouverte, caisson, mur berlinois);
- ❑ Le type de fondation (superficielle sur roc ou sur remblai, pieux, caisson);
- ❑ Le type d'appui (à pendule, en élastomère fretté ou non-fretté, à rotules, isolateurs, etc.);
- ❑ L'absence de diaphragmes aux extrémités du pont;
- ❑ L'état du pont.

## 2.4 MÉTHODES D'ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ SISMIQUE

On recense trois principales méthodes pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique des ouvrages d'art : (a) les méthodes indicielles, (b) les analyses de fragilité et (c) les analyses détaillées. Ces dernières sont généralement réalisées pour un ouvrage spécifique et incluent les analyses statiques ou dynamiques (linéaires ou non-linéaires).

### 2.4.1 Méthodes indicielles

Parmi les méthodes indicielles, la méthode du département du transport de l'état de la Californie (Caltrans 1992) a servi de base au développement de plusieurs autres méthodes dont celles des départements du transport des états New York (NYDOT 1995) et de la Floride (FHWA), ainsi que la méthode SISMOA de la Direction des Routes et le Service d'Études Technique des Routes et Autoroutes (SETRA) de la France (Davi *et al.* 2010) et plusieurs autres (Liu 2001, Parker Small 1999, Thomas *et al.* 1998). La méthode MTQ95, utilisée par le Ministère des Transports du Québec, est fondée sur les travaux de Tremblay *et al.* (1993) et inspirée de la méthode CALTRANS. Dans le cadre d'un projet d'évaluation des ponts de la Ville de Québec en 2007 (Nollet *et al.* 2008, Hida 2009), la méthode MTQ95 a été mise à jour et une nouvelle méthode, VdQ2007, considérée comme mieux adaptée au parc d'ouvrages de la ville a également été proposée.

### 2.4.2 Méthode MTQ95

Le calcul de l'indice de vulnérabilité sismique  $IVS_{MTQ95}$  des ponts et viaducs vise à identifier les ponts devant faire l'objet d'une évaluation détaillée. Il est basé sur une combinaison de trois facteurs d'influence sismique (aléa sismique  $RS$ , conditions de sol  $FF$ , année de conception  $FA$ ) et de huit coefficients d'influence sismique  $C_i$  structuraux et non structuraux. Dans sa formulation actuelle l' $IVS_{MTQ95}$  varie entre 0 et 100, 100 correspondant au plus faible niveau de vulnérabilité et est donné par l'expression suivante :

$$IVS_{MTQ95} = 100 - \left( RS \times FF \times FA \times \sum_{i=1}^8 \omega_i \times C_i \right) \quad (2)$$

Cette formulation est illustrée à la Figure 8 et les définitions et valeurs des coefficients d'influence sismique sont données aux Tableau A 1 et Tableau A 2 de l'Annexe 1. Les détails et informations additionnelles sont disponibles dans le document interne du MTQ (MTQ 2007). Les facteurs d'influence sismique ( $RS$ ,  $FF$  et  $FA$ ), mis à jour dans le cadre du projet d'évaluation des ponts de la Ville de Québec en 2007 et identifiés MTQ2005, sont présentés au Tableau A 3 de l'Annexe 1.

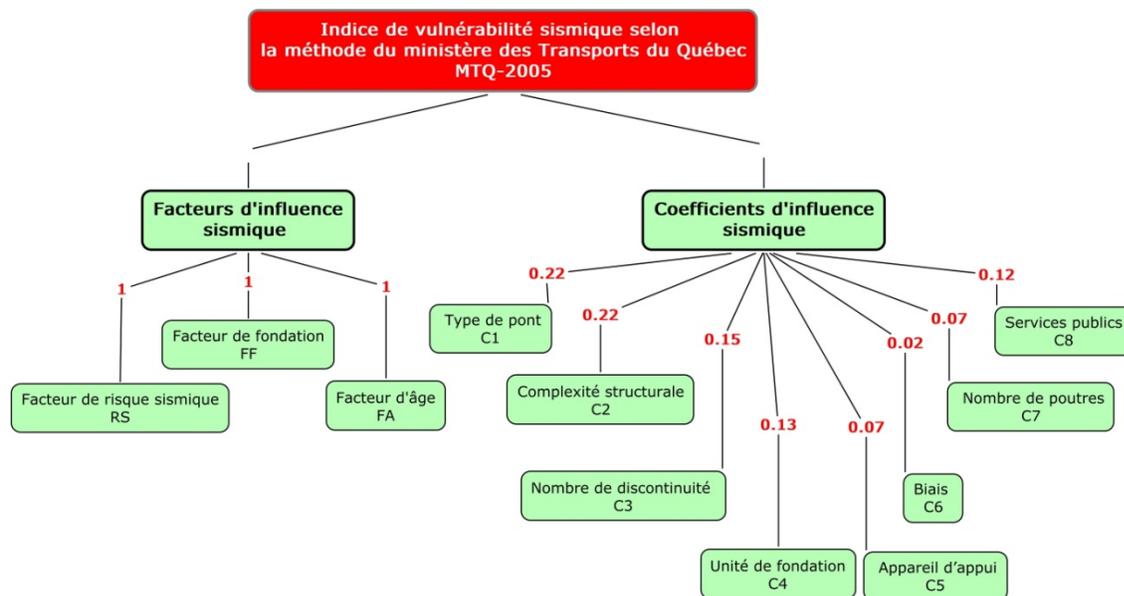


Figure 8 – Illustration de la méthode d'évaluation du MTQ95 et MTQ2005

### 2.4.3 Méthode VdQ2007

L'indice de vulnérabilité sismique  $IVS_{VdQ2007}$  considère le risque d'effondrement du pont en fonction de la rupture probable des composantes principales de la structure et des liens entre ces composantes et la sollicitation sismique. Lors d'un évènement sismique, caractérisé par l'aléa sismique (probabilité d'occurrence à un endroit donné), l'effondrement d'un pont peut survenir s'il y a rupture du tablier, rupture des éléments constituant le système d'appui, rupture du pont dû à une autre déficience structurale ou rupture des fondations. Le risque d'effondrement est amplifié par les effets de site tel que l'amplification de l'onde sismique par le sol, le glissement de terrain ou la liquéfaction du sol.

L'indice de vulnérabilité s'exprime par l'équation suivante:

$$IVS_{VdQ2007} = [10 - (AS \times V_S \times V_F \times V_G \times V_T \times V_A \times V_E)] \times I_P \quad (3)$$

où certains facteurs de vulnérabilité sont donnés par  $V_i = 1 - \sum \alpha_i C_i$

Cette formulation est illustrée à la Figure 9 et les définitions et valeurs des coefficients d'influence sismique sont données aux Tableau A 4 et Tableau A 5 de l'Annexe 2.

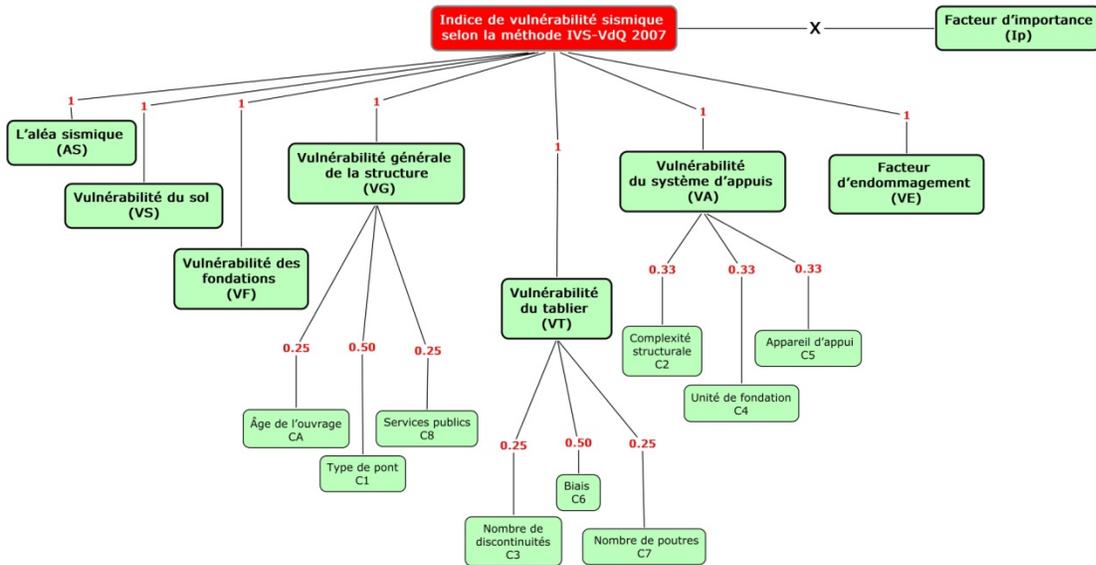


Figure 9 – Illustration de la méthode d'évaluation du VdQ2007

#### 2.4.4 NYDOT

La méthode NYDOT est la méthode d'évaluation préliminaire des ponts développée par le département de transport de New York pour hiérarchiser les ouvrages par ordre de sensibilité aux dommages en cas de séisme. L'évaluation se fait en trois étapes menant à l'attribution d'une cote de vulnérabilité (voir Figure A 1 de l'Annexe 4). La première étape, ou « Screening », utilise uniquement les données d'inventaire pour assigner les ouvrages à un groupe de sensibilité variant de 1 à 4, 1 étant la sensibilité la plus élevée. Les étapes subséquentes nécessitent une inspection et l'étude des plans et dans certains cas une analyse détaillée.

L'étape du premier tri, « Screening », comprend un tri préliminaire permettant d'identifier les ouvrages reconnus non vulnérables pour les retirer du processus d'évaluation, et d'identifier les ouvrages devant nécessairement faire l'objet d'une évaluation détaillée (voir Figure A 2). Les autres se voient attribuer un groupe de sensibilité (de 1 à 4) en fonction de leurs caractéristiques structurales (voir Figure A 3).

Ce classement en quatre groupes de sensibilité distingue nettement les ouvrages à travée unique des ouvrages à travées multiples (voir Figure A 3). Parmi les ouvrages à travée unique, une attention particulière est donnée à la présence d'appuis à pendule et d'un biais pour prendre en compte le risque de perte d'appui des travées simples. Les ponts à travées discontinues sont étudiés différemment de ceux à travées continues du fait de leur sensibilité à la perte d'appui. Ainsi, pour les ouvrages à travées simplement appuyées seuls le type d'appui, le biais et la redondance du système structural sont vérifiés pour l'assignation aux groupes de sensibilité 1 ou 2.

#### 2.4.5 SISMOA

Les risques liés aux séismes considérés par la méthode SISMOA sont : les risques de glissement de terrain, le risque de chute de blocs, le risque de liquéfaction et le risque lié aux phénomènes vibratoires sur la structure. L'indice de risque vibratoire ( $R_{vib}$ ) dépend de l'accélération limite pouvant entraîner des dommages aux ponts, laquelle est reliée à un indice de vulnérabilité globale ( $V_{vib}$ ) de l'ouvrage. Ce dernier considère les caractéristiques générales de la structure (type de structure, année de construction et état de l'ouvrage) et ensuite la rupture probable de l'un ou de l'autre des éléments suivants : le tablier, les culées, les piles et les voûtes (voir Annexe 5). La vulnérabilité du tablier est évaluée en regard de la sensibilité à l'échappement des appuis dans le sens transversal et longitudinal et du comportement des appareils d'appui. Le biais est intégré dans le calcul de la longueur critique d'appui et de la sensibilité à la rotation du tablier, deux paramètres utilisés pour évaluer la sensibilité à l'échappement des appuis

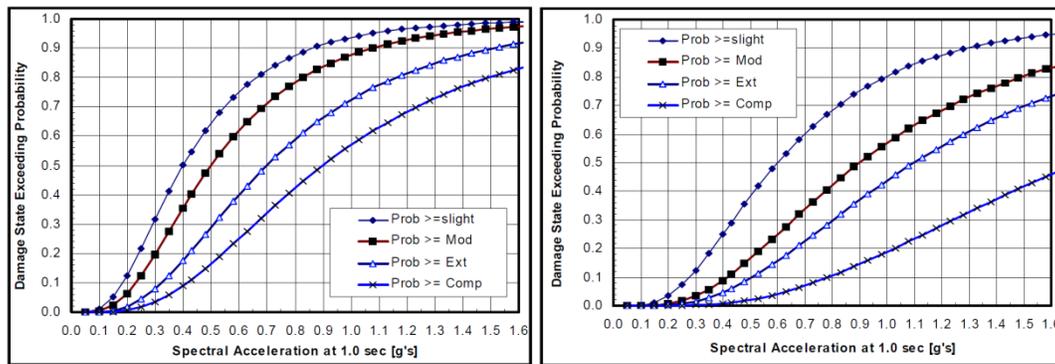
#### 2.4.6 Analyses de fragilité

Les analyses de fragilité des ponts permettent d'obtenir des fonctions ou courbes de fragilité donnant la probabilité d'atteindre différents niveau de dommages en fonction d'une intensité sismique. Ces courbes sont développées sur la base de :

- (i) Sondages d'opinion d'experts : leur précision est tributaire du taux de réponse, d'une vaste généralisation des classes de pont et des caractéristiques régionales des ponts.
- (ii) Données de dommages observés après des événements sismiques : ces fonctions empiriques sont souvent basées sur une seule intensité sismique et sur les dommages observés à un nombre limité de ponts.
- (iii) Analyses structurales : les courbes de fragilité par analyse structurale reposent sur des analyses statiques non-linéaires (push-over) ou des analyses dynamiques temporelles de modèles de ponts. Ces analyses visent à comparer la capacité de la structure à la demande structurale définie en fonction d'une mesure de l'intensité sismique (accélération ou déplacement spectral, accélération maximale au sol, intensité de Mercalli Modifiée, etc.) (Choi *et al.* 2004, Nielson and DesRoches 2007; Isakovic *et al.* 2008; Moschonas *et al.* 2009, Ramanathan *et al.* 2010).

Une des applications les plus répandues faisant usage des fonctions de fragilité est l'outil d'évaluation multi-risque Hazus (FEMA-NIBS 2003). Les données de fragilité de 28 classes de ponts (subdivisées entre les ponts de la Californie et les autres) sont utilisées pour évaluer la distribution de dommages selon différents scénarios de séismes. Les courbes de fragilité donnent la distribution cumulative en lognormal de la probabilité de dépassement d'un niveau de dommage. Une courbe représente la réponse médiane d'un ensemble d'ouvrages ayant des caractéristiques similaires. La Figure 10 donne un exemple des courbes de fragilité proposée par l'application Hazus. Ainsi, chaque courbe est définie par la valeur médiane de la mesure d'intensité (ici l'accélération spectrale) pour une probabilité de dépassement de 50%, et par la déviation (ou l'écart-type); par exemple pour un niveau de dommage faible (« *slight* ») la valeur médiane de  $S_a(1,0s)$  passe de 0,4g à 0,6g entre les ponts conçus avant 1975 et après 1975,

illustrant l'influence du niveau de conception sismique. Pour tenir compte de l'effet du biais ou du nombre de travées, les valeurs médianes des courbes d'Hazus sont modifiées par des facteurs d'ajustement. À noter que le classement proposé par le NYDOT est conforme avec les classes de pont Hazus.



(a) Conception conventionnelle (avant 1975)

(b) Conception sismique (après 1975)

**Figure 10 – Courbes de fragilité Hazus pour les ponts d'une longueur de travée supérieure à 150 m**  
(Tiré de FEMA-NIBS 2003)

Ainsi, on peut utiliser les courbes de fragilité pour établir un classement par priorité sur un grand nombre d'ouvrages en comparant les probabilités d'atteindre un niveau de dommage pour différentes classes de pont. Ceci requière cependant des données de fragilité considérant les caractéristiques des composantes (type d'appuis, biais, nombre de travées, type de piles, type de culées, etc.) et non seulement les classes de pont. Ceci est confirmé par Nielson et DesRoches (2007) qui ont développé des courbes de fragilité pour les composantes d'un pont typique, démontrant que la fragilité générale du pont peut varier par 40% du fait des caractéristiques de certaines composantes.

Au Québec, Tavares (2012) et Suescun (2010) ont proposé des courbes de fragilité pour 5 modèles de ponts à 3 travées continues ou simples, en béton ou en acier en considérant les paramètres suivants :

- ❑ Type de sol
- ❑ Type de fondation
- ❑ Type de pile
- ❑ Type de culée
- ❑ Certains paramètres géométriques telles que : la longueur totale, la largeur totale, la hauteur des colonnes et le ratio de la travée la plus large sur la longueur totale

Les courbes de fragilité développées donnent la probabilité d'atteindre quatre niveaux de dommages différents (de faible à complet) en fonction de l'accélération maximale au sol, pour les cinq classes de pont étudiées. Ces résultats peuvent servir à confirmer les pondérations accordées aux types de ponts dans les méthodes de classement indicelles : par exemple, les ponts continus avec dalle en béton apparaissent comme les plus vulnérables (AMS = 1,21g pour des dommages étendus) que ceux avec tablier en acier (AMS = 1,62g pour les dommages étendus) et les ponts à travées simples en béton sont plus vulnérables que les ponts à travées simples en acier.

### 3 CRITÈRES ET CADRE D'UTILISATION DE LA MÉTHODE D'ÉVALUATION DU MTQ

#### 3.1 GESTION DES RISQUES LIÉS AUX OUVRAGES D'ART

Le MTQ gère environ 10 000 structures, dont près de 8 500 ponts sur l'ensemble des 14 directions territoriales (DT). Les données d'inventaire des structures (données saisies lors de la conception de l'ouvrage) et les données d'inspections sont compilées dans la base de données du système de gestion des structures GSQ (BDD-GSQ). Le calcul et la compilation des indices de vulnérabilité sismiques (IVS) se fait actuellement à partir des informations disponibles dans la BDD-GSQ selon la formulation de la méthode MTQ95, voir Équation (2). L'IVS est utilisé dans deux contextes différents : (i) d'une part, il est utilisé conjointement avec d'autres indices lors de prises de décision sur les interventions classiques sur les ouvrages et (ii) d'autre part, il sert à déterminer les priorités d'inspection et d'intervention après un évènement sismique.

Les données d'inspection servent également à déterminer l'indice de comportement de la structure (ICS) à partir de l'état des matériaux et du comportement des éléments de la structure. L'ICS varie entre 0 et 100 et prend en compte l'ensemble des éléments d'un ouvrage avec une pondération en fonction de l'importance de chaque élément. Il mesure la sécurité de l'ouvrage en fonction de son état ou endommagement : les structures neuves ont un indice de 100 et les vieux ouvrages peuvent avoir des indices très bas, voire nuls.

Le Manuel de gestion des risques liés aux ouvrages d'art (MTQ 2008), actuellement en préparation, propose également un indice socio-économique (ISE) qui varie de 0 à 100. L'ISE caractérise l'importance du pont comme bien et service au sein de la société. Dans un contexte d'évaluation de risque sismique, cet indice reflète les conséquences de sa mise hors service après un séisme : plus l'ISE est élevé, plus les conséquences de sa perte seraient importantes, notamment en termes de perte de vies humaines, diminution de la mobilité, répercussions économiques, large couverture médiatique, et impact sur la réputation de l'organisation. Il est directement relié au réseau stratégique du MTQ (aspect commercial du transport des biens et marchandises) et prend en compte :

- ❑ La valeur à neuf de l'ouvrage
- ❑ L'indice Patrimonial des Structures
- ❑ La distance de détour
- ❑ Le DJMA (Débit journalier moyen annuel)
- ❑ Le pourcentage camions/DJMA
- ❑ La présence de services publics (téléphone, eau, égouts, gaz, télécommunication)
- ❑ Le réseau d'appartenance (passages pour piétons (vélos, VTT, chemin de fer, etc), réseau routier municipal, RS, RSTQ, RSSCE)
- ❑ Le réseau d'obstacle (cours d'eau ou autre obstacle, réseau routier local, RSTQ, RSSCE, chemin de fer)

Le Manuel de gestion des risques liés aux ouvrages d'art propose l'utilisation combinée de l'indice de vulnérabilité sismique (IVS) et de l'indice socio-économique (ISE) dans une cartographie du risque à

quatre quadrants, illustrée à la Figure 11. Cette cartographie du risque permet d’avoir un portrait global de la vulnérabilité de l’ouvrage et d’identifier les ponts importants et vulnérables vis-à-vis de un ou plusieurs risques en même temps. Un résultat dans le quadrant I indique que l’ouvrage doit être traité en priorité. Ensuite le quadrant II est prioritaire au quadrant III car une vulnérabilité élevée et considérée plus critique qu’un ISE élevé. La limite au-delà de laquelle on considère un potentiel de risque est établie à 50. Ainsi, **l’indice de vulnérabilité sismique (IVS) doit varier entre 0 et 100 et une valeur inférieure à 50 correspond à une vulnérabilité sismique plus ou moins faible.**

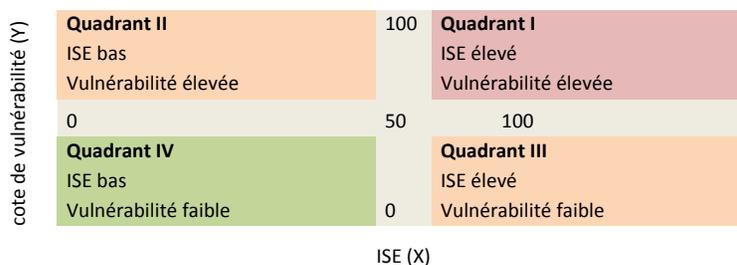


Figure 11 - Quadrant utilisé pour la gestion des risques

### 3.2 PARAMÈTRES POUR L’ÉVALUATION DES IVS ET DONNÉES DE LA BDD-GSQ

#### 3.2.1 Paramètres considérés pour le calcul de l’IVS<sub>MTQ95</sub>

Les paramètres considérés dans le calcul de l’IVS<sub>MTQ95</sub>, décrits à l’Annexe 1, peuvent être extraits directement de la BDD-GSQ ou déterminés à partir des informations de la BDD-GSQ. Afin d’identifier les liens entre les données disponibles et les facteurs et coefficients à définir pour le calcul de l’IVS<sub>MTQ95</sub>, 22 ouvrages ont été étudiés :

- 9 ponts à dalle épaisse (4 ponts à dalle pleine en béton armé, 1 pont à dalle pleine en béton précontraint, et 4 portiques en béton armé) ;
- 13 ponts à poutres à âme pleine (6 ponts à poutres en béton précontraint préfabriqué, 2 ponts à poutres en béton précontraint coulé en place, 2 ponts à poutres en acier, 3 ponts acier-bois).

L’Annexe 6 résume les liens entre les paramètres considérés dans la méthode MTQ95 et la méthode VdQ2007, les données de la BDD-GSQ et certaines hypothèses émises lorsque les données sont manquantes ou incertaines. Les paramètres spécifiques à la méthode VdQ2007 sont aussi identifiés.

#### 3.2.2 Paramètres additionnels

D’autres paramètres, présentement absents dans le calcul de l’IVS, seront considérés afin d’améliorer et de mieux calibrer la méthode d’évaluation actuelle. Le Tableau A 9 de l’Annexe 6 présente les liens entre les paramètres supplémentaires identifiés à la Section 2 et les données de la BDD-GSQ.

## 4 ANALYSE DE LA FORMULATION DE L'IVS MTQ95 DANS SON CONTEXTE D'UTILISATION

### 4.1 OBJECTIFS

Les objectifs de cette section sont :

- i) Évaluer d'une part la capacité des formulations MTQ95 et VdQ2007 à donner un indice qui répond aux critères visés pour une utilisation dans le contexte de gestion des risques des ouvrages d'art.
- ii) Identifier l'influence des paramètres de vulnérabilité de la structure dans la formulation MTQ95.

### 4.2 MÉTHODOLOGIE

Cette partie de l'étude est réalisée à partir des données extraites de la BDD-GSQ sur les ouvrages de la Direction Territoriale de la Capitale-Nationale. Cet échantillon a été choisi pour son nombre élevé de structures, sa grande diversité de types de ponts et de sols et des accélérations maximales au sol (AMS) variant entre 0,18g et 1,2g. Au total la BDD-GSQ de la DT Capitale-Nationale compte 827 ouvrages, y compris les murs et les stations de pompage, et 733 de ces ouvrages sont des ponts répartis comme suit :

- 513 ponts à travée unique;
- 73 ponts à travées multiples continues;
- 147 ponts à travées multiples semi-continues ou simplement appuyées.

L'étude a été réalisée en deux étapes, d'abord pour les ponts à travée unique et ensuite pour les ponts à travées multiples continues :

- 1) Calcul et analyse des IVS selon la formulation actuelle MTQ95 et selon la méthode VdQ2007.
- 2) Calcul et analyse d'une formulation simplifiée de l'IVS<sub>MTQ95</sub> en ne considérant que les paramètres reliés à la structure et en faisant abstraction de l'aléa sismique, de l'effet d'amplification et de la présence des équipements de services publics.

L'information de la BDD-GSQ sur le sol sous les fondations, lorsque disponible, n'est pas nécessairement conforme aux descriptions des sols utilisées par la méthode MTQ95 ou VdQ2007. En effet, la méthode MTQ95 utilise la description des profils de sol de la norme CAN/CSA-S6 (2006) alors que la méthode VdQ2007 repose sur les catégories d'emplacement sismique NHERP utilisées par le Code National du Bâtiment (CNRC 2010). Ces descriptions sont données au Tableau A 6 et au Tableau A 7 de l'Annexe 3. Également, le type de fondations n'est pas toujours indiqué. Ainsi, il n'est pas toujours possible de déterminer de façon précise les facteurs d'influence ou de vulnérabilité sismique reliés à la nature du sol et à l'effet d'amplification ou au type de fondations.

Dans ce contexte, deux approches peuvent être envisagées quant à l'attribution de la valeur du facteur d'influence sismique  $FF$  (effet d'amplification du sol) pour le calcul de l'IVS<sub>MTQ95</sub> (voir Tableau A 1):

- ❑ **Approche 1 :** Sans égard aux données sur les fondations, si aucune donnée de sol n'est disponible pour au moins une des fondations de l'ouvrage, le  $FF$  est fixé à la valeur maximale de 2. Ceci correspond à un sol de type IV (cas le plus conservateur).
- ❑ **Approche 2 :** Si aucune donnée de sol n'est disponible, mais que les données sur les fondations sont disponibles, alors une valeur plus réaliste est attribuée au facteur  $FF$  en tenant compte du type de fondation, soit :
  - ✓ Fondations superficielles :  $FF = 1,3$
  - ✓ Fondations profondes :  $FF = 1,5$
  - ✓ Aucune donnée de fondation :  $FF = 2$
  - ✓ Aucune donnée de fondation pour les structures de type ponceau :  $FF = 1$

Pour le calcul de l' $IVS_{VdQ2007}$  seule l'**approche 2** a été considérée pour déterminer le facteur de vulnérabilité  $V_S$  relié à la catégorie d'emplacement sismique. Ces hypothèses et celles pour déterminer les valeurs du facteur de vulnérabilité  $V_F$  relié au type de fondations sont détaillées au Tableau A 4 et Tableau A 9 de l'Annexe 6.

Dans le cadre de cette étude l'interprétation des IVS se fait sur une base comparative et non selon des critères préétablis. En effet, la méthode originale MTQ95 ne propose pas de valeurs d'IVS limites entre des niveaux de priorité en vue d'une évaluation détaillée ou d'une intervention prioritaire. Quant à la méthode VdQ2007, des valeurs limites d'IVS ont été proposées pour classer les ponts de la Ville de Québec en quatre groupes de priorité (Nollet *et al.* 2008). Cependant, compte-tenu de la formulation actuelle des  $IVS_{MTQ95}$  et  $IVS_{VdQ2007}$ , de tels critères doivent être établis selon le contexte d'utilisation et être adaptés au parc d'ouvrages évalués.

### 4.3 RÉSULTATS DE L'ANALYSE DES FORMULATIONS DES IVS MTQ95 ET VdQ2007

Cette première étape de l'étude répond au premier objectif qui est d'établir si les formulations MTQ95 et VdQ2007 répondent aux critères visés pour une utilisation dans le contexte de gestion des risques des ouvrages d'art. Plus spécifiquement il s'agit de déterminer si :

- 1) La variation de l'IVS est suffisamment dispersée pour permettre de distinguer clairement les ponts les plus vulnérables des moins vulnérables, et cela autant pour les ponts à travée unique que pour les ponts à travées multiples continues;
- 2) Les formulations actuelles des indices MTQ95 et VdQ2007 se prêtent bien à une modification ou adaptation pour une utilisation conforme à la cartographie des risques (voir Section 3.1).
- 3) L'IVS peut être utilisé sur le territoire d'une DT tout en représentant la vulnérabilité relative des ouvrages lorsque l'aléa sismique est peu variable.

#### 4.3.1 Ponts à travée unique

Pour les ponts à travée unique les coefficients  $C_2$  (complexité structurale),  $C_3$  (nombre de discontinuités) et  $C_4$  (redondance des éléments de fondation) sont égaux à **zéro**.

La formulation de l' $IVS_{MTQ95}$  se réduit alors à :

$$IVS_{MTQ95} = 100 - (RS \times FF \times FA)(0,22 C_1 + 0,07 C_5 + 0,02 C_6 + 0,07 C_7 + 0,12 C_8) \quad (4)$$

Sur le territoire de la Capitale-Nationale, le  $RS$  maximum est de 5 (La Malbaie) et la valeur théorique de l' $IVS_{MTQ95}$  varie entre 50 et 100, 50 indiquant les ponts les plus vulnérables.

La formulation de l' $IVS_{VdQ2007}$  demeure quant à elle inchangée, voir Équation (3). Cependant, les valeurs minimales des facteurs de vulnérabilité du tablier,  $V_T$ , et des appuis,  $V_A$ , qui sont fonction des coefficients  $C_2$ ,  $C_3$  et  $C_4$ , sont de 0,25 et de 0,67, respectivement (voir Annexe 2). Sur le territoire de la Capitale-Nationale, le facteur  $AS$  minimum est égal à 0,6 (sismicité modérée) et la valeur théorique de l' $IVS_{VdQ2007}$  varie entre 4 et 10, 10 indiquant les ponts les plus vulnérables.

La Figure 12 présente la variation de l' $IVS_{MTQ95}$  en fonction des approches 1 et 2. Les indices obtenus selon l'approche 1, plus conservatrice, sont en général inférieurs à ceux obtenus selon l'approche 2, et illustrent des ponts plus vulnérables. On remarque que les indices sont plutôt regroupés et très peu dispersés, ce qui ne permet pas d'identifier clairement les ouvrages les plus à risque. Même selon l'approche 1 sur des conditions de sol plus conservatrices que selon l'approche 2, 94% des ponts obtiennent un indice supérieur à 80.

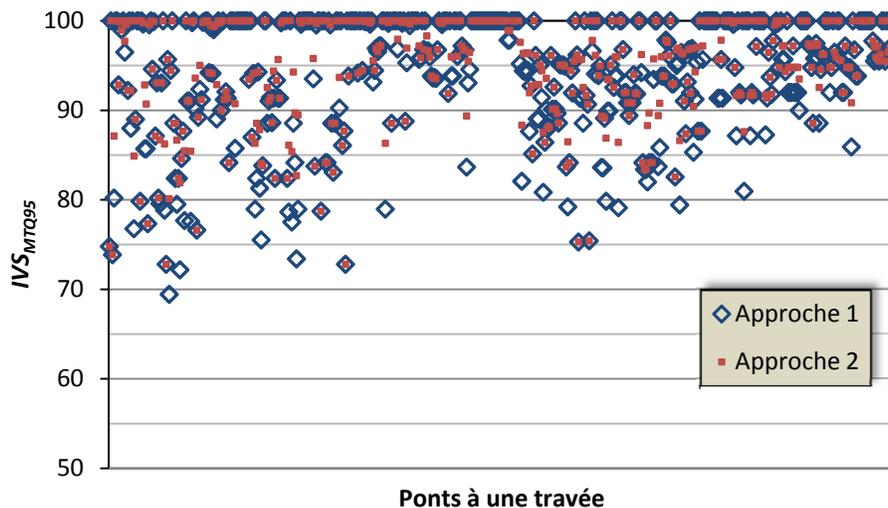


Figure 12 – Valeurs des  $IVS_{MTQ95}$  selon les approches 1 et 2

Le Tableau 1 donne les valeurs minimales et maximales des indices calculés. Les moyennes sont relativement élevées et les écarts type plutôt faibles, ce qui traduit la faible dispersion des valeurs. Les

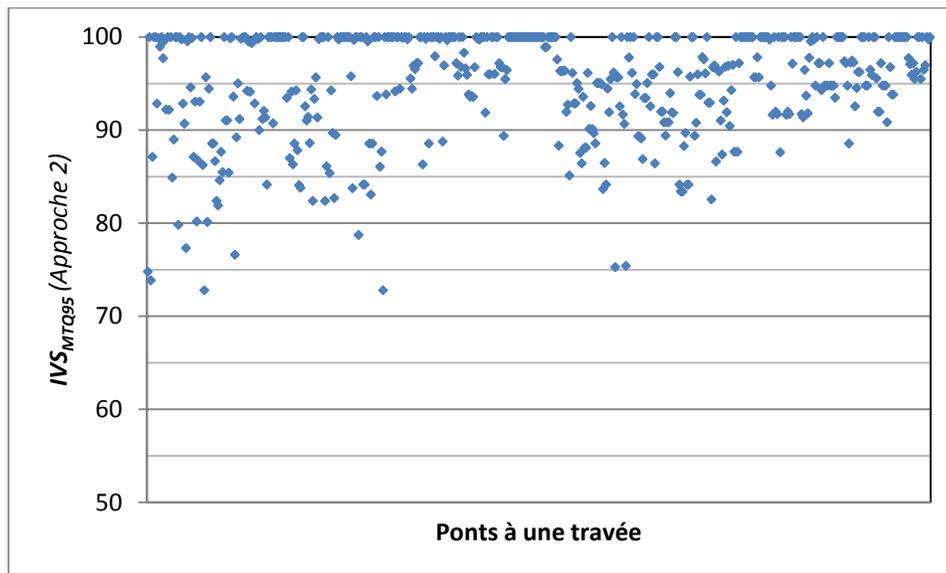
cas les plus vulnérables sont identifiés par un  $IVS_{VdQ2007}$  qui atteint son maximum théorique (10), dès lors qu'un des facteurs de vulnérabilité est nul. Cette situation se produit pour les sols identifiés comme potentiellement liquéfiables ( $V_S = 0$ ) ou pour un facteur de vulnérabilité générale  $V_G$  nul (défini par l'âge, le type de pont et les services publics). À l'opposé, l' $IVS_{MTQ95}$  n'atteint pas son minimum théorique (50) pour les ouvrages les plus vulnérables, alors qu'il atteint son maximum théorique (100) pour les cas les moins vulnérables.

**Tableau 1 – Résultats statistiques des valeurs d'IVS pour les ponts à travée unique**

	MTQ95*	VdQ2007*
IVS minimum théorique	50	4
IVS maximum théorique	100	10
IVS minimum obtenu	72,80	6,04
IVS maximum obtenu	100,00	10,00
Écart Type	5,64	0,95
Moyenne	95,28	8,66

\*Selon l'approche 2

La Figure 13 et la Figure 14 illustrent la répartition des IVS selon l'approche 2. Les valeurs d' $IVS_{VdQ2007}$  semblent légèrement plus dispersées, mais sont très proches du maximum de 10, avec des écarts faibles entre les indices.



**Figure 13 – Répartition des  $IVS_{MTQ95}$  pour les ponts à travée unique selon l'approche 2**

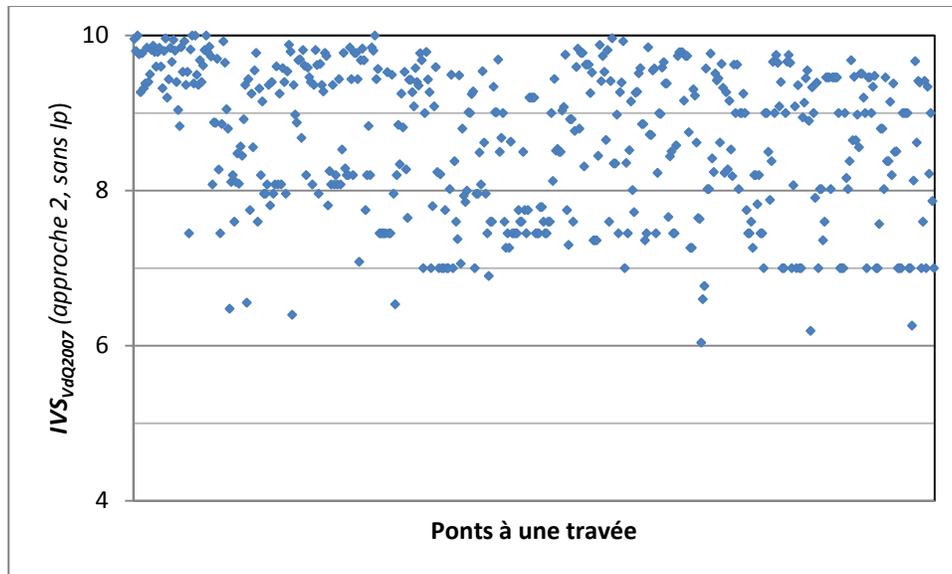


Figure 14 – Répartition des  $IVS_{VdQ2007}$  pour les ponts à travée unique selon l'approche 2

L'analyse des indices en fonction des caractéristiques des ouvrages les plus vulnérables ( $IVS_{VdQ2007}$  de 10 et  $IVS_{MTQ95}$  autour de 72,8 dans le cas présent), indique que l'âge, le type de pont et la présence de services publics ont une influence plus prononcée dans la formulation VdQ2007. Par ailleurs, la prise en compte de la nature des fondations (profondes ou superficielles) dans la méthode VdQ2007 résulte en des IVS indiquant des ouvrages plus vulnérables dans le cas des ponts âgés sur fondations profondes (ou non spécifiées dans la base de données). Certains ouvrages voient leur classement relatif changer de façon notable entre les deux méthodes. On note aussi pour certains ouvrages, que l'évolution des données sismiques entre 1995 et 2005 résulte en un aléa sismique relatif plus élevé ou plus faible, ce qui affecte le classement général de ces ponts selon qu'il est établi avec l' $IVS_{MTQ95}$  ou l' $IVS_{VdQ2007}$ .

#### 4.3.2 Ponts à travées multiples continues

Pour les ponts à travées multiples continues, le coefficient  $C_3$  (nombre de discontinuités) est égal à **zéro**.

La formulation de l' $IVS_{MTQ95}$  se réduit alors à :

$$IVS_{MTQ95} = 100 - (RS \times FF \times FA)(0,22C_1 + 0,22C_2 + 0,13C_4 + 0,07C_5 + 0,02C_6 + 0,07C_7 + 0,12C_8) \quad (5)$$

Sur le territoire de la Capitale Nationale, le  $RS$  maximum est de 5 (La Malbaie), la valeur théorique de l' $IVS_{MTQ95}$  varie entre 15 et 100, 15 indiquant les ponts les plus vulnérables.

La formulation de l' $IVS_{VdQ2007}$  demeure quant à elle inchangée, voir Équation (3). Cependant, la valeur minimale du facteur de vulnérabilité du tablier,  $V_T$ , est de 0,25 (voir Annexe 2). Sur le territoire de la Capitale-Nationale, le facteur  $AS$  minimum est égal à 0,6 (sismicité modérée), la valeur théorique de l' $IVS_{VdQ2007}$  varie entre 4 et 10, 10 indiquant les ponts les plus vulnérables.

Le Tableau 2 donne les valeurs minimales et maximales des indices pour les 73 ponts à travées multiples continues. Les moyennes restent relativement élevées et les écarts type plutôt faibles, ce qui traduit la faible dispersion des valeurs. Cependant, les valeurs d'IVS<sub>MTQ95</sub> des ponts à travées multiples continues sont plus faibles et relativement plus dispersées que pour les ponts à travée unique. De plus, on constate une fois encore que les cas les plus vulnérables sont identifiés par un IVS<sub>VdQ2007</sub> qui atteint son maximum théorique (10), alors que l'IVS<sub>MTQ95</sub> n'atteint pas son minimum théorique (15) pour ces ouvrages.

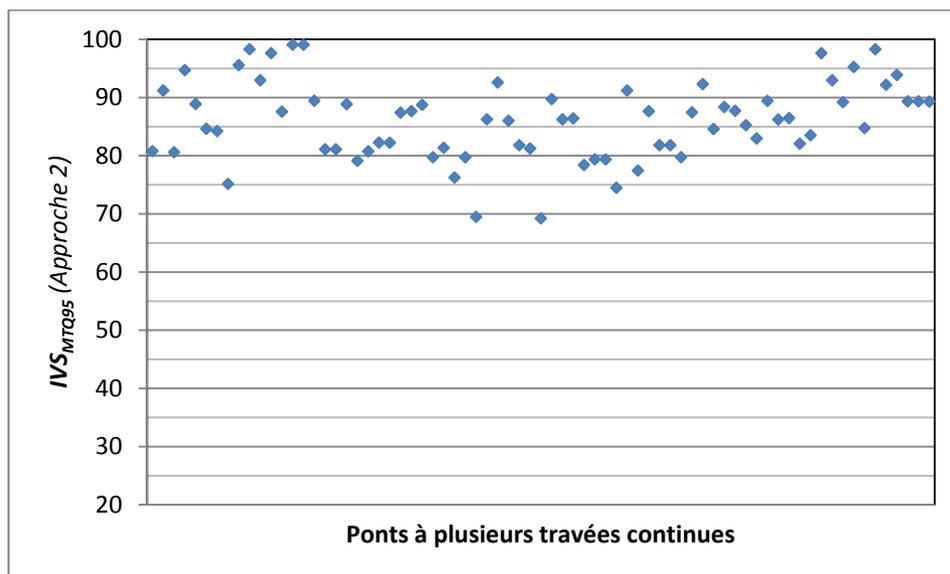
**Tableau 2 – Résultats statistiques des valeurs d'IVS pour les ponts à travers multiples continues**

	MTQ95*	VdQ2007
IVS minimum théorique	15	4
IVS maximum théorique	100	10
IVS minimum obtenu	69,23	5,20
IVS maximum obtenu	99,09	10,00
Écart Type	6,60	0,8
Moyenne	86,57	9,34

\*Selon l'approche 2

L'analyse des indices en fonction des caractéristiques des ouvrages les plus vulnérables (IVS<sub>VdQ2007</sub> de 10 et IVS<sub>MTQ95</sub> autour de 69 dans le cas présent), indique que l'âge, le type de pont et le type de fondation ont une influence plus prononcée dans la formulation VdQ2007.

La Figure 15 et la Figure 16 illustrent la répartition des IVS selon l'approche 2. Les valeurs d'IVS<sub>VdQ2007</sub> sont encore plus près du maximum de 10, avec des écarts faibles entre les indices.



**Figure 15 - Répartition des IVS<sub>MTQ95</sub> pour les ponts à travée multiples continues selon l'approche 2**

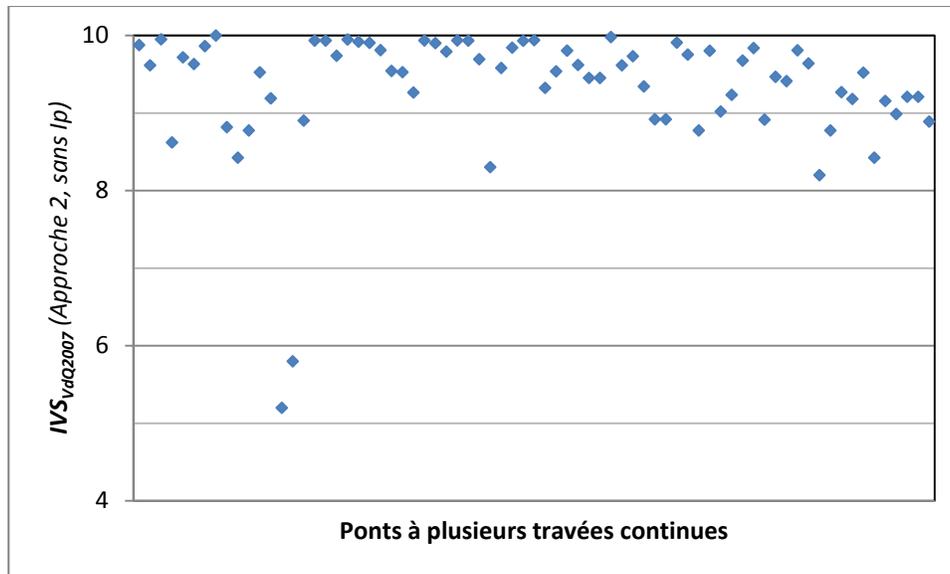


Figure 16 - Répartition des IVS<sub>VdQ2007</sub> pour les ponts à travée multiples continues selon l'approche 2

#### 4.4 RÉSULTATS DE L'ANALYSE DE LA FORMULATION SIMPLIFIÉE DE L'IVS<sub>MTQ95</sub>

##### 4.4.1 Introduction

Cette deuxième étape de l'étude répond au deuxième objectif qui est d'identifier l'influence des paramètres de vulnérabilité de la structure dans la formulation MTQ95. Seules les données sur les caractéristiques de la structure sont considérées, afin de s'affranchir des données secondaires et de l'aléa sismique. La formulation de l'IVS<sub>MTQ95</sub> est donc simplifiée en prenant les facteurs d'influence sismique  $RS$ ,  $FS$  et  $FA$  égaux à 1,0 et en ne considérant que les coefficients d'influence sismique suivants :

- ❑ Coefficient  $C_1$  : Type de pont
- ❑ Coefficient  $C_2$  : Complexité du comportement structural
- ❑ Coefficient  $C_3$  : Nombre de discontinuité dans le système structural
- ❑ Coefficient  $C_4$  : Type d'unité de fondation
- ❑ Coefficient  $C_5$  : Type d'appareil d'appui
- ❑ Coefficient  $C_6$  : Biais
- ❑ Coefficient  $C_7$  : Nombre de poutres

Le coefficient  $C_8$  (Services publics) est pris égal à zéro.

Les indices calculés par la formulation simplifiée de l'IVS<sub>MTQ95</sub> sont analysés et comparés aux groupes de priorité de la méthode NYDOT (NYDOT 1995) décrite à la Section 2.4.4 et à l'Annexe 4. Cette méthode distingue clairement les ponts à travée unique des ponts à travées multiples. Considérant le nombre de ponts à travée unique constituant le parc d'ouvrages de la DT de la Capitale-Nationale (70%), il est important de pouvoir évaluer si l'IVS<sub>MTQ95</sub> permet de bien distinguer entre les ponts les moins

vulnérables et les plus vulnérables de ce groupe. Par exemple, les ponceaux ou portiques sont reconnus pour leur faible vulnérabilité sismique, alors que les ponts à travée simplement appuyée avec un risque de perte d'appui (biais important ou appui à pendule) sont reconnus pour leur vulnérabilité sismique élevée. Dans la méthode NYDOT la vulnérabilité des ponts à travée unique n'est attribuable qu'au type de connexions aux culées et les ponts à culées intégrales sont assignés au groupe de priorité le plus faible (Groupe 4) alors que les plus vulnérables (travée simple avec risque de perte d'appui) sont assignés au groupe de priorité 2.

Dans le cas des ponts à travées multiples, l'IVS<sub>MTQ95</sub> doit pouvoir permettre de distinguer les ouvrages présentant un risque de perte d'appui ou un manque de redondance. Dans la méthode NYDOT ce risque est considéré en assignant ce type de ponts aux groupes de priorité 1 ou 2.

#### 4.4.2 Ponts à travée unique

Pour les ponts à travée unique la formulation simplifiée de la méthode MTQ95 devient:

$$IVS_{MTQ95-Travée\ unique} = 100 - (0,22 \times C_1 + 0,07 \times C_5 + 0,02 \times C_6 + 0,07 \times C_7) \quad (6)$$

↑ Type d'appareil d'appui
↑ Redondance (nombre de poutres)  
↓ Type de structure
↓ Biais

Dans l'Équation (6), la valeur théorique la plus faible est de 96,2 et le maximum de 100.

Les IVS calculés selon la formulation simplifiée pour les 513 ponts à travée unique sont présentés à la Figure 17. La Figure 17(a) montre que l'IVS<sub>MTQ95</sub> arrive à représenter la variation de la vulnérabilité relative des ponts en fonction des caractéristiques structurales. Cependant, le minimum théorique de 96,2 n'est pas atteint. Le classement des indices en fonction du coefficient  $C_1$  (type de structure), présenté à la Figure 17b, fait ressortir quatre paliers distincts correspondant aux différentes valeurs de  $C_1$ . Cela démontre que le type de structure dicte le classement des ponts à travée unique.

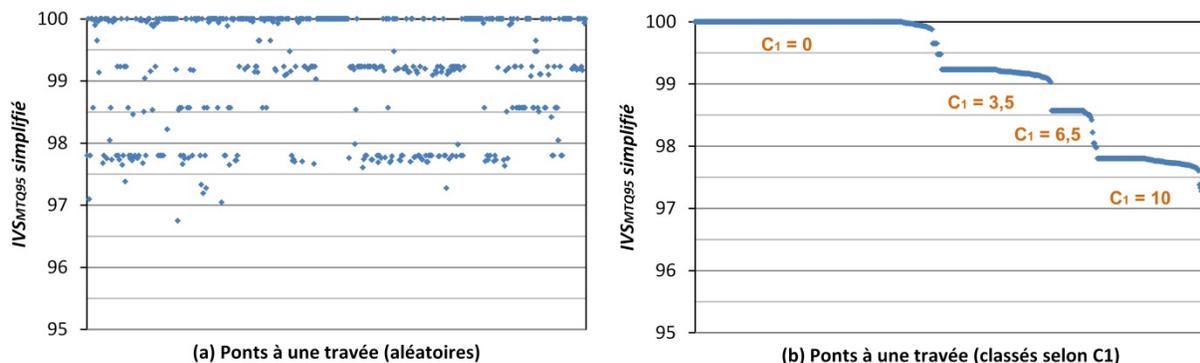
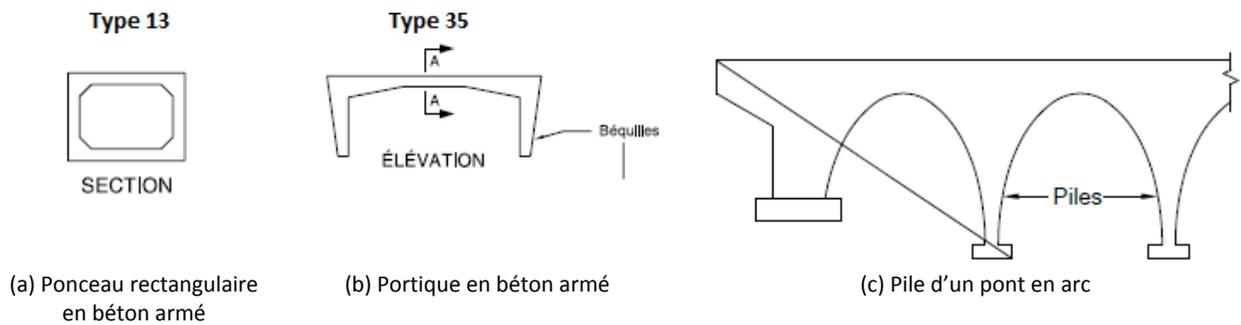


Figure 17 – Valeur d'IVS pour les ponts à une travée, avant et après classement selon le coefficient C1

Cependant, les structures de type ponceaux, type 11 à 21 du MTQ (Figure 18a), et portiques, types 35, 36 et 37 du MTQ ((Figure 18b), considérés à culées intégrales, ne se distinguent pas des autres ponts, alors que le classement NYDOT les place dans le groupe de priorité le plus faible (Groupe 4). À noter que certains autres types de ponts (Figure 18c) pourraient aussi être considérés à culées intégrales, comme certains ponts en arc.



**Figure 18 – Type de ponts à culées intégrales (Ministère des Transports du Québec, 2012)**

Le classement NYDOT assigne le groupe de priorité 2 aux ponts avec des appuis à pendule ou un biais supérieur à 30°. L'IVS<sub>MTQ95</sub> distingue bien les ponts avec appuis à pendule, alors qu'il ne le fait pas pour les ouvrages avec un biais. Par ailleurs, les ouvrages avec un nombre de poutres inférieur à 4 se démarquent.

#### 4.4.3 Ponts à travées multiples continues

Pour les ponts à travées multiples continues la formulation simplifiée de la méthode MTQ95 devient:

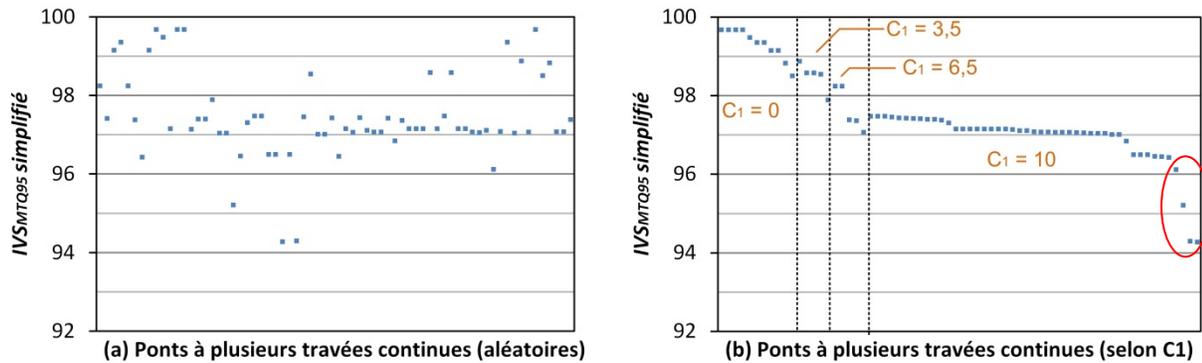
$$IVS_{MTQ95-Travées\ continues} = 100 - (0,22 \times C_1 + 0,22 \times C_2 + 0,13 \times C_4 + 0,07 \times C_5 + 0,02 \times C_6 + 0,07 \times C_7) \quad (7)$$

Type d'appareil d'appui
Type d'appareil d'appui
Redondance (nombre de poutres)

↓ Type de structure
↓ Biais
↓ Biais

Dans l'Équation (7), la valeur théorique la plus faible est de 92,7 et le maximum de 100.

Les IVS calculés selon la formulation simplifiée pour 68 ponts à travées multiples continues sont présentés à la Figure 19. La Figure 19(a) montre que l'IVS<sub>MTQ95</sub> arrive à représenter la variation de la vulnérabilité relative des ponts en fonction des caractéristiques structurales. On constate encore une fois que le minimum théorique (92,7) n'est pas atteint et que l'influence du type de pont (coefficient  $C_1$ ) est moins marquée, voir Figure 19(b) que pour les ponts à travée unique.



**Figure 19 – Valeur d'IVS pour les ponts à travées multiples continues, avant et après classement selon le coefficient C1**

Les ponts se démarquent, par la présence de piles à colonnes uniques, par des appareils d'appui à pendule, par le nombre de poutres du tablier (3 poutres et moins) ou par leur irrégularité verticale (considérée pour les ponts d'étagement seulement). Les 4 ponts ayant un  $IVS_{\text{simplifié}}$  inférieur à 96,1 combinent de 3 à 4 caractéristiques défavorables : ponts à béquilles en béton armé ou à dalle pleine ( $C_1 = 10$ ), ponts d'étagement avec une différence en hauteur de pile supérieure à 50% ( $C_2 = 10$ ), piles à colonne unique ( $C_4 = 10$ ) ou fût ( $C_4 = 2,5$ ), biais différent de zéro ( $C_6 > 0$ ) ou 3 poutres et moins ( $C_7 > 0$ ).

À noter qu'un seul pont en béton armé comporte des appareils d'appui à pendule combiné à un tablier ayant moins de 3 poutres. Son  $IVS_{\text{simplifié}}$  le classe au 5<sup>ème</sup> rang des valeurs les plus faibles dénotant l'influence des coefficients correspondants,  $C_2$  et  $C_7$ . De façon similaire, la méthode NYDOT assigne le groupe de priorité 2 aux ponts avec appareil d'appui à pendule ou aux ponts avec 3 poutres et moins. Par contre, la présence du biais n'a pas d'influence notable sur les résultats de l' $IVS_{\text{MTO95}}$ , alors que la méthode NYDOT leur assigne le groupe de priorité 2. Sur les 73 ponts à travées multiples continues, 9 ont un biais supérieur à 30°, le maximum étant à 58°, alors que 58% des ponts ont un biais inférieur à 10°.

#### 4.4.4 Bilan pour l'ensemble des ponts

La Figure 20 présente les  $IVS_{\text{MTO95}}$  pour la totalité des 581 ponts étudiés en fonction du coefficient  $C_1$  et du nombre de travées. Le coefficient de  $C_1$  (type de structure) est le coefficient structural le plus influent, mais a une influence plus marquée pour les ponts à travée unique. On constate également la plus grande dispersion des IVS pour les ponts ayant plus d'une travée continue que pour les ponts à une seule travée. Ceci illustre bien la faiblesse de l' $IVS_{\text{MTO95}}$  à distinguer les ponts à une travée les plus vulnérables. Par exemple :

*Un pont à poutres à âme pleine en béton, à une seule travée mais avec un appareil d'appui à pendule, un biais de plus de 60°, et une poutre unique, aura un IVS, si l'on ne considère que les données structurales, de 96,2. Il sera mieux classé qu'un pont d'étagement continu à 3*

travées avec des poutres à âme pleine en béton et 2 piles ayant une différence de hauteur de plus de 50%. Un pont avec ces caractéristiques aura un IVS de 95,6.

Par ailleurs, deux ouvrages se distinguent avec un IVS de 94,3, avec les coefficients  $C_1 = 10$  (pont à béquille et pont à dalle pleine),  $C_2 = 10$  (ponts d'étagement, avec une différence de hauteur des piles supérieure à 50%) et  $C_4 = 10$  (unités de fondation piles à colonne unique).

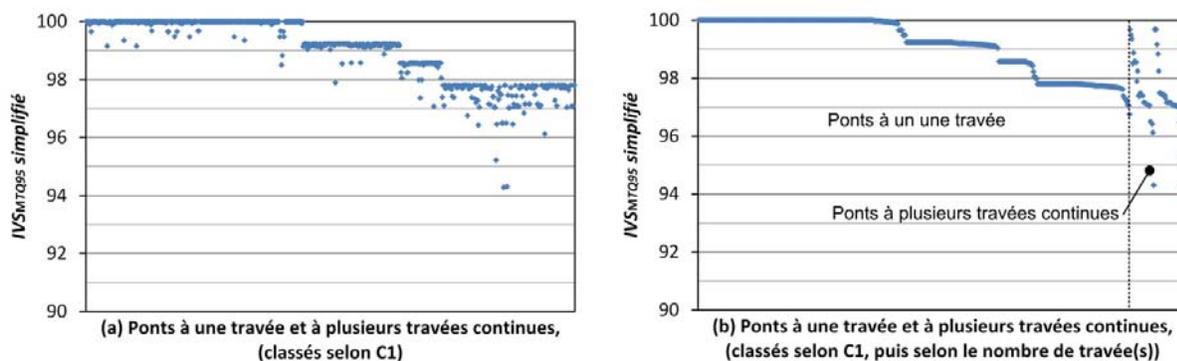


Figure 20 – Classement des IVS des ponts à une travée et à plusieurs travées continues selon le coefficient  $C_1$ , puis selon le nombre de travée

#### 4.5 CONCLUSIONS

Les résultats de l'étude permet de dégager les constats suivants :

##### JUGEMENT GÉNÉRAL SUR LES MÉTHODES MTQ95 ET VdQ2007

- ❑ Les ponts à travée unique représentent environ 70% de l'échantillon extrait de la BDD. Compte tenu du fait que cet échantillon de la DT de la Capitale-Nationale est représentatif des ponts de la Province, la formulation retenue devra être représentative de la vulnérabilité relative de l'ensemble des ponts à travée unique.
- ❑ **La méthode MTQ95 n'est pas assez discriminante** : L'échelle de variation de l'IVS<sub>MTQ95</sub> n'est pas appropriée pour son utilisation dans le contexte de la gestion des risques des ouvrages d'art. Sa formulation actuelle ne permet pas d'obtenir un indice inférieur à 50 pour les ponts les plus vulnérables pour les ponts de la DT de la Capitale-Nationale. Donc, une simple inversion de la formule (100 indiquant les ponts les plus vulnérables au lieu de 0) ne permet pas d'obtenir un IVS supérieur à 50 conforme à la cartographie du risque (voir Figure 11).
- ✓ **La méthode VdQ2007 est trop conservatrice** : Bien que la dispersion des indices soit légèrement plus grande dans le cas des ponts à travée unique, la majorité des indices sont très près du maximum de 10 avec des écarts faibles entre les valeurs et la grande majorité des ponts ont un IVS supérieur à 7. La conversion en une échelle graduelle de 0 à 100 (en multipliant l'IVS<sub>VdQ2007</sub> par 10) indiquerait donc que l'ensemble des ponts sont prioritaires, ce qui n'est pas réaliste.

## INFLUENCE DES PARAMÈTRES

---

- ❑ Le type de pont, dans la méthode MTQ95, est le coefficient structural le plus influent, particulièrement pour les ponts à travée unique.
- ❑ La méthode MTQ95 ne fait pas ressortir les structures de type ponceau et portique, considérées à culées intégrales.
- ❑ En ne considérant que les données structurales (formulation MTQ95 simplifiée), la faible dispersion des indices des ponts à travée unique ne permet pas de distinguer les ponts les plus vulnérables.
- ❑ L'influence du biais, même lorsqu'il est supérieur à 30°, n'apparaît pas dans l'indice calculé pour les ponts à travée unique ni pour les ponts à travées multiples continues.
- ❑ L'influence de la redondance reliée au nombre de poutres est bien représentée.
- ❑ Le type de fondations et leur niveau de conception sismique, considérés dans la formulation VdQ2007, ont une influence marquée sur l'indice de vulnérabilité et devraient être conservés.

## PARAMÈTRES À PRÉCISER

---

- ❑ L'évolution des données d'aléa sismique impose d'actualiser la définition du facteur d'influence sismique prenant en compte les plus récentes données d'aléa au site de chaque ouvrage.
- ❑ En cas d'informations incertaines sur le sol ou les fondations, les hypothèses prises pour définir les facteurs d'influence ou de vulnérabilité reliés à l'effet d'amplification ou au type de fondations sont parfois multiples, et peuvent mener à des résultats d'IVS variables.

## 5 FORMULATION PROPOSÉE POUR LE CALCUL DE L'IVS<sub>MTQ2013</sub>

### 5.1 RAPPEL DES OBJECTIFS ET CRITÈRES

La nouvelle formulation proposée répond aux objectifs et critères suivants :

- 1) IVS compatible au cadre de gestion des risques des ouvrages d'art décrit à la Section 3.1 :
  - L'IVS doit varier de 0 à 100, une valeur inférieure à 50 indiquant un ouvrage présentant un risque plus ou moins faible alors qu'un indice supérieur à 50 indique un ouvrage présentant un risque plus ou moins élevé.
  - L'IVS doit pouvoir être calculé à partir des données de la BDD du système GSQ.
- 2) IVS applicable aussi bien sur le territoire de la Province qu'à l'intérieur d'une DT :
  - La dispersion des IVS doit permettre d'identifier les ouvrages les plus vulnérables lorsque l'aléa sismique est très variable (territoire de la Province).
  - La dispersion des IVS doit permettre d'identifier les ouvrages les plus vulnérables lorsque l'aléa sismique est constant ou peu variable (territoire d'une DT).
- 3) IVS incluant les paramètres et caractéristiques des ouvrages ayant une influence sur la vulnérabilité sismique des ponts.

### 5.2 RECOMMANDATIONS TIRÉES DES ÉTUDES ET ANALYSES

Les recommandations suivantes considèrent les critères énoncés plus haut et les conclusions tirées de l'étude des paramètres influents (Section 2) et de l'analyse de la formulation des IVS<sub>MTQ95</sub> et IVS<sub>VdQ2007</sub> (Section 4).

#### FORMULATION DE L'IVS

---

1. Éliminer les ouvrages reconnus très peu vulnérables (tunnel, murs, etc.).
2. Donner plus de poids au type de pont et à l'année de conception : ces deux paramètres représentent le niveau de charge sismique et le niveau de détails de conception parasismique.
3. Utiliser une formulation avec des facteurs de vulnérabilité composés permettant de considérer le risque de perte d'appui autant pour les ponts à travée unique que pour les ponts à travées multiples (simples, continues ou semi-continues).
4. Utiliser l'ISE pour prendre en compte l'importance du pont, le réseau d'appartenance, le réseau d'obstacle et la présence des services et les ponts d'étagement. Le coefficient  $C_s$  est donc exclu de l'IVS.

## ACTUALISATION DES PARAMÈTRES

---

5. Considérer les données sismiques les plus récentes fournies par Ressources Naturelles Canada<sup>3</sup>.
6. Moduler le facteur d'aléa sismique pour considérer une variation sur le territoire de la province et une autre sur le territoire d'une DT.
7. Relier le facteur d'amplification du site à la catégorie sismique d'emplacement telle que définie dans le CNBC 2010 (CNRC 2010) (voir Tableau A 7 à l'Annexe 3).
8. Réviser les valeurs des coefficients pour les ponts à culées intégrales.
9. Considérer l'irrégularité verticale pour l'ensemble des ponts par le biais d'un facteur de vulnérabilité composé pour les piles.

## AJOUT DE PARAMÈTRES

---

10. Créer une ou deux classes supplémentaires pour les appareils d'appui afin d'avoir une meilleure différenciation (par exemple pour tenir compte de la présence d'isolateurs sismiques).
11. Lier le biais à la longueur d'appui disponible.
12. Ajouter un facteur de vulnérabilité composé pour les culées.
13. Considérer le type de fondation pour les piles et les culées.
14. Considérer certaines particularités de conception.
15. Considérer l'endommagement via l'indice de comportement structural (ICS).

### 5.3 PROCÉDURE ET FORMULATION GÉNÉRALE DE L'IVS<sub>MTQ2013</sub>

Une procédure en trois étapes est proposée :

1. Effectuer un tri préliminaire pour dégager les ouvrages au comportement sismique satisfaisant, et les ouvrages d'importance négligeable;
2. Calculer les IVS pour les ouvrages restants;
3. Prioriser en considérant l'ISE.

#### 5.3.1 Tri préliminaire

Le tri préliminaire permet d'identifier les ouvrages tels que : les passages pour piétons, motoneiges ou VTT, les chemins privés et les stationnements, dont l'obstacle n'est pas une voie type route standard, les tunnels, les ouvrages démolis ou à l'état de projet. Ces ouvrages se voient directement attribuer un IVS de 0.

À noter qu'un IVS est calculé aussi pour les ouvrages à très grande portée (supérieure à 150 m), considérés plus critiques et devant nécessairement faire l'objet d'une évaluation détaillée (ex. *Pont de l'Île d'Orléans*, etc.). Ces ouvrages font déjà partie d'un programme particulier de surveillance et leur priorité sera mise en évidence par leur ISE élevé.

---

<sup>3</sup> [http://www.seismescanada.rncan.gc.ca/hazard-alea/interpolat/index\\_2010-fra.php](http://www.seismescanada.rncan.gc.ca/hazard-alea/interpolat/index_2010-fra.php)

### 5.3.2 Développement de la nouvelle formulation de l'IVS<sub>MTQ2013</sub>

Une nouvelle formulation pour l'IVS<sub>MTQ2013</sub> proposée respecte les recommandations émises plus haut et est conforme à la définition du risque sismique de l'Équation (1) :

$$IVS_{MTQ2013} = (F_{Aléa} \times F_{Site}) \times Vulnérabilité \leq 100 \quad (8)$$

Le développement de cette formulation et du facteur global de vulnérabilité a suivi les étapes suivantes :

1. Définition des valeurs limites attribuées aux facteurs d'aléa sismique ( $F_{Aléa}$ ), d'amplification du site ( $F_{Site}$ ) et du facteur global de vulnérabilité ( $Vulnérabilité$ ). Ces limites, et les ratios entre les différentes conditions d'aléa ou de site, ont été établis en considérant les scénarios suivants
  - Aléa faible, modéré ou élevé;
  - Site de catégorie A, C ou E;
  - Pont ayant des caractéristiques générales défavorables (type structural en béton et âge) avec ou sans déficiences additionnelles (cas extrêmes considérés seulement);
  - Pont récent sans aucune déficience.

Le Tableau 3 présente les valeurs limites établies.

**Tableau 3 – Valeurs limites des facteurs  $F_{aléa}$  et  $F_{site}$  et du facteur global de vulnérabilité**

Facteur d'influence sismique	Valeur minimale	Valeur maximale
$F_{aléa} \times F_{site}$	1,0	3,125
$F_{aléa}$	1,0	2,5
$F_{site}$	1,0	1,25
$Vulnérabilité$	1,0	32

2. Définition de la formulation du facteur global de vulnérabilité et calibration et facteurs de vulnérabilité composés. Le facteur global de vulnérabilité est exprimé par :

$$Vulnérabilité = V_{Général} \times (Cte + V_{Superstructure} + V_{Infrastructure}) \leq 32 \quad (9)$$

Cette formulation donne plus de poids au facteur de vulnérabilité générale  $V_{Général}$  qui considère le type de structure, l'âge et l'endommagement du pont et reflète : le niveau de conception sismique et le niveau de charge sismique, et le comportement général du pont. Les facteurs de vulnérabilité  $V_{Superstructure}$  et  $V_{Infrastructure}$  viennent amplifier la vulnérabilité générale en considérant les déficiences probables au niveau du tablier (risque de perte d'appui), des piles ou des culées. La calibration des valeurs limites à accorder à ces facteurs et la définition de la constante  $Cte$  a été réalisée en considérant des scénarios de déficiences probables. L'utilisation de la constante  $Cte$  permet de maintenir le facteur global de vulnérabilité à un niveau acceptable pour que l'IVS soit supérieur à 50 pour les ponts les plus vulnérables.

3. Calibration des poids associés à chaque coefficient d'influence : le poids attribué aux paramètres entrant dans le calcul des différents facteurs de vulnérabilité  $V_{Général}$ ,  $V_{Superstructure}$  et  $V_{Infrastructure}$ , décrits aux paragraphes suivants, ont été établis sur la base de la revue de littérature et par des simulations de scénarios de déficiences théoriques.

### 5.3.3 Priorisation avec l'ISE

L'IVS<sub>MTQ2013</sub> est ensuite utilisé en combinaison avec l'ISE dans la cartographie du risque de la Figure 11.

## 5.4 FORMULATION DE L'IVS<sub>MTQ2013</sub>

### 5.4.1 Formulation et définitions

La formulation proposée est basée sur la probabilité conditionnelle de plusieurs évènements (ex. le risque est plus faible si l'aléa est faible même si la vulnérabilité de la structure est élevée), et la probabilité de la réunion de deux évènements (ex. la vulnérabilité d'un pont est due à la fois à la vulnérabilité de sa superstructure et de son infrastructure). L'IVS<sub>MTQ2013</sub> est donné par :

$$IVS_{MTQ2013} = (F_{Aléa} \times F_{Site}) \times V_{Général} \times (8 + V_{Superstructure} + V_{Infrastructure}) \leq 100^* \quad (10)$$

\*Pour les sites de catégorie F, nécessitant une étude géotechnique,  $F_{Site} = 10$  et l'IVS<sub>MTQ2013</sub> calculé est supérieur à 100. Il est alors fixé à 100.

Où  $F_{Aléa}$  est le facteur d'aléa sismique défini en fonction de l'accélération maximale au sol à la localisation de l'ouvrage (AMS),  $F_{Site}$  est le facteur d'amplification des ondes sismiques défini en fonction de la catégorie d'emplacement sismique telle qu'établie selon le CNBC 2010. Les facteurs de vulnérabilité composés  $V_{Général}$ ,  $V_{Superstructure}$  et  $V_{Infrastructure}$  représentent respectivement la vulnérabilité reliée aux caractéristiques générales de l'ouvrage, à la superstructure et à l'infrastructure. Ce dernier facteur est déterminé par la valeur maximale entre le facteur de vulnérabilité des culées,  $V_{Culée}$ , ou celui des piles,  $V_{Pile}$ , tel qu'exprimé par l'Équation (11).

$$V_{Infrastructure} = \text{Max}(V_{Culée}; V_{Pile}) \quad (11)$$

Le Tableau 4 définit l'ensemble des facteurs. On notera l'ajout des paramètres suivants dans cette nouvelle formulation :

- Un coefficient d'endommagement,  $C_{Endom}$ , défini à partir de l'ICS, dans le calcul du facteur de vulnérabilité  $V_{Général}$ .
- La longueur d'appui,  $C_{LongApp}$ , incluant le biais dans le calcul du facteur de vulnérabilité  $V_{Superstructure}$ .
- Certaines particularités de conception,  $C_{Part}$ , dans le calcul du facteur de vulnérabilité  $V_{Superstructure}$ .
- Un facteur de vulnérabilité des culées,  $V_{Culée}$ , pour le calcul du facteur de vulnérabilité  $V_{Infrastructure}$ .
- Un coefficient d'irrégularité verticale des piles,  $C_{Irreg}$ , pour le calcul du facteur de vulnérabilité des piles  $V_{Pile}$ , pour l'ensemble des ponts.

**Tableau 4 – Définition des facteurs et coefficients de la formule MTQ2013**

Facteur	Nom	Utilisation et identification des coefficients	Valeurs
$F_{Aléa}$	Aléa sismique	Défini l'aléa sismique calibré sur la province ou sur la DT selon l'utilisation	Entre 1 et 2,5
$F_{Site}$	Amplification du site	S'applique à l'aléa sismique pour prendre en compte la modification des ondes sismiques en fonction de la catégorie de site (phénomène d'amplification)	Entre 1 et 1,25
$V_{Général}$	Vulnérabilité général	Calculé en fonction de : <ul style="list-style-type: none"> <li>Type de pont (<math>C_{Struct}</math>);</li> <li>De l'âge du pont (<math>C_{Age}</math>);</li> <li>L'endommagement /l'état (<math>C_{Endom}</math>);</li> </ul>	Entre 0,5 et 3,2
$V_{Superstructure}$	Vulnérabilité de la superstructure (tablier et appuis)	Calculé en fonction de : <ul style="list-style-type: none"> <li>Type d'appareil d'appui (<math>C_{Appui}</math>);</li> <li>De la longueur d'appui (<math>C_{LongApp}</math>, comprend le biais);</li> <li>Nombre de discontinuités (de joints) (<math>C_{Joint}</math>);</li> <li>Nombre de poutres (<math>C_{Poutre}</math>);</li> <li>Des particularités de conception (<math>C_{Par}</math>).</li> </ul>	Entre 0 et 1,0
$V_{Culée}$	Vulnérabilité des culées	Calculé en fonction de : <ul style="list-style-type: none"> <li>Type de culée (<math>C_{TypeCulée}</math>);</li> <li>Du sol (<math>C_{Sol}</math>);</li> <li>Du type de fondation (<math>C_{Fondation}</math>).</li> </ul>	Entre 0 et 1,0
$V_{Pile}$	Vulnérabilité des piles	Calculé en fonction de : <ul style="list-style-type: none"> <li>Type de pile et redondance (<math>C_{TypePile}</math>);</li> <li>Irrégularité verticale des piles (<math>C_{Irreg}</math>);</li> <li>Du sol (<math>C_{Sol}</math>);</li> <li>Du type de fondation (<math>C_{Fondation}</math>).</li> </ul>	Entre 0 et 1,0

Les valeurs attribuées aux coefficients d'influence  $C_i$  entrant dans le calcul des facteurs de vulnérabilité ont été établies sur la base des méthodes telles que celle du NYDOT, de la FHWA ou du SÉTRA (Davi *et al.* 2010, Liu 2001, Parker Small 1999).

#### 5.4.2 Facteur d'amplification du site $F_{Site}$

L'effet d'amplification de l'onde sismique en fonction de la catégorie d'emplacement sismique est pris en compte par le facteur  $F_{Site}$ . Les rapports entre les coefficients d'amplification  $F_a$  et  $F_v$  du CNBC 2010 (CNRC 2010) selon la catégorie d'emplacement (voir Tableau A 7 de l'Annexe 3) ont servi de base pour proposer les valeurs à attribuer au facteur  $F_{Site}$  à l'intérieur d'une plage de valeur variant entre 1,0 et 1,25 (voir Tableau 5). Les catégories d'emplacement A et B sont regroupées, car l'information disponible dans la BDD-GSQ ne permet pas de différencier entre ces deux catégories. Les détails de cette calibration sont donnés à l'Annexe 8.

**Tableau 5 – Valeurs reprises de  $F_{Site}$  selon la rigidité de l'ouvrage**

Catégorie d'emplacement	$F_{Site}$
A ou B	1,0
C	1,1
D	1,15
E	1,25
F	10*

\*F : Étude géotechnique requise

### 5.4.3 Facteur d'aléa sismique

La calibration du facteur d'aléa sismique  $F_{Aléa}$  en fonction du contexte d'utilisation a été réalisée en analysant les données d'aléa sismique sur le territoire de la Province et à l'intérieur des directions territoriales. Cette analyse est présentée à l'Annexe 9 et a permis de définir trois niveaux d'aléa sismique relatif :

- Faible si l'AMS  $\leq 0,1g$ ;
- Modéré si  $0,1g < AMS \leq 0,4g$
- Élevé si l'AMS  $> 0,4g$

Deux contextes d'utilisation sont considérés :

1. Sur le territoire de la Province le facteur d'aléa sismique  $F_{Aléa}$  est établi en fonction de la valeur d'AMS selon les critères du Tableau 6. On remarquera qu'entre l'aléa faible et l'aléa modéré la valeur de  $F_{Aléa}$  passe de 1,0 à 1,75, dans le but de bien distinguer les ouvrages situés en aléa faible de ceux situés en aléa modéré. En aléa modéré et élevé le facteur  $F_{Aléa}$  est calibré en fonction de la valeur relative de l'AMS dans la plage de valeurs considérées;

**Tableau 6 – Valeurs du  $F_{Aléa}$  pour une utilisation sur l'ensemble de la Province**

Aléa sismique relatif	$F_{Aléa}$
Faible : $AMS \leq 0,1g$	1,0
Modérée : $0,1g \leq AMS \leq 0,4g$	$1,75 + \left( \frac{AMS - 0,1}{0,4 - 0,1} \right) \times 0,5 \leq 2,25$
Élevée : $AMS \geq 0,4g$	$2,25 + \left( \frac{AMS - 0,4}{AMS_{MAX} - 0,4} \right) \times 0,25 \leq 2,5$

2. À l'intérieur d'une même direction territoriale, le facteur d'aléa sismique  $F_{Aléa}$  est établi en fonction de la variation des valeurs de l'AMS. Trois situations sont considérées : l'AMS relativement constant ou peu variable (écart-type inférieur à 0,05g), l'AMS modérément variable ( $0,05g < \text{écart-type} \leq 0,2g$ ) ou très variable (écart-type  $> 0,2g$ ) (Voir Tableau A 14 de l'Annexe 9). Le Tableau 7 présente l'approche proposée pour les 14 directions territoriales en fonction de l'importance de la variation de l'aléa sur leur territoire. Lorsque les valeurs d'AMS sur un territoire sont constantes ou peu variables le facteur d'aléa  $F_{Aléa}$  est défini en fonction de la catégorie d'emplacement sismique (voir Tableau A 7 de l'Annexe 3) pour amplifier l'importance des effets d'amplification au site. Ainsi, sur un sol de catégorie E, produit ( $F_{Aléa} \times F_{Site}$ ) reste maximal à 3,125 pour le classement des ponts sur le territoire d'une DT où l'aléa est peu variable.

**Tableau 7 – Valeurs du facteur d'aléa  $F_{Aléa}$  calibré sur les DT**

Direction Territoriale	Variation de l'AMS	Définition de $F_{Aléa}$
Nord-du-Québec (Baie James)	Constante ou peu variable	Fonction de la catégorie d'emplacement  A et B= 1,0 C = 1,6 D = 2,0 E= 2,5
Laval		
Montérégie Ouest		
Montréal		
Laurentides-Lanaudière		
Outaouais		
Abitibi-Témiscamingue		
Mauricie-Centre-du-Québec	Modérément variable	$1,0 + \left( \frac{AMS - AMS_{MIN(DT)}}{AMS_{MAX(DT)} - AMS_{MIN(DT)}} \right) 1,5 \leq 2,5$
Montérégie Est		
Saguenay-Lac-Saint-jean-Chibougamau		
Côte-Nord	Très variable	Approche provinciale Tableau 6 selon la valeur d'AMS
Bas-Saint-Laurent-Gaspésie-Île-de-la-Madeleine		
Capitale-Nationale		
Chaudière-Appalaches		

#### 5.4.4 Facteur de vulnérabilité générale $V_{Générale}$

Le facteur de vulnérabilité générale dépend principalement du type de structure auquel on associe le coefficient  $C_{Struct}$  (type de structure), la date de construction du pont  $C_{Age}$  et son état d'endommagement  $C_{Endom}$  :

$$V_{Général} = C_{Struct} \times [1 + \alpha_{Age} \times C_{Age} + \alpha_{Endom} \times C_{Endom}] \quad (12)$$

Le Tableau 8 donne les valeurs des coefficients  $C_{Struct}$ ,  $C_{Age}$  et  $C_{Endom}$  et le poids respectif  $\alpha_i$  qui leur est attribué. Les descriptions détaillées des types de structures sont données au Tableau A 15 de l'Annexe 10.

**Tableau 8 – Définition des coefficients pour le calcul du facteur de vulnérabilité générale**

	Coefficients	Description	Critère	Valeur attribuée	$\alpha_i$
<b>VULNÉRABILITÉ GÉNÉRALE <math>V_{Générale}</math></b>	$C_{Struct}$ Type de structure (Défini selon la classification du MTQ)	Portiques et ponceaux	11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 35, 36, 37	0,5	---
		Ponts en bois	45, 46, 66, 67	1,3	
		Ponts en arc en acier	72, 74, 76	1,4	
		Ponts à poutres en acier et ponts mobiles	44, 52, 58, 61, 62, 63, 64, 65, 71, 73, 75, 85	1,5	
		Ponts en béton	31, 32, 33, 34, 38, 39, 41, 42, 43, 47, 48, 49, 50, 51, 56, 57, 81, 82	1,6	
	$C_{Age}$ Année de construction	Conception sismique élevée	Après 2000	0	0,70
		Conception sismique modérée	De 1990 à 1999	0,5	
		Conception sismique faible	De 1970 à 1989	0,7	
		Aucune conception sismique	Jusque 1969	1	
	$C_{Endom}$ Endommagement	Selon l'indice de comportement structural	ICS supérieur à 90	0	0,30
			ICS entre 75 et 90	0,5	
			ICS inférieur à 75	1	

#### TYPE DE STRUCTURE : $C_{STRUCT}$

Le coefficient  $C_{Struct}$  est défini en fonction du type de structure selon la classification des structures du MTQ (Voir Tableau A 15 à l'Annexe 10). À noter, que le coefficient  $C_{Struct}$  des portiques et ponceaux est égal à 0,5 pour obtenir un IVS inférieur à 50 et refléter leur faible vulnérabilité. Une valeur différente de 0 permet de trier ces ouvrages entre eux selon leur état et leur année de construction.

### COEFFICIENT D'ÂGE : $C_{AGE}$

Le coefficient  $C_{Age}$  est établi en fonction de l'année de construction du pont comparée à des années références établies selon l'évolution des codes et normes de conception parasismique.

### ENDOMMAGEMENT DU PONT : $C_{ENDOM}$

Le coefficient d'endommagement est défini en fonction de l'indice de comportement structural et ainsi prend en compte la sécurité de l'ouvrage en fonction de son état ou endommagement. Les limites du Tableau 8 ont été établies en considérant la variation de l'ICS pour les ponts de l'extrait de la BDD-GSQ de la DT Capitale-Nationale (voir Figure 21). L'analyse de l'ensemble des données des ponts de la Province pourrait mener à modifier ces limites. À noter qu'il n'y a pas de corrélation directe entre l'ICS et la date de construction, tel qu'illustré par le graphique de la Figure 22.

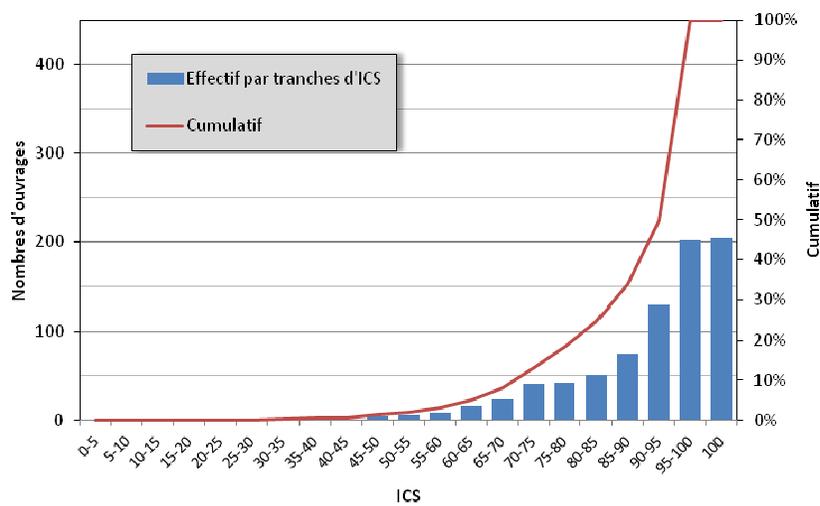


Figure 21 – Valeurs d'ICS des ouvrages de la DT de la Capitale Nationale

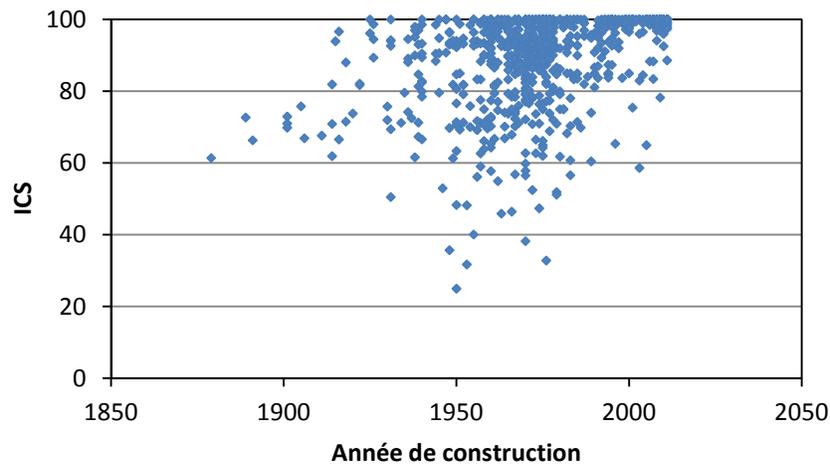


Figure 22 – Valeurs des ICS en fonction de la date de construction des ponts

#### 5.4.5 Facteur de vulnérabilité de la superstructure $V_{Superstructure}$

Le facteur de vulnérabilité de la superstructure dépend de la longueur d'appui disponible  $C_{LongApp}$ , du type d'appareil d'appui  $C_{Appui}$ , du nombre de discontinuités  $C_{Joint}$  et du nombre de poutres  $C_{Poutre}$  et de certaines particularités de conception.  $V_{Superstructure}$  est donné par l'équation suivante :

$$V_{Superstructure} = \left[ \alpha_{LongApp} \times C_{LongApp} + \alpha_{Appui} \times C_{Appui} + \alpha_{Joint} \times C_{Joint} + \alpha_{Poutre} \times C_{Poutre} + \alpha_{Part} \times C_{Part} \right] \quad (13)$$

Le Tableau 9 donne les valeurs des coefficients  $C_{LongApp}$ ,  $C_{Appui}$ ,  $C_{Joint}$ ,  $C_{Poutre}$  et  $C_{Part}$  et le poids respectif  $\alpha_i$  qui leur est attribué.

**Tableau 9 – Définition des coefficients pour le calcul du facteur de vulnérabilité de la superstructure**

Coefficients	Description	Critère	Valeur attribuée	$\alpha_i$
$C_{LongApp}$ Longueur d'appui	Selon le ratio entre la longueur d'appui critique $N_{cr}$ et la longueur d'appui existante $N_{ex}$	$N_{cr} / N_{ex} > 0,6$	$6,25 \times \left( \frac{N_{cr}}{N_{ex}} - 0,60 \right)^2 \leq 1$	
		$N_{cr} / N_{ex} < 0,6$	0	
$C_{Appui}$ Longueur d'appui	Pendule	210	1,0	<b>0,27</b>
	À plaque en acier ou à rotules en acier, à rouleaux ou en élastomère non fretté	203, 207, 208 et 209	0,5	
	Élastomère fretté, articulation sphérique ou élastomère confiné	201, 202, 204, 205 et 206	0,25	
	Isolateurs	213, 214, 215, 216, 217, 218, 219 et 220	0	
$C_{Joint}$ Discontinuité	Nombre de discontinuités déterminé en fonction du nombre de joints et du nombre de travées (Voir Tableau 10)	5 et plus	1,0	<b>0,21</b>
		4	0,8	
		3	0,5	
		2 et moins	0,0	
$C_{Poutre}$ Redondance du tablier	Nombre de poutres du tablier	Une seule poutre	1,0	<b>0,15</b>
		2 poutres	0,8	
		3 poutres	0,5	
		Dalle ou 4 poutres et plus	0,0	
$C_{Part}$ Particularités de conception	Particularités augmentant la vulnérabilité de la superstructure	Travée > 150 m et particularités no. 1, 2, 3, 5, 7 et 13	1,0	<b>0,10</b>
	Particularités sans effet	8 et 12	0	
	Particularités diminuant la vulnérabilité de la superstructure	9, 10 et 11	-1,0	

#### LONGUEUR D'APPUI : $C_{LONGAPP}$

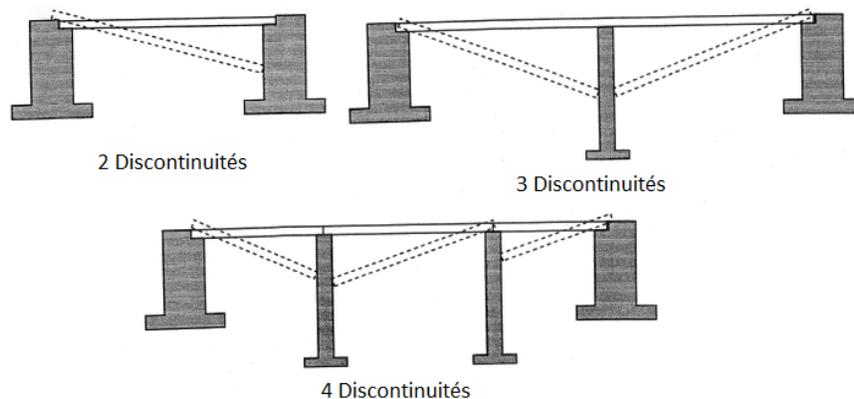
Le coefficient  $C_{LongApp}$  prend en compte le risque de perte d'appui relié à une longueur d'appui insuffisante au niveau des culées et des piles. Il est différent de zéro dès lors que la longueur d'appui critique ( $N_{cr}$ ) est à 60% de la longueur d'appui existante ( $N_{ex}$ ) indiquant une réserve de 40%, et tend vers 1 plus la longueur d'appui existante s'approche de la longueur d'appui critique. Cette approche est conforme à celle proposée dans la méthode SISMOA décrite à l'Annexe 5. Dans le contexte d'application aux ouvrages d'art du MTQ, la longueur critique est établie selon l'article 4.4.10.5 de la norme CAN/CSA-S6 (2006). Son calcul à partir des informations de la BDD-GSQ est détaillé à l'Annexe 11.

#### TYPE D'APPAREIL D'APPUI : $C_{APPUI}$

Le coefficient  $C_{Appui}$  est établi en fonction des types d'appareil d'appui décrits dans le Manuel d'inventaire (MTQ 2012). Il distingue entre autres, les isolateurs des appuis à élastomère frettés ou non frettés et des appuis à pendule. La description détaillée des appareils d'appuis est donnée au Tableau A 16 de l'Annexe 10.

#### DISCONTINUITÉS : $C_{JOINT}$

Le coefficient  $C_{Joint}$  représentant le nombre de discontinuités est repris de la méthode MTQ95, défini à la Figure 23, mais sa définition est adaptée aux informations de la BDD-GSQ.



**Figure 23 – Nombre de discontinuités**

(Tiré de Tremblay et al. 1993)

Le nombre de joint est défini par la présence d'éléments de "joint" (élastomère, épaulement) positionnés aux culées et/ou aux piles. **Les joints comme simples discontinuités ne sont pas répertoriés.** Ainsi un ouvrage à 2 travées discontinues, considéré comme ayant 3 discontinuités pourrait avoir un seul joint répertorié dans la BDD-GSQ (joint de travée). La relation entre le nombre de travées, le nombre de joints et le nombre de discontinuités a été analysée à partir des plans de 10 ouvrages afin d'établir la définition du coefficient  $C_{Joint}$ . Le Tableau 10 présente le nombre de discontinuités le plus probable en fonction du nombre de travées et du nombre de joints saisis dans la BDD-GSQ. Ainsi pour les ponts à 2 travées, si 2 joints sont répertoriés on émet l'hypothèse qu'ils sont aux culées puisque le

nombre est pair. Par contre s'il n'y a qu'un seul joint on considère qu'il est situé à la pile ce qui crée 3 discontinuités si le tablier n'est pas encastré aux culées.

**Tableau 10 – Relations entre le nombre de travées, le nombre de joints et le nombre de discontinuités**

Nombre de travées, $N$	Nombre de joints, $J$	Nombre de discontinuités, $n$
1	0 ou 2	2 et moins
2	0	2 et moins
	2 1, 3 ou 4	2 3
3	0	2 et moins
	1 2, 3, 4 ou 5	3 4
4	0	2 et moins
	1	3
	2 3 et plus	4 5 et plus

**NOMBRE DE POUTRES :  $C_{POUTRE}$**

Le coefficient  $C_{Poutre}$  considère la redondance des éléments du tablier selon le nombre de poutres.

**PARTICULARITÉ DE CONCEPTION :  $C_{PART}$**

Certaines des particularités de conception listées dans le Manuel de l'Inventaire (MTQ 2012) contribuent à augmenter la vulnérabilité sismique d'un pont, telles que les supports temporaires ou appuis de type chaise en travée. D'autres particularités, au contraire diminuent la vulnérabilité de l'ouvrage comme c'est le cas pour le transmetteur de choc (sismique) ou autre renforcement sismique. Le coefficient  $C_{Part}$  prend compte de certaines des particularités de conception pour le calcul du  $V_{Superstructure}$ . À noter qu'on considère une travée de longueur supérieure à 150 m (limite recommandée par la méthode NYDOT) comme particularité de conception. Le détail des particularités de conception prise en compte est donné au Tableau A 17 de l'Annexe 10.

#### 5.4.6 Facteur de vulnérabilité de l'infrastructure $V_{Infrastructure}$

Le facteur vulnérabilité de l'infrastructure considère que la perte d'une pile ou d'une culée peut mener à la mise hors service du pont.  $V_{Infrastructure}$  est donc établie comme la valeur maximale entre les facteurs de vulnérabilité des culées  $V_{Culée}$  ou des piles  $V_{Pile}$  comme donné à l'Équation (11).

Le facteur de vulnérabilité des culées dépend du type de culée,  $C_{TypeCulée}$ , du type de fondation de la culée,  $C_{Fondation}$  et de la nature du sol sous la culée,  $C_{Sol}$ .  $V_{Culée}$  est donné par l'équation suivante :

$$V_{Culée} = \left[ \alpha_{TypeCulée} \times C_{TypeCulée} + \alpha_{FondationCulée} \times C_{Fondation} + \alpha_{SolCulée} \times C_{Sol} \right] \quad (14)$$

Le facteur de vulnérabilité des piles dépend du type de pile,  $C_{TypePile}$ , du type de fondation de la pile,  $C_{Fondation}$  et de la nature du sol sous la pile,  $C_{Sol}$  et de l'irrégularité verticale,  $C_{Irreg}$ .  $V_{Pile}$  est donné par l'équation suivante :

$$V_{Pile} = \left[ \alpha_{TypePile} \times C_{TypePile} + \alpha_{FondationPile} \times C_{Fondation} + \alpha_{SolPile} \times C_{Sol} + \alpha_{Irreg} \times C_{Irreg} \right] \quad (15)$$

Le Tableau 11 donne les valeurs des coefficients  $C_{TypeCulée}$ ,  $C_{TypePile}$ ,  $C_{Fondation}$ ,  $C_{Sol}$  et  $C_{Irreg}$  et le poids respectif  $\alpha_i$  qui leur est attribué dans le calcul des facteurs de vulnérabilité  $V_{Culée}$  ou  $V_{Pile}$ .

**Tableau 11 – Définition des coefficients pour le calcul du facteur de vulnérabilité de l'infrastructure**

Coefficients	Description	Critère	Valeur attribuée	$\alpha_i$
$C_{TypeCulée}$ Type de culée	Culée pleine	1	1,0	0,25
	Culée ouverte ou creuse, béquille de portique ou autre	2, 3, 4, 8 et 10	0,5	
	Culée caisson ou en mur berlinois	5, 6, 7 et 9	0	
$C_{TypePile}$ Type de pile	Pile à une colonne	29	1,0	0,35
	Pile à plusieurs colonnes ou d'un pont en arc	27, 28 et 36	0,5	
	Pile – caisson, pile – banc, pile – pieu caisson ou pile avec fût	31, 32, 33, 34, 35, 25 et 26	0	
	Pile – béquille intermédiaire	30	*Selon l'information sur les piles	
$C_{Fondation}$ Type de fondation	<b>Remblai porteur (pour culée seulement)</b> Fondation non spécifiée	<b>042</b> 053	1,0	0,20 (Piles)  0,20 (Culées)
	Pieux conçus avant 2000 Autre type de fondation profonde conçue avant 2000	044, 045, 047, 048, 049, 050 et 052	0,8	
	Fondation superficielle conçue avant 2000 Pieux caissons et caissons conçus avant 2000	041, 046 et 051	0,5	
	<b>Sol renforcé (pour culée seulement)</b> Tout type de fondation conçue après 2000	<b>043</b> 041 à 052	0	
$C_{Sol}$ Nature du sol	Sol liquéfiable	06	1	0,30 (Piles)
	Sol grossier lâche, argile molle ou silt, remblai	04 et 05	0,8	
	Sol grossier, dense ou compact, ou argile raide	02 et 03	0,5	0,50 (Culées)
	Roc	01	0	
$C_{Irreg}$ Irrégularité verticale	Différence de hauteur de piles	$\Delta h \geq 50\%$	1	0,15
		Autre	0	

\*Les piles « béquille intermédiaire » peuvent être composées d'une ou plusieurs colonnes ou d'un fût. En absence d'information, une valeur médiane de 0,5 pour le  $C_{TypePile}$  est assignée.

#### TYPE DE CULÉE : $C_{TYPECULÉE}$

---

Les types de culées répertoriés dans la BDD-GSQ sont illustrés dans la Figure A 8 de l'Annexe 10. En considérant que la vulnérabilité de la culée augmente avec la poussée des terres, les culées pleines (1), reprenant le plus de poussée des terres, sont les plus vulnérables. Ensuite viennent les culées creuses (3 et 4), les culées ouvertes (2), qui ne subissent pas de poussée des terres importante, ainsi que les béquilles de portique (8) qui sont des culées monolithiques. Enfin les culées les moins vulnérables sont les culées caisson (5, 6 et 7) et les culées en mur berlinois (9). Aucun dommage n'a été recensé pour ce type de culée, bien que ce manque d'information puisse être dû à l'absence de séisme majeur dans une région dont les ouvrages possèdent ce type de culée. Par défaut une valeur moyenne de 0,5 est considérée pour une culée "Autre". La description détaillée des types de culées considérées est donnée au Tableau A 18 de l'Annexe 10.

#### TYPE DE PILES : $C_{TYPEPILE}$

---

Les principaux dommages aux piles sont aux niveaux des renforcements des piles et des chevêtres (manque de longueur d'ancrage, absence de renforcement supérieur, manque de longueur de recouvrement, manque d'armature transversale pour assurer un confinement satisfaisant), et ces dommages ont des conséquences aggravées si la redondance des piles n'est pas suffisante pour permettre une redistribution convenable des efforts. Ainsi les piles à colonne unique sont les plus vulnérables. Les piles à béquille intermédiaire peuvent être composées d'une ou plusieurs colonnes ou d'un fût. En absence d'information, une valeur médiane de 0,5 pour le  $C_{TypePile}$  est assignée à ce type de pile. Ensuite les piles à plusieurs colonnes et les piles de pont en arc sont moyennement vulnérables sauf si elles ont été conçues avec une ancienne version de norme avec peu d'exigence de détails de renforcement entraînant alors une vulnérabilité maximale. Cette situation est considérée implicitement par le coefficient d'âge inclut dans le facteur de vulnérabilité générale. Enfin les fûts, caissons et bancs ne sont pas des types de pile considérés comme vulnérables. La description détaillée des types de piles est donnée au Tableau A 19 de l'Annexe 10.

#### TYPE DE FONDATION : $C_{FONDATION}$ ET CONDITIONS DE SOL: $C_{SOL}$

---

Les ponts avec fondations superficielles sur sol ou fondations profondes sont plus vulnérables aux séismes que les ponts dont les fondations reposent directement sur le roc. Par ailleurs, tous les types de fondations non conçues pour prendre en compte les actions sismiques sont vulnérables et présentent un risque de rupture. Même les pieux ou les caissons présentent un risque s'ils n'ont pas fait l'objet d'une conception parasismique spécifique et/ou si le sol-support n'a pas été évalué d'un point de vue parasismique. Il y a aussi des facteurs aggravants comme la présence d'une berge ou d'un talus incliné, pieu flottant versus emboîture au roc, profondeur de la nappe phréatique, etc. La nature du sol-support est donc un paramètre critique pour tenir compte de la vulnérabilité des fondations. Par conséquent, le poids accordé au coefficient  $C_{Sol}$  est supérieur au poids du coefficient  $C_{Fondation}$ .

Les valeurs attribuées au coefficient de fondation,  $C_{Fondation}$ , prennent en compte le risque relatif de rupture de la fondation selon le classement simplifié suivant :

- ❑ Les fondations superficielles reposant directement sur le roc ou les fondations profondes conçues pour les actions sismiques (après l'année référence);
- ❑ Les fondations superficielles sur sol n'ayant pas été conçues pour les actions sismiques (avant l'année référence);
- ❑ Les fondations profondes n'ayant pas été conçues pour les actions sismiques (avant l'année référence);

Ainsi le coefficient de fondation est défini selon le type de fondation et leur année de construction (ou de réhabilitation) en référence à une année charnière. Ici, l'année 2000 est proposée. Il s'agit d'une approche conservatrice autant en ce qui concerne l'évolution des normes de conception que de la norme S6. L'édition 2000 de la norme CAN/CSA-S6-00 propose des méthodes (dynamiques) spectrale unimodale/multimodale applicables à la majorité des ouvrages en plus de la méthode de la charge uniforme appliqués aux ponts réguliers (importance normale ou d'urgence en zones sismiques faibles ou modérés). Ceci implique une meilleure considération des charges sismiques sur l'ouvrage et les fondations.

À noter que la norme CSA/S6 n'a pas d'exigences spécifiques quant à la conception parasismique des pieux. Il est cependant recommandé de faire appel à un spécialiste si le sol est potentiellement liquéfiable ou si on prévoit une influence importante de l'interaction sol-structure. Or, le risque relié aux sols potentiellement liquéfiables est considéré avec le facteur  $F_{Site}$  et résulte en un  $IVS_{MTQ2013}$  égal à 100. La description détaillée des types de fondation est donnée au Tableau A 20 de l'Annexe 10.

Le coefficient de sol,  $C_{Sol}$ , prend en compte le risque de tassement des sols mous ou des remblais mal consolidés aux culées ou aux piles. Ainsi, la vulnérabilité d'une fondation même récente reliée au risque potentiel de tassement du sol est considérée. La description des sols est détaillée au Tableau A 21 de l'Annexe 10.

#### IRRÉGULARITÉ VERTICALE : $C_{IRREG}$

Seule l'irrégularité en élévation des piles est considérée. Un critère additionnel pour les piles élancées pourrait également être ajouté si le nombre d'ouvrages possédant cette caractéristique le justifie.

## 6 VALIDATION DE LA FORMULATION $IVS_{MTQ2013}$ ET APPLICATION AUX PONTS DE LA DT CAPITALE NATIONALE

### 6.1 INTRODUCTION

Cette section a pour objectif de déterminer si les indices obtenus avec la formulation MTQ2013 répondent aux critères fixés, notamment :

- ❑ IVS compatibles au cadre de gestion des risques des ouvrages d'art;
- ❑ IVS suffisamment dispersés pour permettre d'identifier les ouvrages les plus vulnérables autant sur le territoire de la Province qu'à l'intérieur d'une Direction Territoriale;
- ❑ IVS représentant adéquatement la vulnérabilité relative des ponts à travée unique autant que celle des ponts à travées multiples.

La validation de la formulation de l' $IVS_{MTQ2013}$  est réalisée en considérant des scénarios de déficiences théoriques, d'abord pour les ponts à travée unique et ensuite pour l'ensemble des ponts.

Finalement, l' $IVS_{MTQ2013}$  est calculé pour les ponts de la DT de la Capitale Nationale et le résultat est comparé avec l' $IVS_{MTQ95}$ .

### 6.2 VALIDATION PAR L'ÉTUDE DE SCÉNARIOS DE DÉFICIENCES

#### 6.2.1 Ponts à travée unique

Les scénarios, ou combinaisons, considérées pour cette étape de la validation sont illustrés à la Figure 24. Les facteurs de vulnérabilité ou coefficients d'influence ont été pris à leurs valeurs minimales pour les conditions considérées les moins vulnérables, et à leur valeurs maximales pour les conditions considérées les plus vulnérables :

- ❑ Pour tous les cas  $V_{pile} = 0$  ;  $C_{joint} = 0$  ;  $C_{Poutre} = 0$ ;
- ❑ Pour P0 (ponceaux, portiques) :  $C_{Struct} = 0,5$ ;  $C_{Part} = -1$  (pont intégral);  $C_{LongApp} = 0$  et  $C_{Appui} = 0$
- ❑ Pour P1  $C_{Struct} = 1,6$  (pont avec dalle en béton) :  $C_{Part} = 0$
- ❑ Pour A0 :  $C_{Age} = 0$  et  $C_{Endom} = 0$ ;
- ❑ Pour A1 :  $C_{Age} = 1$  et  $C_{Endom} = 1$ ;
- ❑ Pour C0 :  $V_{Culée} = 0$ ;
- ❑ Pour C1 :  $V_{Culée} = 1$
- ❑ Pour AP0 :  $C_{LongApp} = 0$  et  $C_{Appui} = 0$ ;
- ❑ Pour AP1 :  $C_{LongApp} = 1$  et  $C_{Appui} = 1$ .

Le nombre total de combinaisons est de 60, soit 12 scénarios pour deux conditions de sol (C et E) et trois niveaux d'aléa relatif (faible, modéré et élevé). La Figure 25 illustre le classement relatif attendu pour les scénarios principaux sur une échelle de 0 à 100, divisée en quatre quadrants de vulnérabilité relative : faible (0-25), faible à modérée (25-50), modérée à élevée (50-75) et élevée (75-100).

L'IVS<sub>MTQ2013</sub> a ensuite été calculé pour vérifier le classement relatif de chaque combinaison sur l'échelle de 0 à 100. Cet exercice a été répété pour différentes formulations de l'IVS<sub>MTQ2013</sub> (en faisant varier les valeurs limites des facteurs de vulnérabilité et le poids des coefficients). Le résultat obtenu pour la formulation finale de l'IVS<sub>MTQ2013</sub>, proposée dans ce rapport, est illustré à la Figure 26. Au final, bien que six ouvrages fictifs ne soient pas classés dans le quadrant attendu (en rouge), l'IVS<sub>MTQ2013</sub> calculé est considéré acceptable.

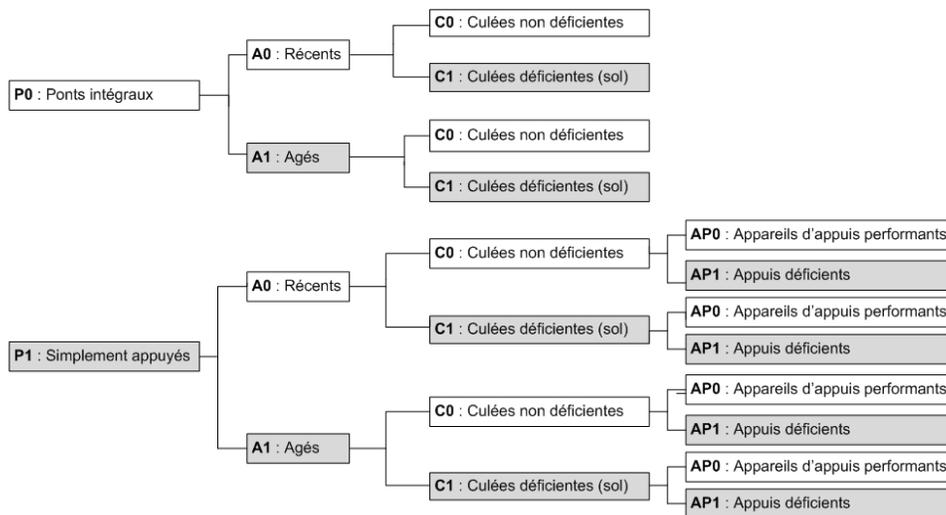


Figure 24 – Scénarios de ponts à une travée

0	25	50	75	100
<b>La Malbaie (Aléa élevé) – Sol E</b>				
P0-A0-C0/C1	P0-A1-C1 P0-A1-C0 P1-A0-C0-AP0/AP1 P1-A0-C1-AP0/AP1	P1-A1-C0-AP1 P1-A1-C0-AP0	P1-A1-C1-AP0/AP1	
<b>La Malbaie (Aléa élevé) – Sol C</b>				
P0-A0-C0/C1 P0-A1-C0	P0-A1-C1 P1-A0-C0-AP0/AP1 P1-A0-C1-AP0/AP1	P1-A1-C0-AP0/1	P1-A1-C1-AP0/AP1	
<b>Québec (Aléa modéré) – Sol E</b>				
P0-A0-C0/C1 P1-A0-C0-AP0	P0-A1-C1 P0-A1-C0 P1-A0-C0-AP1 P1-A0-C1-AP0 P1-A0-C1-AP1	P1-A1-C0-AP0/AP1	P1-A1-C1-AP0/AP1	
<b>Québec (Aléa modéré) – Sol C</b>				
P0-A0-C0/C1 P0-A1-C0 P1-A0-C0-AP0	P0-A1-C1 P1-A0-C0-AP1 P1-A0-C1-AP0 P1-A0-C1-AP1	P1-A1-C0-AP0/AP1	P1-A1-C1-AP0/AP1	
<b>Aléa faible – Sol C</b>				
P0-A0-C0/C1 P0-A1-C0/C1 P1-A0-C0/C1-AP0/AP1	P1-A1-C1-AP0 P1-A1-C0-AP0/AP1	P1-A1-C1-AP1		

Figure 25 – Illustration du classement attendu des scénarios de déficiences

0	25	50	75	100
<b>La Malbaie (Aléa élevé) – Sol E</b>				
P0-A0-C0/C1 : 12,3-13,9	P0-A1-C1 : 27,8 P0-A1-C0 : 24,7 P1-A0-C0-AP0/AP1 : 40- 42,5 P1-A0-C1-AP0/AP1: 45-47,5	P1-A1-C0-AP1 : 85 P1-A1-C0-AP0 : 80	P1-A1-C1-AP0/AP1 : 90-95	
<b>La Malbaie (Aléa élevé) – Sol C</b>				
P0-A0-C0/C1 : 10,9-12,2 P0-A1-C0 : 21,7	P0-A1-C1:24,5 P1-A0-C0-AP0/AP1 : 35,2-37,4 P1-A0-C1-AP0/AP1 : 39,6-41,8	P1-A1-C0-AP0/AP1: 70,4-74,8	P1-A1-C1-AP0/AP1 : 79,2-83,6	
<b>Québec (Aléa modéré) – Sol E</b>				
P0-A0-C0/C1 : 9,5-10,7 P1-A0-C0-AP0 : 30,7	P0-A1-C1 : 21,4 P0-A1-C0 : 19 P1-A0-C0-AP1:32,6 P1-A0-C1-AP0 : 34,6 P1-A0-C1-AP1 : 36,5	P1-A1-C0-AP0/AP1 : 61,4-65,3	P1-A1-C1-AP0/AP1 : 69,1-73	
<b>Québec (Aléa modéré) – Sol C</b>				
P0-A0-C0/C1 : 8,3-9,4 P0-A1-C0 : 16,7 P1-A0-C0-AP0 : 27	P0-A1-C1:18,8 P1-A0-C0-AP1 : 28,7 P1-A0-C1-AP0 : 30,4 P1-A0-C1-AP1:32,1	P1-A1-C0-AP0/AP1 : 54,1-57,4	P1-A1-C1-AP0/AP1 : 60,8-64,2	
<b>Aléa faible – Sol C</b>				
P0-A0-C0/C1:4,3-4,9 P0-A1-C0/C1:8,7-9,8 P1-A0-C0/C1-AP0/AP1 : 14,1-16,7	P1-A1-C1-AP0 :31,7 P1-A1-C0-AP0/AP1: 28,2-29,9	P1-A1-C1-AP1 :33,4		

Figure 26 – Illustration du classement avec les  $IVS_{MTQ2013}$  calculés pour les scénarios de déficiences

### 6.2.2 Ensemble des ponts

L' $IVS_{MTQ2013}$  a été calculé en faisant varier l'ensemble des facteurs de vulnérabilité et coefficients d'influence. Le nombre de déficiences (maximum de 14) a été augmenté graduellement, ( $C_i = 0$  ou 1) pour étudier la variation de l'IVS pour trois conditions principales :

- ❑ Aléa élevé ( $F_{Aléa} = 2,5$ ), modéré ( $F_{Aléa} = 2,0$ ) et faible ( $F_{Aléa} = 1,0$ );
- ❑ Site classe A-B ( $F_{Site} = 1,0$ ), site classe C ( $F_{Site} = 1,1$ ) et site classe E ( $F_{Site} = 1,25$ );
- ❑ Portiques et poutres ( $C_{Struct} = 0,5$ ), ponts en bois ( $C_{Struct} = 1,0$  et ensuite 1,3) et ponts en béton ( $C_{Struct} = 1,6$ ).

La Figure 27 illustre la variation de l'IVS pour les ponts en béton sur sol de catégorie C, en fonction de l'aléa sismique. En aléa faible, l'IVS varie entre 14,1 et 34,7; en aléa modéré, il varie de 29,0 à 69,3 et en aléa élevé, entre 35,2 et 86,7.

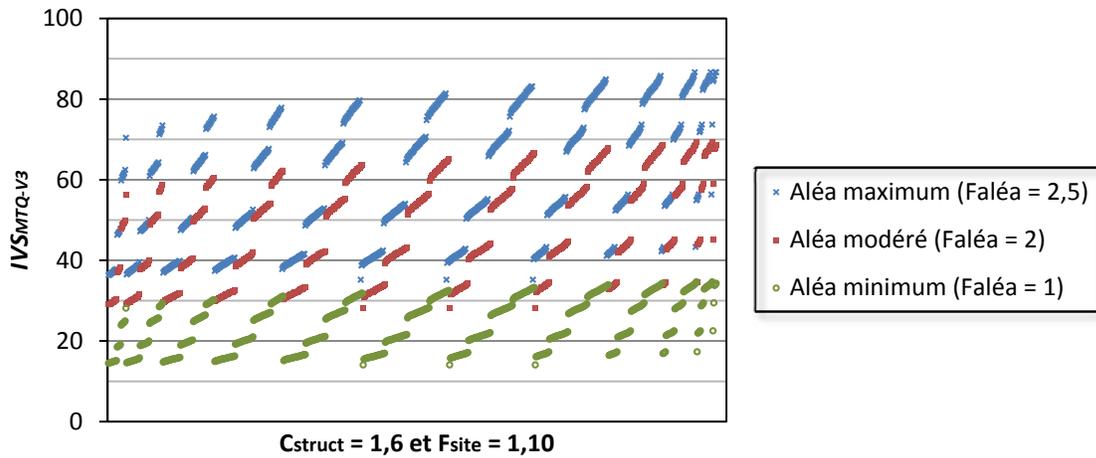


Figure 27 – Variation de l'IVS<sub>MTQ2013</sub> selon l'aléa pour des ponts en béton sur sol C

La Figure 28 illustre la variation de l'IVS pour les ponts en béton en aléa modéré, en fonction de la catégorie d'emplacement (A-B, C et E). Sur sol A-B, l'IVS varie entre 26,4 et 63; sur sol C, il varie de 29,0 à 69,3 et sur sol E, entre 32 et 78,8.

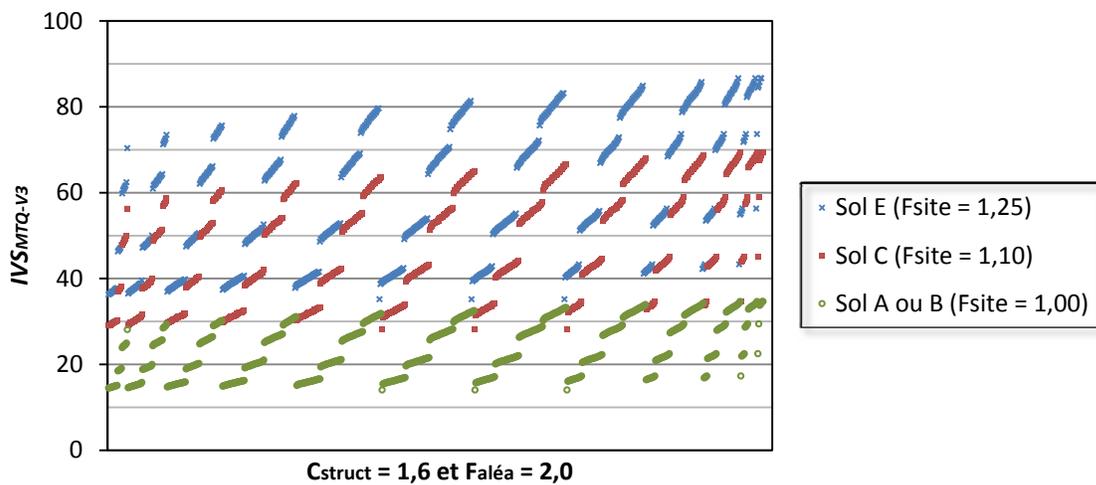


Figure 28 – Variation de l'IVS<sub>MTQ2013</sub> selon la catégorie sismique de site pour des ponts en béton en aléa modéré

La Figure 29 illustre la variation de l'IVS pour les ponts sur un site de catégorie C en aléa modéré, en fonction du type de structure. L'IVS des ponceaux ou portiques varie entre 9,1 et 21,7; l'IVS des ponts en bois varie de 17,6 et 43,3 et celui des ponts en béton, entre 28,2 et 69,3. Les indices des ponts en bois étant considérés relativement trop faibles, les valeurs du coefficient  $C_{struct}$  ont été révisées. L'IVS calculé avec  $C_{struct} = 1,3$  pour les ponts en bois varie entre 22,9 et 56,3.

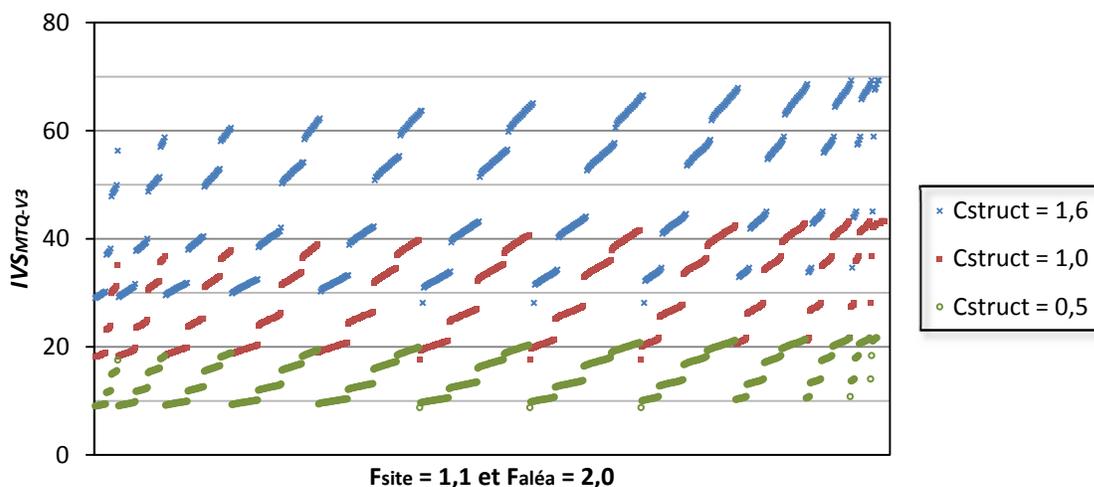


Figure 29 – Variation de l'IVS<sub>MTQ2013</sub> selon le type de structure pour des ponts sur site C en aléa modéré

### 6.3 APPLICATION AUX PONTS DE LA DT DE LA CAPITALE NATIONALE

#### 6.3.1 Comparaison des IVS des formulations MTQ2013 et MTQ95

La formulation de l'IVS<sub>MTQ2013</sub> proposée a été utilisée pour calculer l'IVS des 733 ponts de la DT de la Capitale Nationale. La Figure 30 présente une comparaison les IVS<sub>MTQ95</sub> tels qu'apparaissant dans l'extrait de la BDD-GSQ transmis par le MTQ. Ces IVS ont été inversés ( $100 - IVS_{MTQ95}$ ) pour mieux les comparer à l'IVS<sub>MTQ2013</sub>.

On observe une meilleure dispersion de l'IVS<sub>MTQ2013</sub> cette formulation répondant mieux aux exigences du contexte de gestion des risques des ouvrages d'art. On notera également certains ponts avec un IVS<sub>MTQ95</sub> égal à 100. Ce sont des ponts pour lesquels aucune valeur d'IVS n'est saisie dans la BDD-GSQ. La plupart de ces ouvrages ont été écartés par le tri préliminaire de la Méthode 2013 dû à leur faible vulnérabilité. Pour l'IVS<sub>MTQ2013</sub> les ponts ayant un indice de 100 sont ceux ayant un sol identifié liquéfiable.

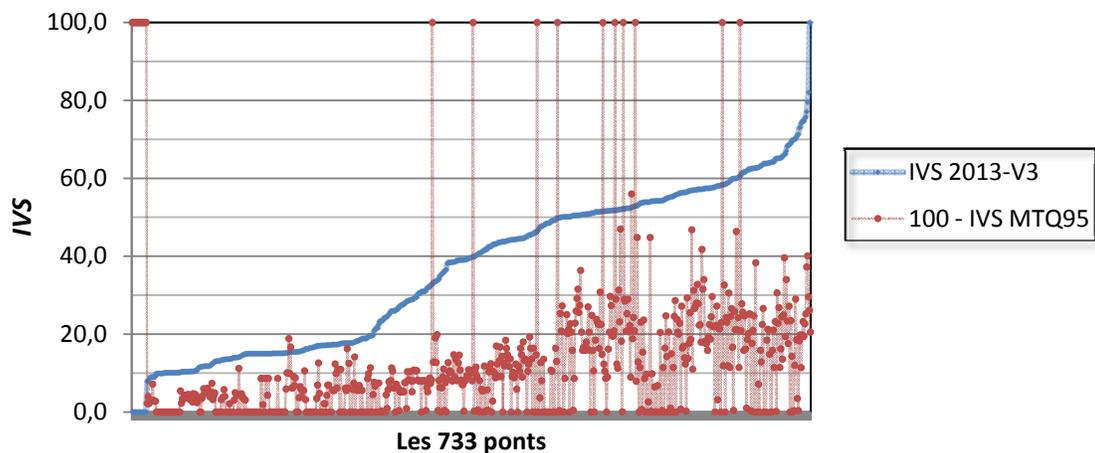


Figure 30 – Comparaison de l'IVS<sub>MTQ2013</sub> et de l'IVS<sub>MTQ95</sub> pour les 733 de la DT Capitale Nationale

La distribution des IVS<sub>MTQ2013</sub> selon le nombre de travées est illustrée à la Figure 31. L'IVS<sub>MTQ2013</sub> varie de 0 à 75,8 pour les ponts à travée unique et de 0 à 82,1 pour les ponts à travées multiples. 58% des ouvrages ont un IVS inférieur à 50.

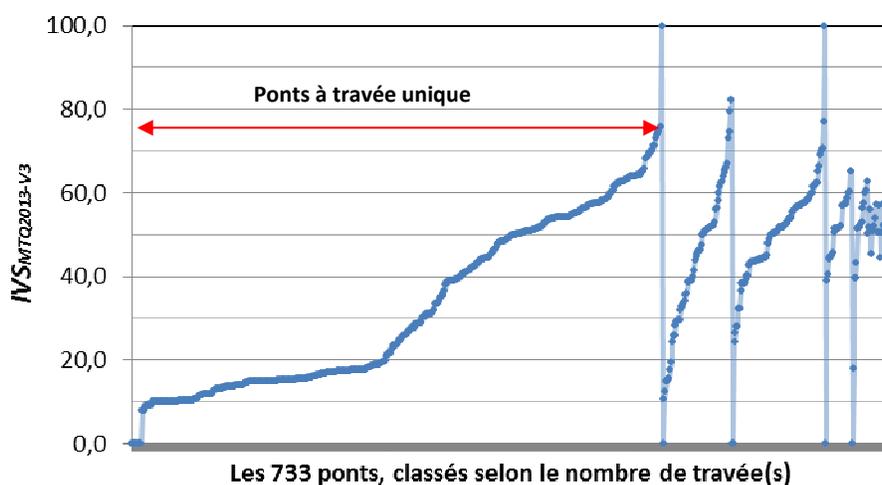


Figure 31 – Variation de l'IVS<sub>MTQ2013</sub> pour les 733 de la DT Capitale Nationale selon le nombre de travée(s)

### 6.3.2 Cartographie du risque

La Figure 32 présente la cartographie du risque résultant de la combinaison des  $IVS_{MTQ2013}$  et des valeurs d'ISE pour les 733 ponts de la DT de la Capitale Nationale. La figure illustre bien la vulnérabilité relative des ouvrages et confirme que la nouvelle formulation répond aux exigences d'utilisation dans le contexte de gestion des risques des ouvrages d'art du MTQ. Le Tableau 12 donne la répartition des ponts entre les quatre quadrants de priorité.

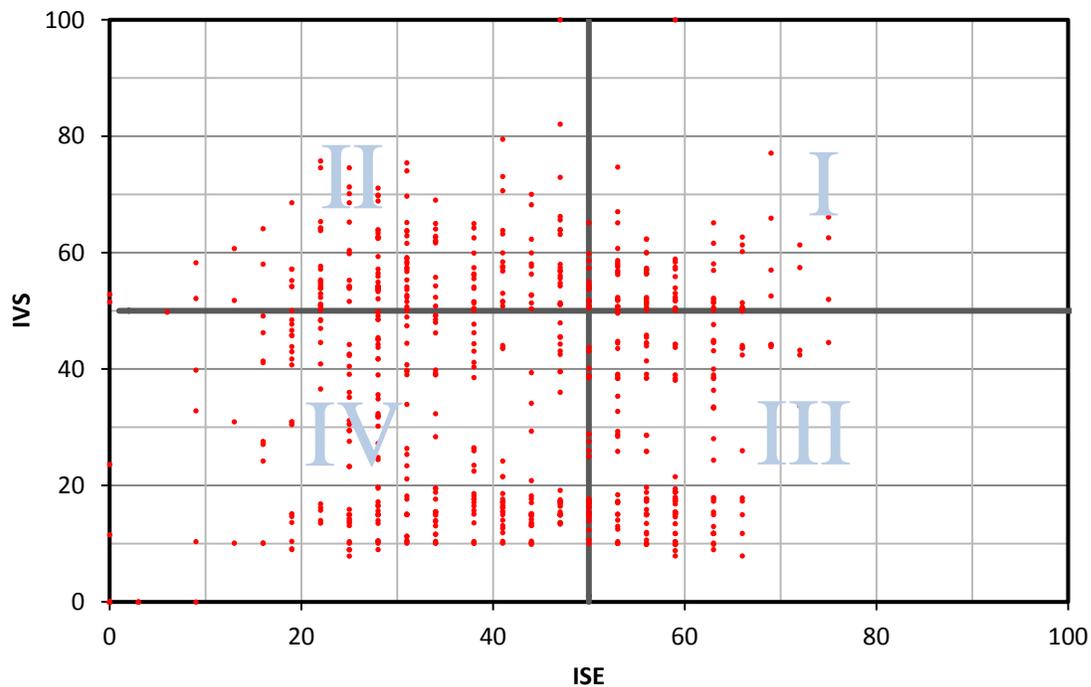


Figure 32 – Cartographie du risque avec l'IVS<sub>MTQ2013</sub> et l'ISE pour les 733 de la DT Capitale Nationale

Tableau 12 – Distribution des 733 ponts de la DT Capitale Nationale entre les 4 quadrants de la cartographie du risque

Quadrant	Effectif	Pourcentage
I	82	11%
II	172	23%
III	189	26%
IV	290	40%

### 6.3.3 Longueur d'appui

Afin de vérifier si l'utilisation du coefficient de longueur d'appui peut représenter adéquatement le risque de perte d'appui des ponts, des relevés ont été faits sur dix ponts de la DT de la Capitale Nationale. Les ratios entre la longueur critique ( $N_{cr}$ ), calculée selon les exigences de la norme CAN/CSA-S6-06, et la longueur existante varie entre 0,23 et 0,69. Trois ponts ont un ratio supérieur à 0,6 résultant en un coefficient  $C_{LongApp}$  supérieur à zéro, mais relativement faible. Par conséquent, il est recommandé d'analyser d'autres données sur un plus grand nombre de ponts pour obtenir une meilleure calibration de ce coefficient.

## 7 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Les méthodes indicielles pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique des ponts sont des outils utiles et largement utilisés pour définir les priorités d'intervention, autant dans un programme de mitigation des risques qu'après un séisme. Cependant, les paramètres considérés et l'importance qui leur est accordée dans la formulation des méthodes existantes, peuvent mener pour un ouvrage spécifique à un classement différent selon la méthode appliquée. L'objectif de ces méthodes indicielles n'est donc pas d'évaluer de façon absolue la vulnérabilité sismique d'un pont mais plutôt de proposer un classement relatif d'un grand nombre de ponts en fonction du risque sismique probable qui leur est associé en considérant le contexte de gestion du risque et les particularités du parc d'ouvrages considérés.

La nouvelle formulation de l'indice de vulnérabilité sismique  $IVS_{MTQ2013}$  répond à ses exigences en respectant le contexte de gestion des risques liés aux ouvrages d'art du MTQ. Il s'échelonne sur une échelle de 0 à 100 et permet d'identifier les ponts les plus vulnérables en considérant les paramètres influents recensés à partir d'une revue des dommages dus aux séismes à travers le monde.

L'étude de scénarios de déficiences théoriques a démontré que l' $IVS_{MTQ2013}$  peut identifier les ponts les plus vulnérables à travée unique autant que ceux à travées multiples. La formulation proposée considère également l'application de l'IVS à l'intérieur d'une Direction Territoriale où l'aléa est constant ou peu variable, modérément variable et très variable, en modulant le facteur d'aléa sismique. L'application de l' $IVS_{MTQ2013}$  sur un échantillon de 733 ponts de la DT de la Capitale-Nationale a démontré que la formulation illustre bien la vulnérabilité relative des ouvrages. La cartographie du risque obtenue en combinant l'indice socio-économique (ISE) et l'IVS donne une répartition des ponts en quatre quadrants de priorité avec 11% des ponts au quadrant I (priorité élevée) et 23% au quadrant II (priorité modérée à élevée).

La calibration des facteurs et coefficients de l' $IVS_{MTQ2013}$  peut cependant être améliorée par l'ajout d'informations non disponibles lors de la réalisation de ce projet. En particulier, il est recommandé de :

- ❑ Comparer l'IVS de ponts pour lesquels des évaluations détaillées ont été réalisées;
- ❑ Faire des relevés additionnels de longueurs d'appui sur un plus grand nombre de ponts pour déterminer la pertinence d'utiliser le coefficient de longueur d'appui dans sa forme actuelle;
- ❑ Ajouter un critère additionnel pour le coefficient d'irrégularité verticale des piles pour considérer les piles élancées en utilisant des données sur leurs dimensions;
- ❑ Réaliser des analyses dynamiques non-linéaires sur des modèles génériques de ponts pour évaluer l'impact de la demande sismique sur les déplacements aux appuis en fonction du biais, de la hauteur de piles et de la longueur de travée;
- ❑ Intégrer l'utilisation de l'IVS dans un système de positionnement géographique qui permettrait à court terme d'obtenir rapidement les données d'aléa sismique en superposant les informations sur les ponts aux couches d'iso-valeurs d'accélération maximales au sol. Par ailleurs, un tel système permettrait d'intégrer des informations sur la topographie de terrain, sur l'épaisseur des dépôts meubles ou sur le microzonage. Ainsi, l'évaluation des risques liés au glissement de terrain ou à l'amplification pourrait être raffinée.

## ANNEXES

### ANNEXE 1 – MÉTHODE MTQ95

Cette section résume les informations sur le calcul de l'indice de vulnérabilité sismique de la méthode MTQ95 décrite dans un document interne du MTQ (MTQ 2007). L' $IVS_{MTQ95}$  est donné par l'expression suivante :

$$IVS_{MTQ95} = 100 - \left( RS \times FF \times FA \times \sum_{i=1}^8 \omega_i \times C_i \right) \quad (16)$$

Où les facteurs d'influence sismique ( $RS$ ,  $FF$  et  $FA$ ) sont définis au Tableau A 1. Les valeurs attribuées aux coefficients d'influence sismique  $C_i$  et leur définition sont présentés au Tableau A 2 avec le poids relatif ( $\omega_i$ ) accordé à chaque coefficient.

**Tableau A 1 – Facteurs d'influence sismique de la Méthode MTQ95**

Facteur d'influence sismique	Catégorie	Valeur du coefficient
Facteur de risque sismique $RS^4$	Zonage effectif $Z' = 0$	0
	Zonage effectif $Z' = 1$	1,0
	Zonage effectif $Z' = 2$	2,0
	Zonage effectif $Z' = 3$	3,0
	Zonage effectif $Z' = 4$	4,0
	Zonage effectif $Z' = 5$	4,5
	Zonage effectif $Z' = 6$	5,0
Facteur de fondation $FF$ (Selon les types de sol de la norme CSA-S6-06, voir Tableau A 6)	Sol de type I : Roc, Sol dense et compact	1
	Sol de type II : Sol dense et compact - Argile très raide d'épaisseur supérieur à 50m	1,3
	Sol de type III : Sol mou de plus de 10 d'épaisseur	1,5
	Sol de type IV : Sol très mou ou reconnu liquéfiable	2,0
Facteur d'âge $FA$	1990 et plus	0,7
	1980-1989	0,8
	1960-1979	0,9
	1959 et moins	1,0

<sup>4</sup>  $RS$  dépend de la zone sismique effective  $Z'$  déterminée en fonction des paramètres de vitesse maximale au sol,  $Z_v$ , et d'accélération maximale,  $Z_a$ , telles que définis au Tableau A3.1.1. de la norme CAN/CSA-S6 (2006) :

$$\begin{cases} Z' = Z_v + 1 & \text{si } Z_a > Z_v \\ Z' = Z_v & \text{si } Z_a \leq Z_v \end{cases} \quad \text{Où} \quad \begin{cases} Z_v : \text{Paramètre de vitesse maximale au sol} \\ Z_a : \text{Paramètre d'accélération maximale} \end{cases}$$

**Tableau A 2 – Coefficients d'influence sismique de la Méthode MTQ95**

		Description des paramètres	Indice	Poids $\omega_i$
<b>Coefficient d'influence sismique</b>	$C_1$ Type de pont	11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 45, 46, 66 et 67	0,0	22%
		35, 36, 37, 72, 74 et 76	3,5	
		44, 52, 58, 61, 62, 63, 64, 65, 71, 73, 75 et 85	6,5	
		31, 32, 33, 34, 38, 39, 41, 42, 43, 47, 48, 49, 50, 51, 56, 57, 81, 82	10,0	
	$C_2^5$ Complexité structurale	Autres	0,0	22%
		Pont avec piles à hauteur variable	10,0	
	$C_3^6$ Nombre de discontinuités	2 et moins	0,0	15%
		3	5,0	
		4	7,5	
		5 et plus	10,0	
	$C_4$ Redondance des éléments de fondation (piles)	Pont à une travée	0,0	13%
		Banc en bois, fût, caisson à claire-voie	2,5	
Banc en acier ou pile à plusieurs colonnes		5,0		
Pile à une colonne		10,0		
$C_5$ Type d'appareil d'appui	Aucun, en élastomère, à glissement, à plaques, à élastomère confiné ou à rouleaux	0,0	7%	
	À pendule	10,0		
$C_6$ Biais du pont	Angle du biais $C_6 = \alpha = \frac{\quad}{6} \leq 10,0$	$\alpha \leq 10,0$	2%	
$C_7^7$ Nombre de poutres	Dalle ou 4 poutres et plus	0,0	7%	
	3 poutres	5,0		
	2 poutres	7,5		
	Une seule poutre	10,0		
$C_8^8$ Services publics	Aucun, conduits vides ou autres, éclairage, feux lumineux, gestion de trafic	0,0	12	
	Câblodiffusion, téléphone	2,5		
	Électricité, égout	5,0		
	Gaz naturel ou aqueduc	10,0		

<sup>5</sup> La variation de hauteur de pile est considérée pour les ponts d'étagement seulement (c'est-à-dire les ponts dont l'obstacle est une route) : Si les piles ont un rapport de hauteur de 50% et plus alors le coefficient  $C_2$  est de 10.

<sup>6</sup> Le coefficient  $C_3$  permet de considérer l'effet négatif des discontinuités engendrées par les joints de dilatation entre les travées augmentant le risque de pertes d'appuis.

<sup>7</sup> Le coefficient  $C_7$ , considère la redondance du système structural. Il est déterminé pour chaque travée du pont, et la valeur la plus critique est considérée pour l'ensemble du pont.

<sup>8</sup> Un coefficient  $C_8$  est attribué pour chaque service. Les coefficients s'additionnent sans toutefois dépasser 10.

Les facteurs d'influence sismique ont été mis à jour dans le cadre d'un projet d'évaluation de la vulnérabilité sismique des ponts de la Ville de Québec pour tenir compte des données plus récentes sur l'aléa sismique et la catégorisation sismique des sites (Hida 2009, Nollet *et al.* 2008). Ces facteurs sont présentés au Tableau A 3.

**Tableau A 3 – Facteurs d'influence sismique de la Méthode MTQ2005**

Facteur d'influence sismique	Catégorie	Valeur
Facteur de risque sismique <i>RS</i> <sup>9</sup>	Sismicité faible	1,0
	Sismicité moyenne	3,0
	Sismicité élevée	5,0
Facteur de fondation (catégorisation sismique des sites, voir Tableau A 7) <i>FF</i>	A - Roc sain	0,5
	B - Roc	0,6
	C - Sol très dense ou roc altéré	1,0
	D - Sol raide	1,4
	E- -Argile molle/Profil de sol avec argile molle	2,0
	F – Étude géotechnique requise	Note
Facteur d'âge <i>FA</i>	2000 et après	0,6
	1990 à 1999	0,7
	1980 à 1989	0,8
	1960 à 1979	0,9
	1959 et avant	1,0

\*Un avis sur le risque géotechnique est émis, et aucun indice n'est calculé.

<sup>9</sup> Le niveau de sismicité est défini à partir des valeurs d'accélération spectrales à 0,2s et 1s au site de l'ouvrage, par la relation suivante :

NIVEAU DE SISMICITÉ <sup>(*)</sup>	$Sa_{0,2}$	$Sa_{1,0}$
Élevé	> 0,500 g	> 0,200 g
Modéré	0,167 g à 0,500 g	0,067 g à 0,200 g
Faible	< 0,167 g	< 0,067 g

(\*) Le niveau faible ou élevé n'est attribué que si les conditions sur  $Sa_{0,2}$  et  $Sa_{1,0}$  sont satisfaites, autrement la sismicité est définie comme modérée.

## ANNEXE 2 – MÉTHODE VdQ2007

Cette section résume les informations sur le calcul de l'indice de vulnérabilité sismique de la méthode VdQ2007 décrite dans le rapport sur l'évaluation des ponts de la Ville de Québec (Nollet *et al.* 2008). L' $IVS_{VdQ2007}$  est donné par l'expression suivante :

$$IVS_{VdQ2007} = [10 - (AS \times V_S \times V_G \times V_T \times V_A \times V_F \times V_E)] \times I_P \quad (17)$$

Où les facteurs de vulnérabilité  $AS$ ,  $V_S$ ,  $V_F$  et  $V_E$  sont définis au Tableau A 4 et les autres facteurs  $V_G$ ,  $V_T$  et  $V_A$  sont définis en fonction de coefficients d'influence sismique  $C_i$ , selon la relation suivante, et définis au Tableau A 5.

$$V_i = 1 - \sum \alpha_i C_i \quad (18)$$

**Tableau A 4 – Facteurs de vulnérabilité sismique pour le calcul de l'IVS de la méthode VdQ2007**

		Description des paramètres	Valeur
$AS$	Facteur d'aléa sismique	Sismicité faible	1
		Sismicité modérée	0,6
		Sismicité élevée	0,2
$V_S$	Facteur de vulnérabilité du sol (catégorisation sismique des sites, voir Tableau A 7)	A - Roc sain	10
		B - Roc	7,0
		C - Sol très dense ou roc altéré	5,0
		D - Sol raide	3,0
		E - Argile molle/Profil de sol avec argile molle	2,5
		F – Étude géotechnique requise	0 <sup>(*)</sup>
$V_F$	Facteur de vulnérabilité des fondations	Fondations superficielles sur roc ou <b>conçues pour les actions sismiques</b>	1,0
		Fondations superficielles sur sol <b>non conçues pour les actions sismiques</b>	0,8
		Fondations profondes <b>non conçues pour les actions sismiques</b> :	0,5
$V_E$	Facteur d'endommagement	Bon à Très bon	1,0
		Acceptable	0,7
		Mauvais à Très mauvais	0,5

(\*) Lorsqu'une étude géotechnique est requise (site de catégorie F) le facteur de vulnérabilité du sol  $V_S$  étant égal à 0, l'IVS est alors égal à la valeur maximale, soit 10.

**Tableau A 5 – Valeurs des coefficients pour le calcul des facteurs de vulnérabilité de la méthode VdQ2007**

	<b>Coefficients</b>	<b>Description des paramètres</b>	<b>Valeur</b>	<b>Poids</b>
<b>VULNÉRABILITÉ GÉNÉRALE <math>V_G</math></b>	$C_A$ Âge de l'ouvrage	1990 et plus	0	<b>25%</b>
		1980 a 1989	0,35	
		1972 a 1979	0,6	
		1960 a 1971	0,8	
		1959 et moins	1,0	
	$C^*_1$ Type de pont	11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 45, 46, 66 et 67	0,0	<b>50%</b>
		35, 36, 37, 72, 74 et 76	0,35	
		44, 52, 58, 61, 62, 63, 64, 65, 71, 73, 75 et 85	0,65	
		31, 32, 33, 34, 38, 39, 41, 42, 43, 47, 48, 49, 50, 51, 56, 57, 81, 82	1,0	
	$C^*_8$ Services publics	Aucun, conduits vides ou autres, éclairage, feux lumineux, gestion de trafic	0,0	<b>25%</b>
		Câblodiffusion, téléphone	0,25	
		Électricité, égout	0,5	
Gaz naturel ou aqueduc		1,0		
<b>VULNÉRABILITÉ DU TABLIER <math>V_T</math></b>	<b>Coefficients</b>	<b>Description des paramètres</b>	<b>Valeur</b>	<b>Poids</b>
	$C^*_3$ Nombre de discontinuités	2 et moins	0,0	<b>25%</b>
		3	0,5	
		4	0,75	
		5 et plus	1,0	
	$C^*_6$ Biais du pont	$C^*_6 = \text{Angle du biais}/60 \leq 1,0$	Angle $\leq 1,0$	<b>50%</b>
	$C^*_7$ Nombre de poutres	Dalle ou 4 poutres et plus	0,0	<b>25%</b>
		3 poutres	0,5	
		2 poutres	0,75	
		Une seule poutre	1,0	
<b>VULNÉRABILITÉ DU SYSTÈME D'APPUI <math>V_A</math></b>	<b>Coefficients</b>	<b>Description des paramètres</b>	<b>Valeur</b>	<b>Poids</b>
	$C^*_2$ Complexité structurale	Autres	0,0	<b>33%</b>
		Pont avec piles à hauteur variable	1,0	
	$C^*_4$ Redondance des éléments de fondation (piles)	Pont à une travée	0,0	<b>33%</b>
		Banc en bois, fût, caisson à claire-voie	0,25	
		Banc en acier ou pile à plusieurs colonnes	0,5	
		Pile à une colonne	1,0	
	$C^*_5$ Type d'appareil d'appui	Aucun, en élastomère, à glissement, à plaques à élastomère confiné ou à rouleaux	0,0	<b>33%</b>
		À pendule	1,0	

Note : Les critères établis pour dans la méthode MTQ95 pour déterminer la valeur à attribuer à chaque coefficient  $C_i$  sont repris.

### ANNEXE 3 – CLASSIFICATION DES SOLS ET CATÉGORIES D’EMPLACEMENT

**Tableau A 6- Description des profils de sol de la norme CAN/CSA-S6-06**

(Tiré de CAN/CSA 2006)

Profil de sol	Description
I	Roc de tout genre, d'aspect argileux ou de nature cristalline (ce matériau peut être caractérisé par une vitesse d'ondes de cisaillement > 750 m/s ou d'autres méthodes appropriées de classification) sol rigide dont la profondeur est < 60 m, et dont les couches au-dessus du roc sont formées de dépôts stables de sable, de gravier ou d'argile ferme.
II	Argile ferme Sol profond non cohérent dont la profondeur dépasse 60 m et dont les couches au-dessus du roc sont formées de dépôts stables de sable, de gravier ou d'argile ferme.
III	Argile de fermeté moyenne à faible et sable sur une profondeur de moins de 9 m, peut comporter des couches stériles de sable ou d'autres sols non cohérents
IV	Argile tendre ou limon sur une profondeur de plus de 12 m (ce matériau peut être caractérisé par une vitesse d'onde de cisaillement inférieure à 150 m/s et peut comprendre des dépôts naturels meubles ou du remblai non stabilisé)

**Tableau A 7 – Catégorisation d’emplacement sismique selon le Tableau 4.1.8.4.A du CNB 2010**

(Tiré de CNRC 2010)

Catégorie d’emplacement	Profil du sol	Propriétés moyennes des 30 premiers mètres.		
		Vitesse moyenne des ondes de cisaillement, $V_s$ (m/s)	Résistance moyenne à la pénétration standard, $N_{60}$	Résistance du sol non drainé au cisaillement, $s_u$
A	Roche dure (1)(2)	$V_s > 1500$	s/o	s/o
B	Roche(1)	$760 < V_s \leq 1500$	s/o	s/o
C	Sol très dense et roche tendre	$360 < V_s < 760$	$N_{60} > 50$	$s_u > 100$ kPa
D	Sol consistant	$180 < V_s < 360$	$15 \leq N_{60} \leq 50$	$50 \text{ kPa} < s_u \leq 100 \text{ kPa}$
E	Sol meuble	$V_s < 180$	$N_{60} < 15$	$s_u < 50$ kPa
		Tout profil de plus de 3 m d'épaisseur et dont le sol a les caractéristiques suivantes :		
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• indice de plasticité : <math>PI &gt; 20</math>;</li> <li>• teneur en eau : <math>w \geq 40\%</math>; et</li> <li>• résistance du sol non drainé au cisaillement : <math>s_u &lt; 25</math> kPa</li> </ul>		
F	Autres sols(3)	Une évaluation spécifique à l'emplacement est exigée.		

(1) Les catégories d’emplacement A et B, roche dure et roche, ne doivent pas être utilisées s’il y a plus de 3 m de matériaux meubles entre la roche et la sous-face des semelles de fondation ou du radier. La catégorie d’emplacement appropriée dans ce cas-ci est établie d’après les propriétés moyennes de la couche totale de matériaux meubles (voir l’annexe A).

(2) Si la vitesse,  $s$  a été mesurée sur place, les valeurs de  $F_a$  et de  $F_v$  dérivées des tableaux 4.1.8.4.B. et 4.1.8.4.C. peuvent être multipliées par  $(1500/s)^{0.5}$ .

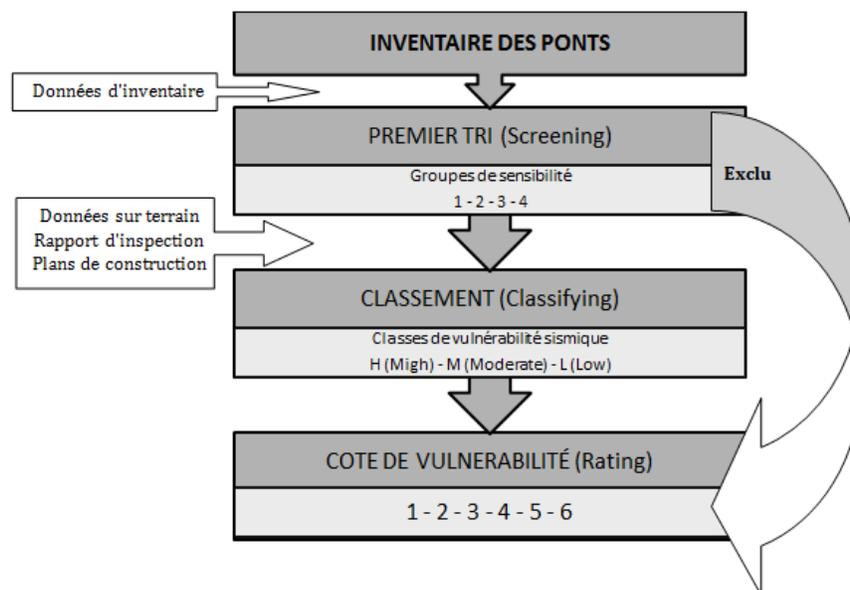
(3) Parmi les autres types de sol, on compte notamment :

- a) les sols liquéfiables, les argiles très sensibles et extrasensibles, les sols peu consolidés susceptibles d’affaissement et d’autres sols susceptibles d’affaissement ou de défaillance en raison de charges dues aux séismes;
- b) la tourbe et les argiles à forte teneur en matières organiques dont l’épaisseur dépasse 3 m;
- c) les argiles ayant une grande plasticité ( $PI > 75$ ) dont l’épaisseur dépasse 8 m; et
- d) les argiles raides, de molles à moyennes, dont l’épaisseur dépasse 30 m

## ANNEXE 4 – MÉTHODE NYDOT

Cette section résume les principes généraux de la méthode d'évaluation du département du transport de l'état de New York décrite dans (NYDOT 1995, révisé en 2004). La Figure A 1 présente les étapes principales de la méthode NYDOT. L'étape du premier tri (« Screening ») est effectuée à partir des données d'inventaire et permet de classer les ouvrages en 4 groupes de sensibilité. À cette étape, un tri préliminaire permet d'identifier les ouvrages reconnus non vulnérables pour les retirer du processus d'évaluation et ceux devant nécessairement faire l'objet d'une évaluation détaillée (voir Figure A 2). Les autres se voient attribuer un groupe de sensibilité (de 1 à 4) en fonction de leurs caractéristiques structurales (voir Figure A 3).

Ces groupes de sensibilité sont ensuite utilisés pour définir la priorité pour l'évaluation suivante, soit le classement en classes de vulnérabilité sismique (« Classifying »). La classe de vulnérabilité sismique sera elle-même utilisée pour attribuer une cote de vulnérabilité à l'ouvrage (« Rating »), qui prend en compte les conséquences d'une rupture.



**Figure A 1 – Étapes d'évaluation de la méthode NYDOT**

*Traduit et tiré du Manuel du NYDOT (1995)*

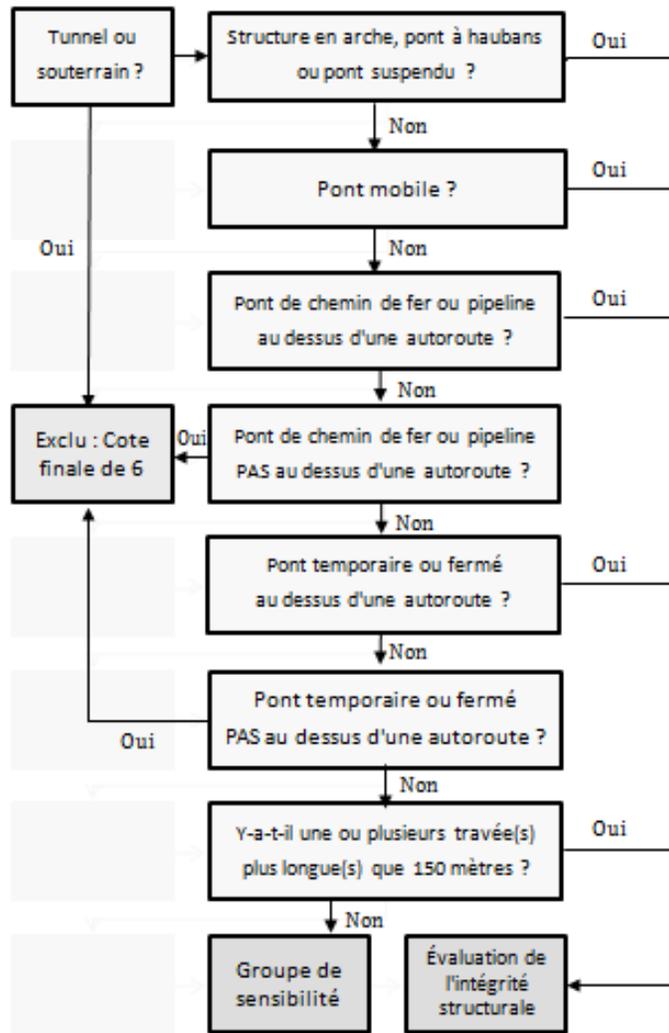


Figure A 2 – Tri préliminaire lors de l'étape du « Screening »  
 Traduit et tiré du Manuel du NYDOT (1995)

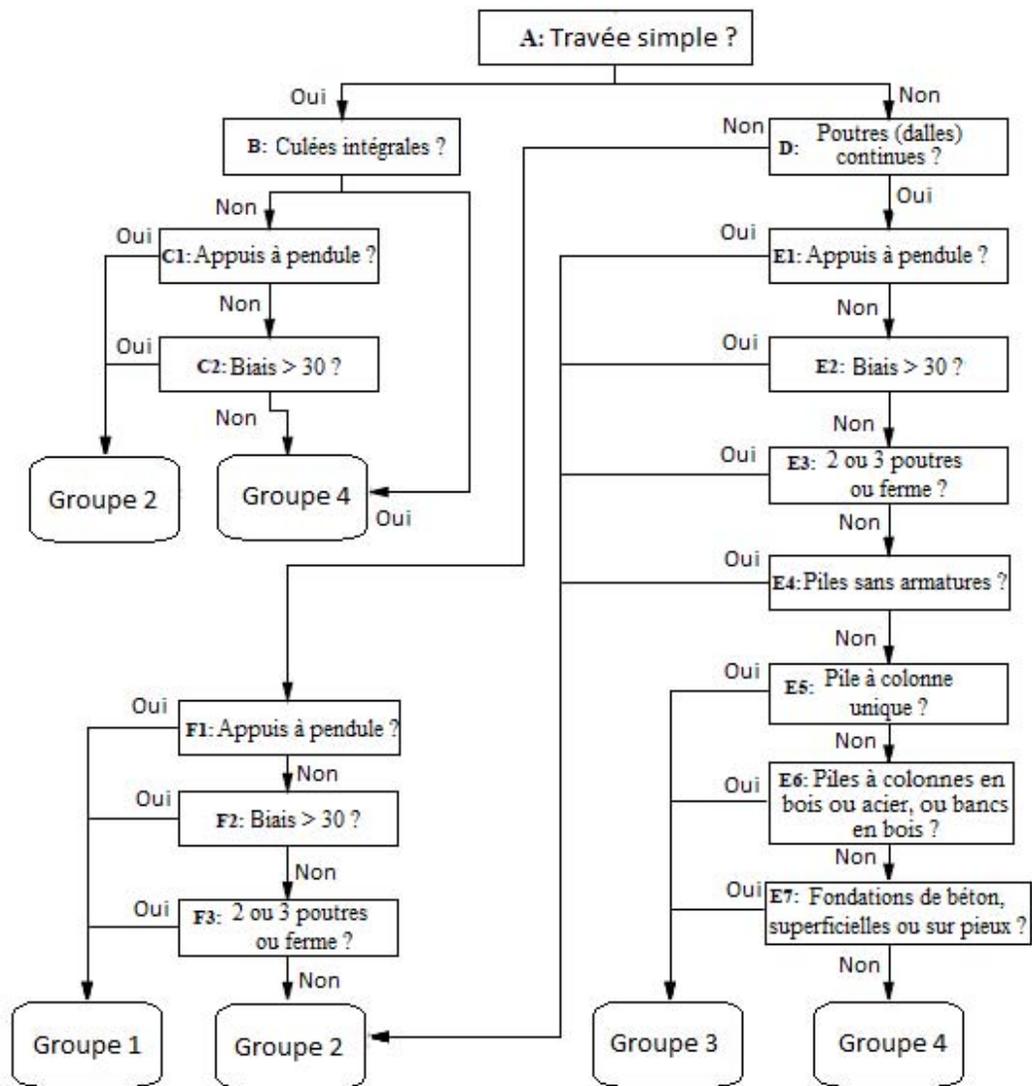


Figure A 3 – Algorithme utilisé par le NYSDOT pour trier les ouvrages dans leur groupe de sensibilité  
 Traduit et tiré du Manuel du NYDOT (1995)

## ANNEXE 5 – MÉTHODE SISMOA

Cette section résume les principes généraux de la méthode SISMOA développée par la Direction des Routes et le SETRA en France (Davi *et al.* 2011). La méthode SISMOA est une méthode d'évaluation préliminaire proposant un indice de vulnérabilité aux phénomènes induits par le séisme  $V_{vib}$  (pour vibratoire), défini par :

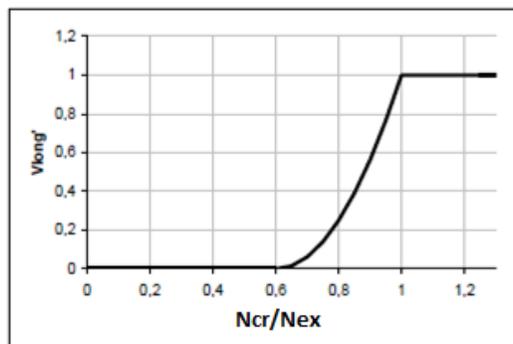
$$V_{vib} = V_{général} \times \text{Max}(V_{voûte}; V_{tablier}; V_{culées}; V_{piles}) \quad (19)$$

Le macro-indice de vulnérabilité général dépend de la méthode de conception (c'est-à-dire l'année du code), du type de structure et de son état. Cet indice de vulnérabilité permet de déduire, selon une formule empirique, une valeur d'accélération limite pouvant entraîner des dommages aux ponts: plus l'ouvrage est vulnérable, plus l'accélération créant des dommages est faible.

Enfin l'indice de risque vibratoire  $R_{vib}$  se calcule en fonction du rapport de l'accélération du sol divisé par cette accélération critique :

- ❑ Si l'accélération est égale à cette accélération critique  $R_{vib} = 0,5$ .
- ❑ Si l'accélération est égale à la moitié de cette accélération critique  $R_{vib}$  est nul.
- ❑ Si l'accélération est égale au double de cette accélération critique  $R_{vib}$  vaut le maximum de 1.

Dans le calcul de la vulnérabilité du tablier, le risque d'échappement des appuis est pris en compte par un critère d'échappement variant en fonction du rapport entre la longueur minimale critique d'appui/longueur d'appui existante ( $N_{cr}/N_{ex}$ ). Ce critère est égal à 0 si  $(N_{cr}/N_{ex}) < 0,6$ , puis à la valeur minimale entre 1 et  $6,25 \times \left(\frac{N_{cr}}{N_{ex}} - 0,60\right)^2 \leq 1,0$ , tel qu'illustré à la Figure A 4.



**Figure A 4 – Critère d'échappement des appuis selon la procédure SISMOA**

*Traduit et tiré Davi et al. (1995)*

## ANNEXE 6 – PARAMÈTRES DE VULNÉRABILITÉ ET DONNÉES DE LA BDD

Les tableaux suivants présentent l'ensemble des paramètres pris en compte dans le calcul des IVS des méthodes MTQ95 et VdQ2007, ainsi que les paramètres additionnels considérés pertinents pour le calcul d'un IVS. Ces paramètres sont mis en lien avec les données de la BDD-GSQ.

À noter que pour la méthode VdQ2007, aucune donnée de la BDD-GSQ ne permet de déterminer une valeur pour le facteur d'endommagement  $V_E$ .

**Tableau A 8 – Identification des données de la BDD-GSQ servant au calcul de l'IVS<sub>MTQ95</sub> et IVS<sub>VdQ2007</sub>**

	Description du paramètre	Identification de la donnée	Remarques
<b>Données sur l'aléa sismique et l'amplification du site</b>			
$RS$ ou $AS$	Données géographiques (latitudes et longitudes);	<b>Données générales : Localisation :</b> X ; Y ; Longitude ; Latitude ; Orientation ; Point de repère Municipalité	Pour relier à l'aléa sismique (accélération spectrale)
$FF$ ou $F_s$	Information qualitative du sol en surface et en place	<b>Données par éléments : Fondations :</b> Sol ou renforcement <i>Uniquement pour les éléments de fondations :</i> Nature du sol	Des hypothèses sont émises pour déterminer le type de sol (I, II, III ou IV) de la méthode MTQ95 ou la catégorie sismique du site (A, B, C, D ou E) de la méthode VdQ2007 (voir Tableau A 11)
$FF$	Sol potentiellement liquéfiable (Pour certains ouvrages seulement);	<b>Données par éléments : Fondations :</b> Sol ou renforcement <i>Uniquement pour les éléments de fondations :</i> Nature du sol	$FF=2$ pour MTQ95 $F_s$ : Étude géotechnique requise pour VdQ2007
<b>Données sur le niveau de conception</b>			
$FA$ ou $C_A$	Année de construction	<b>Données générales : Année :</b> Année construction Unités de fondation Systèmes structuraux Platelage Dernière réparation dalle	Permet de relier aux normes utilisées lors de la conception
<b>Données sur les coefficients de vulnérabilité</b>			
$C_1$ ou $C^*_1$	Groupe de pont	<b>Identification :</b> Type de structure	Identification du type de pont selon la classification du MTQ
$C_2$ ou $C^*_2$	Données géométriques	<b>Données par éléments : Piles</b> Colonnes / bancs Fûts -> hauteur <b>Obstacles :</b> Type voie	La hauteur de pile est utilisée pour vérifier le critère d'irrégularité pour les ponts d'étagement
$C_3$ ou $C^*_3$	Nombre de joints	<i>Données transmises par le MTQ dans une table à part</i>	Utilisé conjointement avec les données sur le nombre de travées pour juger de la continuité. Voir les recommandations au Tableau 10.
	Nombre de travées	<i>Données transmises par le MTQ dans une table à part</i>	
$C_4$ ou $C^*_4$	Redondance des éléments de fondations pour les piles	<b>Détails Travées :</b> Unités de fondation	Dépend du type d'unité de fondation des piles.
$C_5$ ou $C^*_5$	Type d'appuis	<b>Données par éléments :</b> Piles Culées -> Appareil	

	Description du paramètre	Identification de la donnée	Remarques
$C_6$ ou $C^*_6$	Biais.	<b>Données générales :</b> Type biais Valeur angle	
$C_7$ ou $C^*_7$	Redondance (nombres de poutres)	<i>Données transmises par le MTQ dans une table à part</i>	
$C_8$ ou $C^*_8$	Services publics (éclairage, égout, électricité, gaz naturel, téléphone)	<b>Description -&gt; Services publics :</b> Type de service ; nombre	
$V_F$	Type de fondation (superficielle ou profonde) et leur niveau de conception	<b>Données par éléments :</b> Piles Culées -> Fondation <b>COMPRIS DANS :</b> <b>Description -&gt; Détails – Travée :</b> <i>Ensemble des données</i> <i>Et aussi :</i> <b>Éléments -&gt; Détails :</b> <i>Ensemble des données</i>	Des hypothèses sont émises pour déterminer le type de fondations, voir Tableau A 11. Cependant, il est difficile de déterminer le niveau de conception des fondations

**Tableau A 9 – Paramètres additionnels pouvant être utilisés à partir des données de la BDD-GSQ**

Description du paramètre	Identification de la donnée	Remarques
<b>Données sur l'aléa sismique et l'amplification du site</b>		
Statut de la structure	<b>Identification :</b> Statut de la structure : On ne veut que les « 1 – Actif MTQ »	Permet d'extraire les ponts dont le MTQ n'est pas responsable, les ouvrages démolis, à l'état de projet, ou étant un projet abandonné
Type de culées	<b>Description -&gt; Détails – Travée :</b> <i>Ensemble des données</i> ET : <b>Éléments -&gt; Détails :</b> <i>Ensemble des données</i> <b>Détails Travées :</b> Unités de fondation	Permet de considérer la vulnérabilité reliée au type de culées.
Indice de comportement structural (ICS)	<i>Données transmises par le MTQ dans une table à part</i>	Permet de considérer le comportement général et l'endommagement
Présence de dalle de transition (dalle d'approche aux culées)	<b>Éléments -&gt; Détails :</b> <i>Ensemble des données</i> <b>(Approche)</b> <b>Données par élément :</b> Approches	Permet de considérer les risques de tassement sous une dalle d'approche, en combinaison avec les données sur le sol.
Classification du pont selon son importance (Pont de secours, d'urgence ou autre) actuel et souhaitable si reconstruction	<b>Identification :</b> Catégorie S/U/A Catégorie S/U/A souhaitable	Est relié aux types de réseau dont fait partie l'ouvrage (route supportée et obstacle)
Type de route supportée par le pont (route locale, réseau stratégique)	<b>Données générales :</b> Route <b>Données route :</b> Type Voie Classe route <b>Routes -&gt; Détail -&gt; Identification :</b> Nom ; Type de voie <b>Routes -&gt; Détail -&gt; Classification :</b> Classe de route ; Réseau Camion ; RRN/RSSCE/RSTQ <b>Routes -&gt; Détail -&gt; Chaussée :</b> Nombre de voies de circulation actuel ; nombre de voies de circulation souhaitable	Permet de considérer l'importance des conséquences d'une mise hors-service du pont.
Type de route/cours d'eau enjambée par le pont	<b>Données générales :</b> Obstacle <b>Données obstacle :</b> Type Voie <b>Obstacle -&gt; Détail -&gt; Identification :</b> Nom ; Type de voie <b>Obstacle -&gt; Détail -&gt; Classification :</b> Classe route ; RRN/RSSCE/RSTQ <b>Obstacle -&gt; Détail -&gt; Circulation :</b> DJMA ; Longueur détour ; <b>Obstacle -&gt; Détail -&gt; Chaussée :</b> Nombre de voies de circulation actuel <b>Obstacle -&gt; Hydraulique -&gt; Description :</b> Eaux navigables	Permet de considérer l'importance des conséquences d'une mise hors-service du pont.

## ANNEXE 7 – HYPOTHÈSES POUR LE CALCUL DES IVS

Lorsque l'information sur le sol est disponible elle est décrite de façon qualitative. Le Tableau A 10 présente la correspondance entre la nature du sol de la BDD-GSQ et les hypothèses faites pour les profils de sol selon la norme CAN/CSA-S6 (2006) et les catégories d'emplacement selon le CNBC 2010 (CNRC 2010).

**Tableau A 10 - Correspondance entre la nature du sol de la BDD-GSQ, les profils de sol de la norme CAN/CSA-S6 et les catégories d'emplacement du CNBC 2010**

BDD-GSQ Sol ou Renforcement	Catégorie d'emplacement selon CNBC 2010	Type de sol selon la norme CAN/CSA-S6
Roc	A et B	Type I
Sol grossier, dense ou compact	C	Type II
Argile raide	D	Type III
Sol grossier lâche, argile molle ou silt Remblai	E	Type IV
Non spécifié		Autre
Sol liquéfiable	F	

Le Tableau A 11 présente les hypothèses utilisées pour déterminer les coefficients d'influence communs aux méthodes MTQ95 et VdQ2007 pour le calcul des IVS, pour les ponts à travée unique et pour les ponts à travées multiples continues. Le Tableau A 12 présente les hypothèses utilisées pour déterminer les facteurs d'influence ou de vulnérabilité spécifiques à chacune des méthodes.

**Tableau A 11 – Hypothèses émises pour le calcul des IVS, coefficients communs aux méthodes MTQ95 et VdQ2007**

Facteur ou Coefficient	Ponts à travée unique	Ponts à travées multiples continues
$C_1$ ou $C^*_1$		Direct
$C_2$ ou $C^*_2$	$C_2$ ou $C^*_2 = 0$	Selon calculs de la différence de hauteur de piles pour les ponts d'étagement; Pour les 6 ouvrages à plusieurs travées, sans donnée sur les piles : $C_2$ ou $C^*_2 = 0$
$C_3$ ou $C^*_3$		$C_3$ ou $C^*_3 = 0$
$C_4$ ou $C^*_4$	$C_4$ ou $C^*_4 = 0$	<p>Selon cas.</p> <p>Lorsque l'unité de fondation est "Pile - Béquille intermédiaire" (non répertoriée dans le tableau des <math>C_4</math>) :</p> <p>Si l'élément est "fût" =&gt; <math>C_4 = 2,5</math> pour l'IVS<sub>MTQ95</sub> et =&gt; <math>C^*_4 = 0,25</math> pour l'IVS<sub>VdQ2007</sub></p> <p>Si "colonnes/bancs" (le plus défavorable entre "banc" et "pile à plusieurs colonnes") =&gt; <math>C_4 = 5</math> pour l'IVS<sub>MTQ95</sub> et =&gt; <math>C^*_4 = 0,5</math> pour l'IVS<sub>VdQ2007</sub></p> <p>Pour les bancs en maçonnerie : =&gt; <math>C_4 = 7,5</math> pour l'IVS<sub>MTQ95</sub> =&gt; <math>C^*_4 = 0,75</math> pour l'IVS<sub>VdQ2007</sub>.</p> <p>Aucune donnée : =&gt; <math>C_4 = 10</math> (<math>C^*_4 = 1,0</math> pour VdQ)</p>
$C_5$ ou $C^*_5$		Direct Si pas de donnée $C_5$ ou $C^*_5 = 0$
$C_6$ ou $C^*_6$		Direct
$C_7$ ou $C^*_7$		Direct
$C_8$ ou $C^*_8$		Direct Si pas de donnée $C_8$ ou $C^*_8 = 0$

**Tableau A 12 – Hypothèses émises pour le calcul des IVS – Facteurs spécifiques aux méthodes MTQ95 et VdQ2007**

	Facteur ou Coefficient	Ponts à travée unique	Ponts à travées multiples continues
<b>MTQ95</b>	<i>RS</i>	Pour les villes non répertoriées, le <i>RS</i> de la ville la plus proche entre La Malbaie, Québec ou Cap Santé	
	<i>FF</i>	<p><u>Approche 1 :</u> Si sol non spécifié, ou aucune donnée de fondation et donc de sol =&gt; <math>FF = 2</math> (type IV, cas le plus défavorable)</p> <p><u>Approche 2 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si sol non spécifié :</li> </ul> <p>Si fondation superficielle =&gt; <math>FF = 1,3</math> (sol dense, type II)</p> <p>Si fondation profonde =&gt; <math>FF = 1,5</math> (sol mou, type III)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si aucune donnée de fondation : =&gt; <math>FF = 2</math> (type IV) =&gt; <math>FF = 1</math> (roc, type I) dans le cas des ponceaux</li> </ul>	<p><u>Approche 1:</u>  <i>NON APPLIQUÉE</i></p> <p><u>Approche 2 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si sol non spécifié :</li> </ul> <p>Si fondation superficielle =&gt; <math>FF = 1,3</math> (sol dense, type II)</p> <p>Si fondation profonde =&gt; <math>FF = 1,5</math> (sol mou)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si aucune donnée de fondation : =&gt; <math>FF = 2</math> (type IV)</li> </ul>
	<i>FA</i>	Direct	
<b>VdQ2007</b>	<i>AS</i>	Selon les données d'AMS extraites du Ressources canada <sup>10</sup> à partir des coordonnées géographiques (latitude et longitude) du pont et la ville la plus proche.	
	<i>V<sub>S</sub></i>	<p><u>Approche 2 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si sol non spécifié :</li> </ul> <p>Si fondation superficielle =&gt; <math>V_S = 5</math> (Type C)</p> <p>Si fondation profonde =&gt; <math>V_S = 2,5</math> (type E)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si aucune donnée de fondation : =&gt; <math>V_S = 2,5</math> (Type E) =&gt; <math>V_S = 5</math> (Type C) dans le cas des ponceaux =&gt; <math>V_S = 2,5</math> (type E)</li> <li>• Si aucune donnée de fondation : =&gt; <math>V_S = 2,5</math> (Type E) =&gt; <math>V_S = 5</math> (Type C) dans le cas des ponceaux</li> </ul>	<p><u>Approche 2 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si sol non spécifié :</li> </ul> <p>Si fondation superficielle =&gt; <math>V_S = 5</math> (Type C)</p> <p>Si fondation profonde =&gt; <math>V_S = 2,5</math> (type E)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si aucune donnée de fondation : =&gt; <math>V_S = 2,5</math> (Type E)</li> </ul>
	<i>V<sub>F</sub></i>	<p>Si fondation superficielle <math>V_F = 0,5</math> Si fondation profonde <math>V_F = 0,8</math></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si pas de fondation : Si ponceau <math>V_F = 1</math> Sinon <math>V_F = 0,5</math></li> </ul>	<p>Si fondation superficielle <math>V_F = 0,5</math> Si fondation profonde <math>V_F = 0,8</math></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si pas de fondation : =&gt; <math>V_F = 0,8</math></li> </ul>
	<i>V<sub>E</sub></i>	$V_E = 1$ (Aucune donnée disponible)	

<sup>10</sup> [http://www.seismescanada.rncan.gc.ca/hazard-alea/interpolat/index\\_2010-fra.php](http://www.seismescanada.rncan.gc.ca/hazard-alea/interpolat/index_2010-fra.php)

## ANNEXE 8 – CALIBRATION FACTEUR D'AMPLIFICATION DE SITE $F_{SITE}$

La calibration du facteur d'amplification  $F_{Site}$  est faite en respectant les rapports entre les coefficients d'amplification  $F_a$  et  $F_v$  du CNBC 2010 (CNRC 2010) selon la catégorie sismique d'emplacement. Ces coefficients sont définis en fonction de la période fondamentale de la structure et des données d'accélération spectrales. Les périodes fondamentales des ouvrages n'est pas une information disponible dans la BDD-GSQ et la revue de littérature n'a pas permis d'établir une relation simple entre la période et le type de structure ou entre la rigidité et le type de structure. Le facteur  $F_{Site}$  est donc calibré sur les valeurs médianes d'accélération spectrales des villes du Québec, et en considérant la moyenne entre les  $F_a$  pour les ouvrages rigides, et les  $F_v$  pour les ouvrages souples. Le Tableau A 13 donne les rapports obtenus pour un facteur  $F_{Site}$  variant entre 1,0 et 2,0 et entre 1,0 et 1,25.

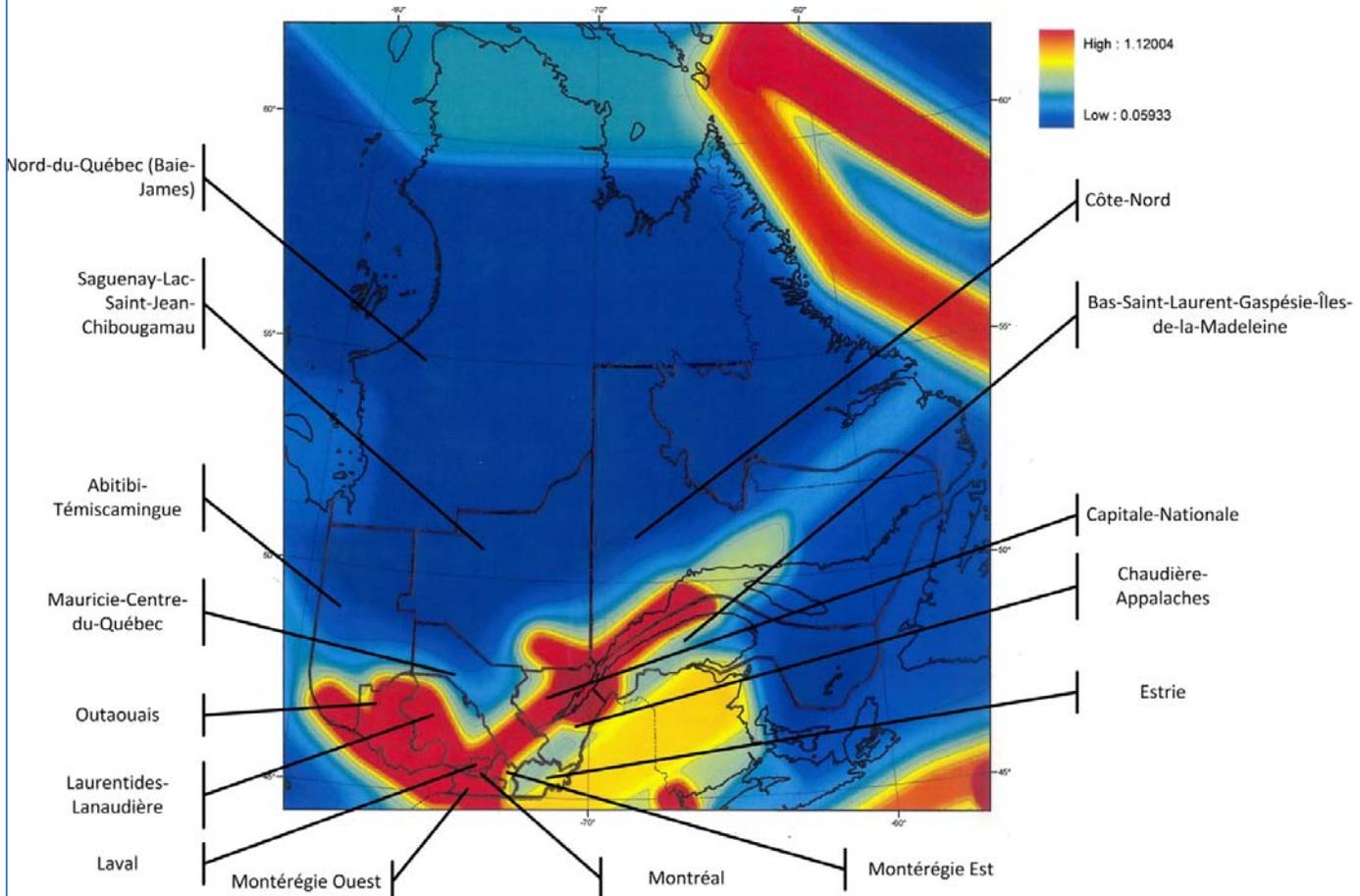
**Tableau A 13 - Valeurs de  $F_{Site}$  en fonction de  $F_a$  et  $F_v$**

Catégorie d'emplacement	Valeurs de $F_{Site}$ : définition primaire			Calibration 1	Calibration 2
	$F_a$ interpolé	Moyenne	$F_v$ interpolé	$F_{Site}$	$F_{Site}$
A	0,74	0,62	0,5	1,0	1,0
B	0,84	0,74	0,64	1,11	1,05
C	1,00	1,00	1,00	1,36	1,10
D	1,16	1,26	1,36	1,60	1,15
E	1,29	1,675	2,06	2	1,25
F					

Les données sur le sol de la BDD-GSQ, lorsque disponibles, ne sont pas définies selon les catégories d'emplacement du Tableau A 13 établie sur 30 mètres de profondeur. La corrélation proposée entre les données sur le sol de la BDD-GSQ et les catégories d'emplacement est présentée au Tableau A 10.

## ANNEXE 9 – CALIBRATION DU FACTEUR L'ALÉA SISMIQUE $F_{ALÉA}$

La carte de la Figure A 5 illustre la variation de l'accélération maximale au sol sur le territoire de la Province de Québec et selon les directions territoriales.



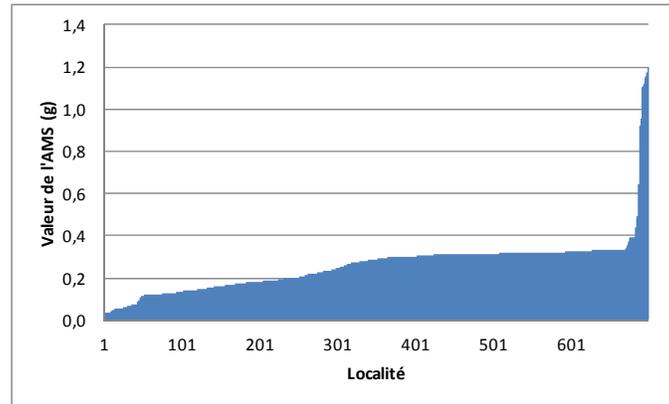
**Figure A 5 – Carte d'aléa sismique du Québec représentant les isovaleurs d'AMS avec un intervalle de contour de 0,05 pour une période de récurrence de 2500 ans, à partir des données du CNBC 2005<sup>11</sup>**

L'analyse des données d'aléa sismique sur le territoire de la Province et à l'intérieur des directions territoriales a permis de constater que :

- Il y a une bonne corrélation entre les valeurs d'accélération maximale au sol (AMS) et les données d'accélérations spectrales à 0,2 secondes et 1,0 seconde : les coefficients de corrélation R étant établis respectivement à 0,97 et 0,81.

<sup>11</sup> Pour un sol de classe C (terrain ferme) avec un degré d'amortissement de 5%, PGA (Accélération Maximale du Sol) exprimée en portion de g (accélération gravitationnelle = 9,81 m/s<sup>2</sup>)

- La variation des valeurs d'AMS pour 700 localités du Québec indique que pour près de 98% des localités considérées, l'AMS est inférieure à 0,4g et pour 6,6% des localités l'AMS est inférieure à 0,1g (Voir Figure A 6). Trois niveaux d'aléa sismique relatif sont définis :
  - ✓ Faible si l'AMS ≤ 0,1g;
  - ✓ Modéré si 0,1g < AMS ≤ 0,4g
  - ✓ Élevé si l'AMS > 0,4g



**Figure A 6 – Variation de l'AMS sur 700 localités de la province de Québec**

Deux contextes d'utilisation sont considérés :

3. Sur le territoire de la Province le facteur d'aléa sismique  $F_{Aléa}$  est établi en fonction de la valeur d'AMS par rapport à l'AMS de la zone de sismicité relative.
  - À l'intérieur d'une même direction territoriale, la variation des valeurs de l'AMS est soit relativement constante (en vert), peu variable (en jaune), modérément variable (en orange) ou très variable (en rouge), comme illustré à la Figure A 7. Le Tableau A 14 présente les 14 directions territoriales en fonction de l'importance de la variation de l'aléa, défini selon les valeurs d'AMS, sur leur territoire.

**Tableau A 14 – Regroupement des DT selon l'aléa sismique relatif**

Direction Territoriale	Valeur de l'AMS		Variation de l'AMS	Aléa sismique relatif
	Moy.	Écart type		
Nord-du-Québec(Baie James)	0,059	0	Constante	Faible
Laval	0,323	0		Modéré
Montérégie Ouest	0,324	0		Modéré
Montréal	0,327	0		Modéré
Laurentides-Lanaudière	0,308	0,01	Peu variable	Modéré
Outaouais	0,316	0,01		Modéré
Abitibi-Témiscamingue	0,076	0,03		Faible
Mauricie-Centre-du-Québec	0,234	0,07	Modérément variable	Modéré
Montérégie Est	0,242	0,09		Modéré
Saguenay-Lac-Saint-jean- Chibougamau	0,240	0,12		Modéré
Côte-Nord	0,243	0,13		Modéré
Bas-Saint-Laurent-Gaspésie-Île-de- la-Madeleine	0,308	0,27	Très variable	Modéré
Capitale-Nationale	0,436	0,33		Élevé
Chaudière-Appalaches	0,329	0,35		Modéré

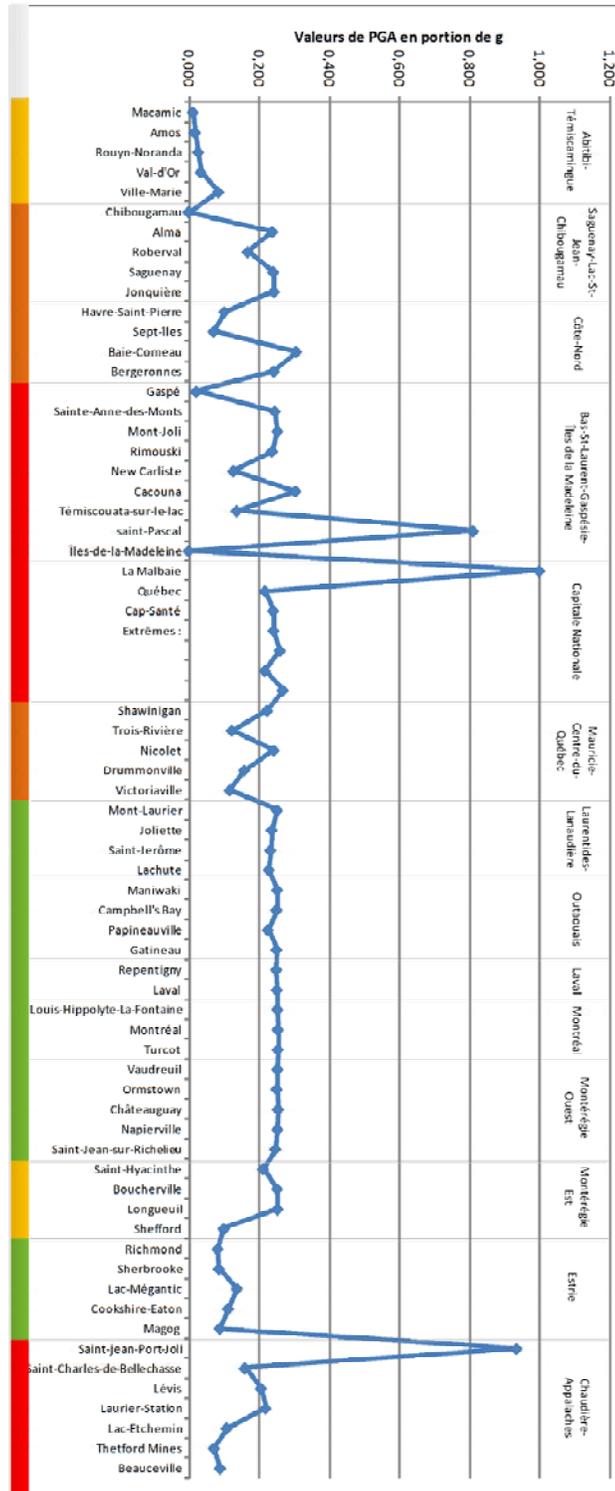


Figure A 7 - AMS de certaines villes par DT

## ANNEXE 10 – DÉFINITION DES FACTEURS DE VULNÉRABILITÉ ET COEFFICIENTS D'INFLUENCE

Les tableaux suivants donnent la description détaillée des coefficients d'influence pour le calcul des facteurs de vulnérabilité.

VULNÉRABILITÉ GÉNÉRALE  $V_{GÉNÉRALE}$

Tableau A 15 – Définitions et valeurs de  $C_{Struct}$  dans la formulation MTQ2013

$C_{Struct}$	Type	$C_{Struct}$	Type
0,5	<b>Ponceau</b> 11 - Ponceau de type dalle en béton armé, 12 - Ponceau de type portique en béton armé 13 - Ponceau rectangulaire en béton armé 14 - Ponceau circulaire en béton 15 - Ponceau circulaire en acier 17 - Ponceau elliptique en acier 18 - Ponceau arqué en acier 19 - Ponceau coûté en acier 21 - Ponceau en bois <b>Pont à dalle épaisse</b> 35 - Portique en béton armé 36 - Portique en béton sous remblai 37 - Portique en béton précontraint	1,5	<b>Pont à poutres à âme pleine</b> 44 - Poutres en acier 52 - Poutres en acier enrobées de béton <b>Pont à poutres-caissons</b> 58 - Poutres-caissons en acier <b>Pont à poutres triangulées</b> 61 - À tablier inférieur en acier 62 - À tablier intermédiaire en acier 63 - Type Pony-Warren en acier 64 - Type Bailey en acier 65 - À tablier supérieur en acier 71 - À tablier inférieur en béton armé 73 - À tablier intermédiaire en béton armé 75 - À tablier supérieur en béton armé <b>Pont mobile</b> 85 - Pont mobile
1,3	<b>Pont à poutres à âme pleine</b> 45 - Pont acier-bois 46 - Poutres en bois <b>Pont à poutres triangulées</b> 66 - En bois 67 - Pont couvert	1,6	<b>Pont à dalle épaisse</b> 31 - Dalle pleine en béton armé 32 - Dalle pleine en béton précontraint 33 - Dalle évidée en béton armé 34 - Dalle évidée en béton précontraint 38 - Pont à béquilles en béton armé 39 - Pont à béquilles en béton précontraint <b>Pont à poutres à âme pleine</b> 41 - Poutres en béton armé 42 - Poutres en béton précontraint préfabriquées 43 - Poutres en béton précontraint coulées en place 47 - Portique en béton 48 - Portique en béton sous remblai 49 - Portique en acier 50 - Pont à béquilles en béton 51 - Pont à béquilles en acier 56 - Poutres-caissons en béton armé 57 - Poutres-caissons en béton précontraint <b>Pont à câbles</b> 81 - Pont suspendu 82 - Pont à haubans
1,4	<b>Pont en Arc</b> 72 - À tablier inférieur en acier 74 - À tablier intermédiaire en acier 76 - À tablier supérieur en acier		

**Tableau A 16 – Définitions et valeurs de  $C_{Appui}$  dans la formulation MTQ2013**

Type d'appareil d'appui	$C_{Appui}$
210 – À pendule – Mobile	1
203 – En élastomère non fretté – Fixe	0,5
207 – À plaques en acier ou à rotules en acier – Fixe	0,5
208 – À plaques en acier ou à rotules en acier – Mobile	0,5
209 – À rouleaux – Mobile	0,5
201 – En élastomère fretté – Fixe	0,25
202 – En élastomère fretté – Mobile	0,25
204 – En élastomère fretté avec éléments glissants – Mobile	0,25
205 – Articul. sphérique ou Élast. confiné – Fixe	0,25
206 – Articul. sphérique ou Élast. confiné – Mobile	0,25
213 – Isolateur en élastomère avec noyau de plomb – Fixe	0
214 – Isolateur en élastomère avec noyau de plomb – Mobile	0
215 – Isolateur de type pendule à friction – Fixe	0
216 – Isolateur de type pendule à friction – Mobile	0
217 – Isolateur sismique Goodco-Z-Tech – Fixe	0
218 – Isolateur sismique Goodco-Z-Tech – Mobile	0
219 – Isolateur avec un appui à disque et ressorts en élastomère – Fixe	0
220 – Isolateur avec un appui à disque et ressorts en élastomère – Mobile	0

**Tableau A 17 – Définitions et valeurs de  $C_{Part}$  dans la formulation MTQ2013**

$C_{Part}$	Particularité de conception
1	13 – Pont en courbe
1	Travée > 150 m
1	1 – Appuis de type « chaise » en travée
1	2 – Appareils d'appui sous le chevêtre
1	3 – Support temporaire
1	5 – Colonne vis-à-vis un diaphragme
1	7 – Béquille avec appareil d'appui à la base
0	8 – Paralume
0	12 – Pont semi-intégral
-1	9 – Transmetteur de choc (sismique)
-1	10 – Autre renforcement sismique
-1	11 – Pont intégral

**Tableau A 18 – Définitions et valeurs de  $C_{TypeCulée}$  dans la formulation MTQ2013**

Type d'unité de fondation de culée	$C_{TypeCulée}$
1 – Culée pleine	1
2 – Culée ouverte*	0,5
3 – Culée creuse — côté approche	0,5
4 – Culée creuse — côté pont	0,5
8 – Culée — Béquille de portique*	0,5
10 – Culée — Autre	0,5
5 – Culée — Caisson à claire-voie	0
6 – Culée — Caisson à claire-voie gainé	0
7 – Culée — Caisson	0
9 – Culée en mur berlinois	0

\*Les détails de renforcement des colonnes qui composent les culées ouvertes et les béquilles de portique ont beaucoup d'influence sur leur comportement. Bien que le coefficient d'âge ( $C_{Age}$ ) incluse dans le calcul du facteur de vulnérabilité générale, ( $V_{Générale}$ ) certains types d'unité de fondation de culée pourraient se voir appliquer un coefficient de détails en fonction de leur date de construction.

**Tableau A 19 – Définitions et valeurs de  $C_{TypePile}$  dans la formulation MTQ2013**

Type d'unité de fondation des piles	$C_{TypePile}$
29 – Pile à une colonne	1,0
27 – Pile à plusieurs colonnes avec chevêtre	0,5
28 – Pile à plusieurs colonnes sans chevêtre	0,5
36 – Pile d'un pont en arc	0,5
31 – Pile — Caisson à claire-voie	0
32 – Pile — Caisson à claire-voie gainé	0
33 – Pile — Caisson	0
34 – Pile — Banc	0
35 – Pile — Pieu caisson	0
25 – Pile avec fût et chevêtre	0
26 – Pile avec fût sans chevêtre	0
30 – Pile — Béquille intermédiaire	*

\*Les piles « Béquille intermédiaire » peuvent être composées d'une ou plusieurs colonnes ou d'un fût. En absence d'information, une valeur médiane de 0,5 pour le  $C_{TypePile}$  est assignée.

**Tableau A 20 – Définitions et valeurs de  $C_{Fondation}$  dans la formulation MTQ2013**

Type de fondations	$C_{Fondation}$
<b>042 – Remblai porteur (pour culée seulement)</b>	<b>1,0</b>
053 – Fondation non spécifiée	1,0
<b>FONDATEMENTS CONÇUES AVANT 2000</b>	
044 – Pieux en bois	0,8
045 – Pieux en acier	0,8
047 – Pieux préfabriqués en béton	0,8
048 – Pieux en béton à base élargie	0,8
049 – Pieux forés	0,8
050 – Pieux de type indéterminé*	0,8
052 – Autre type de fondation profonde	0,8
041 – Fondation superficielle	0,5
046 – Pieux caissons	0,5
051 – Caisson	0,5
<b>Tout type de fondation conçue après 2000</b>	<b>0</b>
<b>043 – Sol renforcé (pour culée seulement)</b>	<b>0</b>

**Tableau A 21 – Définitions et valeurs de sol  $C_{Sol}$  dans la formulation MTQ2013**

Nature du sol	$C_{Sol}$
01 - Roc	0
02 - Sol grossier, dense ou compact	0,5
03 - Argile raide	0,5
04 - Remblai	0,8
05 - Sol grossier lâche, argile molle ou silt	0,8
06 - Sol liquéfiable	1,0

Si le sol n'est pas spécifié il est recommandé d'utiliser l'information suivante :

- ❑ Sinon si fondation superficielle  $C_{Sol} = 0,5$ ;
- ❑ Si fondations profondes ou absence de données de fondation  $C_{Sol} = 0,8$ ;
- ❑ Si traverse un cours d'eau  $C_{Sol} = 0,8$ .

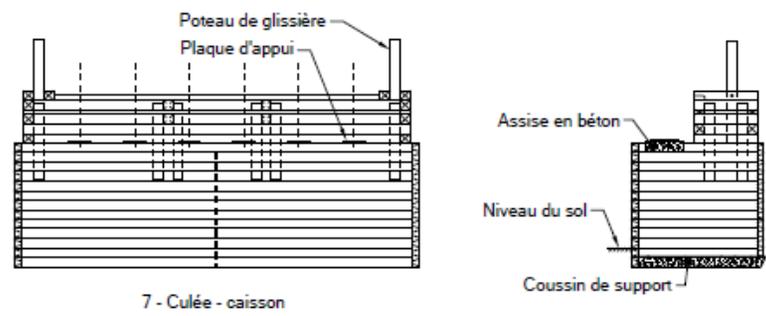
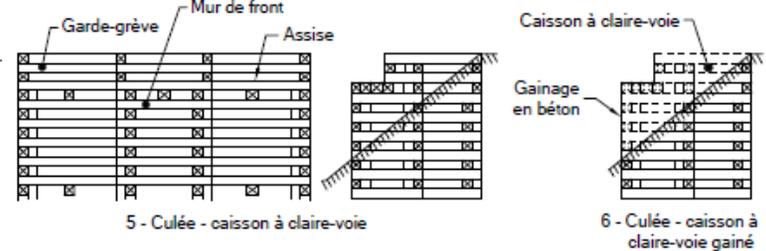
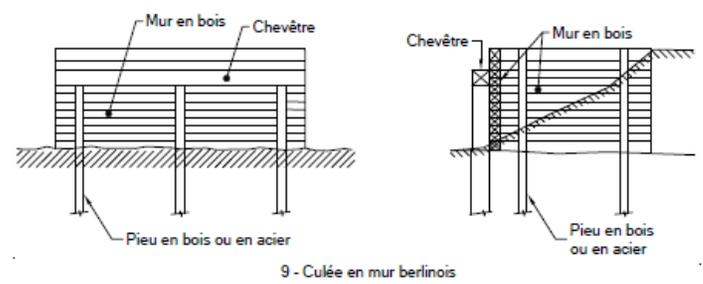
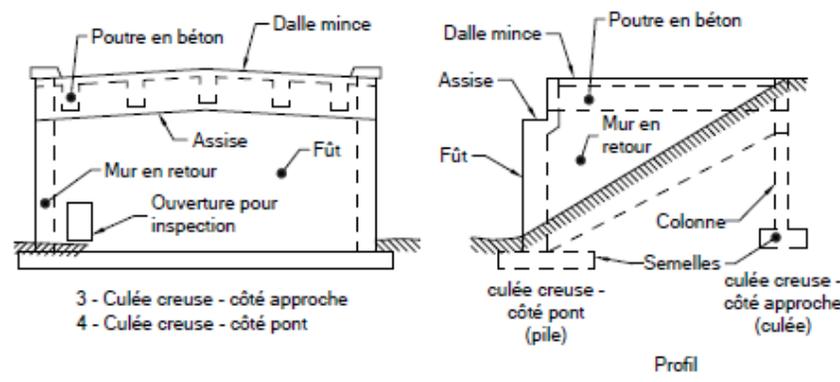
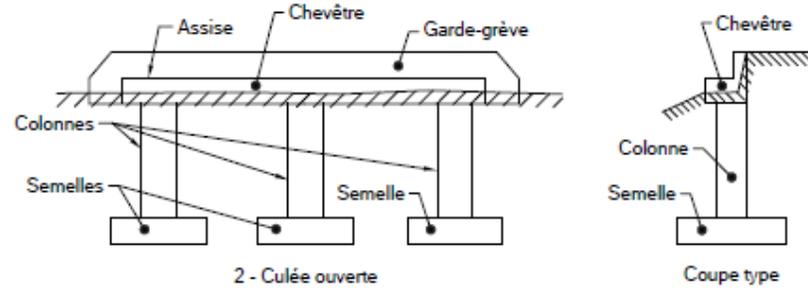
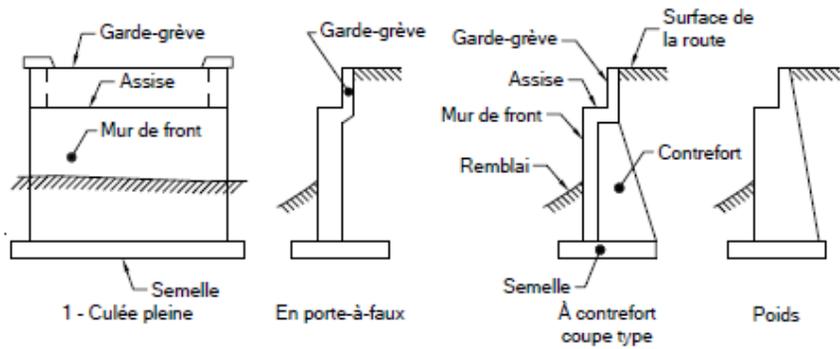


Figure A 8 - Types de culées possibles dans la BDD du MTQ

## ANNEXE 11 – CALCUL DE LA LONGUEUR D’APPUI CRITIQUE À PARTIR DES INFORMATIONS DE LA BASE DE DONNÉES

Le coefficient de longueur d’appui  $C_{LongApp}$  est établi à partir d’une longueur d’appui critique  $N_{cr}$  prise égale à la **longueur d'appui minimale**  $N$  définie par l’article 4.4.10.5 de la norme CAN/CSA-S6-06. La longueur d'appui minimale  $N$  (en mm), mesurée perpendiculairement à la face de la culée ou de la pile (exclusion faite du recouvrement de béton), est donnée par :

$$N = K \left( 200 + \frac{L}{600} + \frac{H}{150} \right) \left( 1 + \frac{\psi^2}{8000} \right) \quad (20)$$

Avec :

- $K$  Coefficient de modification selon la zone de rendement sismique et le type de profil de sol.
- $L$  Longueur du tablier du pont jusqu'au joint de tablier adjacent ou jusqu'à l'extrémité du tablier (en mm).  
Pour les articulations comprises dans une travée, la somme des distances de chaque côté de l'articulation (en mm).  
Pour les ponts d'une seule travée, la longueur du tablier du pont (en mm).
- $H$  Pour les culées, la hauteur moyenne des poteaux qui supportent le tablier du pont jusqu'au joint de tablier suivant (en mm).  
Pour les poteaux ou les piles, hauteur du poteau ou de la pile (en mm).  
Pour les articulations comprises dans une travée, la hauteur moyenne de deux poteaux ou piles adjacents (en mm).  
Pour les ponts à travée indépendantes 0 mm.
- $\Psi$  Biais de l'appui mesuré à partir d'une ligne perpendiculaire à l'axe longitudinal de la travée (degrés).

La longueur du tablier  $L$ , la hauteur des poteaux  $H$  et le biais  $\Psi$  peuvent être extraits directement de la BDD-GSQ. La définition du biais par la norme CSA-S6-06 correspond à celle du Manuel d'inventaire des structures. Par contre, le coefficient de modification  $K$ , dépend du type de profil de sol et de la zone de rendement sismique selon les définitions de la norme CAN/CSA-S6, tel que présenté au Tableau A 22.

**Tableau A 22 – Définition du coefficient de modification  $K$  selon la norme CAN/CSA-S6**

Zone de rendement sismique	Coefficient de modification, $K$
1 A=0 Type de profil de sol I ou II	0,5
Type de profil de sol III ou IV A=0,05 (tous types de profil)	1,0
2 (toutes valeurs de A et tous types de profil)	1,0
3 (toutes valeurs de A et tous types de profil)	1,5
4 (toutes valeurs de A et tous types de profil)	1,5

Le Tableau A 23 présente la définition des zones de rendement sismique selon la norme CAN/CSA-S6-06 en fonction de l'accélération horizontale maximale (AHM) pour une probabilité de dépassement de 10% en 50 ans.

**Tableau A 23 – Définition du coefficient de modification K selon la norme CAN/CSA-S6**

Accélération horizontale maximale (AHM), g, ayant une probabilité de dépassement de 10% en 50 ans	Rapport d'accélération de la zone, A	Zone de rendement sismique	
		Pont de secours	Ponts d'urgence et autres ponts
0,00 ≤ AHM < 0,04	0	2	1
0,04 ≤ AHM < 0,08	0,05	2	1
0,08 ≤ AHM < 0,11	0,1	3	2
0,11 ≤ AHM < 0,16	0,15	3	2
0,16 ≤ AHM < 0,23	0,2	3	3
0,23 ≤ AHM < 0,32	0,3	4	4
0,32 et plus	0,4	4	4

Pour établir le calcul de la longueur d'appui critique  $N_{cr}$  selon l'Équation (20) directement à partir des informations de la BDD-GSQ, il est nécessaire de relier les définitions des types de profil de sol et des zones de rendement sismique du Tableau A 22 aux définitions de la nature du sol de la BDD et de l'accélération maximale au sol (AMS) au site du pont, utilisée pour définir le facteur d'aléa sismique  $F_{Aléa}$ . L'AMS au site du pont est extraite des données les plus récentes de Ressources Naturelles Canada (RNC) pour une probabilité de dépassement de 2% en 50 ans.

Les profils de sol de la norme CAN/CSA-S6-06 sont définis au Tableau A 6 et la correspondance avec la nature du sol saisie dans la BDD-GSQ est présentée au Tableau A 10 de l'Annexe 3.

Le Tableau A 24 propose la définition de zones de rendement sismique en fonction des données d'AMS pour une probabilité de dépassement de 2% en 50 ans. Cette définition a été établie en comparant les données d'AHS de la norme CAN/CSA-S6-06 et celles d'AMS de RNC pour 125 villes réparties entre les différentes zones de rendement sismique.

**Tableau A 24 – - Zones de rendement sismique défini selon l'AMS (2% en 50 ans)**

AMS (probabilité de dépassement de 2% en 50 ans)	Zone de rendement sismique	
	Pont de secours	Ponts d'urgence et autres ponts
0,00 ≤ AMS < 0,13	2	1
0,13 ≤ AMS < 0,30	3	2
0,30 ≤ AMS < 0,40	3	3
0,4 et plus	4	4

## RÉFÉRENCES

- Anderson, D. L., Mitchell, D., et Tinawi, R. (1996). « Performance of concrete bridges during the Hyogoken Nanbu (Kobé) earthquake on January 17,1995 ». *Revue canadienne de génie civil*, 23 (3) : 714-726.
- CAN/CSA (2006). *Code canadien sur le calcul des ponts routiers - CAN/CSA-S6-06*. Mississauga (Ont.): Association canadienne de normalisation, 820 p.
- Basoz, N. I., Kiremidjian, A. S., King, S. A. t Law, K. H. (1999). « Statistical analysis of bridge damage data from the 1994 Northridge, CA, Earthquake ». *Earthquake spectra*, 15(1): 25-54.
- Bruneau, M. (1998). « Performance of steel bridges during the 1995 Hyogoken–Nanbu (Kobe, Japan) earthquake—a North American perspective ». *Elsevier Engineering Structures*, 20(12): 1063–1078.
- CAEE (1995). *The Hyogo-Ken Nanbu, (Kobé) Earthquake of 17 January 1995 – Preliminary reconnaissance report*. Canadian Association of Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, 257 p.
- Caltrans (1992). *Seismic hazard components in the Caltrans prioritization algorithm*. California Department of Transportation- Division of structures.
- Chen, W.-F., et Duan, L. (2003). *Bridge engineering seismic design*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Choi, E., DesRoches, R. et Nielson, B. (2004). « Seismic fragility of typical bridges in moderate seismic zones ». *Engineering Structures*, 26 : 187-199.
- CNRC (2010). *Code national du bâtiment-Canada 2010*. Commission canadienne des codes du bâtiment et de prévention des incendies, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa.
- Davi, D., Kaban, M., Légeron, F., Marchand, P., Portier, B., Resplendino, J., Schmitt, P., Thibault, C. et Vivier, A. (2010, actualisé 2011). *SISMOA : Evaluation préliminaire du risque sismique sur les ouvrages d'art existants - Guide technique*. Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA), France, 28 p.
- FEMA-NIBS (2003). *HAZUS-MH MR4: Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model Technical manual*. Federal Emergency Management Agency (FEMA), National Institute of Building Science (NIBS), Washington, D.C, 712 p.
- Gouider, S. (2011). *Influence des systèmes de contreventement latéral des ponts sur leur vulnérabilité sismique*. Mémoire de maîtrise en génie de la construction, ÉTS, Mtl, Canada
- Halchuk, S. and Adams, J. (2004). « Deaggregation of seismic hazard for selected canadian cities ». *Compte-rendus de 13<sup>th</sup> world Conference en Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada.
- Hida, H. (2009). *Évaluation de la vulnérabilité sismique des ponts municipaux*. Mémoire de maîtrise en génie de la construction, ÉTS, Mtl, Canada.

Isakovic, T., Lazaro, M. P. N. et Fischinger, M. (2008). « Applicability of pushover methods for the seismic analysis of single-column bent viaducts ». *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 37.

Kawashima, K. (2000). « Seismic performance of RC bridge piers in Japan : An evaluation after the 1995 Hyogo-ken Nambu earthquake ». *Progress in Structural Engineering and Materials*, John Wiley & Sons, 2 : 82-91.

MTQ (2007). *Devis pour le développement du système de gestion des structures (GSQ-6026) – Annexe 3 (Version en projet)*. Direction des structures, Ministère des Transports du Québec, Québec.

MTQ (2008). *Manuel de gestion des risques liés aux ouvrages d'art (Version 1.0 en projet pour validation)*. Service de la sécurité civile, Ministère des Transports du Québec, Québec.

MTQ (2013). *Ouvrages d'art Tome III - Classification des ouvrages d'art*. Direction générale des infrastructures et des technologies, Ministère des Transports du Québec, Les publications du Québec, Québec.

MTQ (2012). *Manuel d'Inventaire des Structures*. Ministère des Transports du Québec, Québec, 404 p.

Mitchell, D., Huffman, S., Tremblay, R., Saatcioglu, M., Palermo, D., Tinawi, R. et Lau, D. (2012). « Damage to bridges due to the 27 February 2010 Chile earthquake ». *Revue canadienne de génie civil*, 39: 1–18

Mitchell, D., Tinawi, R. et Sexsmith, R.G. (1991). « Performance of bridges in the 1989 Loma Prieta earthquake-lessons for Canadian designers ». *Revue canadienne de génie civil*, 18(4) : 711-734.

Moschonas, I.F., Kappos, A.J., Panetsos, P., Papadopoulos, V., Makarios, T. et Thanopoulos, P. (2009). « Seismic fragility curves for greek bridges: Methodology and case studies ». *Bulletin of Earthquake Engineering*, 7(2) : 439-468.

NYDOT (1995 révisé 2004). *Seismic Vulnerability Manual*. Structure Design and Construction Division – Bridge Safety Assurance Unit, New York State Department of Transportation, 44 p.

Nielson, B. G., et DesRoches, R. (2007). « Seismic fragility methodology for highway bridges using a component level approach ». *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(6) : 823-839.

Nollet, M.-J., LeBoeuf, D. et Khaled, A. (2008). *Vulnérabilité sismique des infrastructures essentielles de la ville de Québec* », rapport soumis à la Ville de Québec, 115 pages.

Priestley, M. J. N., Seible, F. et Calvi, G. M. (1996). *Seismic design and retrofit of bridges*, John Wiley & Sons, 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, Californie.

Ramanathan, K., DesRoches R. et Padgett, J. E. (2010). « Analytical fragility curves for multispan continuous steel girder bridges in moderate seismic zones ». *Journal of the Transportation Research Board*, 2202 : 173-182.

Parker Small, E. (1999). *Development of a methodology for the integration of seismic risk mitigation activities in project and network level bridge management systems*. Thèse de doctorat, United States -- New York, State University of New York at Buffalo.

SML (2002). « Earthquake Image Archives ». In *1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, Japan*. En ligne. <<http://geot.civil.metro-u.ac.jp/archives/eq/95kobe/index.html>>.

Suescun, J.R. (2010). *Courbes de fragilité pour les ponts au Québec tenant compte du sol de fondation*. Mémoire de maîtrise en génie civil, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 157 p.

Tavares, D. H. (2012). *Évaluation de la vulnérabilité sismique des ponts routiers au Québec à l'aide des courbes de fragilité / Seismic risk assessment of bridges in Quebec using fragility curves*. Thèse de doctorat en génie, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 206 p.

Thomas, A.L., Eshenaur, S.R. et Kulicki, J., MCEER et Modjeski (1998). *Methodologies for evaluating the importance of highway bridges*. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York, 186 p.

Tremblay, S., Filiatrault, A. et Tinawi, R. (1993). *Méthode rapide de classement sismique des ponts et viaducs du Québec*. Rapport No EPM/GCS-1993-01, École polytechnique de Montréal, Département de génie civil, Section structures.

Yashinsky, M. (1998). « Performance of bridge seismic retrofits during Northridge earthquake ». *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 3(1) : 1-14.