

Intégration des effets de sites à l'évaluation de la vulnérabilité
sismique des ouvrages d'art à l'aide d'une plateforme de
système d'information géographique (SIG)

par

Azarm FARZAM

THÈSE PRÉSENTÉE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION
DU DOCTORAT EN GÉNIE
Ph. D.

MONTREAL, LE 12 SEPTEMBRE 2018

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Azarm Farzam, 2018



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Marie-José Nollet, directrice de thèse
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Amar Khaled codirecteur de thèse
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Tony Wong, président du jury
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

Mme Rola Assi membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Samuel Yniesta, examinateur externe
Département des génies civil, géologique et des mines à l'École Polytechnique de Montréal

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 19 JUILLET 2018

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Un grand remerciement à ma directrice de thèse Madame Marie-José Nollet, ing. Ph.D., et mon co-directeur, Monsieur Amar Khaled, ing. Ph.D., Professeurs à l'École de Technologie Supérieure, qui m'ont permis de réaliser ce projet et de le financer. Je les remercie pour leur confiance, leur disponibilité et leurs conseils qui m'ont accompagnée et guidée tout au long de ce projet.

Je remercie également les membres du jury pour leur temps et leur expertise, et la commission géologique et ressources naturelles Canada pour les données sans lesquelles je n'aurais rien pu faire et leurs précieux conseils. J'aimerais également remercier Monsieur P. Quinn, ing. Ph.D., pour nous avoir donné accès à son inventaire de glissements de terrain, ce qui a permis de valider notre méthodologie. Un grand merci au Ministère des Transports, de la Mobilité Durable et de l'Électrification des Transports, pour leur base de données sur les caractéristiques structurales des ouvrages d'art. Je voudrais aussi remercier l'équipe de la bibliothèque de l'ÉTS et particulièrement Mme Stewart, qui m'a aidée dans ma recherche de données.

Un grand merci à Suze, Hanif et Jean-François qui m'ont accompagnée lors des mesures de vibrations ambiantes sur le terrain. Ils y ont consacré chacun trois longues journées d'automne. Je remercie aussi Ghaleb, qui m'a beaucoup aidée pour la modélisation routière. Je voudrais adresser un remerciement aussi à tous mes camarades d'étude et amis avec qui j'ai passé des moments formidables, Sahar et Sara particulièrement. Enfin, j'aimerais remercier mon conjoint, Fidele et l'ensemble de ma famille qui m'ont soutenue tout au long de cette aventure et qui m'ont permis de la mener à bien.

INTÉGRATION DES EFFETS DE SITES À L'ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ SISMIQUE DES OUVRAGES D'ART À L'AIDE D'UNE PLATEFORME DE SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE (SIG)

Azarm FARZAM

RÉSUMÉ

Dans la partie sud-est du Canada on dénombre environ 600 séismes par année. Bien que la sismicité y soit reconnue comme modérée, la densité de la population dans les régions urbaines en fait la 2ème plus importante zone à risque sismique du Canada. L'étude de la vulnérabilité du risque sismique a pour but d'évaluer les dommages potentiels des ouvrages afin de prioriser les interventions suite à un séisme ou de planifier les travaux de mise aux normes. Ces outils sont généralement de nature indicielle et sont utilisés par les gestionnaires d'ouvrages pour prioriser les interventions. C'est le cas des méthodes de Caltrans, du NYDOT, du SETRA et celle du Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec (MTMDET). Ces méthodes indicielles considèrent la vulnérabilité structurale des ouvrages exposés et l'aléa sismique défini selon le niveau d'accélération probable au site pour une période de récurrence donnée pour qualifier le risque sismique. En général, l'effet d'amplification des ondes sismiques par le site est intégré à l'aléa sismique, mais trop souvent les informations géotechniques spécifiques aux sites des ouvrages ne sont pas disponibles rendant l'évaluation moins représentative. Par ailleurs, rares sont les méthodes indicielles qui prennent en compte les effets induits, tels que les glissements de terrain, les chutes de blocs, ou le potentiel de liquéfaction des sols. Cette étude propose de développer des échelles de sensibilité aux effets de sites (intégrant l'amplification, la liquéfaction et les mouvements gravitaires) pour mieux définir l'aléa sismique et l'intégrer dans les méthodes indicielles d'évaluation du risque sismique grâce à des échelles de sensibilité des ouvrages.

Ce travail s'insère notamment dans un projet d'étude de la vulnérabilité des ouvrages d'art pour la vallée du Saint-Laurent, pour une meilleure prise en compte de l'aléa dans l'analyse du risque sismique des ouvrages d'art en tirant profit des avantages offerts par les systèmes d'information géographiques (SIG). Ce projet vise à proposer des échelles de sensibilité à

VIII

l'amplification et aux effets induits (glissements de terrain, chutes de blocs ou potentiel de liquéfaction) en s'appuyant sur des données cartographiques (SIG) de natures hydrologiques, topographiques et géologiques. Ces échelles de sensibilité peuvent ensuite être aisément intégrées aux différentes méthodes indicielles de priorisation sismique existantes.

L'échelle de sensibilité pour l'amplification est validée à partir d'une campagne d'acquisition de mesures de bruits ambiants sur le sol et sur des ponts. L'échelle de sensibilité aux glissements de terrain est validée par un inventaire sur les glissements de terrain dans la vallée du Saint-Laurent. Ces échelles peuvent ensuite être intégrées aux méthodes indicielles de priorisation sismique. Elles sont ici appliquées à la méthode indicielle du MTMDET pour évaluer l'impact sur la priorisation des ouvrages. De plus, un exemple d'application des nouveaux indices intégrant les effets de sites est proposé dans le dernier chapitre. Une évaluation succincte de l'impact de la perte sur le réseau routier de certains ouvrages d'art est étudiée afin d'illustrer comment certains logiciels et l'utilisation des SIG peuvent aider dans la priorisation des interventions sur les ouvrages d'art dans un contexte de gestion du risque sismique.

Mots-clés : risque sismique, amplification, liquéfaction, glissement de terrain, chute de bloc, méthode indicielle, système d'information géographique, ouvrage d'art

INTEGRATION OF SITE EFFECTS TO THE EVALUATION OF THE SEISMIC VULNERABILITY OF BRIDGES THROUGH A GIS PLATFORM

Azarm FARZAM

ABSTRACT

Southeastern Canada experiences about 600 earthquakes per year. While seismic hazard is generally moderate in eastern Canada, the density of the population in urban areas makes it the second-largest seismic hazard area in Canada. The study of the vulnerability of the seismic risk aims to evaluate the potential damage to structures in order to prioritize the interventions following an earthquake or to plan mitigation strategies. These tools are generally index-based, such as Caltrans, NYDOT, SETRA or the scoring procedure used in the province of Quebec (MTMDET). These scoring procedures consider the structural vulnerability of the exposed structures and, to qualify the seismic risk, the seismic hazard index is defined from the probable acceleration at the site for a given recurrence period. In general, the site amplification effect of seismic waves is integrated with the seismic hazard. However, the specific geotechnical information at the site of the structures is often not available, making the resulting seismic risk of vulnerability score less representative. Besides, few index-based methods are taking into account the induced effects, such as landslides, rock falls or the liquefaction potential of soils. This study proposes to develop sensitivity scales for site effects to better define the seismic hazard in order to integrate it to scoring procedures for the evaluation of the seismic risk for bridges and overpasses.

This work is part of a project to study the seismic vulnerability of bridges and overpasses for the Saint-Lawrence valley, taking advantages of Geographic Information Systems (GIS), for a better consideration of the seismic hazard in the analysis of the seismic risk to these infrastructures. The aim of this project is to develop a sensitivity scale to the amplification effect and induced effects (landslides, rock falls or liquefaction potential) based on hydrological, topographic and geological cartographic data (GIS). These sensitivity scales could then be easily integrated within the various scoring procedures for seismic prioritization.

The amplification sensitivity scale was validated by ambient vibration measurements taken at the sites of several bridges to capture the natural frequencies of the ground and bridge. An inventory of landslides in the St. Lawrence Valley validates the landslide sensitivity scale. These scales are then integrated within the index-based procedure used in Quebec (MTMDET). Moreover, a succinct evaluation of the impact of the loss on the road network of some bridges is studied in order to illustrate how softwares can help to prioritize the interventions on bridges in a context of seismic planning and mitigation strategies.

Keywords: Seismic risk, amplification, liquefaction, landslides, rock falls, index-based procedure, geographic information system, bridge

TABLE DES MATIÈRES

| | Page |
|--|------|
| INTRODUCTION | 1 |
| CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE | 19 |
| 1.1 Contexte général | 19 |
| 1.1.1 Contexte sismotectonique | 19 |
| 1.1.2 Effet de sites | 22 |
| 1.2 Amplification | 23 |
| 1.2.1 Enjeux | 23 |
| 1.2.2 Facteurs contrôlant l'amplification | 24 |
| 1.2.3 Méthodes d'investigation | 27 |
| 1.3 Effets induits par un séisme | 28 |
| 1.3.1 Liquéfaction | 29 |
| 1.3.2 Mouvements gravitaires | 30 |
| 1.3.3 Glissements de terrain | 34 |
| 1.3.4 Les chutes de blocs | 37 |
| 1.4 Vulnérabilité sismique | 38 |
| 1.4.1 Vulnérabilité sismique relié aux régions urbaines | 38 |
| 1.4.2 Vulnérabilité des ponts | 39 |
| 1.4.3 Comment les effets de sites contribuent à augmenter le risque sismique des ponts | 44 |
| 1.5 Définition du contexte d'évaluation de la vulnérabilité et du risque sismique des ponts par méthode indicielle | 48 |
| 1.5.1 Contribution des SIG | 49 |
| 1.5.2 Méthode Caltrans | 53 |
| 1.5.3 Méthode NYSDOT | 53 |
| 1.5.4 Méthode SETRA | 55 |
| 1.5.5 Méthode d'évaluation du Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec | 57 |
| 1.5.6 Définition des facteurs et coefficients principaux pour les méthodes indicielles | 64 |
| 1.6 Réseaux routiers et évaluation de la valeur des éléments exposés | 65 |
| 1.6.1 Indice socio-économique | 65 |
| 1.6.2 Facteurs liés à la valeur des éléments exposés pour les ouvrages d'art.... | 65 |
| 1.7 Conclusions | 66 |
| CHAPITRE 2 CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET PHYSIOGRAPHIQUE DE LA RÉGION D'ÉTUDE | 67 |
| 2.1 Géologie du socle rocheux | 67 |
| 2.2 Géologie des dépôts meubles | 70 |
| 2.3 Réseau hydrographique | 75 |
| 2.4 Nappe phréatique | 76 |

| | | |
|---|---|-----|
| 2.5 | Topographie et pentes | 78 |
| 2.6 | Cartes de microzonage | 80 |
| 2.6.1 | Ville de Québec | 81 |
| 2.6.2 | Ville de Montréal | 82 |
| 2.6.3 | Région d'Ottawa-Gatineau | 83 |
| 2.7 | Inventaires des glissements de terrain | 84 |
| 2.8 | Conclusions | 85 |
| CHAPITRE 3 DÉFIS TECHNIQUES ET CADRE MÉTHODOLOGIQUE | | 87 |
| 3.1 | Avantage d'une plateforme | 87 |
| 3.2 | Amplification | 88 |
| 3.2.1 | Approche méthodologique | 88 |
| 3.2.2 | Données pour l'amplification | 89 |
| 3.3 | Liquéfaction | 90 |
| 3.3.1 | Approche méthodologique | 90 |
| 3.3.2 | Données pour la liquéfaction | 92 |
| 3.4 | Glissements de terrain | 93 |
| 3.4.1 | Approche méthodologique | 93 |
| 3.4.2 | Données pour les mouvements gravitaires | 98 |
| 3.4.3 | Chutes de blocs | 99 |
| 3.5 | Discussions et conclusions | 99 |
| CHAPITRE 4 PHÉNOMÈNE D'AMPLIFICATION | | 101 |
| 4.1 | Échelle de susceptibilité à l'amplification | 101 |
| 4.2 | Probabilité d'appartenance aux catégories d'emplacement | 102 |
| 4.3 | Méthode de validation des indices de susceptibilité par mesures de vibration ambiantes | 111 |
| 4.3.1 | Campagne d'acquisition | 112 |
| 4.3.2 | Prise de mesures | 115 |
| 4.3.3 | Traitement des données | 116 |
| 4.4 | Résultats de la campagne de MVA | 118 |
| 4.4.1 | Fréquences de résonance des sites | 118 |
| 4.4.2 | Validation des MVA | 119 |
| 4.4.3 | Calcul des V_{s30} des sites | 121 |
| 4.4.4 | Ajustement des niveaux de susceptibilité à l'amplification suite aux MVA | 124 |
| 4.4.5 | Amplitude du pic de MVA et amplification réelle | 130 |
| 4.4.6 | Phénomène de résonance entre les ponts ou viaducs et le sol | 132 |
| 4.5 | Discussion et conclusion | 133 |
| CHAPITRE 5 SUSCEPTIBILITÉ À LA LIQUÉFACTION | | 135 |
| 5.1 | Échelle de susceptibilité à la liquéfaction | 136 |
| 5.2 | Paramètres | 136 |
| 5.2.1 | La géologie | 136 |
| 5.2.2 | Nappe phréatique | 143 |
| 5.3 | Carte finale de la susceptibilité à la liquéfaction | 144 |

| | | |
|---|---|------------|
| 5.4 | Discussion et conclusion..... | 148 |
| CHAPITRE 6 SUSCEPTIBILITÉ AUX MOUVEMENTS GRAVITAIRES..... | | |
| 6.1 | Échelle de susceptibilité aux mouvements gravitaires..... | 151 |
| 6.2 | Paramètres..... | 152 |
| 6.2.1 | Géologie..... | 152 |
| 6.2.2 | Toit de la nappe phréatique..... | 156 |
| 6.2.3 | Pente..... | 156 |
| 6.2.4 | Réseau hydrographique..... | 157 |
| 6.3 | Outil pour générer la carte de susceptibilité aux mouvements gravitaires | 157 |
| 6.4 | Glissements de terrain..... | 159 |
| 6.4.1 | Carte finale de la susceptibilité aux glissements de terrain | 159 |
| 6.4.2 | Validation de la méthode d'évaluation à la susceptibilité aux glissements de terrain..... | 162 |
| 6.5 | Chutes de blocs | 163 |
| 6.6 | Discussion et conclusion..... | 165 |
| CHAPITRE 7 INTÉGRATION DES CARTES DE SUSCEPTIBILITÉ AUX MÉTHODES INDICIELLES | | |
| 7.1 | Données utilisées | 169 |
| 7.2 | Rappel de quelques notions de probabilité | 171 |
| 7.3 | Calcul d'un nouvel indice de risque sismique | 172 |
| 7.4 | Intégration de la susceptibilité à l'amplification et à la liquéfaction dans la prise en compte de l'aléa..... | 174 |
| 7.5 | Intégration de la susceptibilité aux mouvements gravitaires dans la prise en compte de l'aléa | 178 |
| 7.6 | Discussion et conclusion..... | 182 |
| CHAPITRE 8 MODÉLISATION D'UN TRONÇON D'AUTOROUTE SUITE À L'EFFONDREMENT PARTIEL D'OUVRAGES D'ART | | |
| 8.1 | Choix du trajet modélisé..... | 185 |
| 8.2 | Données utilisées | 188 |
| 8.3 | Résultats..... | 193 |
| 8.4 | Discussion et conclusion..... | 194 |
| CONCLUSION | | 197 |
| RECOMMANDATIONS | | 205 |
| ANNEXE I | CLASSEMENT DES CATÉGORIES SISMIQUES DES SOLS SELON LE CNBC..... | 209 |
| ANNEXE II | MÉTHODE RAPIDE DE CLASSEMENT SISMIQUE DES PONTS ET VIADUCS DU QUÉBEC | 211 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| ANNEXE III | DÉFINITION DES FACTEURS ET COEFFICIENTS SISMIQUES DE LA FORMULATION DU MTQ2013 | 213 |
| ANNEXE IV | ÉCHELLE DES TEMPS GÉOLOGIQUES | 215 |
| ANNEXE V | CAMPAGNE DE MESURE : RÉSULTATS DES COURBES H/V RÉALISÉES SUR SOL | 217 |
| ANNEXE VI | RÉSULTATS DES CALCULS POUR LA CAMPAGNE DE MESURE | 227 |
| ANNEXE VII | CAMPAGNE DE MESURE : RÉSULTATS DES COURBES H/V RÉALISÉES SUR LES PONTS | 231 |
| ANNEXE VIII | RÉSULTATS DES MESURES MVA POUR LES OUVRAGES D'ART | 243 |
| ANNEXE IX | CALCUL DE L'ALÉA GÉNÉRAL SELON L'AMS | 245 |
| ANNEXE X | INDICE DE SUSCEPTIBILITÉ À L'AMPLIFICATION | 247 |
| ANNEXE XI | VOLUME DE TRAFIC SUR L'INTERSECTION | 251 |
| APPENDICE A | CONTRIBUTIONS ORIGINALES | 253 |
| | LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 255 |

LISTE DES TABLEAUX

| | | Page |
|-------------|--|------|
| Tableau 1.1 | Valeurs de F selon la catégorie d'emplacement sismique | 61 |
| Tableau 3.1 | Classement de la susceptibilité à la liquéfaction des différentes lithologies,..... | 91 |
| Tableau 3.2 | Description des trois catégories principales de géologie pour la classification de la susceptibilité aux mouvements gravitaires..... | 95 |
| Tableau 4.1 | Tableau des niveaux de susceptibilité à l'amplification selon les catégories d'emplacement sismique | 102 |
| Tableau 4.2 | Dépôts alluviaux : Tableau des probabilités d'appartenance à une catégorie sismique selon l'épaisseur des dépôts meubles, avec niveau de susceptibilité correspondant | 107 |
| Tableau 4.3 | Dépôts de versant : Tableau des probabilités d'appartenance à une catégorie sismique selon l'épaisseur des dépôts meubles, avec niveau de susceptibilité correspondant | 108 |
| Tableau 4.4 | Dépôts fluvioglaciers : Tableau des probabilités d'appartenance à une catégorie sismique selon l'épaisseur des dépôts meubles, avec niveau de susceptibilité correspondant | 108 |
| Tableau 4.5 | Dépôts marins : Tableau des probabilités d'appartenance à une catégorie sismique selon l'épaisseur des dépôts meubles, avec niveau de susceptibilité correspondant | 108 |
| Tableau 4.6 | Dépôts organiques : Tableau des probabilités d'appartenance à une catégorie sismique selon l'épaisseur des dépôts meubles, avec niveau de susceptibilité correspondant | 109 |
| Tableau 4.7 | Tills dépôts glaciaires : Tableau des probabilités d'appartenance à une catégorie sismique selon l'épaisseur des dépôts meubles, avec niveau de susceptibilité correspondant | 109 |
| Tableau 4.8 | Dépôts anthropiques : Tableau des probabilités d'appartenance à une catégorie sismique selon l'épaisseur des dépôts meubles, avec niveau de susceptibilité correspondant | 109 |
| Tableau 4.9 | Dépôts indifférenciés : Tableau des probabilités d'appartenance à une catégorie sismique selon l'épaisseur des dépôts meubles, avec niveau de susceptibilité correspondant | 110 |

| | | |
|--------------|---|-----|
| Tableau 4.10 | Tableau récapitulatif des niveaux de susceptibilité à l'amplification selon l'épaisseur des dépôts meubles et le type de géologie affleurante | 111 |
| Tableau 4.11 | Surface couverte par les dépôts meubles en fonction de l'épaisseur générale des dépôts | 113 |
| Tableau 4.12 | Nombre de mesure de bruit ambiant en fonction de la configuration géologique..... | 114 |
| Tableau 4.13 | Table récapitulative des fréquences de résonance pour les mesures de bruit ambiant en Hertz..... | 118 |
| Tableau 4.14 | Tableau récapitulative des V_{s30} pour les mesures de bruit ambiant en m/s..... | 123 |
| Tableau 4.15 | Tableau récapitulative des catégories d'emplacement sismique selon les dépôts de surface et l'épaisseur des dépôts meubles | 124 |
| Tableau 4.16 | Tableau récapitulatif des niveaux de susceptibilité à l'amplification selon l'épaisseur des dépôts meubles et le type de dépôt de surface | 127 |
| Tableau 4.17 | Tableau de corrélation entre les niveaux de susceptibilité à l'amplification finaux et les catégories d'emplacements sismiques pour les villes de Montréal et Québec par de précédentes études..... | 128 |
| Tableau 5.1 | Corrélation entre les lithologies de la zone d'étude et celles considérées dans Youd et Perkins (1978)..... | 138 |
| Tableau 5.2 | Résumé des niveaux de susceptibilité à la liquéfaction des différents dépôts trouvés dans la limite de la zone d'étude..... | 141 |
| Tableau 6.1 | Relation entre les catégories de susceptibilité aux mouvements gravitaires et leur indice de susceptibilité..... | 151 |
| Tableau 6.2 | Description des trois catégories principales de géologie pour la classification de la susceptibilité aux mouvements gravitaires..... | 153 |
| Tableau 6.3 | Tableau de classification de la géologie selon leur degré de compacité, composition, angle de friction interne effectif et cohésion effective | 154 |
| Tableau 6.4 | Classement de la susceptibilité aux mouvements gravitaires avec la prise en compte de la proximité à un point d'eau | 160 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Tableau 7.1 | Tableau des indices de susceptibilité à l'amplification selon les niveaux de susceptibilité à l'amplification et les catégories d'emplacements sismiques..... | 175 |
| Tableau 7.2 | Effectifs dans les quadrants de priorisation avec et | 178 |
| Tableau 7.3 | Conversion des niveaux de susceptibilité en indice de susceptibilité pour le calcul d'IRS des ouvrages d'art des Basses-Terres du Saint-Laurent..... | 179 |
| Tableau 7.4 | Effectifs dans les quadrants de priorisation avec la prise en compte des mouvements gravitaires | 181 |
| Tableau 8.1 | Caractéristiques des dix ouvrages d'art sur le tronçon de route modélisé | 188 |
| Tableau 8.2 | Récapitulatif des données nécessaires à la modélisation | 189 |
| Tableau 8.3 | Récapitulatif des volumes durant l'heure de pointe avant et après un séisme..... | 193 |
| Tableau 8.4 | Durée du trajet en minutes en fonction du nombre de voies ouvertes sur l'autoroute et du volume de véhicule engagés dans le trafic | 194 |

LISTE DES FIGURES

| | | Page |
|-------------|---|------|
| Figure 1.1 | Carte de sismicité de l'est canadien de 1985 à 2016, avec les quatre zones de sismicité et la zone d'étude en noir..... | 20 |
| Figure 1.2 | Domage causé par le séisme de Saguenay sur l'Hôtel de ville de Montréal-Est | 24 |
| Figure 1.3 | Schéma d'un modèle à une dimension de couche sédimentaire recouvrant le socle | 26 |
| Figure 1.4 | Relation entre la magnitude d'un séisme et la surface affectée par des glissements de terrain..... | 31 |
| Figure 1.5 | Glissement de terrain à Notre-Dame-de-la-Salette, provoqué par le séisme de Val-des-Bois..... | 33 |
| Figure 1.6 | Diagramme de Déclenchement de rupture de bloc | 38 |
| Figure 1.7 | Graphique du risque sismique..... | 39 |
| Figure 1.8 | Rupture d'une colonne lors du séisme de Northridge (1994)..... | 42 |
| Figure 1.9 | Rupture des assemblages, viaduc Cypress (Loma Prieta, 1989) | 43 |
| Figure 1.10 | Perte d'appui et rupture d'une travée du pont Rio Bananito construit sur des sédiments de faibles résistances au cisaillement | 45 |
| Figure 1.11 | Effondrement d'une travée du pont Rio Viscaya au Costa Rica (1990).... | 46 |
| Figure 1.12 | Glissement et rotation d'une culée du pont South Brighton Bridge | 47 |
| Figure 1.13 | Carte de l'accélération maximale (AMS ou PGA) du sol pour une période de retour de 2500 ans | 59 |
| Figure 1.14 | Exemple de spectre de réponse de calcul du CNBC2015 pour la ville de Montréal | 60 |
| Figure 1.15 | Quadrant utilisé par le MTMDET pour la gestion des risques | 62 |
| Figure 2.1 | Carte de la région d'étude et des trois provinces géologiques pour les Basses-Terres du Saint-Laurent | 69 |
| Figure 2.2 | Carte des dépôts superficiels pour les Basses-Terres du Saint-Laurent ... | 73 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Figure 2.3 | Carte de l'épaisseur des dépôts meubles pour les Basses-Terres du Saint-Laurent..... | 74 |
| Figure 2.4 | Carte de l'ensemble des rivières et lacs pour la région d'étude..... | 75 |
| Figure 2.5 | Carte des forages du SIH avec hauteur de nappe phréatique..... | 76 |
| Figure 2.6 | Toit de la nappe phréatique à partir des données du SIH | 77 |
| Figure 2.7 | Carte de la zone d'étude avec les principales villes et le modèle numérique de terrain à une résolution d'environ 30 mètres | 78 |
| Figure 2.8 | Carte de la zone d'étude avec en bleu les zones de pentes faibles et en rouge les zones de pentes fortes..... | 80 |
| Figure 2.9 | Carte de microzonage de la ville de Québec..... | 82 |
| Figure 2.10 | Carte de microzonage de la ville de Montréal | 83 |
| Figure 2.11 | Carte de microzonage de la région d'Ottawa regroupant les villes d'Ottawa et de Gatineau..... | 84 |
| Figure 2.12 | Carte de l'inventaire des glissements de terrain, | 85 |
| Figure 3.1 | Schéma des données utiles pour l'évaluation de la susceptibilité à l'amplification..... | 89 |
| Figure 3.2 | Schéma des données utiles pour l'évaluation de la susceptibilité à la liquéfaction..... | 92 |
| Figure 3.3 | Schéma des données utiles pour l'évaluation de la susceptibilité aux mouvements gravitaires | 98 |
| Figure 4.1 | Carte de microzonage de la ville de Québec intersectée avec l'épaisseur des dépôts meubles et la géologie de surface | 103 |
| Figure 4.2 | Carte de microzonage de la ville de Montréal intersectée avec l'épaisseur des dépôts meubles et la géologie de surface | 104 |
| Figure 4.3 | Carte de microzonage de la région d'Ottawa (villes d'Ottawa et Gatineau) intersectée avec l'épaisseur des dépôts meubles et la géologie de surface | 105 |
| Figure 4.4 | Carte de la zone d'étude avec les 50 sites de mesures de vibrations ambiantes et l'âge du roc | 115 |
| Figure 4.5 | Photo d'une prise de mesure à Terrebonne..... | 116 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Figure 4.6 | Courbe de vibrations ambiantes pour le site numéro 50..... | 117 |
| Figure 4.7 | Fréquences de résonance en fonction de l'épaisseur des dépôts meubles | 121 |
| Figure 4.8 | Carte de susceptibilité à l'amplification pour les Basses-Terres du Saint-Laurent : très très bas = 1; très bas = 1.025; bas = 1.05; bas à modéré = 1.1, modéré = 1.15;..... | 129 |
| Figure 4.9 | Histogramme de la couverture des niveaux de susceptibilité à l'amplification en pourcentage par rapport à la zone d'étude..... | 130 |
| Figure 4.10 | Histogramme des moyennes d'amplitudes du pic de fréquence H/V en fonction des différents types de dépôts de surface..... | 132 |
| Figure 5.1 | Carte de la susceptibilité à la liquéfaction des différentes lithologies | 142 |
| Figure 5.2 | Distribution des susceptibilités à la liquéfaction en fonction de la géologie..... | 143 |
| Figure 5.3 | Graphique des différentes opérations à effectuer pour obtenir une carte de susceptibilité à la liquéfaction | 145 |
| Figure 5.4 | Carte finale de la susceptibilité à la liquéfaction | 146 |
| Figure 5.5 | Distribution des susceptibilités à la liquéfaction pour les Basses-Terres du Saint-Laurent | 147 |
| Figure 6.1 | Carte de la répartition des trois groupes géologiques | 155 |
| Figure 6.2 | Distribution des trois groupes géologiques..... | 156 |
| Figure 6.3 | Graphique des différentes opérations à effectuer pour obtenir une carte de susceptibilité aux mouvements gravitaires..... | 158 |
| Figure 6.4 | Carte finale de la susceptibilité aux glissements de terrain | 161 |
| Figure 6.5 | Distribution des susceptibilités aux glissements pour les Basses-Terres du Saint-Laurent | 162 |
| Figure 6.6 | Comparaison des distributions de susceptibilité pour l'ensemble de la zone d'étude et pour l'inventaire des glissements de terrain | 163 |
| Figure 6.7 | Carte finale de la susceptibilité aux chutes de blocs..... | 164 |
| Figure 6.8 | Distribution des susceptibilités aux chutes de blocs pour les Basses-Terres du Saint-Laurent..... | 165 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Figure 7.1 | Carte des indices de vulnérabilité structurale des ouvrages d'art de la direction territoriale de la capitale nationale..... | 170 |
| Figure 7.2 | Illustration de la prise en compte des effets de sites dans la méthode d'évaluation de la vulnérabilité sismique des ouvrages d'art pour les Basses-Terres du Saint-Laurent | 171 |
| Figure 7.3 | Distribution des ouvrages d'art en fonction de leur indice F_{site} | 176 |
| Figure 7.4 | Cartographie du risque sismique pour la population de ponts de la Capitale Nationale en tenant compte du nouvel indice F_{site} | 177 |
| Figure 7.5 | Distribution des ouvrages d'art en fonction de leur indice relatif aux mouvements gravitaires | 179 |
| Figure 7.6 | Cartographie du risque sismique pour la population de ponts de la Capitale Nationale en tenant compte du nouvel indice F_{site} | 180 |
| Figure 7.7 | Carte des indices de risques sismiques des ouvrages d'art de la direction territoriale de la capitale nationale..... | 181 |
| Figure 8.1 | Modélisation d'un tronçon d'autoroute A40 à la hauteur de la ville de Québec | 187 |
| Figure 8.2 | Géométrie de l'intersection entre la 28 ^{ème} rue et le Bd. Henri-Bourassa..... | 191 |

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

| | |
|--------|---|
| ACFAS | Association francophone pour le savoir |
| AMS | Accélération maximale du sol |
| CHP | Coefficient d'heure de pointe |
| CPT | Essai de pénétration au cône (Cone penetration test) |
| CS | Classification score |
| CNBC | Code national du bâtiment du Canada |
| DT | Direction territoriale |
| E | Indice d'aléa sismique (méthode NYSDOT) |
| FEMA | Federal Emergency Management Agency |
| GCS | Geographic coordinate system |
| HAZUS | Logiciel Hazus (Hazard US) |
| HCS | Highway capacity Software |
| HVSR | Horizontal to vertical spectral ratio |
| IVS | Indice de vulnérabilité sismique |
| ISE | Indice socio-économique |
| MASW | Multichannel analysis of surface waves (mesures d'ondes de surface multi-canaux) |
| MTMDET | Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec |
| MTQ | Ministère des Transports du Québec (ancien MTMDET) |
| MVA | Mesure de vibrations ambiantes |
| NAD | North American Datum |
| NEHRP | National earthquake hazards reduction program (US) |

XXIV

| | |
|--------|--|
| NYSDOT | New York State Department of transportation |
| SETRA | Service d'études techniques des routes et autoroutes |
| SIG | Système d'information géographique |
| SIH | Système d'information hydrogéologique |
| SPT | Essai de pénétration structurale (Standard penetration test) |
| UTM | Universal transverse mercator (transverse universelle de Mercator) |
| V | Indice de vulnérabilité |

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Alphabet grec minuscule

| | |
|-----------|-----------------------------------|
| β | Amortissement |
| κ | Contraste d'impédance |
| ρ | Densité du sol, kg/m ³ |
| σ' | Contrainte effective normale, kPa |

Alphabet grec majuscule

| | |
|--------------------|------------------------------------|
| α ou ϕ | Angle de frottement interne, degré |
|--------------------|------------------------------------|

Alphabet romain minuscule

| | |
|-------|---|
| acrit | accélération critique d'un ouvrage (SISMOA) |
| avib | accélération possible du sol selon (SISMOA) |
| f0 | Fréquence fondamentale, Hz |
| f02D | Fréquence fondamentale pour un modèle à deux dimensions, Hz |
| h | Épaisseur des sédiments de surface, m |
| g | Accélération gravitationnel, 9,81 m/s ² |
| km | Kilomètre |
| kPa | Kilo pascal |
| n | Période de retour |

Alphabet romain majuscule

| | |
|--------|---|
| A | Amplification |
| C | Cohésion, kPa |
| Fa, Fv | Coefficient d'emplacement variant selon la période |
| HNS | Composante horizontale (Nord-Sud) traitée, du signal de vibrations ambiantes |
| HEO | Composante horizontale (Est-Ouest) traitée, du signal de vibrations ambiantes |
| L | Largeur du bassin, m |
| Mw | Magnitude de moment |
| P | Probabilité |
| Psf | Livre par pieds carré (Pounds per square foot) |

| | |
|------|---|
| R | Résistance au cisaillement, kPa |
| Rvib | Indice de risque de vulnérabilité vibratoire (SISMOA) |
| Sa | Accélération spectrale, m/s^2 |
| Su | Résistance du sol non-drainé au cisaillement, kPa |
| S(T) | Accélération spectrale pour une période, m/s^2 |
| T | Période en seconde |
| V | Composante verticale traitée, du signal de vibrations ambiantes |
| Vs | Vitesse des ondes de cisaillement, m/s |
| Vs30 | Vitesse des ondes dans les 30 premiers mètres, m/s |

INTRODUCTION

Le risque peut être défini par trois composantes principales, soit : l'aléa, la vulnérabilité et la valeur des éléments exposés (UNDRO, 1991). L'aléa sismique est la probabilité qu'un événement sismique d'une certaine intensité se produise dans une région donnée pour une période de retour définie. Cette intensité dépend de manière globale de la sismicité de la zone et de sa géologie à large échelle. Toutefois, à l'échelle locale, un séisme peut être affecté par une amplification provenant de la configuration des sédiments non-consolidés avec le socle rocheux en place (Ansal et Pitilakis, 2004; O'Rourke et Liu, 1999). De plus, des effets induits tels que les glissements de terrain, les chutes de blocs ou la liquéfaction des sols peuvent également être déclenchés à la suite d'un séisme. La seconde composante du risque prend en compte la vulnérabilité des éléments exposés. Pour un ouvrage d'art, par exemple, ce sont les caractéristiques structurales de l'ouvrage qui détermineront sa vulnérabilité face à un séisme. Ainsi un pont avec une longueur d'appui insuffisante aura plus de chance de subir une perte d'appui du tablier lors d'un séisme; on le qualifiera alors de plus vulnérable. La troisième composante du risque considère la valeur des éléments exposés. À l'échelle d'une ville, la population est l'une des composantes principales de la valeur des éléments exposés au risque sismique. Les récents séismes de Christchurch (2010 et 2011) ont par exemple, causés 185 décès (Cubrinovski et al., 2012).

Les études de risque sismique ont pour but d'évaluer les dommages potentiels des ouvrages afin de prioriser les interventions suite à un séisme ou de planifier les travaux de mise aux normes. Dans un contexte de gestion du risque, les outils disponibles pour l'évaluation du risque sismique sont généralement de nature indicielle permettant de procéder au classement ou triage des ouvrages selon leur vulnérabilité ou risque associé relatif. Les méthodes basées notamment sur le calcul de performance des ouvrages d'art pour un niveau de sollicitation donné sont en général utilisées pour un nombre limité d'ouvrages. Elles s'appuient sur des analyses statiques ou dynamiques (Bimschas, 2010; Nollet, 2004).

Les méthodes indicielles qualifient le risque sismique par une évaluation qualitative de la vulnérabilité structurale des ouvrages exposés et une évaluation de l'aléa sismique souvent défini selon le niveau d'accélération probable au site. Généralement, l'effet d'amplification des ondes sismiques par le site est intégré à l'aléa sismique, mais trop souvent les informations géotechniques spécifiques aux sites des ouvrages ne sont pas disponibles rendant l'évaluation moins représentative. De plus, rares sont les méthodes indicielles qui tiennent compte des effets induits, tels que les glissements de terrain, les chutes de blocs, ou le potentiel de liquéfaction des sols. Cette étude propose de développer des échelles de sensibilité aux effets de sites pour mieux définir l'aléa sismique et l'intégrer dans les méthodes indicielles d'évaluation du risque sismique des ouvrages. Les effets de sites considérés dans cette étude, comprennent à la fois les phénomènes d'amplification, de glissements de terrain, de chutes de blocs et de liquéfaction des sols.

Nous tenterons dans un premier temps de recueillir des informations sur l'aléa et notamment les effets de site, grâce à la compilation de données géologiques, géotechniques, topographiques et hydrographiques sur une plateforme de système d'information géographique (SIG). À partir de ces bases de données, l'amplification, la liquéfaction, les glissements de terrain et les chutes de blocs seront caractérisés. Cette caractérisation amènera à une analyse qualitative des effets de site pour la région d'étude. Elle se traduira en échelle de susceptibilité qui pourra être quantifiée dans un second temps, selon l'application à une méthode indicielle.

Les plateformes d'informations géographiques permettront de compiler des informations de natures ponctuelles, telles que les caractéristiques structurales des ouvrages d'art ou le niveau de la nappe phréatique dans un forage à un emplacement (X;Y), avec des informations à plus grandes échelles telles que les formations géologiques (socles rocheux, géologie de surface ou épaisseur des dépôts meubles) ou la topographie d'une région. Ce travail nécessitera la recherche de diverses sources de données nécessaires à l'évaluation de la susceptibilité aux effets de sites. La plateforme d'information géographique permettra de traiter ces données afin de les rendre compatibles avec l'ensemble de la base de données. Les SIG permettront également de générer des cartes de susceptibilité aux effets de sites selon un ensemble de

critères et d'extraire des informations spécifiques à chaque ouvrage d'art. Cette approche permettra de combiner les données sur la vulnérabilité structurale des ouvrages à la susceptibilité aux effets de sites qui sera établie.

Ainsi, des cartes de susceptibilité reliées à l'amplification, à la liquéfaction ou aux mouvements gravitaires (glissements de terrain et chutes de blocs) seront produites pour les régions des Basses-Terres du Saint-Laurent, selon une analyse qualitative. Dans un troisième temps, ces échelles de susceptibilité seront converties en indice pour notamment venir compléter l'évaluation par méthode indicielle du risque sismique des ouvrages d'art pour les Basses-Terres du Saint-Laurent. Dans un quatrième temps, à titre d'exemple d'application du nouvel indice lié au risque sismique des ouvrages d'art, une évaluation de l'impact de la perte partielle de fonctionnalité d'une dizaine d'ouvrages d'art sur un tronçon de route reliant une école à un hôpital dans la ville de Québec sera analysée.

Ce travail porte sur l'intégration des données géotechniques et géologiques sur une plateforme SIG, pour l'étude du risque sismique des ouvrages d'art de la vallée du Saint-Laurent depuis la ville de Québec au nord jusqu'à la frontière avec les États-Unis au sud (Figure 0.1). La zone d'étude correspond à la limite supérieure du niveau d'eau de la mer de Champlain à son apogée, c'est-à-dire à tout le périmètre où l'on est susceptible de trouver des dépôts reliés à la mer de Champlain dans les Basses-Terres Canadiennes du Saint-Laurent.

Il y a environ 11 000 ans, la mer de Champlain a envahi toutes les Basses-Terres du Saint-Laurent jusqu'au niveau du Lac Georges actuel (état de New York aux US). À l'ouest, la mer s'étendait de Brockville à Deep River, en Ontario. Aujourd'hui, un lac Champlain existe dans l'état de New York aux États-Unis, mais au Canada les vestiges de cette mer correspondent au Lac Saint-Pierre actuel.

Au nord, la limite d'étude se situe à la hauteur de la ville de Québec et de la moitié de l'île d'Orléans et au sud à la frontière avec les États-Unis. Au sud-ouest, la limite se situe de Cornwall à Hawkesbury. Toutefois certaines régions ne sont pas bien documentées du point

de vue géologique, c'est pourquoi les frontières de la zone d'étude varie parfois légèrement de la limite de la présence d'argiles marines dites de Champlain.

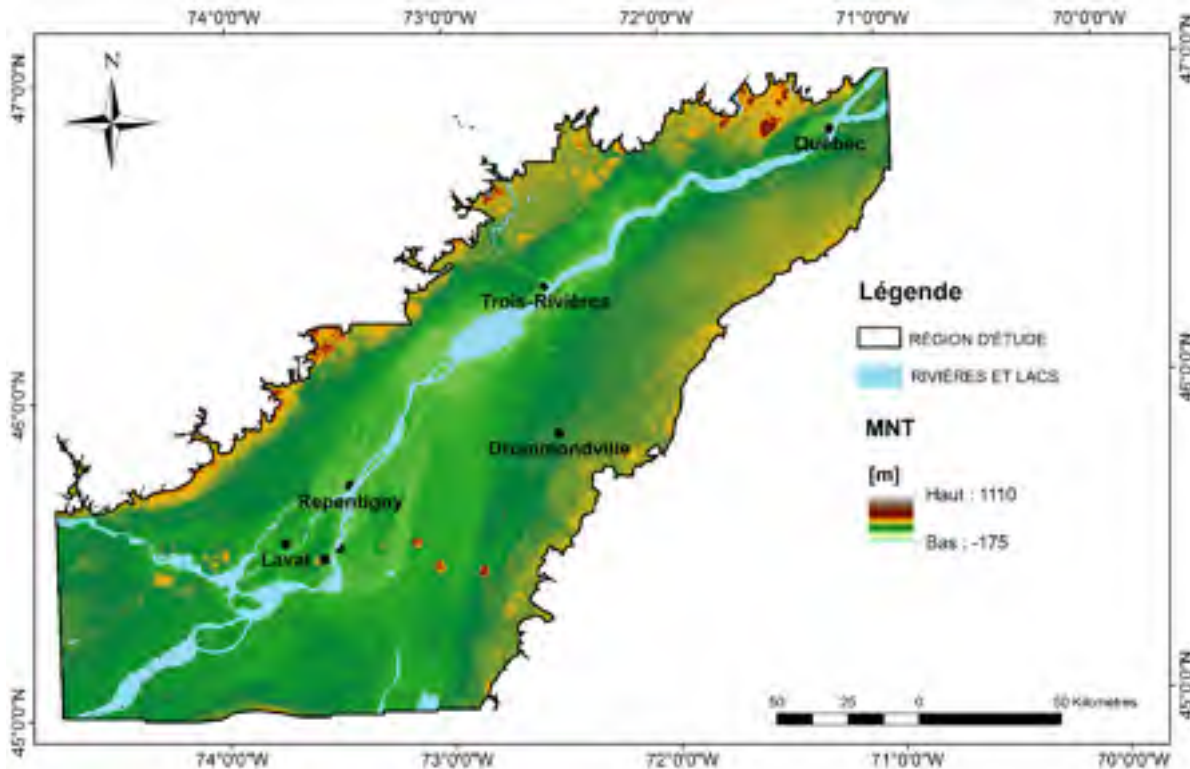


Figure 0.1 Carte de la zone d'étude : Les Basses-Terres du Saint-Laurent produites à partir des données USGS (2015)

Problématique

Les possibles dommages causés par un tremblement de terre sur les ouvrages d'art (ponts et viaducs) pourraient mettre en jeu la sécurité des automobilistes et autres usagers du réseau de transport dans la région des Basses-Terres du Saint-Laurent. Les ponts (incluant les viaducs) devraient faire partie des structures dites parasismiques. Au Canada, les ponts de secours doivent demeurer ouverts après un séisme survenant une fois au 450 ans (séisme de calcul de 10% en 50 ans), alors que les ponts d'urgence peuvent subir des dommages mineurs mais doivent rester ouverts aux véhicules d'urgence. Les autres ponts peuvent subir des dommages mais ne pas s'effondrer pour préserver la sécurité des utilisateurs (CAN/CSA, 2006).

Toutefois, la construction des ponts est parfois antérieure à l'entrée en vigueur des codes et normes parasismiques (MTMDET, 2017b). Ils sont alors vulnérables aux séismes, ce qui contribue à augmenter le risque sismique associé aux ponts. De plus, les conditions géologiques et géotechniques peuvent jouer un rôle prédominant dans l'amplification des ondes à l'échelle locale.

Les récents séismes de Mexico (2017) de Christchurch (en 2010 et 2011) ou de Tohoku (2011) ont mis en évidence la nécessité de mieux comprendre le fonctionnement des tremblements de terre, leur source, leur propagation, les phénomènes induits et leurs impacts sur les infrastructures urbaines (Akinci et al., 2010; Hisada et al., 2005; Theilen-Willige, 2010). L'urbanisation massive du dernier siècle et de ce début du 21^{ème} siècle augmente le risque sismique global et tout particulièrement la vulnérabilité des villes face à un phénomène dont le déclenchement reste très imprévisible.

Si l'on ne peut éviter un tremblement de terre, en revanche, on peut en diminuer les conséquences que sont les dommages aux structures et les pertes humaines et matérielles potentielles en mitigeant le risque sismique. Les plateformes de système d'information géographique (SIG), représentent notamment un outil puissant pour la gestion des données relatives aux séismes, ce qui permet de mieux anticiper les zones à risques (Davidson et Shah, 1997; Erdik et al., 2010; Feizizadeh et Kienberger, 2017; FEMA, 2012; Kim, 1993; Kiremidjian et al., 2007; Shinozuka et al., 2005).

Les Basses-Terres du Saint-Laurent sont une des régions les plus densément peuplées du Québec. La région d'étude recensent à elles seules environ 92% de la population de la province (7 697 588 sur 8 321 888)¹. Elle est composée de grandes régions urbaines telles que Montréal et la ville de Québec dont la population est respectivement de 4 138 300 et 812 200². Le sud-

¹ Institut de la statistique, Q. 2016. « MRC, Population totale, 1996-2017 ». < <http://www.stat.gouv.qc.ca/docs-hmi/statistiques/population-demographie/structure/index.html> >.

² Statistique Canada. 2017. « Population des régions métropolitaines de recensement ». < <http://www.statcan.gc.ca/tables-tableaux/sum-som/102/cst01/demo05a-fra.htm> >.

est du Canada est régulièrement touché par des tremblements de terre. Ressources Naturelles Canada en dénombre environ 600 par année dont 25 sont d'une magnitude assez élevée pour être ressentis. Chaque dix ans, environ trois séismes avec des magnitudes supérieures ou égales à cinq sont ressentis dans le sud-est du Canada (Gouvernement du Canada, 2018b). C'est à partir de cette magnitude que les secousses sont susceptibles de causer des dommages aux constructions (Gouvernement du Canada, 2011). Depuis 2008, on dénombre deux séismes de magnitude supérieure à 5 : Val-Des-Bois en 2010 et Shawville en 2013 (Government of Canada, 2018b). De plus, des séismes destructeurs se sont produits à Charlevoix en 1663, puis en 1925, de magnitude $M_w=7$ et 6.2, respectivement (Cassidy et al., 2010; Mitchell et al., 1990). Sur l'île de Montréal, une des régions les plus peuplées, plus de quarante séismes ont été ressentis de 1642 à 1925. De plus, six d'entre eux ont été suffisamment forts pour causer des dommages, notamment à cause de la géologie locale (Gouin, 2001).

Le tremblement de terre de Saguenay en 1988, d'une magnitude de $M_w=5.9$, a causé des dégâts jusqu'à une distance de 340 km de l'épicentre. L'ancien Hôtel de ville de Montréal-Est, construit en béton armé sur une couche d'argile de 17 mètres de profondeur, a subi des dommages importants à son parement de maçonnerie (Mitchell et al., 1990). Ce séisme a également été l'occasion d'observer la corrélation entre la présence de dépôts meubles sur un site et l'amplification des ondes sismiques à l'échelle locale (Paultre et al., 1993). De plus, de nombreux glissements de terrain, chutes de blocs et liquéfaction des sols ont été observés (Lamontagne, 2002). Plus récemment, en 2010, le séisme d'une magnitude $M_w = 5$ à Val-des-Bois, près d'Ottawa, a causé de nombreux glissements de terrain et l'effondrement d'une culée de pont (Gouvernement du Canada, 2010) (Figure 0.2).



Figure 0.2 Dommages causés par le séisme de Val-des-Bois au Québec sur un pont près d'Ottawa
Tirée de Gouvernement du Canada (2010)

Cette étude vise à utiliser une plateforme de système d'information géographique (SIG) pour intégrer l'information géologique et géotechnique au processus d'évaluation du risque sismique des ouvrages d'art (ponts et viaducs). Le résultat permettra de prioriser les interventions suite à un séisme ou de planifier les travaux de mise aux normes.

Il existe plusieurs approches d'évaluation du risque sismique des ponts. Au Québec, le Ministère des Transports, de la Mobilité Durable et de l'Électrification des Transports (MTMDET) utilise une méthode indiciaire pour prioriser les interventions sur les ouvrages d'art (Lemaire, 2013). Bien que cette méthode intègre les effets d'amplification ou le potentiel de liquéfaction des sols, elle ne tient pas compte des glissements de terrain ou des chutes de blocs. De plus, faute de données, seuls quelques ponts font l'objet d'une description succincte du sol en présence. La nature géologique et géotechnique des sols est très peu présente et lorsqu'elle est prise en compte, elle n'est que partielle et incomplète. De plus, en l'absence de données, on tend à adopter une approche conservatrice en considérant que les sols comme très

susceptibles aux effets de site. L'utilisation de système d'information géographique permet de construire une base de données relatives aux facteurs contrôlant l'amplification des ondes sismiques ou des effets induits, tels que mouvements gravitaires ou liquéfaction des sols. Les sites sont ensuite classifiés en niveau de susceptibilités aux différents effets de site. Il est possible ensuite, grâce aux coordonnées géographiques de chaque ouvrage d'art, d'extraire les données concernant les effets d'amplification et effets induits, par une approche automatisée sans avoir besoin d'un déplacement sur le terrain.

En effet, il est possible d'intégrer ces aléas en utilisant les informations de nature géologiques, topographiques, hydrographiques ou autres, sur une plateforme de système d'information géographique (SIG). Ce projet propose d'intégrer ces données spatiales (exemple : géotechniques ou géologiques), pour chaque emplacement d'ouvrage d'art et de leur attribuer un indice de susceptibilité permettant de fournir une estimation de l'aléa sismique et de la vulnérabilité d'un ouvrage d'art selon les caractéristiques de site et de la structure propre.

Objectifs de la recherche

L'objectif général de cette thèse est d'évaluer le risque sismique des ouvrages d'art grâce à la compilation de données ponctuelles et cartographiques sur une plateforme de système d'information géographique (SIG). Cette étude vise à intégrer les effets de sites aux méthodes indicelles d'évaluation de la vulnérabilité sismique des ouvrages d'art.

Ce travail est divisé en quatre objectifs spécifiques :

1. Le premier objectif spécifique est de documenter les effets de site reliés aux Basses-Terres du Saint-Laurent et déterminer les paramètres et facteurs les affectant. On considérera d'abord le phénomène d'amplification et les autres composantes des effets de site présents dans la zone d'étude, soient les phénomènes induits tels que la liquéfaction des sols et les mouvements gravitaires dont les glissements de terrain et chutes de blocs;

2. Le deuxième objectif spécifique est de caractériser les effets de sites sous forme de cartes de susceptibilité pour les régions des Basses-Terres du Saint-Laurent. Ces cartes s'appuieront sur des données géologiques, géotechniques, topographiques et hydrographiques sur une plateforme de système d'information géographique. De plus, les informations relatives à l'amplification seront complétées par une campagne de mesures de vibrations ambiantes. Enfin, un inventaire sur les glissements de terrain sera aussi utilisé pour valider l'approche de cartographie de la susceptibilité des glissements de terrain;
3. Le troisième objectif vise à évaluer le risque sismique des ouvrages d'art par une approche qualitative pour prioriser les interventions de mise aux normes avant et après un séisme. Il s'agira de combiner les informations relatives à la susceptibilité des différents effets de site aux approches d'évaluation du risque par méthode indicielle dans une plateforme SIG. On considérera ici comme cas d'application la méthode indicielle d'évaluation de la vulnérabilité des ouvrages d'art du MTMDET du Québec. Cette dernière considère déjà la vulnérabilité sismique des ouvrages d'art à travers de multiples critères ayant fait l'objet de précédentes études (Lemaire, 2013). La réalisation de cet objectif permettra d'évaluer le risque sismique des ouvrages d'art par une approche qualitative pour prioriser les interventions de mise aux normes avant et après un séisme;
4. Le quatrième objectif sera de proposer un exemple d'application d'un nouvel indice de risque sismique intégrant les effets de sites. Il s'agit d'évaluer ce que représente la perte partielle ou complète d'un certain nombre d'ouvrages sur un circuit menant d'une école à un hôpital. La perte partielle des ouvrages d'art sera illustrée par la suppression d'une voie, puis de deux voies de l'autoroute menant de l'école à l'hôpital.

Méthodologie

La méthodologie est structurée autour des quatre objectifs spécifiques cités précédemment.

La 1^{ère} étape consiste à établir une base de données pour répertorier les principaux facteurs qui influent sur les effets de site (Figure 0.3). Cette étape vise à établir les critères qui serviront à définir les échelles de sensibilité. Pour l'amplification, elle est souvent déterminée par le

principe de microzonage qui consiste à classer les sols selon les catégories de vitesses d'ondes de cisaillement initialement définies par NHERP et utilisées par le Code national du bâtiment (IRC-CNRC, 2015a). Dans le cadre de cette étude, un croisement sera effectué entre des données de microzonage déjà existantes, la géologie de surface et l'épaisseur des dépôts meubles. Pour la liquéfaction les facteurs retenus sont la géologie de surface et la nappe phréatique. Pour les mouvements gravitaires, ce sont ces mêmes facteurs ainsi que le réseau hydrographique et le modèle numérique de terrain qui sert de base à l'extraction des pentes des versants ou des falaises.

Dans un second temps, les données pertinentes seront combinées afin de définir une échelle de susceptibilité pour chacun des effets de site et lorsque cela est possible une validation est effectuée. Par exemple, l'acquisition sur le terrain de mesures de vibrations ambiantes avec un tromographe (Tromino®, 2011) permet de trouver les fréquences de résonance (Bonney-Claudet et al., 2006b; Nakamura, 2000). Ceci permettra de compléter et valider l'interprétation des informations géologiques précédemment compilées sur SIG. De plus, la carte finale de susceptibilité à l'amplification sera comparée aux données de microzonages pour valider l'approche. Pour la susceptibilité aux glissements de terrain, une comparaison avec un inventaire sera également mise en place.

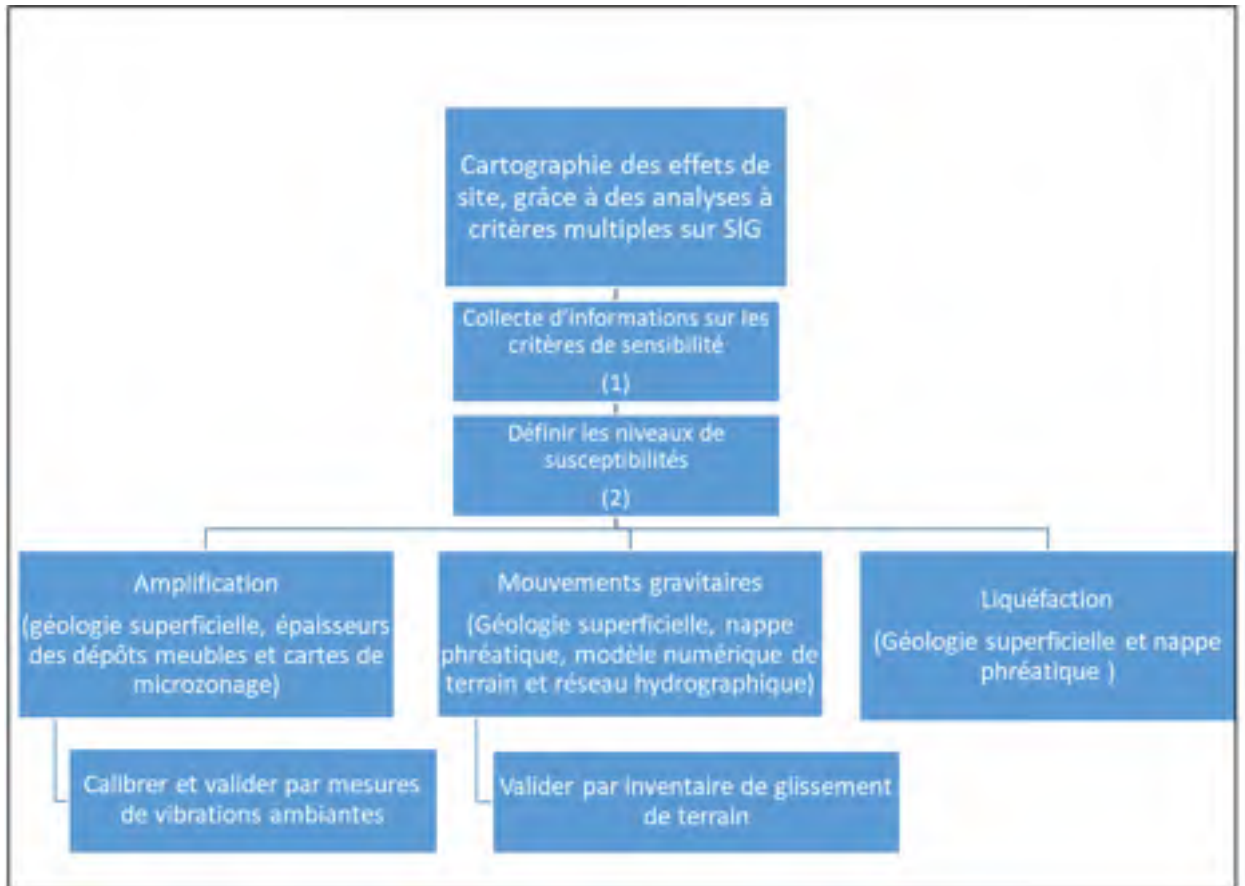


Figure 0.3 Méthodologie du premier et second objectif spécifique

La troisième phase de ce travail servira à évaluer, sur la plateforme SIG, le risque sismique des ouvrages d'art par une approche qualitative pour prioriser les interventions de mise aux normes avant et après un séisme. Il s'agira de combiner la susceptibilité des différents effets de site aux approches d'évaluation du risque par méthode indiciaire, telle que celle utilisée par le MTMDET (Lemaire, 2013). Les caractéristiques structurales des ouvrages d'art stockées sous forme de tables et de points seront combinées sur la plateforme SIG aux informations relatives à l'aléa et aux effets de site, afin de proposer un nouvel indice de risque sismique des ouvrages d'art intégrant à la fois la vulnérabilité structurale de chaque ouvrage et la susceptibilité aux différents effets de site. La validité de cet indice sera vérifiée au moyen d'une étude statistique basée sur les données existantes du MTMDET (Figure 0.4).

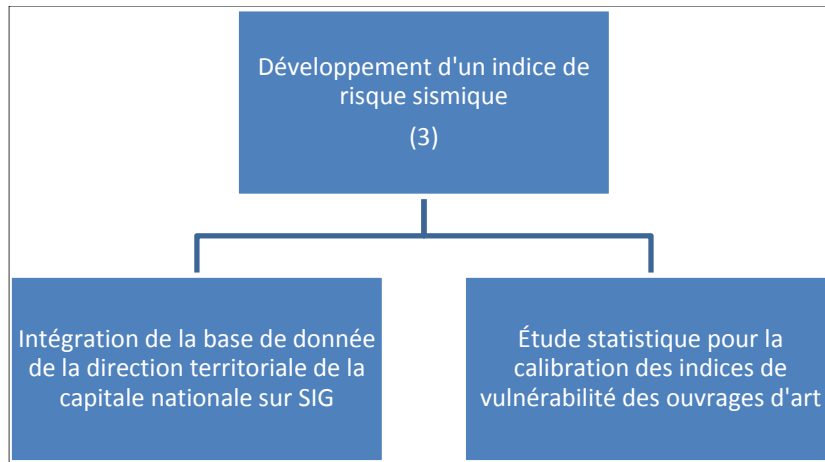


Figure 0.4 Méthodologie du troisième objectif spécifique

La quatrième phase nécessitera une base de données du réseau routier afin d'estimer le temps nécessaire supplémentaire pour relier une école à un hôpital lors d'un scénario hypothétique de séisme (Figure 0.5). Différents scénarios seront envisagés, prenant en compte l'obstruction d'une des voies de l'autoroute, puis d'une deuxième, conséquence de la perte partielle de l'usage des ouvrages d'art. Une augmentation du trafic routier sera aussi prise en compte lors de la modélisation.

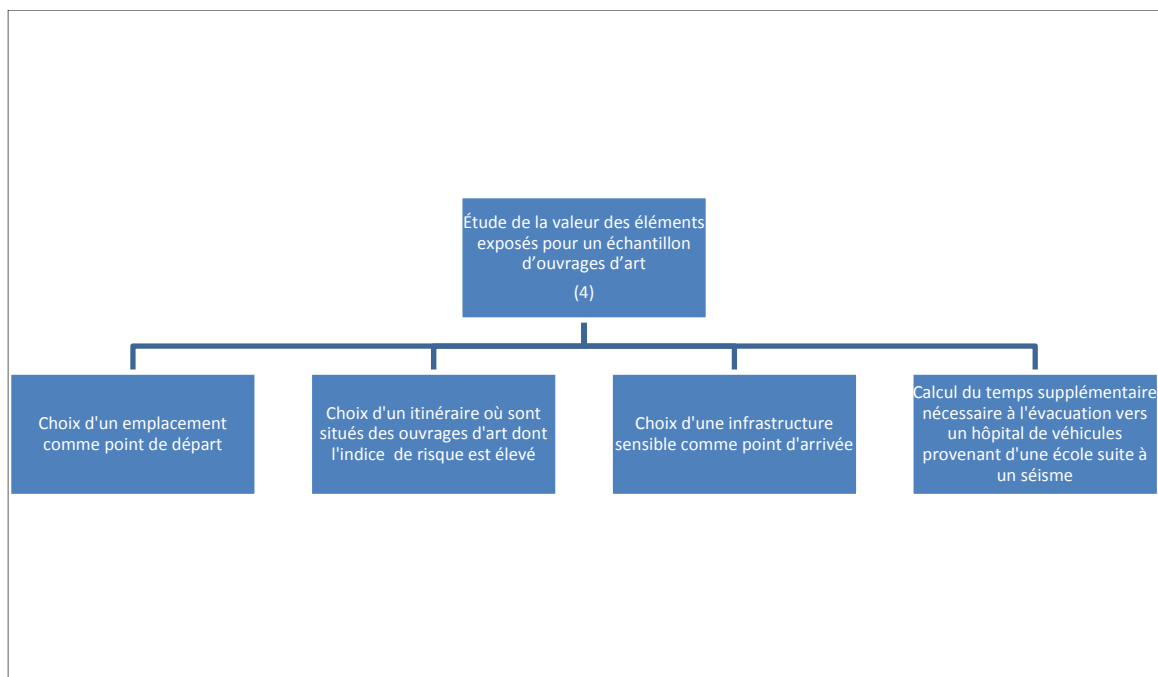


Figure 0.5 Méthodologie du quatrième objectif spécifique

Contributions originales

Ce projet présente un défi scientifique et technique, car il traite les trois aspects du risque sismique sur une plateforme d'information géographique (SIG) pour les Basses-Terres du Saint-Laurent. L'utilisation d'un SIG complète les moyens d'études actuels de la vulnérabilité des ouvrages d'art pour la région d'étude. La création d'une base de données sur l'amplification des sols et des effets induits tel que glissements de terrain, chutes de blocs ou liquéfaction des sols permet une meilleure prise en compte de l'aléa dans l'analyse du risque sismique des ouvrages d'art. Il s'agit de combiner la susceptibilité des différents effets de sites aux approches d'évaluation du risque sismique par méthode indicielle, telle que celle utilisée par le MTMDET (Lemaire, 2013) afin de prioriser les interventions avant et après un séisme. Le projet permet d'obtenir une estimation des effets de site lorsqu'aucune étude géotechnique n'est disponible. Son application sert donc de base à une première évaluation à très large échelle. Il appartient ensuite aux décideurs concernés de mener des études plus précises, afin d'évaluer les travaux de mise aux normes. La base de données concernant les effets de site peut

également être utilisée pour d'autres méthodes indiciaires concernant des écoles ou des trajets de pipeline par exemple.

Les travaux réalisés ont fait l'objet de deux articles, l'un portant sur les mouvements gravitaires (Farzam et al., 2018b) et l'autre portant sur l'amplification des ondes sismiques à l'échelle locale et les mesures de vibrations ambiantes (pas encore soumis).

De plus, le projet a fait l'objet de deux présentations au congrès de l'ACFAS, la première se focalisait sur les effets induits (Farzam et al., 2015) tandis que la seconde sur l'amplification, et de deux articles publiés et présentés au Congrès annuel de la SCGC. Le premier présenté à London (ON) en 2016 traite de l'effet d'amplification et de son intégration dans les méthodes d'évaluation à l'aide de plateforme SIG (Farzam et al., 2016). Le second présenté à Fredericton (NB) en 2018 et porte sur l'intégration des effets de site dans la méthode d'évaluation de la vulnérabilité sismique des ouvrages d'art (Farzam et al., 2018a).

Limites de la thèse

Ce projet propose de compléter la méthode actuelle d'évaluation de la vulnérabilité sismique des ouvrages d'art en intégrant les effets de site. L'utilisation d'une plateforme SIG nécessite d'avoir accès à des bases de données déjà existantes. Les résultats finaux obtenus sont donc dépendants de la qualité et de la résolution des données disponibles. Lorsque cette résolution est jugée trop faible, une étude géotechnique ou encore le calcul de facteur de sécurité sont recommandés. De plus, la même recommandation est valide afin d'évaluer l'amplification, lorsque le site est composé d'argiles sensibles.

L'utilisation d'une méthode indiciaire implique une estimation qualitative de la vulnérabilité sismique. Ainsi, les échelles de susceptibilité aux effets de site sont de nature qualitative et non quantitative. Elles ont pour but de classer de manière relative, en fonction de la région d'étude, les sites en présence. Il en est de même pour l'application de la méthode du MTMDET. Notre étude cherche à prioriser les interventions de mise aux normes et pour ce faire, la

calibration des indices est spécifique aux types d'ouvrages rencontrés dans la province du Québec.

Pour le cas particulier de la susceptibilité à l'amplification, les indices ont été calibrés en fonction de la géologie locale, ce qui implique que cette évaluation n'est valide qu'à l'échelle régionale lorsque l'histoire géologique et la nature des dépôts sont similaires. En effet, l'hypothèse d'une même colonne sédimentaire en fonction de l'épaisseur des dépôts meubles et de la géologie de surface permet une évaluation partielle de l'amplification. L'effet d'amplification est considéré en fonction des catégories d'emplacements sismiques définis par le code canadien de construction dans une perspective de conception (IRC-CNRC, 2015a). Ces catégories servent à déterminer des coefficients d'amplification qui permettent le calcul d'accélération spectrale en fonction de période. Toutefois, le phénomène d'amplification dépend souvent également du contenu fréquentiel du séisme et non pas uniquement de la catégorie d'emplacement sismique. De plus, l'effet d'amplification dû à la topographie ne sera pas considéré dans cette étude.

En ce qui concerne les glissements de terrain et chutes de blocs, les critères retenus sont la géologie avec un classement en trois catégories selon la composition des dépôts de surface; la pente du versant ou de la falaise, plus la pente est forte, plus la susceptibilité est grande; la nappe phréatique, qui déterminera si une lithologie est gorgée d'eau ou non et le réseau hydrographique. Le seuil pour la nappe phréatique est fixé à 10 m de profondeur, si la nappe est plus proche de la surface alors les lithologies sont considérées comme humides et sont classées différemment en s'inspirant de l'approche adoptée par la FEMA (2012) Certains glissements de terrain ont lieu toutefois à des profondeurs supérieures à 10 m. Ainsi ce critère sous-évalue légèrement la susceptibilité aux mouvements gravitaires. L'ajout d'un nouveau critère, prenant en compte la grande susceptibilité des argiles marines à glisser aux abords d'un point d'eau aura la tendance à surévaluer légèrement l'aléa lié aux glissements de terrain. De plus, les éléments de stabilisation de versant ou de falaise ne seront pas retenus dans cette étude, mais peuvent venir compléter la méthode si par la suite la base de données le permet.

Enfin, il est important de mentionner que la liquéfaction des sols est un phénomène complexe prenant place dans un agencement spécifique de plusieurs couches géologiques de différentes natures et que la méthode utilisée permet une évaluation selon des critères faciles d'accès, tels que la géologie de surface et la hauteur de la nappe phréatique. L'approche se base sur le jugement d'expert, qui évalue les lithologies selon des standards (FEMA, 2012) qui ne peuvent parfois pas être appliqués à la région d'étude. Dans ce cas d'autres niveaux de susceptibilités seront retenus selon les recommandations de géotechniciens. Un seuil de 10 m est également fixé pour déterminer si le sol est saturé en eau. Cette hypothèse sous-tend donc qu'il n'y a pas de phénomène de liquéfaction à des profondeurs au-delà de 10 m. Toutefois des phénomènes de liquéfaction ont lieu à de plus grandes profondeurs, mais n'ont pas une grande incidence sur des structures exceptées pour des barrages dont les fondations sont très profondes.

Organisation de la thèse

Les chapitres de cette thèse sont organisés autour des quatre objectifs spécifiques, tel que l'on peut le voir dans la Figure 0.6. Le premier chapitre permet de synthétiser grâce à la revue de littérature les informations nécessaires à la compréhension de notre problématique ainsi que l'état de l'art y étant relié. Le deuxième chapitre décrit l'ensemble des données disponibles et pertinentes pour mener cette étude à bien. Le troisième chapitre propose une méthodologie pour le développement d'échelle de susceptibilité aux effets de sites. Les chapitres quatre, cinq et six décrivent respectivement les résultats concernant l'amplification, la liquéfaction et les mouvements gravitaires. Le chapitre sept développe une étude statistique permettant de calibrer les échelles de susceptibilité aux effets de site à des indices évaluant la vulnérabilité sismique des ouvrages d'art pour les Basses-Terres du Saint-Laurent. Le chapitre huit décrit le cas spécifique de la perte partielle de dix ouvrages d'art sur un tronçon d'autoroute et du temps supplémentaire nécessaire pour atteindre un hôpital depuis deux écoles lorsque l'autoroute est endommagée suite à un séisme. Les deux derniers chapitres fournissent des conclusions et des recommandations concernant l'ensemble de la thèse. Des annexes sont également présentes afin de fournir plus de détails quant à certains sujets ne faisant pas partie des objectifs principaux de l'étude ou concernant les résultats des mesures sur le terrain.

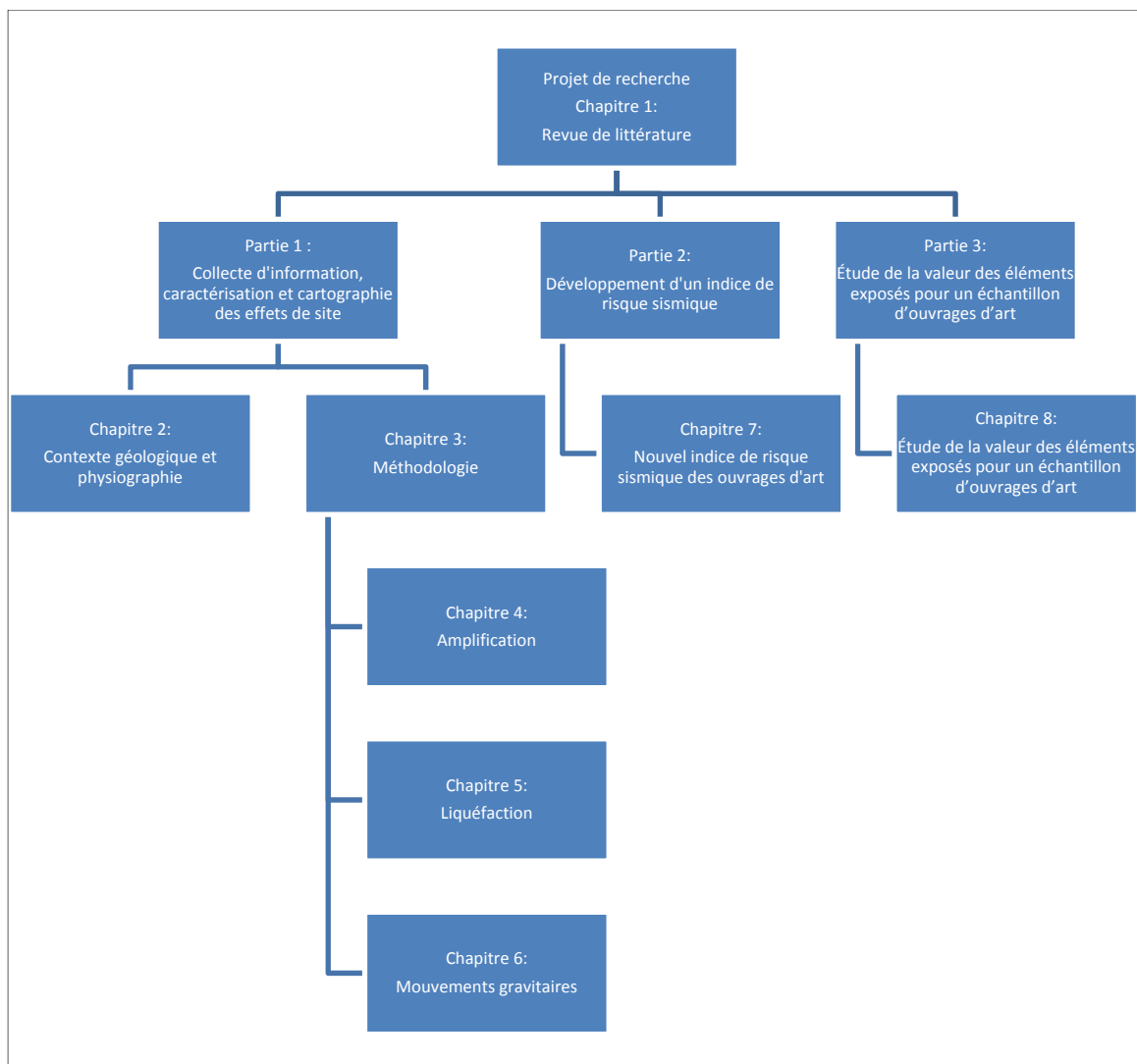


Figure 0.6 Organisation de la thèse

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre présente le contexte sismique de la zone d'étude ainsi qu'un recensement des écrits sur les notions essentielles pour comprendre la problématique de cette recherche. Il abordera consécutivement la nature de l'aléa, son incidence sur les ponts et les méthodes existantes pour évaluer la vulnérabilité sismique de ces derniers. Une dernière section traitera également des paramètres à considérer pour caractériser la valeur des éléments exposés.

1.1 Contexte général

1.1.1 Contexte sismotectonique

La sismicité de la région l'est du Canada provient principalement de l'extension de la faille médio-océanique de l'océan Atlantique causant un stress dans la direction nord-est et du rebond du continent nord-américain suite à son allègement causé par la fonte des glaciers il y a près de 10 000 ans. On peut distinguer quatre zones sismiquement actives dans cette région (Figure 1.1 Carte de sismicité de l'est canadien de 1985 à 2016, avec les quatre zones de sismicité et la zone d'étude en noir

Adaptée de Ressources naturelles Canada (2016)

): Celle de l'ouest du Québec longeant le fleuve d'Ottawa, la région de Charlevoix-Kamouraska considérée comme la plus active, la région du bas Saint-Laurent d'activité modérée et enfin celle du nord des Appalaches (Adams et Basham, 1989; Gouvernement du Canada, 2011). Ces quatre régions et leurs spécificités sont développées ci-dessous.

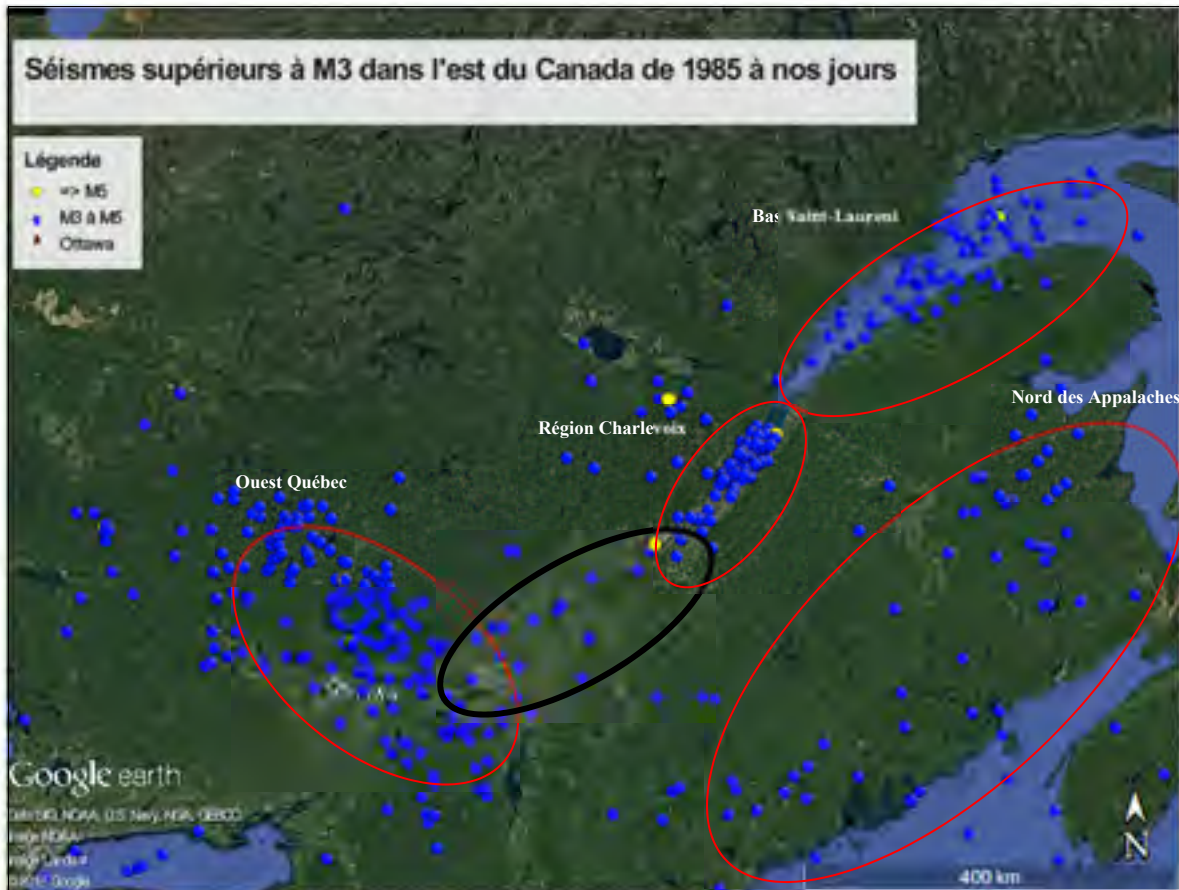


Figure 1.1 Carte de sismicité de l'est canadien de 1985 à 2016, avec les quatre zones de sismicité et la zone d'étude en noir
Adaptée de Ressources naturelles Canada (2016)

La sismicité de la région de l'ouest du Québec semble provenir d'une part au sud, de la faille normale du rift de la rivière d'Ottawa et d'autre part dans la partie nord, par des fissures dans le bouclier canadien provenant du passage, il y a environ 130 millions d'années, du continent nord-américain sur des points chauds (Adams et Basham, 1989). On peut notamment citer les tremblements de terre de Témiskamingue en 1935 ($M_w=6.1$), de Cornwall en Ontario en 1944 causant 26 millions de dollars de dommages (Gouvernement du Canada, 2011) ou encore celui de Val-des-Bois en 2010 qui a causé de nombreux glissements de terrain (Cassidy et al., 2010; Gouvernement du Canada, 2010).

La deuxième région se situant autour de la ville de Charlevoix, est la région la plus active. On dénombre plus de cinq séismes d'une magnitude de six dans les 350 dernières années. En 1663

un séisme de $M_w=7$ a frappé la région, mais celui de 1925 avec une magnitude de $M_w=6.2$ a été l'un des plus destructeurs de la province (Gouvernement du Canada, 2016). Plusieurs bâtiments importants, dont la gare et les installations du port de Québec ainsi que de nombreux autres bâtiments en maçonnerie non armée particulièrement vulnérables, se sont écroulés. Les secousses ont été ressenties jusqu'à 1000 km de distance (Cassidy et al., 2010; Gouvernement du Canada, 2011). La raison de ces séismes provient d'une faille inverse-décrochante résultant de la combinaison entre le rift du Saint-Laurent (faille Logan) et le désordre causé par l'impact d'une météorite il y a environ 365 millions d'années (Adams et Basham, 1989; Cassidy et al., 2010).

La région du bas Saint-Laurent se situant au nord de la ville de Québec, est caractérisée par une sismicité faible. Il est cependant important de rappeler que, de par sa faible densité de population, l'histoire de la région ne permet pas de remonter antérieurement aux cent dernières années (Adams et Basham, 1989). Un séisme d'une magnitude $M_w \sim 5.1$ a toutefois été enregistré dans cette région en mars 1999 (Gouvernement du Canada, 2011).

La dernière région est celle du nord des Appalaches, qui recouvre une partie du Nouveau-Brunswick et de la Nouvelle-Angleterre. Plusieurs séismes, dont un, d'une $M_w \sim 5.7$, ont été ressentis en 1982 dans la région de Miramichi.

En dehors de ces quatre zones, un séisme particulièrement destructeur, d'une magnitude $M_w=5.9$, est survenu dans la région de Saguenay en 1988 à une profondeur de 29 km. Les dommages ont été estimés à plusieurs dizaines de millions de dollars (Gouvernement du Canada, 2011), avec des effets induits allant jusqu'à 200 km de distance (Lamontagne, 2002). Ce séisme met de plus en valeur l'importance de la géologie locale dans la réponse sismique d'un site. En effet, des dégâts ont été constatés jusqu'à 350 km de distance de l'épicentre sur des sites en présence de sédiments non-consolidés.

En effet, d'une part, pour la même distance épacentrale, l'accélération de pointe enregistrée est deux fois plus élevée sur la rive nord du Saint-Laurent se trouvant sur le bouclier canadien que

sur la rive sud reposant sur la zone de déformation des Appalaches. Ceci semble être dû à la relativement grande profondeur de l'épicentre et à la forte réflexion des ondes sismiques le long du fleuve Saint-Laurent où se trouve des discontinuités de la croûte terrestre entre le bouclier Canadien et la zone de déformation des Appalaches (Paultre et al., 1993). De plus, le contenu fréquentiel a également changé selon que la distance à l'épicentre était supérieure ou inférieure 110 km. En dessous de 110 km, l'accélération spectrale pour un amortissement critique de 5% est 3.4 fois amplifiée pour des périodes plus basses que 0.075 sec. Alors que pour des distances supérieures à 110 km, l'amplification a augmenté jusqu'à 5 fois l'accélération spectrale pour des périodes entre 0.13 à 0.4 sec. (Paultre et al., 1993).

D'autre part, les zones recouvertes par des sédiments meubles (Boucherville, Shawinigan) sont plus touchées par des dommages aux bâtiments que des zones situées sur la roche, même si leur distance à l'épicentre est plus grande. Ceci est relié aux phénomènes d'amplification; la ville de Montréal, située à 340 km de distance, a également observé de nombreux dommages dus au phénomène d'amplification. Ces dommages sont corrélés avec la présence de sédiments fins (souvent d'argile et de silt) d'une épaisseur de 5 à 30 mètres en surface (Mitchell et al., 1990; Paultre et al., 1993). De plus, il est important de mentionner que le contenu fréquentiel du séisme à l'épicentre joue également un rôle dominant dans le potentiel d'amplification et de dé-amplification des sols à l'échelle locale. Dans un contexte de conception et d'évaluation qualitative du risque sismique, c'est l'étude par microzonage qui est valorisée. En effet, celle-ci permet d'attribuer des catégories sismiques en fonction de la géologie sur chaque site. Ces catégories sont ensuite reliées à des facteurs d'amplification fixés par le CNBC. Ce sont ces facteurs qui permettent aux concepteurs de définir les spectres d'accélération en fonction de la période utilisés pour la conception d'une structure.

1.1.2 Effet de sites

On appelle effets de site, les phénomènes d'amplification ou de déamplification des ondes sismiques dus au contexte géologique local, ainsi que parfois les effets induits tels que liquéfactions, glissements de terrain, chutes de blocs ou encore tsunamis. L'analyse de l'histoire sismique de la région d'étude fait apparaître de nombreux phénomènes

d'amplification, de liquéfaction, de glissement de terrain et de chute de bloc. C'est pourquoi ce projet se focalisera sur ces quatre phénomènes, sans prendre en compte les tsunamis. En effet, les tsunamis n'apparaissent pas dans les Basses-Terres du Saint-Laurent. Ceux-ci se développent surtout aux abords des grands lacs, mers ou océans, suite à de gros glissements de terrain. L'étude portera donc, dans un premier temps, sur le déplacement transitoire engendré par un séisme et son amplification, puis les déplacements permanents induits par celui-ci.

1.2 Amplification

1.2.1 Enjeux

Le phénomène d'amplification des ondes sismiques a déjà été observé depuis le moyen âge (Lateltin et al., 2004). Toutefois, c'est le séisme de Mexico City en 1985 et ses conséquences désastreuses qui ont amené les chercheurs à se pencher sur ce phénomène. En effet, la même accélération spectrale de 0.2g est observée à l'épicentre du séisme et à Mexico city situé à 360 kilomètres de distance. La géologie locale indique la présence de dépôts meubles, la ville étant construite sur un ancien lac. Ces sédiments sont réputés pour piéger et amplifier les ondes sismiques (Chávez-García et Bard, 1994). D'autre part, les bâtiments les plus touchés comportaient de 9 à 14 étages, ce qui correspond à des structures dont la période fondamentale est d'environ 2 secondes. Lorsque ces bâtiments se situaient sur des dépôts dont la fréquence avoisinait également les 2 secondes, de plus nombreux dégâts étaient constatés. C'est ce que l'on appelle le phénomène de résonance entre sol et infrastructure (Davidovici, 1985).

Plus proche de nous, le séisme de Saguenay a également provoqué de nombreux dégâts dans la province du Québec. Les enregistrements montrent une amplification 1.4 fois plus élevée pour des sites situés sur des dépôts alluviaux que sur des mesures au roc. De plus, 95% des constructions endommagées ont été bâties sur des sédiments, tel que des argiles ou des sables (Paultre et al., 1993). Le coût total des dommages a été estimé à environ 44 millions de dollars (Paultre et al., 1993). La Figure 1.2 illustre les dommages causés à l'Hôtel de ville de Montréal-Est situé à 340 km de distance de l'épicentre.



Figure 1.2 Dommage causé par le séisme de Saguenay sur l'Hôtel de ville de Montréal-Est
Tirée de Gouvernement du Canada (2011)

1.2.2 Facteurs contrôlant l'amplification

Il existe trois phénomènes provoquant l'amplification des ondes sismiques. Le premier, et le plus répandu, provient du piégeage des ondes dans une couche molle reposant sur un socle rocheux. Les ondes sont réfractées et peuvent rentrer en résonance pour certaines fréquences. C'est principalement ce phénomène que nous chercherons à étudier. Mais il existe également le phénomène d'effet de site topographique qui a tendance à se produire au bord des falaises (Wald et Allen, 2007) et le phénomène de bord de vallée, qui peut provoquer des ondes de surface à l'intersection entre le roc et le sol (Lateltin et al., 2004).

L'amplification des ondes due à leur piégeage est principalement contrôlée par le contraste d'impédance entre la couche superficielle et le roc. Elle peut être définie par le rapport entre l'accélération à la surface et l'accélération au sommet de la couche inférieure. Le contraste d'impédance κ est exprimé par (Finn et Wightman, 2003) :

$$\kappa = \frac{(\rho_1 \cdot V_{s1})}{(\rho_2 \cdot V_{s2})} \quad (1.1)$$

Où ρ_1 et V_{s1} sont respectivement, la densité et la vitesse d'ondes de cisaillement de la couche supérieure et ρ_2 et V_{s2} celles de la couche inférieure.

Ainsi pour un sol élastique ayant un amortissement β , l'amplification A se calcule par l'équation (1.2) :

$$A = \frac{1}{\left(\kappa + \beta \cdot \frac{\pi}{2} \right)} \quad (1.2)$$

Plus la vitesse de cisaillement de la couche supérieure sera faible plus l'amplification sera forte. Il en est de même pour la densité. Il est important d'indiquer que sous une forte charge sismique, le comportement du sol sera non-linéaire. Le module de cisaillement et l'amortissement dépendent de la déformation. Sous une forte charge sismique le module de cisaillement effectif va diminuer alors que l'amortissement va augmenter. La résistance au cisaillement va également limiter la magnitude de l'accélération en surface, car les ondes sismiques ne peuvent pas générer de contraintes de cisaillement supérieures à la résistance au cisaillement du sol (Finn et Wightman, 2003) .

Dans le cas simple d'une couche d'épaisseur h et de longueur infinie, recouvrant le rocher (Figure 1.3), on peut définir la fréquence (f_0) à laquelle l'amplification sera maximale par l'équation ci-dessous:

$$f_0 = \frac{V_s}{4 \cdot h} \quad (1.3)$$

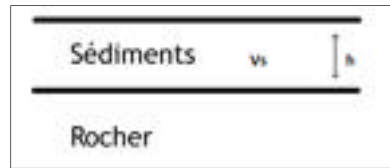


Figure 1.3 Schéma d'un modèle à une dimension de couche sédimentaire recouvrant le socle

On peut donc calculer les vitesses d'onde de cisaillement, lorsqu'elles ne sont pas connues, à partir des profondeurs des dépôts meubles et de la fréquence de résonance, pour un modèle dit en une dimension.

Pour un modèle en deux dimensions, dont la géométrie est en bassin, la fréquence de résonance est relié à la largeur L et à la hauteur du bassin H selon l'équation ci-dessous (Havenith et al., 2009) :

$$F_0^{2D} = \frac{V_{smed}}{4 \cdot h} \cdot \sqrt{1 + \left(2.9 \frac{H}{L}\right)^2} \quad (1.4)$$

Les vitesses des ondes de cisaillement font l'objet de nombreuses études géotechniques, car elles sont utiles, d'une part pour calculer les risques géologiques tel que l'amplification sismique (Fäh et al., 1997), la liquéfaction des sols (Tang et al., 2007; Zhang, 2010) ou les glissements de terrain, mais également dans la prospection pour détecter des gisements de pétrole ou de nappes phréatiques.

De plus, on peut également calculer les vitesses de cisaillement par des données obtenues par essai SPT (Standard Penetration Test) qui mesure la résistance d'une masse à pénétrer dans le sol (Akin et al., 2011; Imai et Tonouchi, 1982) ou encore des essais CPT (Cone Penetration Test) (Robertson, 1990).

La réalité diffère toutefois d'un modèle 1D ou 2D et l'agencement des structures devient souvent plus complexe. Pour ces raisons, il est souvent nécessaire de coupler les informations

sur les vitesses de cisaillement avec les fréquences de résonances pour avoir une idée plus précise et plus juste du comportement du sol (Fäh et al., 2001).

1.2.3 Méthodes d'investigation

Les méthodes d'investigation des effets d'amplification de site se basent généralement sur l'évaluation des vitesses d'onde de cisaillement des 30 premiers mètres (V_{s30}), exprimées par l'équation (1.5) (Ansal et Pitilakis, 2004) :

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n (h_i / V_i)} \quad (1.5)$$

C'est le cas notamment de l'Eurocode en Europe (British standards, 2004), du NEHRP aux Etats-Unis (US et al., 2003) et du CNBC 2010 au Canada.

Les deux premiers objectifs de ce travail permettront de créer une carte de susceptibilité à l'amplification. Cette carte sera de nature qualitative et non quantitative. Toutefois, les cartes déjà existantes de catégorie sismique des sols exprimées en termes de vitesses de cisaillement V_{s30} (telles que définies par le CNBC) seront utilisées ainsi que des mesures de vibrations ambiantes (MVA) définissant la fréquence de résonance. Si les vitesses des ondes de cisaillement dans les trente premiers mètres sont importantes, de plus en plus d'études proposent une carte des périodes de résonance des sites (Ghofrani et Atkinson, 2014; Hunter et al., 2012; Nastev et al., 2016b). En effet, ces dernières, ainsi que la mesure d'ondes de surface ou la modélisation d'onde de cisaillement pour une colonne semblent mieux corrélées avec la présence de dommages (Castellaro et al., 2008; Ghofrani et Atkinson, 2014; Rosset et al., 2015). En particulier pour les sites où les sédiments sont moins épais que 30 mètres, lorsqu'une couche rigide surmonte une couche plus souple ou lorsque la fréquence fondamentale est inférieure à un Hz. De plus, il est souvent plus facile de déterminer la période de résonance que de mesurer précisément la vitesse de propagation des ondes de cisaillement.

La fréquence de résonance est déterminée par l'amplitude du rapport spectral entre les composantes horizontales et la composante verticale des vibrations ambiantes, aussi appelée *H/V spectral ratio* (HVSR) (Nakamura, 1989). Le ratio H/V est maximum à la fréquence de résonance du site. En effet, les composantes horizontales augmentent et se mettent à résonner dans les couches meubles alors que la composante verticale s'annule à la surface. Le signal des vibrations ambiantes apparaît généralement pour les fréquences inférieures à 1 Hz de sources naturelles telles que les vagues, les cours d'eau ou les phénomènes climatiques de larges échelles, tant dis que pour les fréquences supérieures à 1 Hz, les sources sont d'origines humaines telles que l'industrie ou le trafic routier (Hunter et al., 2012; SESAME, 2004).

L'acquisition se fait par mesure de vibrations ambiantes grâce à un sismomètre à trois composantes, deux horizontales et une verticale (Tromino®, 2011). Le traitement se fait ensuite à l'aide d'un logiciel qui divise le signal en fenêtre de 20 sec. Ces fenêtres sont filtrées et affinées par un fenêtrage de Bartlett. Une transformée de Fourier y est ensuite appliquée puis le signal est lissé par la méthode des fenêtrages triangulaires. Le résultat final est une courbe d'amplification avec l'écart-type en fonction des fréquences (SESAME, 2004). L'écart-type peut en outre être diminué par la sélection de fenêtres où le signal est clair.

Si l'efficacité de cette technique, développée par Nogoshi et Igarashi (1971) puis par Nakamura (1989), fait l'objet d'un consensus (Bonney-Claudet et al., 2006a; Lachet et Bard, 1994), il existe encore quelques incertitudes quant à la nature des ondes mesurées pour obtenir la fréquence fondamentale de vibration des sols (Bonney-Claudet, 2004; Nakamura, 1989). Il semblerait toutefois que le signal soit majoritairement composé d'ondes de surface de Rayleigh et de Love (Hunter et al., 2012; SESAME, 2004).

1.3 Effets induits par un séisme

On inclut dans les effets de site également les déplacements permanents, tels que les glissements de terrain, les chutes de bloc et la liquéfaction. On désigne les chutes de blocs et

les glissements de terrain comme des mouvements gravitaires dont un des facteurs déclencheurs est le séisme.

1.3.1 Liquéfaction

La liquéfaction des sols est un phénomène qui apparaît lorsqu'il y a une perte de résistance au cisaillement lors d'une annulation des contraintes effectives due à une augmentation de la pression de pores (O'Rourke et Liu, 1999; Priestley, 1996; Winkley, 2013). Ce phénomène a tendance à augmenter en fonction de la durée du séisme et donc en fonction de l'augmentation de la magnitude du séisme (FEMA, 2012).

Les principaux facteurs pouvant affecter cette analyse qualitative de la susceptibilité d'un site au phénomène de liquéfaction sont la stratigraphie, la granulométrie, la compacité et le degré de saturation que l'on peut lier à la profondeur de la nappe phréatique (Bird et al., 2006; Idriss et Boulanger, 2014; Kayen et al., 2013). Pour les lithologies, on considère souvent les caractéristiques géotechniques des formations affleurantes, telles que leur granulométrie ou degré de compacité ou leur résistance au cisaillement (FEMA, 2012; Youd et Perkins, 1978). Cette technique permet d'évaluer de manière simplifiée les phénomènes de liquéfaction des sols. Toutefois, le phénomène est souvent bien plus complexe, car il met en action l'agencement de plusieurs types de lithologies. La liquéfaction implique le plus souvent un piégeage de la nappe phréatique dans une couche propice à la liquéfaction, sous-jacente à une couche plus imperméable en surface (Tuttle et al., 1990; Tuttle et Seeber, 1991). Ce phénomène a été constaté pour la région de Charlevoix et de Saguenay. En effet, suite à des études sur la paléosismicité de la région de l'est du Canada (Tuttle et Seeber, 1991; Tuttle et Atkinson, 2010), de nombreux cas de liquéfaction ont été recensés dans différents types de dépôts sous forme de remontées turbulentes ou d'éruptions d'un filon intrusif. L'épandage latéral est également un type de liquéfaction. On peut mentionner que la méthodologie de la FEMA (FEMA, 2012) quantifie le déplacement latéral en fonction de la susceptibilité du sol, de l'AMS et de la magnitude du séisme. Toutefois, notre approche d'évaluation qualitative ne nécessite pas l'application d'une telle méthode. Un autre phénomène parfois associé à de la liquéfaction et très répandu dans la zone d'étude correspond à l'amollissement cyclique des

argiles marines (Boulanger et Idriss, 2007; Carson et Lajoie, 1981; Quinn, 2009). Ce dernier sera traité comme un type de glissement de terrain.

Pour déterminer le degré de susceptibilité des couches de sol et notamment leur degré de résistance au cisaillement, il existe de multiples approches. Des données géotechniques, tel que les V_s (Zhang, 2010), les CPT, les SPT ou encore S_u peuvent être utilisées (Bird et al., 2006; Mayfield et al., 2009; Tang et al., 2007). Lorsque ces données ne sont pas disponibles, il est possible de se baser sur le jugement d'experts qui classent les lithologies en niveaux de susceptibilité, selon leur faciès et leurs degrés de compacité (FEMA, 2012; Youd et Perkins, 1978).

Durant le séisme le plus important du XX^{ème}, à Charlevoix-Kamouraska en 1925 d'une magnitude $M_w=6.2$, des phénomènes de liquéfaction des sols ont été constatés dans le vieux port de la ville de Québec situé sur des dépôts alluviaux (Lamontagne, 2008). De plus, lors du séisme de Saguenay en 1988, d'une magnitude $M_w=5.9$, cinq sites dans la région de Ferland et Boilleau, entre 25 à 30 km de l'épicentre, ont été endommagés par des phénomènes de liquéfaction (Boivin, 1992; Tuttle et al., 1990; Tuttle et Seeber, 1991).

1.3.2 Mouvements gravitaires

Les enjeux

Les nouvelles technologies, telle que la télédétection, permettent de quantifier la relation entre les séismes et les déclenchements de mouvements gravitaires, tels que les glissements de terrain et les chutes de blocs (Keefer, 2002; Locat et al., 1984). Des études ont pu notamment montrer la relation entre la magnitude d'un séisme et les surfaces affectées par des mouvements gravitaires (Keefer, 2002) (Figure 1.4).

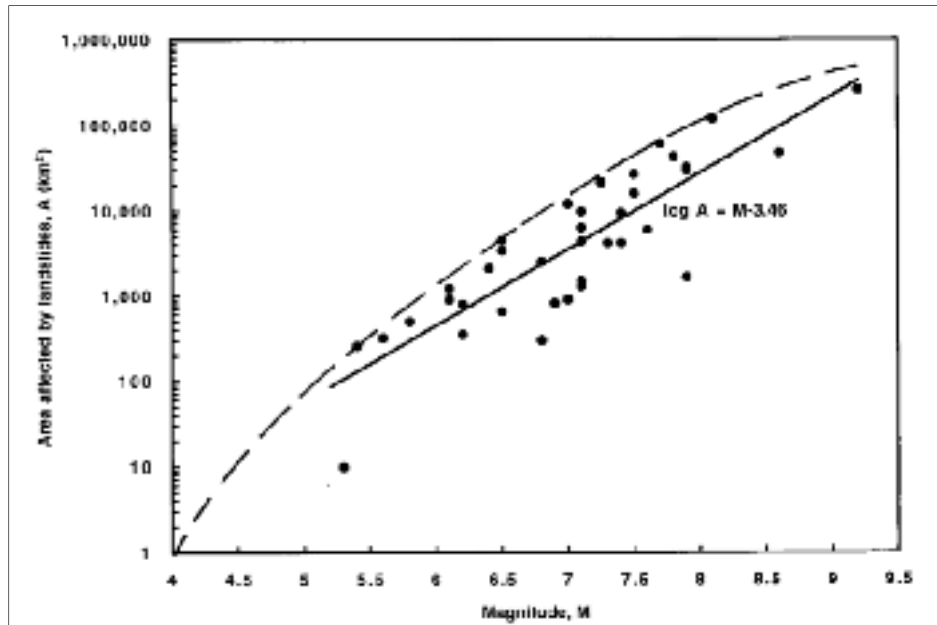


Figure 1.4 Relation entre la magnitude d'un séisme et la surface affectée par des glissements de terrain
Tirée de Keefer (2002)

De plus, les tremblements de terre de Saguenay (1988) (Mitchell, 1990) et de Val-des-Bois (Figure 1.5) (2010) (Gouvernement du Canada, 2011) ont montrés la capacité des séismes à déclencher des mouvements gravitaires dans la Province du Québec. En effet, lors du tremblement de terre de Saguenay (1988, $M_w=5.9$) plus de vingt glissements de terrain ont été constatés tel qu'à Saint-Jean Vianney, Sainte-Thècle, Saint-Adelphe, Côte de la Miche, Sainte-Brigitte de Laval, Saint-Félix d'Otis, Stoneham et Hervey-Jonction et ce, jusqu'à environ 200 km de l'épicentre (Lefebvre et al., 1992; Locat, 2008).

Plus loin dans l'histoire, suite au séisme de 1663 à Charlevoix-Kamouraska proche de La Malbaie d'une magnitude de $M_w \sim 7$ (Locat, 2008), de nombreux glissements de terrain furent observés sur les flancs des rivières Betsiamites, Rivière du Gouffre (Charlevoix), St-Maurice (LaBissonnière and Saint-Boniface), Shipshaw (Saguenay, Saint-Jean Vianney), Pentecôte, Batiscan ainsi que le long du fleuve Saint-Laurent (Desjardins, 1980; Filion et al., 1991; Gouin, 2001; Locat, 2008). En tout, plus de 1.7 km^3 de masse de terre ont été déplacées, glissements subaquatiques inclus (Locat, 2008). Le séisme de La Malbaie de 1860, d'une magnitude proche

de 6³, a également induit des glissements de terrain à la Pointe-aux-Alouettes à 60 km de distance où une partie de la forêt s'est effondrée dans la rivière (Lamontagne, 2008). En 1870 également, le séisme de Baie St-Paul (dans la région de Charlevoix-Kamouraska) d'une magnitude de $M_w \sim 6.5$ changea le paysage suite aux mouvements de terrain sur le flanc des montagnes. Des chutes de blocs ont été la cause de la mort de trois personnes à Batiscan à 175 km de l'épicentre (Lamontagne, 2008). D'autres chutes de blocs se sont produites à Saint-Anne de Beaupré à 60 km de l'épicentre. D'autres mouvements gravitaires ont également été constatés à Cap Trinité au bord de la rivière Saguenay (105 km de distance de l'épicentre). Le séisme de Charlevoix-Kamouraska en 1925 d'une magnitude $M_w = 6.2$ déjà cité pour ces phénomènes de liquéfaction, a également causé des glissements de terrain jusqu'à 230 km de distance à Shawinigan (Lamontagne, 2008). En 2010, le séisme de Val-des-Bois $M_w = 5$ (Gouvernement du Canada, 2011) a également provoqué de nombreux glissements de terrain, tels qu'à Notre-Dame-de-la-Salette (à 10 km de distance de l'épicentre) d'une longueur de 400 mètres (Figure 1.5).

³ La magnitude est approximative, car à l'époque, il n'était pas possible d'avoir des mesures précises.

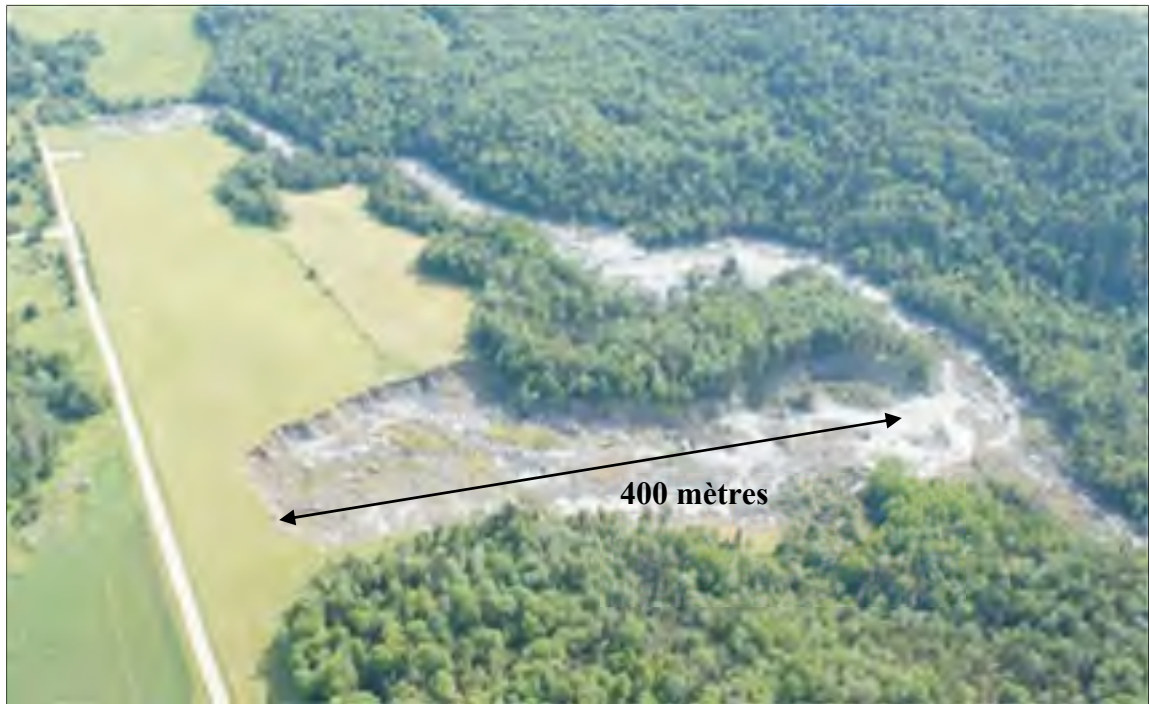


Figure 1.5 Glissement de terrain à Notre-Dame-de-la-Salette, provoqué par le séisme de Val-des-Bois
Tirée de Gouvernement du Canada (2011)

Forces

Les deux composantes dirigeant les glissements de terrain et les chutes de blocs sont :

- la contrainte de cisaillement, composante déstabilisatrice;
- la résistance au cisaillement, composante stabilisatrice.

Ces contraintes sont appliquées parallèlement à la pente. Un mouvement gravitaire se produit lorsque la contrainte de cisaillement due aux sollicitations sismiques est plus élevée que la contrainte admissible au cisaillement du sol (résistance). Durant un séisme, l'instabilité sur un plan de rupture apparaît lorsque l'accélération du sol provoque une augmentation des contraintes de cisaillement.

La contrainte de cisaillement dépend du poids et de la pente du plan de glissement. La résistance au cisaillement (R) est au cœur des instabilités des mouvements gravitaires, elle est régit par la loi de Mohr-Coulomb sous l'équation (1.6):

$$R = c + \sigma' \tan(\alpha) \quad (1.6)$$

Où c représente la force de cohésion en kPa, σ' la contrainte effective normale (kPa) et α l'angle de frottement interne (degré). La cohésion et l'angle de frottement interne sont des propriétés intrinsèques aux différentes lithologies en place, tandis que la contrainte effective varie selon l'environnement des masses en mouvement. La contrainte effective normale dépend du poids de la masse susceptible de glisser et est normale à la pente. Elle dépend aussi de la pression interstitielle qui est liée à la porosité et à la teneur en eau. De plus, sur un plan de glissement la lubrification de la surface de glissement sera déterminante, c'est notamment le cas lors de fortes pluies.

On peut distinguer deux types de facteurs influençant les mouvements gravitaires (Xu et al., 2012; Xu et al., 2013). D'une part, il y a les facteurs « déclenchants » et d'autre part les facteurs intrinsèques. Les facteurs déclenchants sont les séismes, les volcans, les fortes précipitations ou les cycles de gels et dégèles consécutifs. Les plus courant sont notamment les séismes et les fortes précipitations. Ces facteurs et leur influence sur le déclenchement des mouvements gravitaires ont déjà été décrits ci-dessus. Les prochaines sections traitent des facteurs intrinsèques qui déterminent la susceptibilité d'un site à un mouvement gravitaire.

1.3.3 Glissements de terrain

Les paramètres intrinsèques qui gouvernent les mouvements gravitaires sont reliés au climat, à la géologie, à la géomorphologie ou à l'hydrographie. Ces derniers permettent une approche sur plateforme SIG. Ils ont fait l'objet de plusieurs études dont les observations et conclusions permettent de mieux définir le rôle respectif de chaque paramètre (Dai et Lee, 2002; Domínguez-Cuesta et Bobrowsky, 2013; Lineback Gritzner et al., 2001; Theilen-Willige, 2010; Updike et al., 1988; Van Westen et al., 2008; Wang et al., 2010; Wilson et Keefer, 1985).

Rôle de la géologie

La géologie joue un rôle prépondérant, car c'est elle qui détermine la cohésion du sol ou l'angle de friction ou encore sa perméabilité. Un sol peut selon la nature des grains, telle que leur taille ou leur forme, être plus ou moins cohésif. En général, plus un sol est cohésif, plus il est stable. Ainsi les sables sont par exemple non-cohésifs (Domínguez-Cuesta et Bobrowsky, 2013; Fourniadis et al., 2007; Pourghasemi et al., 2013; Theilen-Willige, 2010).

Rôle de la topographie

La topographie joue également un rôle prépondérant, car elle détermine la pente (Domínguez-Cuesta et Bobrowsky, 2013; Fourniadis et al., 2007). De plus, une topographie de pente convexe sera plus stable qu'une pente droite ou de forme concave (Pourghasemi et al., 2013; Theilen-Willige, 2010).

Rôle du climat

Paramètre moins important que la géologie ou la topographie, la pluviométrie joue tout de même un rôle significatif puisqu'elle agit sur la pression de pores. Le climat joue à la fois le rôle d'un facteur déclenchant et à la fois un facteur intrinsèque. Beaucoup de pluie signifie donc plus d'instabilité. De plus, dans les climats polaires, les gels et dégelés consécutifs aux changements saisonniers sont également connus pour déstabiliser la roche (Domínguez-Cuesta et Bobrowsky, 2013; Pourghasemi et al., 2013; Theilen-Willige, 2010).

Rôle de la végétation

La végétation permet l'évapotranspiration, ce qui évacue une partie de l'humidité du sol. De plus, les racines sont connues pour augmenter la cohésion. La végétation évite également l'érosion, elle sera donc facteur de stabilité. En revanche, une végétation trop dense va

augmenter la masse et ainsi la contrainte de cisaillement (Domínguez-Cuesta et Bobrowsky, 2013; Pourghasemi et al., 2013; Theilen-Willige, 2010).

Rôle du réseau hydrographique

La présence de cours d'eau à proximité peut rendre le terrain instable à cause de l'érosion notamment, mais également à cause de la présence de nappe phréatique proche de la surface. Des mesures de drainage permettent de remédier à l'instabilité causée par la présence d'eau dans le sol, ainsi la stabilité du sol augmentera (Domínguez-Cuesta et Bobrowsky, 2013; Fourniadis et al., 2007; Pourghasemi et al., 2013; Quinn et al., 2011; Theilen-Willige, 2010; Van Westen et al., 2008).

Rôle de l'occupation du sol

L'occupation du sol joue un rôle sur l'écoulement des eaux et ainsi influence la susceptibilité aux mouvements gravitaires. Ainsi, les zones agricoles ou les zones habitées sont généralement plus stables que les zones sans végétation (Long, 2008).

Étude de stabilité

Il existe de nombreuses méthodes d'étude de stabilité sous chargement dynamique, qui proposent de diviser une masse potentiellement instable en tranches (Karray et Ghobrial, 2013). Ces méthodes font l'hypothèse que la masse de sol est rigide et que par conséquent le cisaillement ne se produit que sur une surface unique de glissement. Elles font également l'hypothèse que le sol est parfaitement plastique, ce qui revient à dire qu'aucune déformation de cisaillement ne se produit avant que la résistance du sol ne soit atteinte. Enfin, la résistance au cisaillement est similaire le long de la surface de rupture. On peut citer la méthode Bishop simplifiée, qui ne considère que la force verticale des tranches en négligeant les forces inter tranches horizontales. Cette méthode considère une surface de glissement qui est modélisée de forme circulaire; la méthode Spencer qui considère les forces inter tranches horizontales

comme toujours parallèles ou encore la méthode Morgenstern-Price qui considère les forces inter tranches comme non-parallèles. Ces dernières méthodes sont utilisées dans un contexte d'évaluation de la stabilité lorsque les surfaces sont non circulaires (Agam et al., 2016).

1.3.4 Les chutes de blocs

Les facteurs contrôlant les chutes de blocs sont les mêmes que pour les glissements de terrain, c'est-à-dire la géologie, la topographie et le réseau hydrogéologique (Cruden, 1985; Pantelidis, 2009). Toutefois, il faut également prendre en compte l'état de la roche. Une lithologie fracturée sera bien plus susceptible qu'une roche intacte. Une bonne description comprend la qualité de la roche, les fréquences des fractures, leurs orientations et leurs pendages (inclinaisons des fractures). Plus l'orientation des fractures sera proche de l'orientation de la pente, plus le danger sera élevé. Lorsqu'il est plus incliné que la pente alors le danger sera aussi élevé.

Il est possible, à partir d'une carte géologique, de connaître l'orientation des fractures et le pendage. Toutefois la qualité de la roche et l'état de fracturation sont des données difficiles à obtenir à grande échelle (Barton et al., 1974); c'est pourquoi, lors d'une étude (Baillifard et al., 2003), une approche simplifiée SIG a été proposée selon les critères suivants :

1. Proximité d'une faille;
2. Présence de falaise ou de pente forte;
3. Présence d'éboulis.

L'ensemble de ces paramètres sont représentés à la Figure 1.6.

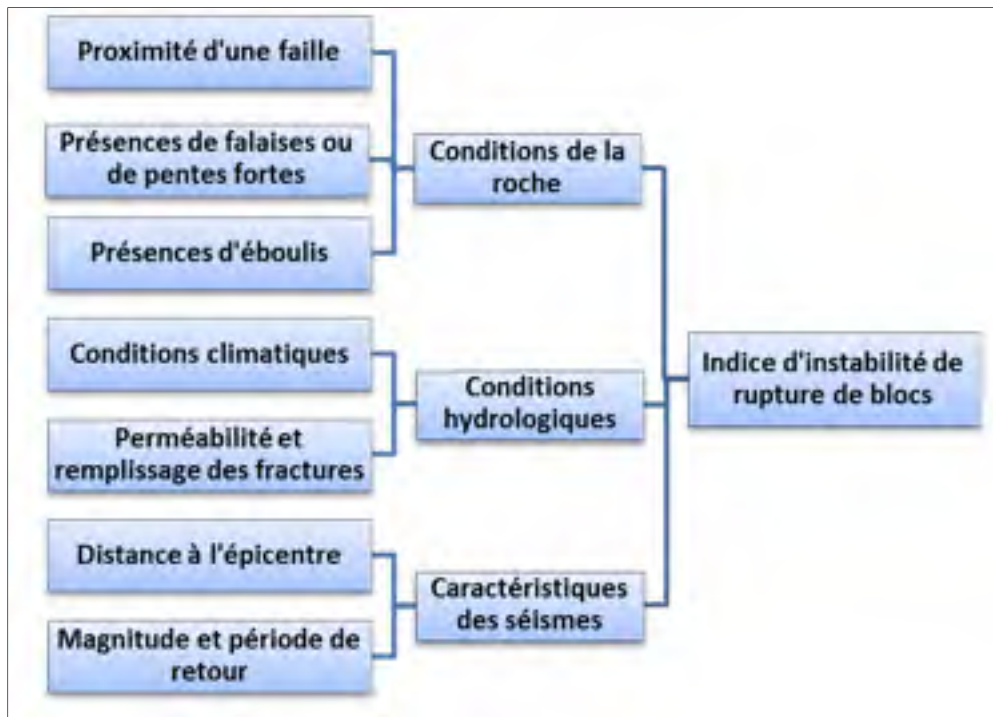


Figure 1.6 Diagramme de Déclenchement de rupture de bloc
Adaptée de Pantelidis (2009)

1.4 Vulnérabilité sismique

1.4.1 Vulnérabilité sismique relié aux régions urbaines

La région des Basses-Terres du Saint-Laurent regroupe les deux villes les plus peuplées de la province du Québec avec respectivement 4 138 300 habitants pour la ville de Montréal et 812 200 pour la ville de Québec⁴. Dans une de leurs études, Adams et al. (2002) estiment le risque sismique, selon l'aléa sismique de la région et la population urbaine, pour les principales villes du pays (Figure 1.7).

⁴ Données tirées de statistique Canada pour 2017.



Figure 1.7 Graphique du risque sismique
Tirée de Adams et al. (2002)

Cette étude montre que Montréal et la ville de Québec figurent parmi les six villes les plus à risque du Canada. L'aléa sismique doit donc être systématiquement pris en compte lors de la conception d'infrastructure. Particulièrement dans les villes où la densité de population conduit à un risque accru. Quant aux structures existantes, l'évaluation du risque sismique qui leur est associé doit prendre en compte la vulnérabilité de la structure mais aussi l'aléa en tenant compte des effets de site.

1.4.2 Vulnérabilité des ponts

Enjeux

Les réseaux routiers et les ponts ont un rôle essentiel à jouer lors de catastrophes naturelles telles que les séismes. En effet, ce sont ces derniers qui permettent l'accès aux infrastructures dites sensibles comme les hôpitaux. Ce sont également eux qui maintiennent sur tout le territoire les réseaux électriques, gaz et eau courante (Mitchell et al., 1994).

On estime la durée de vie d'un ouvrage d'art à environ 30 ans avant qu'il ne soit nécessaire d'effectuer des travaux de réparations (MTMDET, 2017b). Au Québec 70% des ponts du réseau routier supérieur sont construits entre 1960 et 1980 (MTMDET, 2017). À cette période les connaissances en construction parasismique étaient encore déficientes. En effet, c'est surtout suite aux séismes des années 1980 à 2000, notamment au Japon et aux États-Unis que l'on a pu identifier les déficiences structurales des ouvrages d'art face aux séismes (Griezic, 1999; Mitchell et al., 1994). De plus, le climat froid favorise l'utilisation des sels déglacant et réduit la durée de vie des ouvrages d'art.

Le MTMDET gère environ 9700 ouvrages d'art dont 5400 sur le réseau routier supérieur et 4300 sur le réseau routier municipal (MTMDET, 2017b), dont environ 48% sont dans la région d'étude (Gouvernement du Canada, 2018a). Pour l'année 2015-2016, 849.8 millions de dollars ont été consacrés à la mise aux normes des structures du réseau routier supérieur et 103.2 millions pour la réfection des structures du réseau routier municipal (MTQ, 2016). L'entretien de ce dernier étant sous la responsabilité du MTMDET depuis 2008. Au total, on observe une hausse de 17 points (75%) depuis 2008 pour le réseau supérieur et 17 points (55.6%) pour le réseau routier municipal (MTMDET, 2017b).

Les précédents séismes nous ont fournis des informations importantes sur le comportement sous charge sismique des ouvrages d'art. L'inventaire des dommages nous permet de mieux comprendre les points faibles de ces ouvrages. De plus, il nous permet également de cibler les zones à renforcer afin d'éviter de commettre les mêmes erreurs (Mitchell et al., 1995; Mitchell et al., 2012; Mitchell et al., 1994; Mitchell et Tinawi, 1992; Mitchell et al., 1991; Priestley, 1996).

Vulnérabilité structurale

De manière générale, moins un pont a une structure complexe et des discontinuités dans la superstructure et mieux il réagira aux sollicitations sismiques. De plus, l'âge de l'ouvrage

pourra donner de bonnes indications sur les normes utilisées pour le construire ou sur son état d'usure (Hida, 2009; Lemaire, 2013; Tinawi et al., 1993b)

Le type de construction et les matériaux jouent également un rôle essentiel. En effet, les ponts en bois ou en acier sont moins vulnérables que les ponts en béton armé. Un pont à poutres est généralement plus vulnérable tandis que les ponts à portique sont plutôt stables (Hida, 2009; Lemaire, 2013; Tinawi et al., 1993b).

De plus, le type d'appareils d'appui est également important; la présence d'appui à pendule par exemple rend la structure très vulnérable vis-à-vis des sollicitations sismiques (Hida, 2009; Lemaire, 2013; Tinawi et al., 1993b).

On notera également que les armatures au niveau des piles et des fondations jouent un rôle prédominant pour le renforcement et la stabilité de la structure, ainsi que pour le transfert des charges.

La plupart des dommages constatés sur les ponts suite aux séismes peuvent être regroupés en cinq catégories (Lemaire, 2013; Mitchell et al., 2012; Priestley, 1996) :

- la perte d'appui des travées;
- la rupture des colonnes et des piles;
- la rupture des assemblages et des clés;
- la liquéfaction ou le tassement des sols;
- la rupture des culées.

Les deux derniers points ne seront pas décrits ci-dessous, car ils seront traités plus loin dans le chapitre traitant des conséquences des effets de site sur le risque sismique des ouvrages d'art.

La perte d'appui induit généralement l'effondrement d'une travée. Elle peut être due à une longueur d'assise insuffisante, à l'ouverture des joints ou encore à la présence d'un biais. Le

rôle des appuis est de transmettre la force d'inertie engendrée par la masse du tablier aux éléments porteurs. Les ponts à travée unique ou à nombre de poutres réduit sont généralement touchés par ce type de rupture (Priestley, 1996).

Une des causes de rupture des colonnes et des piles est le flambement des armatures longitudinales (Figure 1.8) (Andrawes et al., 2009; Hida, 2009; Lemaire, 2013; Priestley, 1996). Elle est principalement due au manque de confinement du béton et du type d'encastrement, qui contrôle la résistance en flexion des piles. Les piles à colonne unique fragilisent le système tandis que plusieurs colonnes par piles permettent de mieux répartir les charges latérales en présence (système redondant).



Figure 1.8 Rupture d'une colonne lors du séisme de Northridge (1994)
Tirée de Andrawes et al. (2009)

Plusieurs mesures peuvent être prises pour renforcer les piles afin de mieux transférer les charges de la superstructure aux fondations; des armatures transversales peu espacées et un renforcement des barres situées sur les faces des colonnes peuvent augmenter la résistance. De plus, on utilise souvent des corsets d'acier qui entourent la colonne et augmentent sa capacité portante (Priestley, 1996).

Les assemblages relient les éléments horizontaux d'un pont avec les éléments verticaux. Cette fonction nécessite de bonnes armatures qui résisteront aux grandes flexions et cisaillements pour lesquelles elles seront sollicitées (Figure 1.9). Afin de palier à leur faiblesse, il est souvent nécessaire de renforcer avec des barres d'ancrage, ou de poser des étriers supplémentaires avec des goujons (Priestley, 1996).



Figure 1.9 Rupture des assemblages, viaduc Cypress (Loma Prieta, 1989)
Tirée de Brocher et al. (2014)

Perspectives

Le MTMDET et les municipalités gèrent actuellement 9700 ouvrages d'art (MTMDET, 2017b), dont 48% sont situés dans les Basses-Terres du Saint-Laurent dans le zone d'études (Government of Canada, 2018a). Le but n'est pas de concevoir des ponts résistants entièrement aux tremblements de terres, mais de limiter les dégâts sévères et de maintenir la structure opérationnelle suite à une catastrophe.

En 2013, dans le cadre d'un projet de recherche, Lemaire (2013) met à jour le calcul de l'indice de vulnérabilité sismique (IVS) des ouvrages d'art, pour une meilleure représentation du parc d'ouvrage actuel. Cette étude met en évidence le besoin d'intégrer les SIG pour une meilleure appréciation des conditions de site local et particulièrement pour la détermination d'un spectre d'accélération précis sur toute la région d'étude. Dans cette optique, l'introduction des SIG permettra d'améliorer leurs outils d'analyse et d'intégrer de nouvelles informations de nature géologique, géomorphologique ou hydrographique lors du calcul de la vulnérabilité sismique des ouvrages d'art.

1.4.3 Comment les effets de sites contribuent à augmenter le risque sismique des ponts

L'amplification sismique

Le phénomène d'amplification augmente la demande en accélération ou en déplacement, ce qui augmente le risque de dommage. Grâce aux courbes de fragilité, et aux spectres d'accélération du sol spécifique à chaque type de sol, il est possible d'obtenir des courbes de dommage relatives à un groupe d'ouvrages possédant les mêmes caractéristiques structurales (FEMA, 2012; Nollet, 2004).

Le phénomène d'amplification sismique est maintenant bien connu des ingénieurs civils et sismologues. Il fait l'objet de multiples études qui tentent de l'investiguer par différentes méthodes de microzonage. Le microzonage consiste à attribuer selon la nature des sols en présence et leur épaisseur, une catégorie d'emplacement sismique (voir section 1.5.5). Ces catégories, par l'intermédiaire de facteur d'amplification permettent de calculer une accélération spectrale en fonction d'une période (IRC-CNRC, 2015a). En général, les dépôts de sol très meubles, catégories D et E, amplifient le signal sismique par rapport à la catégorie de référence C, mais ce n'est pas le cas pour les périodes en-dessous de 0.2 sec. On peut mentionner que le contenu fréquentiel du séisme en lui-même peut faire varier l'amplification.

La Figure 1.10 montre un exemple de rupture de travée et perte d'appui d'un pont due à une amplification des ondes sismiques causée par la présence de sédiments avec une faible résistance au cisaillement à la surface, suite au tremblement de terre du Costa Rica (Priestley, 1996).



Figure 1.10 Perte d'appui et rupture d'une travée du pont Rio Bananita construit sur des sédiments de faibles résistances au cisaillement, (Costa Rica 1990)
Tirée de Priestley (1996)

Liquéfaction

Ce phénomène survient lorsqu'il y a une perte de résistance au cisaillement. Ce sont généralement les sols tels que les sables (granularité faible) saturés en eau qui sont sujet à la liquéfaction (Bird et al., 2006; O'Rourke et Liu, 1999; Youd et Perkins, 1978). La liquéfaction des sols a souvent causé l'effondrement de ponts (Mitchell et al., 2012; Priestley, 1996; Winkley, 2013). Elle fragilise notamment les éléments de fondation comme les piles et les culées et peut entraîner la chute totale du tablier (Hida, 2009; Lemaire, 2013).

Le pont Rio Viscaya au Costa Rica (1990) est un exemple d'effondrement d'une travée attribuable à un phénomène de liquéfaction (Figure 1.11) (Priestley, 1996).



Figure 1.11 Effondrement d'une travée du pont
Rio Viscaya au Costa Rica (1990)
Tirée de Priestley (1996)

Il est difficile d'y remédier si ce n'est en augmentant la redondance des éléments du pont en prévoyant des travées continues. Des mesures de densification du sol ou de réduction de la pression de pore ainsi que du vibroremplacement sont parfois effectués (Galy, 2013; Priestley, 1996).

Mouvements gravitaires

Les glissements de terrain, chutes de blocs et autres effets induits peuvent parfois être plus destructeurs que l'événement sismique en lui-même (Brocher et al., 2014). Au Québec, les argiles issues de l'ancienne mer de Champlain sont particulièrement susceptibles aux glissements de terrain (Lefebvre, 1986; Quinn et al., 2008). De plus, les fortes précipitations courantes dans cette région du monde augmentent l'aléa face à ces phénomènes.

Les culées jouent souvent le rôle de mur de soutènement par rapport aux remblais. Une mauvaise consolidation peut causer des efforts de rotation et de translation qui entraînent leur

affaissement ou leur rupture. Des fondations profondes composées de pieux peuvent diminuer ce phénomène, en cas de tassement différentiel, de glissement de terrain ou de liquéfaction. De plus, la pose d'une dalle de tassement à l'arrière de la culée permet de diminuer la rotation de la culée sous l'effet d'un tassement (Mitchell et al., 2012; Mitchell et Tinawi, 1992; Priestley, 1996) (Figure 1.12). Des mesures externes à l'ouvrage peuvent également contribuer à diminuer l'aléa relié aux glissements de terrain, comme des mesures de drainage.



Figure 1.12 Glissement et rotation d'une culée du pont South Brighton Bridge (Nouvelle Zélande, 2011)
Adaptée de Cubrinovski et al. (2012)

Le pouvoir destructif d'un bloc lors de sa chute est énorme, il peut renverser une pile, endommager une culée ou même détruire un tablier. Des mesures de protection contre ces chutes de blocs permettent de diminuer considérablement le risque lié à ce phénomène, tels que la présence de grillages ou des fossés de réception, d'ancrages ou de bétonnage.

Ainsi, si les glissements de terrain et les chutes de blocs sont gouvernés par les mêmes forces, ils n'affectent pas de manière similaire les éléments structuraux des ouvrages d'art. De plus, les mesures de protection externes aux ouvrages sont différentes selon que le site est susceptible aux glissements de terrain ou aux chutes de blocs. Par conséquent, il sera important de bien différencier ces deux phénomènes dans un contexte de prise en compte des effets de site lors de l'évaluation du risque sismique des ouvrages d'art.

1.5 Définition du contexte d'évaluation de la vulnérabilité et du risque sismique des ponts par méthode indicielle

C'est suite au séisme de San Fernando en 1971, que la première méthode indicielle d'évaluation sismique a été développée en Californie (Caltrans, 1992). Par la suite, l'état de New York (NYSDOT, 2002) et de la Floride (Small, 1999) ont également élaboré leur propre méthode aux États-Unis.

Au Québec, on peut citer la méthode développée par l'École polytechnique de Montréal en 1993 (Tinawi et al., 1993b), puis celle du MTMDET (anciennement MTQ) MTQ95, inspirée par la méthode utilisée en Californie et de celle de l'École polytechnique de Montréal. En 2001, Liu (2001) de l'université McGill a également développé sa propre méthode. En 2007 et 2013, les travaux de recherche menés à l'École de Technologie Supérieure ont donné naissance à la méthode Ville de Québec 2007 (VdQ2007) adaptée spécifiquement à la ville de Québec (Hida, 2009) et à la méthode MTQ2013 (Lemaire, 2013) adaptée aux ponts des 14 directions territoriales du MTMDET.

L'objectif de ce travail est de poursuivre les recherches menées conjointement par le MTMDET et l'École de Technologie Supérieure pour adapter la méthode MTQ2013 sur une plateforme SIG et y intégrer les effets de site et effets induits. Pour ce faire, la méthode française du Service d'Études sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements (SETRA)(Davi et al., 2011), qui a la particularité d'intégrer les effets induits dans son évaluation de la vulnérabilité sismique, peut servir d'inspiration.

Les effets induits et effets de site sont tous deux liés à des phénomènes régis à grandes échelles, tel que la géologie ou la présence d'une nappe phréatique. Dès lors, l'introduction de ces phénomènes, dans une méthode d'évaluation de la vulnérabilité sismique des ponts ainsi que leurs représentations, seront favorisées sur une plateforme d'information géographique.

1.5.1 Contribution des SIG

Les plateformes d'informations géographiques sont des outils puissants pour la gestion des données comportant une composante géographique. Elles permettent un affichage simple, mais également des analyses à la fois portées par des relations spatiales que des analyses qualitatives ou quantitatives stockées sous forme de tables. Les données géographiques peuvent être représentées grâce à un fichier forme ou par une image matricielle. De plus, l'utilisation de données géologiques, géotechniques, hydrologiques et géomorphologiques à larges échelles, permet une évaluation de l'aléa lorsque les infrastructures sont trop nombreuses pour accéder à une étude géotechnique site par site (Kiremidjian et al., 2007).

Le projet SIG le plus connu concernant l'évaluation du risque sismique est la méthode Hazus (FEMA, 2012). La méthode Hazus intègre l'amplification, les mouvements gravitaires et la liquéfaction des sols à l'étude de la vulnérabilité des ponts ainsi qu'à celle des bâtiments pour estimer des probabilités de dommages pour un ensemble d'ouvrages. Cette méthode est basée sur le jugement d'expert. En effet, des courbes de capacité sont évaluées pour différents modèles d'ouvrages d'art (ou de bâtiments), en fonction du type de structure de l'ouvrage, tel qu'un pont à travée simple ou à travées multiples, en acier ou en béton. Ces courbes de capacité couplées à la demande en déplacement permettent l'obtention d'une fonction de vulnérabilité avec différents niveaux de dommages dépendamment de l'accélération du sol. Ces fonctions sont ensuite converties en courbes de fragilité qui fournissent des probabilités de dommages en fonction de l'accélération spectrale (FEMA, 2012; Nollet, 2004).

En ce qui concerne les effets de site, l'amplification est prise en compte pour l'évaluation des dommages, mais la méthode ne propose toutefois pas de marche à suivre pour procéder au microzonage. Pour les mouvements gravitaires, la méthodologie utilisée par la méthode Hazus

(FEMA, 2012) conjugue des indices déterminés grâce à des caractéristiques hydrogéologiques, géologiques et topographiques, qui peuvent être favorables ou défavorables aux sites; avec des probabilités d'enclenchement de mouvements gravitaires, fonction de l'accélération maximale au sol et de la magnitude du séisme. Cette méthode permet de calculer une probabilité de déclenchement de glissement de terrain (FEMA, 2012).

Pour la liquéfaction, la méthode Hazus n'est pas non plus qualitative ou indicielle. Elle évalue une probabilité de liquéfaction en fonction de la magnitude, de l'accélération maximale au sol, de la profondeur de la nappe phréatique et de l'indice de susceptibilité relié à la géologie. De plus, pour l'épandage latéral, un déplacement est également calculé en fonction des mêmes précédents paramètres. Toutefois, la méthode Hazus s'inspire fortement de la classification par niveau de susceptibilité de Youd et Perkins (1978). La classification géologique y est identique, mais la prise en compte de la hauteur de la nappe phréatique diffère.

En Europe, le projet SERGISAI (Zonno et al., 2003) et le projet ELER du groupe de recherche NERIES (Erdik et al., 2010) relèvent le même défi d'évaluation du risque sismique sur plateforme SIG. Comme Hazus (FEMA, 2012; Kircher et al., 2006), ces méthodes permettent de calculer des probabilités de dommage pour un ensemble d'ouvrage selon un événement sismique. En effet, elles n'évaluent pas la vulnérabilité sismique d'un ouvrage d'art donné, mais la vulnérabilité pour un ensemble de construction, sur un certain domaine.

Dans le domaine spécifique de quantification des effets de site sur une plateforme SIG, on peut citer notamment les travaux de Theilen-Willige (Theilen-Willige, 2010; Theilen-Willige et Burnett, 2011) et ses collaborateurs Pararas-Carayannis et al. (2011) qui intègrent également les données satellitaires comme outil d'évaluation. Ces méthodes évaluent l'amplification ou la susceptibilité aux effets induits grâce aux données de modèles numériques de terrain (SRTM ou ASTER) et de données de télédétection LANDSAT que l'on peut télécharger gratuitement sur le web. Cela permet d'obtenir une première estimation des susceptibilités à un faible coût. En ce qui concerne l'amplification, Wald et Allen (2007) utilisent le modèle numérique de terrain afin d'en évaluer la susceptibilité. Plus récemment, Karimzadeh et al. (2017) intègrent

des informations de natures géologiques en plus des données satellites, c'est ce que l'on appelle les méthodes hybrides.

Au Canada et plus particulièrement dans la province du Québec, des études sur les effets d'amplification ont été effectuées pour les villes de Québec (Leboeuf et Nollet, 2006; Michaud, 2004), Montréal (Chouinard et Rosset, 2012), Ottawa et Gatineau (Hunter et al., 2010; Motazedian et al., 2011), ainsi que pour les vallées du Saint-Laurent et d'Ottawa pour ce qui a trait à l'amplification sismique (Nastev et al., 2016a; Nastev et al., 2016b). Ces dernières requièrent une connaissance détaillée de l'épaisseur des différentes couches géologiques alors que la méthodologie de l'étude présentée dans le cadre de cette thèse permet une évaluation à l'échelle locale en prenant en compte uniquement la géologie de surface et l'épaisseur de l'ensemble des dépôts meubles. L'hypothèse qu'à l'échelle régionale, les sites ayant la même géologie de surface auront une colonne sédimentaire approximativement similaire est également utilisée pour l'est Canadien par Braganza et al. (2016). Toutefois leur modèle ne prend en considération que quatre types de géologie en surface alors que dans cette étude douze types de géologie sont considérés.

En ce qui concerne les mouvements gravitaires, Van Westen et al. (2008) ont montré, grâce aux données de télédétection, le lien entre séisme et glissements de terrain. Très récemment, Quinn et Zaleski (2015) ont essayé de déterminer une valeur seuil de l'accélération maximale au sol (AMS) qui déclencherait les glissements de terrain dans les argiles Champlain de l'est du Canada. Toutefois, les données n'ont pas été concluantes. D'autres études plus récentes (Feizizadeh et al., 2017; Feizizadeh et al., 2014; Gheshlaghi et Feizizadeh, 2017; Pourghasemi et al., 2013) proposent une analyse multicritère basée sur les données disponibles reliées aux mouvements gravitaires. Ces données sont ensuite comparées à un inventaire pour procéder à une analyse de régression afin d'obtenir une équation prédictive de la susceptibilité aux mouvements gravitaires.

Pour les Basses-Terres du Saint-Laurent, Quinn (2009) a évalué la susceptibilité aux glissements de terrain par une régression multiple, en considérant huit types de géologie, le modèle numérique de terrain, l'utilisation des sols et l'épaisseur des dépôts meubles. Cette

approche a été ensuite validée par un inventaire de glissements de terrain extrait par des photos aériennes et par une revue de la littérature. Par la suite, le modèle de susceptibilité aux glissements de terrain a été appliqué à l'évaluation d'infrastructures linéaires telles que les chemins de fer, les autoroutes et les pipelines. L'approche utilisée dans le cadre de cette étude vise à caractériser la susceptibilité aux glissements de terrain en s'appuyant sur le jugement d'experts ayant travaillé pour le projet Hazus et est adaptée à la spécificité de la région d'étude en prenant en compte la grande fragilité des argiles marines dite de Champlain. Les données géologiques sont extraites d'une étude très récente qui identifie douze principales lithologies pour la zone d'étude (Parent et al., 2018). L'approche utilisée sera également comparée à l'inventaire produit par Quinn (2009) afin de valider la méthodologie.

L'évaluation par les méthodes indicielles du risque sismique des infrastructures est très répandue (Basöz et Kiremidjian, 1995; Davi et al., 2011; Kim, 1993; Kiremidjian et al., 2007; NYSDOT, 2002). Ces méthodes permettent la classification rapide des infrastructures en calculant un indice de risque sismique qui prend en compte à la fois l'aléa sismique et la vulnérabilité structurale de chaque ouvrage d'art grâce à l'identification de leurs déficiences structurelles face aux séismes. Dans ce contexte d'évaluation du risque sismique d'infrastructure, le facteur aléa est souvent relié à un paramètre unique, qui est souvent l'accélération maximale au sol (AMS) ou l'accélération spectrale pour une période donnée (Basöz et Kiremidjian, 1995; Coburn et Spence, 2002; Davi et al., 2011; Kiremidjian et al., 2007).

On peut également mentionner une méthode multicritère avec régression multiple, spécifique pour la vulnérabilité sismique des ponts de New York qui a été développée à l'université de New York par Kim (1993), reconnaissant l'intérêt de prendre en compte les effets induits tels que liquéfaction pour la vulnérabilité des ouvrages d'art. Cette méthode prend en compte notamment l'aléa sismique général sous forme d'AMS.

Comme décrit plus haut, c'est suite au séisme de San Fernando en 1971 que la première méthode indicielle d'évaluation sismique a vu le jour en Californie (Caltrans, 1992). Nous décrirons dans les prochaines sections brièvement certaines méthodes comme celle de

Caltrans, celle de New York (NYSDOT, 2002) et celle du SETRA en France (Davi et al., 2011).

1.5.2 Méthode Caltrans

La méthode Caltrans divise son analyse en deux niveaux. Le premier niveau traite de l'activité sismique de la région et de l'aléa. Le second niveau analyse l'impact du pont sur le réseau et la vulnérabilité de l'ouvrage d'art. Le score total maximum de vulnérabilité d'un pont est de 1.0 pour un ouvrage très vulnérable et de 0 pour un ouvrage peu vulnérable.

Les critères traitant du 1^{er} niveau sont normalisés pour un maximum de 1.0. En revanche, l'impact sur le réseau a un peu moins d'influence et est normalisé par un indice de 0.6, ainsi que de 0.4 pour la vulnérabilité de l'ouvrage.

L'activité sismique peut varier de faible à modérée. L'aléa sismique est composé des conditions du sol (amplification selon le NEHRP), de l'accélération maximale du sol (AMS) et de la durée sismique (selon la magnitude). Les glissements de terrain et la liquéfaction sont également pris en compte, mais non les chutes de blocs. Une mise à jour de la méthode en 2009 (Knudsen et al., 2009) a permis d'inclure la prise en compte de la liquéfaction dans la procédure d'évaluation. Elle prend en compte certains des éléments de la méthode utilisée par la méthode Hazus (FEMA, 2012) tel que l'âge et le milieu de dépôt. Elle considère également la proximité à un point d'eau, la hauteur de la nappe phréatique, l'altitude ou le fait que l'ouvrage enjambe une rivière ou non. Ces informations sont reliées à la magnitude et à l'accélération maximale du sol pour obtenir une susceptibilité à la liquéfaction.

1.5.3 Méthode NYSDOT

Le département des transports de l'état de New York évalue également la vulnérabilité sismique de ses ponts par une méthode indicielle. Elle leur attribue des notes de « un » à « six » où « six » est le moins vulnérable et un le plus vulnérable. La méthode est principalement divisée en 3 étapes (NYSDOT, 2002). Dans la première étape, un premier tri classe les

ouvrages d'art en 4 groupes, selon certaines caractéristiques structurales. Cette étape vise à prioriser l'évaluation du risque sismiques pour certains ouvrages d'art.

La deuxième étape, la classification est calculée pour des indices CS (*classification score*) allant de 0 à 100 où 100 est très vulnérable et 0 faiblement vulnérable. Le calcul se fait grâce à deux indices allant de 0 à 10 (voir équation (1.7) (NYSDOT, 2002) : le facteur de vulnérabilité structurelle V et la cote d'aléa sismique du site E.

$$CS = V \times E \quad (1.7)$$

Le coefficient E prend en compte l'aléa général selon un coefficient d'accélération sismique maximale (AMS) pour une probabilité de dépassement de 10 % en 50 ans (équivalent approximativement à une période de retour de 475 ans). Il considère également l'amplification selon quatre catégories de sol.

La vulnérabilité face à la liquéfaction est également prise en compte selon la susceptibilité du sol à la liquéfaction, la magnitude du coefficient d'accélération sismique maximale que nous décrivons plus tard et une vulnérabilité intrinsèque à l'ouvrage face à la liquéfaction.

On peut mentionner que le facteur de vulnérabilité structurelle prend en compte la vulnérabilité face à la rupture des culées (suite à un tassement) selon deux conditions : le pont traverse un cours d'eau comme obstacle et la capacité du tassement différentiel peut atteindre 15 centimètres.

La dernière étape prend en compte l'impact de l'activité du pont sur le réseau routier selon le trafic journalier et le réseau d'appartenance de l'ouvrage tel qu'une autoroute, une artère principale ou une route liée au réseau municipale (NYSDOT, 2002).

1.5.4 Méthode SETRA

La méthode d'évaluation française SETRA (Davi et al., 2011), est également une méthode d'évaluation préliminaire du risque sismique des ouvrages d'art. Elle aboutit à un classement de la susceptibilité des ouvrages qui a pour but d'identifier une valeur de risque de dommage probable. De plus, elle a la particularité de considérer les déplacements transitoires comme les déplacements permanents. C'est pourquoi cette approche peut être un bon exemple pour quantifier les risques liés à l'influence du sol sur la vulnérabilité d'un ouvrage.

La méthode SETRA évalue le risque selon les phénomènes suivants:

- accélération du sol;
- liquéfaction;
- glissement de terrain;
- chute de blocs.

Ainsi, la méthode SETRA travaille sur quatre indices de vulnérabilité liés à chacun des phénomènes décrits précédemment, tel que

- V_{vib} vulnérabilité au phénomène vibratoire;
- V_{liq} vulnérabilité à la liquéfaction;
- V_{gliss} vulnérabilité aux glissements de terrain;
- V_{blocs} vulnérabilité aux chutes de blocs.

Amplification :

La vulnérabilité vibratoire, fonction des caractéristiques structurales de l'ouvrage, permet d'établir une valeur d'accélération critique. Celle-ci peut ensuite être comparée à l'accélération vibratoire du sol (Davi et al., 2011). La méthode permet par la suite de quantifier le risque

selon le rapport entre l'accélération critique (a_{crit}) de l'ouvrage et l'accélération vibratoire (a_{vib}) du sol selon l'équation (1.8).

$$R_{vib} = 0.703 \ln \left(\frac{a_{vib}}{a_{crit}} \right) + 0.5057 \quad (1.8)$$

Phénomènes induits :

L'indice de vulnérabilité V lié à la liquéfaction dépend uniquement du type de fondations. Les fondations profondes (> 10 mètres) diminuent la vulnérabilité tandis que des fondations superficielles l'augmentent. Pour l'indice de vulnérabilité lié aux glissements de terrain, c'est également le type de fondation qui est déterminant, mais de manière plus précise en incluant l'hypothèse de pieux tubés ou non tubés. Enfin pour les chutes de blocs l'indice va dépendre du type de pont (cadre, portique, travées continues ou indépendantes ou encore maçonnerie), du type de piles (cinq classes de piles ainsi que l'épaisseur de la dalle ou l'épaisseur et le nombre de colonnes), du type de tablier et du type de protection aux chutes de blocs (grillage, écran, fosse, etc.).

La méthode SETRA évalue l'aléa de l'ensemble des phénomènes induits par une même formule (équation. (1.9) tel que :

$$Aléa = 0.703 \ln \left(\frac{a_{vib}}{a_{crit}} \right) + 0.5057 \quad (1.9)$$

Où a_{vib} = accélération du sol et a_{crit} à l'accélération critique qui déclenchera le phénomène induit. L'enjeu de ce travail sera de définir des indices appropriés, à partir des caractéristiques géotechniques du sol pour établir une bonne estimation des ouvrages pouvant être les plus endommagés suite à un séisme.

1.5.5 Méthode d'évaluation du Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec

A) Définition de l'aléa sismique et de l'amplification selon le CNBC

Dans le contexte de cette étude on s'intéresse à la définition de l'aléa sismique sous forme de cartes géo-référencées. L'aléa sismique, tel que défini dans la méthode du MTMDET, considère comme variable l'accélération maximale au sol (AMS) et calcule un indice à partir de cette accélération (AMS) (Lemaire, 2013). Ces données sont fournies par Ressources Naturelles Canada sous forme de fichiers ouverts (Halchuk et al., 2015) et servent de base pour les calculs reliés au code national du bâtiment du Canada (IRC-CNRC, 2015a).

La dernière version du code considère une période de retour de 2475 soit une probabilité de dépassement de 2% en 50 ans. Plus la période de retour est grande, moins l'évènement le plus grand pris en considération aura de chance de se produire. Ces périodes de retour sont généralement exprimées par une probabilité de dépassement sur un intervalle de temps de 50 ans, selon la formule (1.10):

$$P(n)=1-e^{-\lambda n} \quad (1.10)$$

Où l'indice n , est généralement 50, par exemple la dernière carte compte une probabilité de dépassement de 2% en 50 ans et λ est l'inverse de la période de récurrence. Les nouvelles cartes sont basées sur un spectre d'accélération uniforme pour un site de référence de catégorie d'emplacement sismique C (vitesse moyenne des ondes de cisaillement entre 360 et 760 m/s) pour tout le Canada (Allen et al., 2015; IRC-CNRC, 2015b).

Ces spectres d'aléa uniforme sont produits sur la base d'évènements sismiques passés, de grandes ampleurs (de magnitude supérieure à 4.75), combinés aux principales zones où la géologie pourrait être susceptible d'enclencher de nouveaux séismes pour la 4^{ème} génération, code 2005 et 2010 (Adams et Atkinson, 2003; Allen et al., 2015). Pour la région d'étude c'est-à-dire la partie sud est du pays, la 5^{ème} génération (version 2015) utilise une mise à jour du

modèle historique (H) ainsi que du modèle sismotectonique régional (R), selon un modèle hybride qui pondère les contributions de ces derniers selon l'échelle locale ou régionale (Adams, 2011; Halchuk et al., 2015). De plus, les équations de prédiction des mouvements sismiques du sol sont plus nombreuses afin de mieux s'adapter aux spécificités géologiques qui conduisent à la propagation des ondes (Adams, 2011; Allen et al., 2015; Atkinson et al., 2014).

La Commission géologique du Canada (Ressources Naturelles Canada) met à disposition plusieurs cartes d'aléa sismique utilisant les données spectrales du CNBC. Ces cartes sont disponibles pour les accélérations spectrales à des périodes de 0.05s, 0.1s, 0.2s, 0.3s, 0.5s, 1s, 2s, 5s et 10s ainsi que pour l'accélération maximale au sol (AMS ou Peak Ground Acceleration, PGA) ainsi que la vitesse maximale du sol (VMS ou Peak Ground Velocity PGV) (Halchuk et al., 2015). La Figure 1.13 présente la carte d'AMS pour une période de retour de 2% en 50 ans.

Le choix de la carte utilisée sera donc fonction de l'usage que l'on voudra en faire, selon la période fondamentale d'une structure. Celle-ci peut soit être mesurée sur l'ouvrage d'art grâce aux mesures de vibrations ambiantes (MVA ou HVSR en anglais), soit par analyse modale d'un modèle numérique. Lorsque plusieurs ouvrages sont concernés et que leur période spécifique n'est pas connue, l'aléa peut être qualifié par un paramètre unique tel que l'accélération spectrale à 0.3 sec ou à 1.0 sec (Porter, 2009), ou l'AMS (Basöz et Kiremidjian, 1995; Coburn et Spence, 2002; Kim, 1993; Kiremidjian et al., 2007; NYSDOT, 2002). Cette valeur correspond, sur le spectre uniforme d'accélération, à l'accélération pour la plus faible période (Figure 1.14). L'AMS pour la région d'étude varie entre 0.2g et 0.4g.

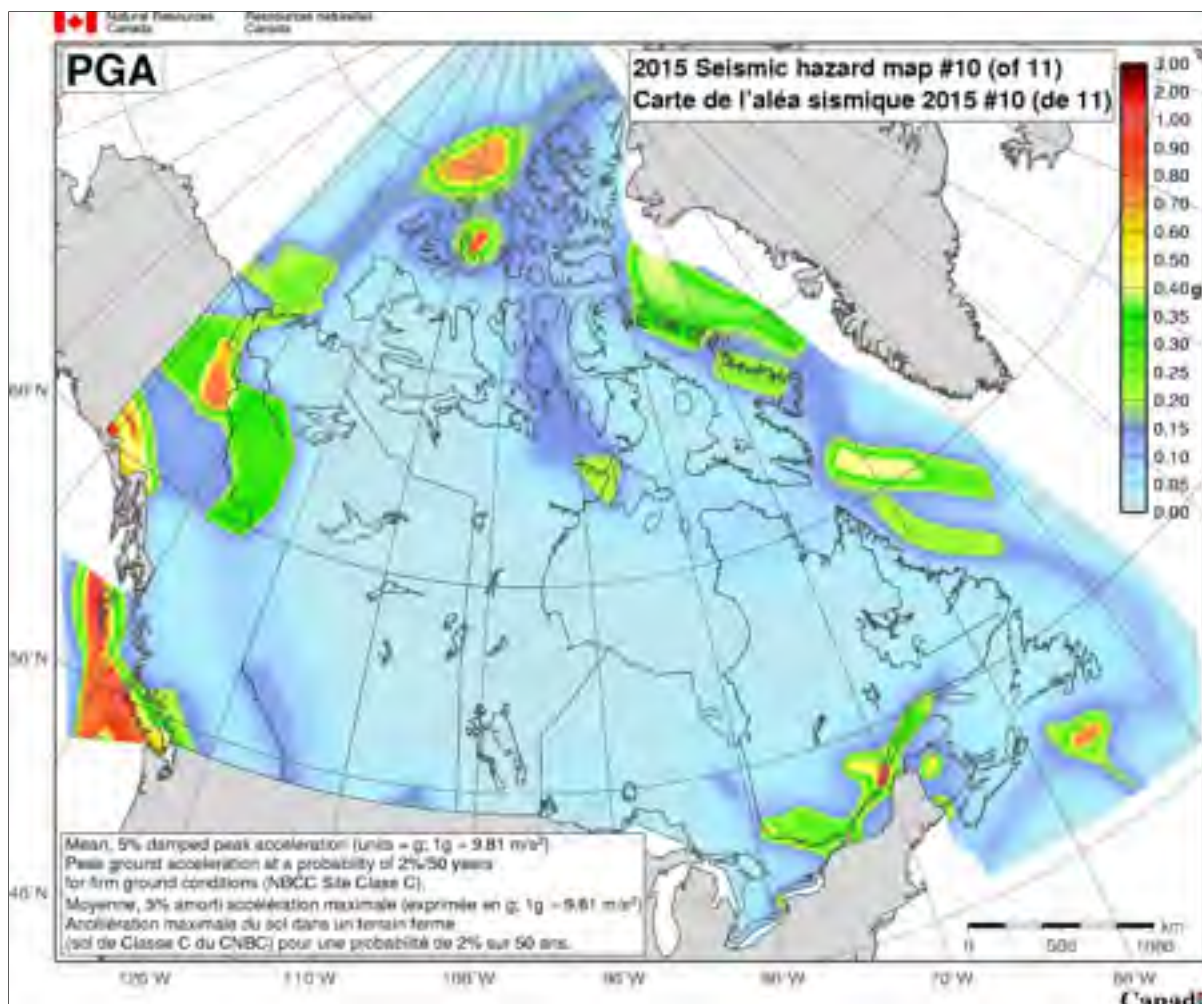


Figure 1.13 Carte de l'accélération maximale (AMS ou PGA) du sol pour une période de retour de 2500 ans
Tirée de Gouvernement du Canada (2015)

La Figure 1.14 présente le spectre de réponse de calcul pour un emplacement sismique de référence de catégorie C pour la ville de Montréal. Le spectre de calcul se définit par deux phases : la première correspond à un plateau supérieur pour $T \leq 0.2s$ où l'accélération spectrale (S_a) est constante, la deuxième est la phase où la vitesse est constante et que l'accélération décroît. Une dernière phase correspond à un déplacement constant non visible sur le spectre de calcul pour des périodes très longues. Un facteur F est utilisé en fonction des périodes et de l'AMS pour calculer les valeurs d'accélération spectrales amplifiées pour les différentes catégories d'emplacement sismique (IRC-CNRC, 2015a). On peut noter que l'AMS est

légèrement plus faible que les valeurs du spectre. En effet, le CNBC simplifie les spectres de réponse pour des périodes faibles en définissant un plateau supérieur. En réalité, l'accélération spectrale augmente depuis l'AMS jusqu'à des valeurs supérieures au plateau puis diminue pour venir rejoindre le spectre de réponse de calcul du CNBC (IRC-CNRC, 2015a).

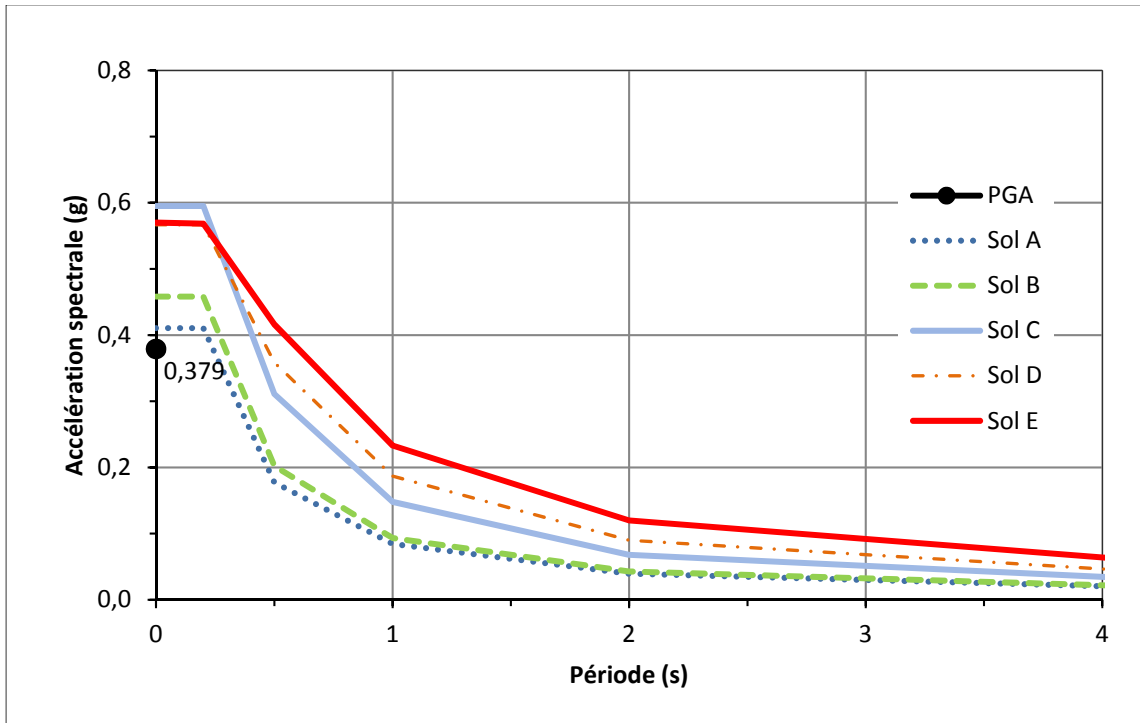


Figure 1.14 Exemple de spectre de réponse de calcul du CNBC2015 pour la ville de Montréal
Adaptée de Halchuk et al. (2015)

À une échelle plus locale, les types de sol en présence peuvent atténuer ou amplifier les ondes sismiques. Le CNBC décrit les sites selon 6 catégories d'emplacements sismiques : A étant la roche la plus compacte qui généralement atténue les ondes et E la plus meuble, celle qui pour la plupart des périodes amplifie les ondes (ANNEXE I). La catégorie F quant à elle, nécessite une étude géotechnique détaillée (ANNEXE I).

Les catégories d'emplacements sismiques des sites dépendent de la vitesse de cisaillement des ondes sismiques dans les trente premiers mètres (Finn et Wightman, 2003). Cette

caractéristique du site peut être également décrite par la résistance moyenne à la pénétration généralement utilisé pour des sols sableux ou par la résistance du sol non drainé au cisaillement pour les sols argileux (IRC-CNRC, 2015a) (ANNEXE I). On peut mentionner que l’amplitude du séisme en soi va également faire varier la réponse locale, mais dans une perspective d’évaluation d’ouvrages, ce sont l’AMS et les catégories sismiques qui seront prises en compte dans cette étude.

Ainsi, le spectre d’accélération peut être amplifié ou atténué en fonction de la catégorie d’emplacement sismique du site (Figure 1.14). Il est à noter que pour des périodes très courtes (0.2s), les catégories d’emplacements sismiques D et E peuvent parfois atténuer les ondes sismiques plutôt que les amplifier par rapport au site de référence C (voir Figure 1.14). De plus, on peut mentionner que pour des périodes encore plus courtes de l’ordre de 0.05s, la roche dure, c’est-à-dire de catégorie d’emplacement A, de l’est du Canada amplifie légèrement les ondes. En effet, il semblerait qu’elle permette à une plus grande quantité d’énergie de courte durée de se déplacer vers la surface plutôt que d’être amortie ou dispersée (IRC-CNRC, 2015b).

Tableau 1.1 Valeurs de F selon la catégorie d’emplacement sismique
pour une période de 0.2s
Tiré du Tableau 4.1.8.4.-B IRC-CNRC (2015a)

| Catégorie d’emplacement | Valeurs de F (0.2) | | | | |
|----------------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| | $PGA_{ref} \leq 0.1$ | $PGA_{ref} = 0.2$ | $PGA_{ref} = 0.3$ | $PGA_{ref} = 0.4$ | $PGA_{ref} \geq 0.5$ |
| A | 0.69 | 0.69 | 0.69 | 0.69 | 0.69 |
| B | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.77 |
| C | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| D | 1.24 | 1.09 | 1 | 0.94 | 1.9 |
| E | 1.64 | 1.24 | 1.05 | 0.93 | 0.85 |
| F | * | * | * | * | * |

*Une évaluation spécifique à l’emplacement est exigée

B) Principe de la méthode d'évaluation du MTMDET

Le MTMDET quantifie le risque lié au tremblement de terre par la combinaison d'un indice de vulnérabilité sismique (IVS), et d'un indice socio-économique (ISE) (Figure 1.15). Le premier évalue la vulnérabilité relative de l'ouvrage en fonction de ses caractéristiques et déficiences structurales et le second évalue la valeur d'un pont et les conséquences de sa perte sur le réseau de transport (Lemaire, 2013). Ces indices varient de 0 à 100 où un indice élevé signifiera une vulnérabilité ou une valeur socio-économique forte et un indice faible une vulnérabilité sismique ou une valeur socio-économique faible. Ainsi, un ouvrage prioritaire se situera dans le quadrant I car son indice IVS et son indice ISE seront élevés, tandis qu'un ouvrage peu vulnérable, et à faible importance socio-économique se situera dans le quadrant IV (voir Figure 1.15).



Figure 1.15 Quadrant utilisé par le MTMDET pour la gestion des risques
Tirée de Lemaire (2013)

La première version de la méthode d'évaluation de la vulnérabilité sismique des ouvrages d'art du MTMDET a été développée en 1995 (MTQ, 1996). Elle s'inspirait très fortement de la méthode développée par Tinawi et al. (1993b) (ANNEXE II). Adaptée en 2009 par Hida (2009) pour les ponts de la ville de Québec, sa version la plus récente a été proposée en 2013 (MTQ2013) par Lemaire (2013). L'IVS se compose du produit de coefficients structuraux relatifs aux composantes du pont $V_{\text{vulnérabilité}}$, ainsi que du produit d'un facteur lié à l'aléa $F_{\text{aléa}}$, et d'un facteur lié aux conditions d'amplification spécifique au site F_{site} , tel que donné par l'équation (1.11):

$$IVS_{MIQ2013} = (F_{aléa} \times F_{site}) \times V_{vulnérabilité} \quad (1.11)$$

Le facteur $F_{aléa}$ varie de 1 à 2.5 et le facteur F_{site} varie de 1 à 1.25. Le facteur F_{site} n'est toutefois pas pris en compte systématiquement et suite au manque d'information, il est souvent approximatif ou évalué par une approche trop conservatrice. De plus, lorsque de l'information précise permet de détecter une forte probabilité de liquéfaction, le coefficient F_{site} prend une valeur de 10.

La vulnérabilité structurelle quant à elle dépend de la vulnérabilité générale du pont, de la vulnérabilité de la superstructure, et de la vulnérabilité de l'infrastructure, elle peut varier de 1 à 32 (1.12) :

$$V_{vulnérabilité} = V_{générale} \times (C^{ste} + V_{superstructure} + V_{infrastructure}) \quad (1.12)$$

Où :

C^{ste} représente une constante qui permet aux ponts bien conçus de se retrouver avec un indice sous les 50, même s'ils sont situés sur un site avec $F_{aléa}$ et F_{site} élevés; $V_{générale}$ représente la vulnérabilité générale comprenant l'endommagement du pont, son âge et son type de structure; et $V_{superstructure}$ la vulnérabilité liée au tablier et aux appuis. $V_{infrastructure}$ dépend de la valeur maximum entre la vulnérabilité des culées ($V_{culée}$) et celle des piles (V_{piles}). La vulnérabilité des piles et des culées sont respectivement dépendantes de la géologie du site, du type de fondations et du type de culées ou de piles (Lemaire, 2013) (voir ANNEXE II).

On note que pour la vulnérabilité des piles et des culées, un coefficient C_{sol} qui définit la susceptibilité du sol à un tassement ou à la liquéfaction est déjà pris en compte de façon qualitative. Par contre, comme pour le facteur F_{site} , la base de données ne possède pas le moyen d'assigner de façon systématique un coefficient pour chaque ouvrage. De plus, ce coefficient ne considère que quatre indices de susceptibilité (Lemaire, 2013) allant de 0 à 1, définis selon

la nature géologique du site et le code Canadien de calcul sur les ponts routiers (CAN/CSA, 2006).

1.5.6 Définition des facteurs et coefficients principaux pour les méthodes indicielles

La plupart des méthodes indicielles considèrent les trois composantes du risque dans leur évaluation (aléa, vulnérabilité et valeur des éléments exposés)(UNDRO, 1991) (1.13).

$$\text{Risque sismique} = \text{aléa} \times \text{vulnérabilité} \times \text{valeur des éléments exposés} \quad (1.13)$$

En revanche la prise en compte des effets induits n'est pas systématique. La méthode du MTMDET prend en considération le phénomène de liquéfaction lorsque des données sur le type de site sont disponibles, mais elles ne le sont que rarement. La nouvelle approche considérera également l'aléa sismique lié aux glissements de terrain et chutes de blocs. Ils seront classés selon six niveaux de susceptibilité.

Le facteur aléa, comme vu précédemment, prend souvent en compte l'aléa sismique général et l'amplification locale. L'aléa sismique générale peut être fonction de l'accélération maximale au sol (AMS), de l'accélération à une période donnée : ex. $S_a(0.2s)$, de l'intensité ou encore de la distance à une faille. S'il est vrai que certaines études (Xu et al., 2012; Xu et al., 2013) démontrent que la distance à une faille joue un rôle plus fort dans le déclenchement des glissements de terrain que l'AMS; dans un contexte de prise en compte de la vulnérabilité sismique des infrastructures, c'est l'AMS qui présente une meilleure corrélation avec des dommages (Basöz et Kiremidjian, 1995; Coburn et Spence, 2002; Kiremidjian et al., 2007; Tinawi et al., 1993b; Van Westen et al., 2008). Cette étude prend en compte l'aléa général par le calcul d'un indice basé sur la définition de l'AMS selon Halchuk et al. (2015).

La vulnérabilité structurale face à ces phénomènes induits ne sera toutefois pas traitée dans ce projet, mais des recommandations notamment provenant de la méthode SETRA (Davi et al., 2011) pourront être mentionnées.

1.6 Réseaux routiers et évaluation de la valeur des éléments exposés

1.6.1 Indice socio-économique

La valeur d'un ouvrage d'art et l'impact de sa perte sur le réseau routier constitue un facteur important de gestion du risque. Pour la direction des structures et le MTMDET (Service de la sécurité civile: Transports Québec, 2008), un indice socio-économique a déjà été défini en appui à la méthode d'évaluation de la vulnérabilité des ouvrages d'art. Celui-ci prend en compte les facteurs énumérés dans la liste suivante :

- valeur à neuf de l'ouvrage;
- indice patrimonial des structures;
- détour;
- débit journalier moyen annuel;
- présence de services publics (gaz, électricité, eau, etc.);
- réseau d'appartenance (autoroute, route municipale, passage pour piéton);
- réseau d'obstacle (cours d'eau, autoroute, route municipale, passage pour piéton).

1.6.2 Facteurs liés à la valeur des éléments exposés pour les ouvrages d'art

La présente étude tentera d'évaluer le temps supplémentaire à un certain nombre de véhicules pour se rendre d'une entrée d'autoroute proche d'une école à un hôpital situé dans la ville de Québec suite à un scénario de séisme et à l'effondrement partiel de certains ouvrages. L'effondrement partiel des ouvrages d'art sera pris en compte à travers l'hypothèse qu'une des voies ou deux des voies de l'autoroute seront fermées à la circulation. Ce dernier chapitre (CHAPITRE 8) servira d'illustration d'une part, à l'utilisation des indices de risques sismiques et d'autre part à l'utilisation d'un logiciel de modélisation du trafic routier. Cette composante pourrait venir compléter l'ISE déjà existant.

Dans un cadre plus général, Kiremidjian et al. (2007) proposent de calculer la valeur d'un ouvrage d'art selon les coûts financiers de sa perte ainsi que par sa distance de détour dans le

cadre d'évaluation du risque sismique des ouvrages d'art pour la baie de San Francisco. La méthode Caltrans dans sa deuxième étape d'évaluation du risque des ouvrages d'art, prend également en compte l'impact socio-économique de manière très similaire à la procédure du MTMDET. De plus, des programmes d'aide à l'évacuation routière sont développés, tel que celui développé par Cova et Johnson (Cova et Johnson, 2003). Pour la ville de Montréal, un plan d'évacuation suite à un scénario sismique a été élaboré, pour les quartiers les plus vulnérables en prenant en compte la vulnérabilité des bâtiments, la démographie, les infrastructures routières ainsi que les infrastructures dites sensibles tels que les hôpitaux, les services d'incendies, les postes de police ou encore les barrages, les usines de traitements des matériaux dangereux (Tamima, 2016; Tamima et Chouinard, 2012; 2016). D'autres études prennent également en compte le niveau de vie des habitants des quartiers à évacuer, mettant notamment en avant la classe sociale et l'état de santé général des personnes concernées (Chakraborty et al., 2005; Chou et al., 2004; Cutter et al., 2003).

1.7 Conclusions

Ce chapitre a d'abord décrit le contexte général de cette étude avec les enjeux de la cartographie des effets de sites pour la région d'étude et de leur intégration dans l'évaluation de la vulnérabilité sismique des ouvrages d'art. Il a également décrit succinctement les méthodes d'évaluations traditionnelles site par site de l'amplification, de la liquéfaction et des mouvements gravitaires, puis les méthodes généralement utilisées sur les plateformes d'information géographique. Des exemples de l'évaluation du risque sismique des ouvrages d'art et de la prise en compte des effets de site dans ces dernières ont également été décrites, afin de mieux juger de la pertinence de la méthodologie. Une description des facteurs liés à la prise en compte de la valeur des éléments exposés est également proposée afin d'ajouter un nouvel élément lié au retard de véhicules circulant sur une autoroute si celle-ci voit une ou deux de ces voies fermées à la circulation. Le but de cette dernière démarche est d'illustrer comment les données sur les ouvrages d'art peuvent être utilisées dans le cadre d'une étude préventive plutôt que réactive concernant le risque sismique de ces ouvrages.

CHAPITRE 2

CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET PHYSIOGRAPHIQUE DE LA RÉGION D'ÉTUDE

Ce chapitre décrit la nature du socle rocheux et des différents types de dépôts présents dans la région d'étude. Il explique également les processus de traitements nécessaires aux différentes bases de données, afin d'obtenir les informations pertinentes utilisées lors de la production des cartes finales concernant l'amplification, la liquéfaction et les mouvements gravitaires.

Ces bases de données sont de natures géographiques, connectives, quantitatives ou simplement qualitatives. Elles peuvent être représentées sous forme de tables, de graphiques ou d'images grâce à leurs coordonnées géographiques. La plateforme SIG en elle-même propose différents types d'entités géographiques. Parmi elles les plus importants formats d'affichages sont d'une part, les fichiers formes (shapefiles) et d'autre part les fichiers raster composés d'images pixelisées. Les fichiers formes sont eux divisés en trois catégories: points, polygones et lignes.

Toutes les cartes sont projetées en NAD_1983_UTM_18N, ce qui permet une projection avec des unités en mètre. Cette projection cylindrique transverse, appelée Mercator transverse, est très utilisée en Amérique du Nord, notamment par le service géologique des États-Unis. Le fuseau 18N correspond à un méridien central à 75° ouest. Il permet une bonne projection des sites de 72° à 78° ouest, correspondant à la majeure partie de la région d'étude. L'ellipsoïde de référence du NAD83 correspond au système de référence géodésique 1980 (GRS80).

2.1 Géologie du socle rocheux

La région du sud-est du Québec est dominée par trois régions géologiques : les Appalaches à l'est, les Basses-Terres du Saint-Laurent le long du fleuve Saint-Laurent, et enfin à l'ouest la province de Grenville faisant partie du bouclier Canadien (Figure 2.1) (Lavoie, 2008).

Le bouclier Canadien domine la géologie du Québec et est constitué des plus vieilles roches de la région. Il se compose d'abord de roches ignées datant du Précambrien (voir ANNEXE IV), appartenant à l'ancien supercontinent Rodinia. Entre 1500 et 900 millions d'années, une chaîne de montagne de hauteur comparable à l'Himalaya s'est formée causant de grandes zones de déformations et du métamorphisme encore visible aujourd'hui. Ainsi les roches de la province de Grenville sont composées de roches ignées et métamorphiques (principalement de granite et de gneiss) datant de près d'un milliard d'années (Fensome et al., 2014). Par la suite, le passage des multiples glaciers a remodelé la topographie, et déposé des blocs rocheux, graviers et silts typiques des paysages glaciaires (Nastev et al., 2016a; Rocher et al., 2000).

Vers la fin du Précambrien et du début du Cambrien (540 millions d'années), un rift s'est formé au milieu de cette chaîne de montagne et a fait petit à petit place à un océan, le Iapetus. Il divise le supercontinent Rodinia en Laurentie et proto-Gondwana (Fensome et al., 2014). Des sédiments se sont déposés ainsi sur la plateforme continentale du Cambrien à l'Ordovicien et forment ce que l'on appelle aujourd'hui les Basses-Terres du Saint-Laurent. Ces dernières sont composées principalement de roches sédimentaires (carbonatées et siliciclastiques) du bassin d'avant pays (Nastev et al., 2016a; Rocher et al., 2000). De grandes villes comme Montréal y sont construites. Leur superficie est d'environ 29 000 km² (Ahmat, 2011) et elles sont traversées par de nombreuses failles normales actives jusqu'à la fin de l'Ordovicien. L'orientation de ces dernières était principalement est/ouest ou parfois nord-est/sud-ouest.

À la fin du Cambrien (début Ordovicien, il y a près de 500 millions d'années) le début de l'Orogénèse Taconienne forme au sud-est la chaîne de montagne des Appalaches qui s'étend de la péninsule gaspésienne jusqu'en Alabama aux États-Unis. Les roches des Appalaches sont composées de roches de bas métamorphisme provenant des sédiments d'eaux profondes de l'océan Iapetus avec des roches intrusives apparaissant au Crétacé. Ces dernières ont pris le nom de collines Montérégiennes. C'est vers la fin de l'Ordovicien, il y a 450 millions d'années qu'apparaît la faille Logan toujours active aujourd'hui, formée par le chevauchement de la Plate-forme du Saint-Laurent par les Appalaches. De nos jours, le promontoire de Québec, la plus grande partie de l'île d'Orléans et toute la rive sud du Saint-Laurent sont situés sur les

Appalaches (Nastev et al., 2016a; Rocher et al., 2000; Savard, 2013). Le relief accidenté de la ville de Québec l'une des plus grandes villes de la région amène toutefois des risques naturels, tels que chutes de blocs. En effet, l'inclinaison, parallèle à la pente, des couches sédimentaires du promontoire du cap Diamant a mené par deux fois (1841 et 1889) à des chutes de blocs causant le décès de plus de 70 personnes. Depuis 1775, 88 personnes ont trouvé la mort et 70 ont été blessées suite à des mouvements gravitaires. Aujourd'hui un muret de protection est érigé à la base du cap Diamant (Baillifard et al., 2004; Fensome et al., 2014).

Les données utilisées pour localiser les différents types de substrat rocheux proviennent d'un fichier de formes composé de polygones disponible sur le site « Geogratis » du gouvernement Canadien (Gouvernement du Canada, 2004b).

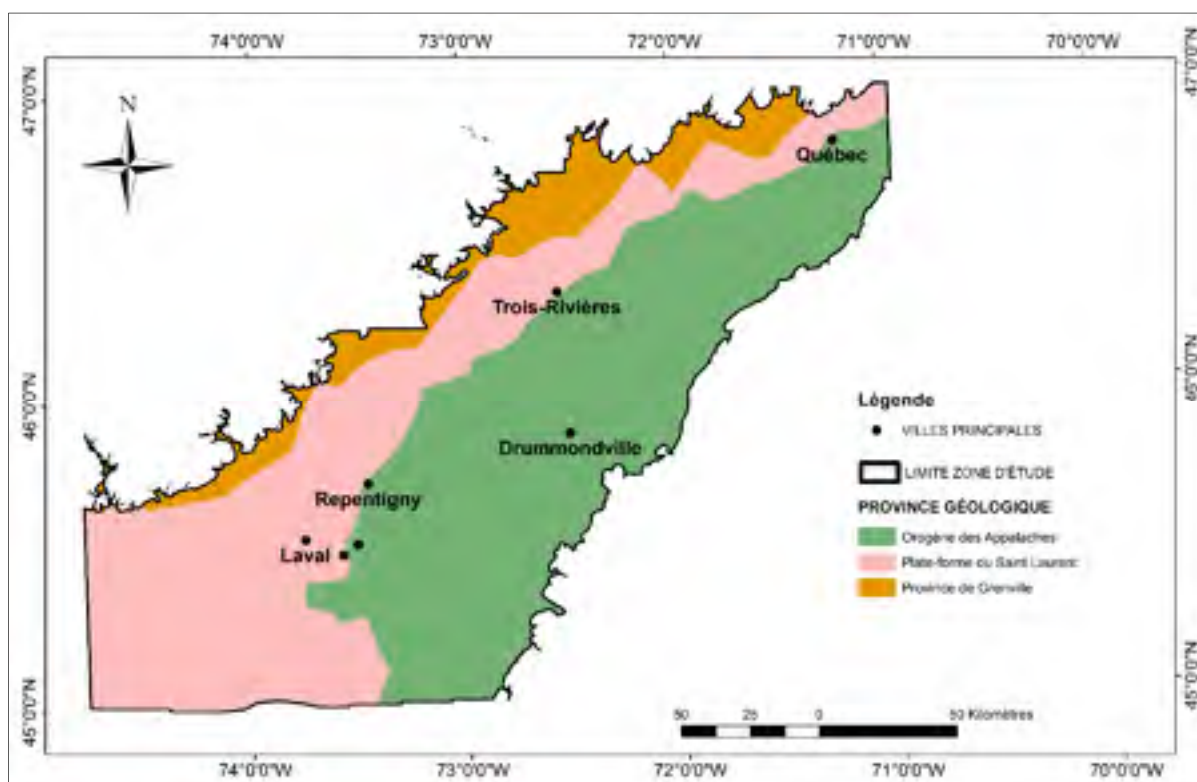


Figure 2.1 Carte de la région d'étude et des trois provinces géologiques pour les Basses-Terres du Saint-Laurent
Produites à partir des données du Gouvernement du Canada (2004b)

2.2 Géologie des dépôts meubles

Le dernier âge glaciaire, datant d'il y a 20 000 ans, a entièrement recouvert le Canada par le glacier Wisconsin, d'une épaisseur en son centre allant jusqu'à 5 km à la hauteur de la baie d'Hudson. Ainsi, la majorité des dépôts meubles du pays est composée de sédiments de bassins glaciaires et postglaciaires (Leroueil et al., 1983; Quigley, 1980). À la base de la colonne sédimentaire du quaternaire, on trouve surtout du till. Ces tills proviennent des trois avancées glaciaires Illinoien (300 000 à 130 000 ans), Sangamonien (130 000 à 80 000 ans) et Wisconsinien (de 80 000 à 10 000 ans) (Ross et al., 2006). Le till de Gentilly, principal till correspondant au dernier stade glaciaire dans la région d'étude, est composé d'une diamictite à matrice silto-sableuse ou silto-argileuse avec des blocs et des graviers (Nastev et al., 2016b; Russell et al., 2011). Il s'est retiré suivant une orientation nord-ouest en laissant des crêtes morainiques (Parent et Occhietti, 1988). Toutefois à certains endroits des eskers ont érodé la moraine pour venir se déposer sur le roc lors du retrait. Ainsi, on trouvera parfois des sédiments fluvioglaciaires ou des sédiments glaciolacustres à la base de la colonne ou entre deux types de till. De plus, dans certaines régions le till est parfois remanié ce qui diminue son niveau de compactage et ainsi sa résistance au cisaillement (Russell et al., 2011; Savard, 2013; Tremblay, 2008).

Ces eskers et ces tunnels sous-glaciaires se trouvent à de nombreux endroits dans la zone d'étude (Fransham et Gadd, 1977), tel qu'au nord-ouest de Montréal (Ross et al., 2006). Ces sédiments fluvioglaciaires sont composés de sables de toutes tailles et de graviers (Nastev et al., 2016b). Au fur et à mesure des retraits glaciaires, apparaissent des lacs proglaciaires. Lors de la dernière fonte glaciaire apparaissent deux lacs principaux, le lac Vermont et le lac Iroquois. Il y a environ 12,1 milliers d'années ces deux lacs se joignent pour former le lac Candona. Les sédiments glaciolacustres sont composés d'argiles d'eau douce et de silts; de sables et graviers pour les parties littorales (Parent et Occhietti, 1988; Tremblay, 2008).

La mer de Champlain est apparue il y a approximativement 12 000 ans jusque 10 000 ans, au front du glacier, là où se situe la Plate-forme du Saint-Laurent (Leroueil et al., 1983; Parent et

Occhietti, 1999; Quigley, 1980; Savard, 2013). Elle a progressivement envahi les plaines du Saint-Laurent et a déposé des argiles marines sur les dépôts glaciaires déjà présents. Elle inonde également le lac Candona, ainsi les argiles marines succèdent aux argiles d'eaux douces des lacs proglaciaires. Lors de l'inondation du lac Candona par la mer de Champlain, le niveau de l'eau chute de 60 mètres (Parent et Occhietti, 1988). Les argiles marines proviennent majoritairement des anciennes mers de Champlain pour les sédiments le long du fleuve Saint-Laurent et de l'Outaouais, de la mer Laflamme, pour ceux situés proches de la région du lac Saint-Jean, de la mer Goldthwait pour l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent jusqu'à Lévis et du lac Barlow-Ojibway pour ceux de l'ouest de la Province (Dionne, 1977; Leroueil et al., 1983; Quigley, 1980). Les sédiments littoraux de la mer de Champlain eux, sont majoritairement composés de sables et de graviers (Tremblay, 2008). La région d'étude se situe principalement sur les anciennes terres de la mer de Champlain. Les nombreux affluents de la mer et l'apport des glaciers ont causé un mélange entre sédiments d'eau douce et sédiments marins. Ces sédiments peuvent atteindre une épaisseur allant jusqu'à une centaine de mètres dans le centre du bassin de Basses-Terres du Saint-Laurent. La quantité des dépôts dépend principalement du volume de glace fondu, de la vitesse du rebond isostatique et de l'ouverture ou de la fermeture du bassin de drainage. Il y a 10 000 ans, la fonte partielle du glacier a créé un soulèvement du continent, ce qui a fait disparaître la mer de Champlain (Parent et Occhietti, 1988). Les argiles marines, de par leur salinité plus forte que les argiles d'eau douce, contiennent généralement plus de matières organiques, ces dernières conduisent à une activité microbienne qui modifie l'équilibre entre les sulfures et les bicarbonates, ce qui augmente la peptisation et diminue la résistance au cisaillement (Quigley, 1980); d'autre part leur forte teneur en eau (68%) en font une lithologie particulièrement sensible aux effets de site (Tremblay, 2008) surtout aux abords des berges là où il y a altération et fissuration (Lefebvre, 1986).

Suite au retrait de la mer de Champlain, vers 9800 ans, on trouve des silts d'origine lacustre du lac Lampsilis ancêtre du lac Saint-Pierre (Savard, 2013; Tremblay, 2008). Il apparaît également des sédiments alluviaux provenant du Proto-Saint-Laurent. Ces sédiments sont toujours en processus de dépôts car ils regroupent également le système fluvial actuel. Ils

sont composés de tills remaniés, d'argiles remaniées, de sables, de graviers et de silts. Ils peuvent atteindre plus de 10 mètres (Caron et al., 2014; Fransham et Gadd, 1977; Godbout, 2013; Tremblay, 2008).

On peut également apercevoir des sédiments organiques formés de tourbes ou de débris végétaux. Des études montrent que certaines de ces tourbières ont commencé à se former après le retrait de la mer de Champlain (Caron et al., 2014). Ces dépôts se forment dans les marais, les marécages, et aux abords des lacs. Leur épaisseur peut dépasser les quelques mètres et ces derniers sont particulièrement sensibles aux glissements de terrain (Fransham et Gadd, 1977). Aux sédiments organiques sont parfois reliés des sédiments éoliens (Filion, 1987; Tremblay, 2008). En effet, des dunes se sont formées par la déposition de sédiments éoliens entre 10 000 ans et 7 500 ans, lorsque le climat anticyclonique était sec et froid. Ces sédiments recouvrent les dépôts organiques, mais parfois ce sont les sédiments organiques qui apparaissent sur les dépôts éoliens, notamment dans les espaces protégés par les dunes. Il y a environ 7 500 ans, la fonte du glacier est suffisamment avancée pour qu'un climat chaud et humide s'installe sur la région et stoppe le processus de dépôt éolien (Filion, 1987).

En haut de la colonne sédimentaire, on peut parfois trouver des dépôts de versant, remaniés par des glissements de terrains. Ces derniers sont composés de silts et d'argiles remaniées. Situés aux pieds d'amphithéâtre ou de gradin, témoins d'anciens glissements de terrain, ils sont surtout reconnaissables par leur aspects géomorphologique (Godbout, 2013; Savard, 2013).

La Figure 2.2 expose les douze principales lithologies présentes en surface dans la région d'étude. Les données originales se présentent sous forme d'un fichier Excel d'environ 286 250 lignes, contenant de l'informations sur les dépôts en surface aux coordonnées XY d'une grille dont la résolution est de 500 mètres (Parent et al., 2018). Pour la région d'étude d'une surface de 32 000 km², 138 690 lignes sont extraites, dont 129 640 contiennent une information sur la géologie de surface, les autres sites se trouvant sous des rivières ou des lacs. Ces points sont ensuite projetés sur une carte thématique présentant les douze types de géologie.

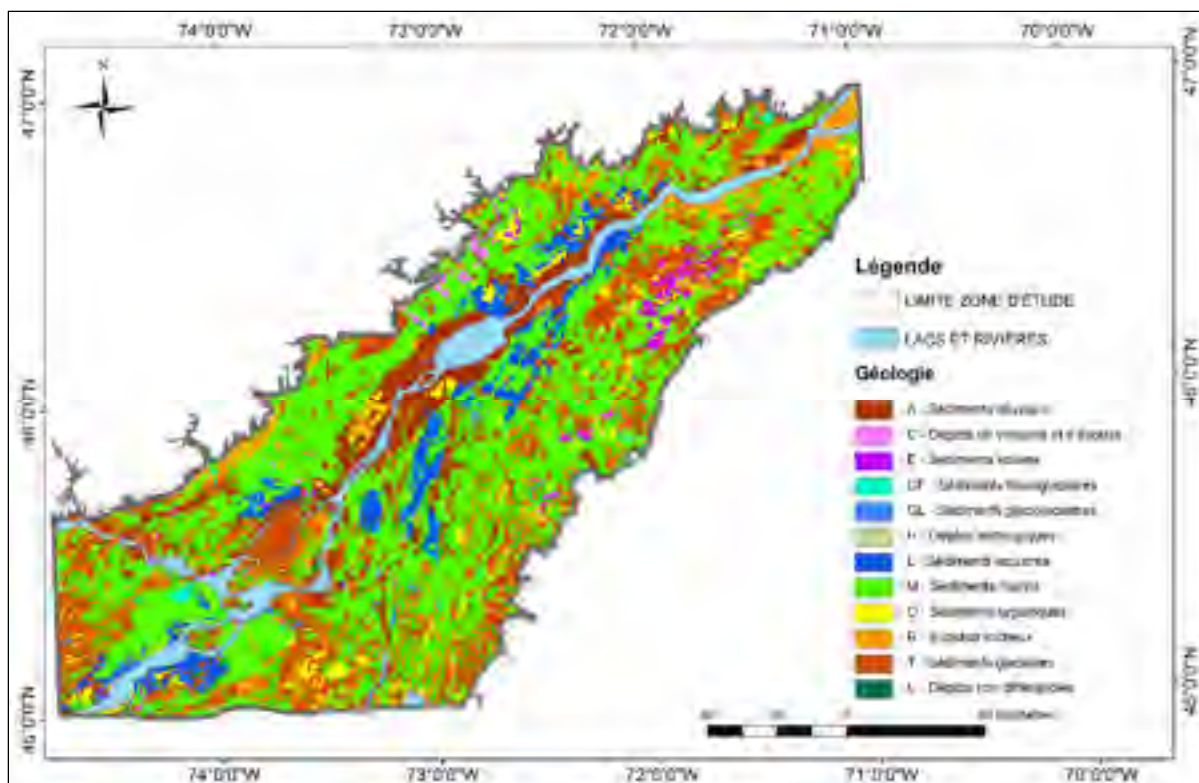


Figure 2.2 Carte des dépôts superficiels pour les Basses-Terres du Saint-Laurent
Produites à partir des données de Parent et al. (2018)

Les sédiments non-consolidés de la province du Québec sont donc dominés surtout par des tills (T), mais également par des argiles marines (A-C-M) et d'eaux douces (A-C-FL-L), des silts (A-C-FL) et des sables (A-C-E-FG) et du gravier (A-C-FG). La colonne sédimentaire peut toutefois rapidement varier latéralement. Ainsi les argiles marines seront d'une épaisseur plus grande au centre de la région d'étude qu'aux bordures nord et sud. De plus, dans ces régions les dépôts quaternaires sont d'environ une dizaine de mètres alors qu'ils peuvent aller jusqu'à 120 mètres en son centre, tel qu'illustré sur la carte de l'épaisseur des dépôts meubles de la Figure 2.3.

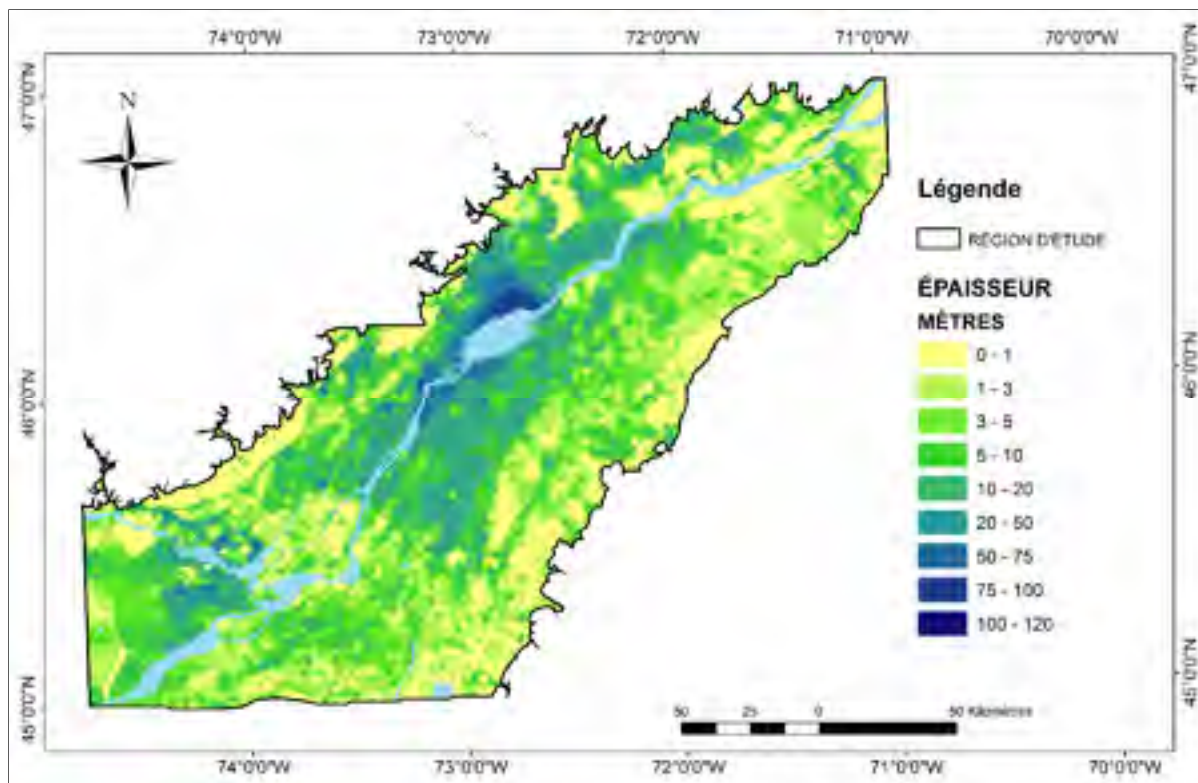


Figure 2.3 Carte de l'épaisseur des dépôts meubles pour les Basses-Terres du Saint-Laurent Produites à partir des données du Gouvernement du Canada (2004a).

Le modèle d'épaisseur des dépôts meubles date de 2004 et provient du site du gouvernement du Canada, qui vise à enrichir les données concernant la géologie urbaine et environnementale, la géologie de surface de la vallée du Saint-Laurent, du centre et de l'est du Canada (Gouvernement du Canada, 2004a). Il n'est disponible que sous forme de fichier polygone, mais à l'origine il provient d'un fichier matriciel d'une résolution de 275 mètres. Les dépôts meubles sont parfois inexistants, mais ils peuvent aussi dépasser les 100 mètres au centre de la vallée.

L'étude de ces sédiments non-consolidés, de leur profondeur et de leur géométrie est un élément clé dans un contexte d'évaluation des effets de site sismique et plusieurs auteurs ont effectué quelques études géotechniques afin de caractériser ces dépôts et quantifier les effets de sites (Aylsworth et Lawrence, 2003; Lefebvre, 1986; Leroueil et al., 1983; Locat et al., 1984; Scott, 2003; Tinawi et al., 1993a).

2.3 Réseau hydrographique

Les données considérées pour les lacs et rivières proviennent des cinq sources (Land Information Ontario, 2011; 2015; Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, 2000; 2016; Statistics Canada, 2016) et constituent un total de 105 046 entités, qui ont été combinées grâce à l'outil « Merge » dans la boîte de gestion des données. La carte de l'ensemble des rivières et lacs pour la région d'étude est présentée à la Figure 2.4.

Une zone tampon de 100 mètres autour de ces entités (lacs ou rivières) a été délimitée comme zone sensible. Cela signifie que toutes les sites proches de 100 m ou moins du réseau hydrographique seront considérés comme sensibles. Ce seuil a été fixé grâce à l'étude de cartes de risque de glissements pour certaines municipalités régionales de comté (MRC) situées dans les Basses-Terres du Saint-Laurent (MTQ, 2012; 2013a; 2013b). Il est à noter que 20% de la zone d'étude se situent à proximité d'un cours d'eau ou d'un lac.

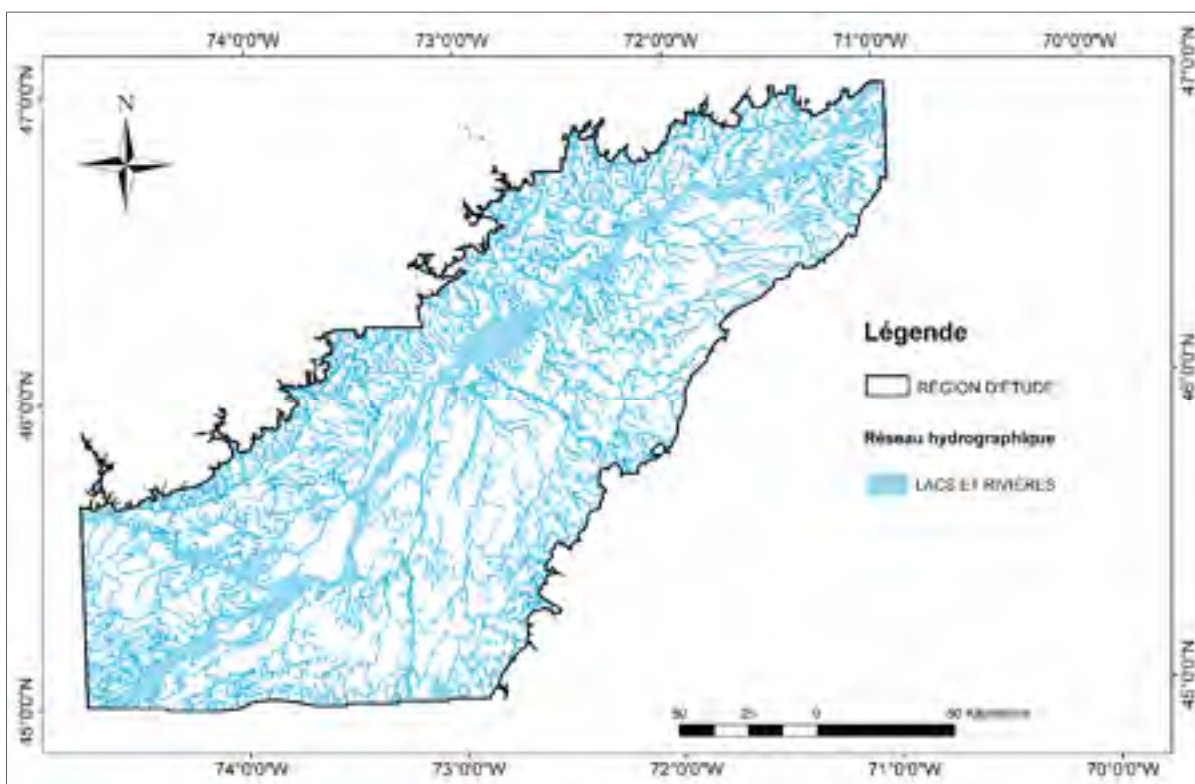


Figure 2.4 Carte de l'ensemble des rivières et lacs pour la région d'étude

2.4 Nappe phréatique

Les données utilisées pour évaluer la hauteur de la nappe phréatique proviennent du site internet du Ministère du développement durable, environnement et lutte contre les changements climatiques du gouvernement du Québec (MDDELCC, 2014) appelé système d'information hydrogéologique (SIH). Les données récoltées correspondent à toutes les données disponibles pour la zone d'étude, c'est-à-dire 78'792 forages dont la répartition peut être visualisée, grâce à la carte de la Figure 2.5. Toutefois, la hauteur de la nappe correspond à la mesure lors du forage et non du niveau de la nappe à son maximum, c'est-à-dire à la fonte des neiges au printemps.

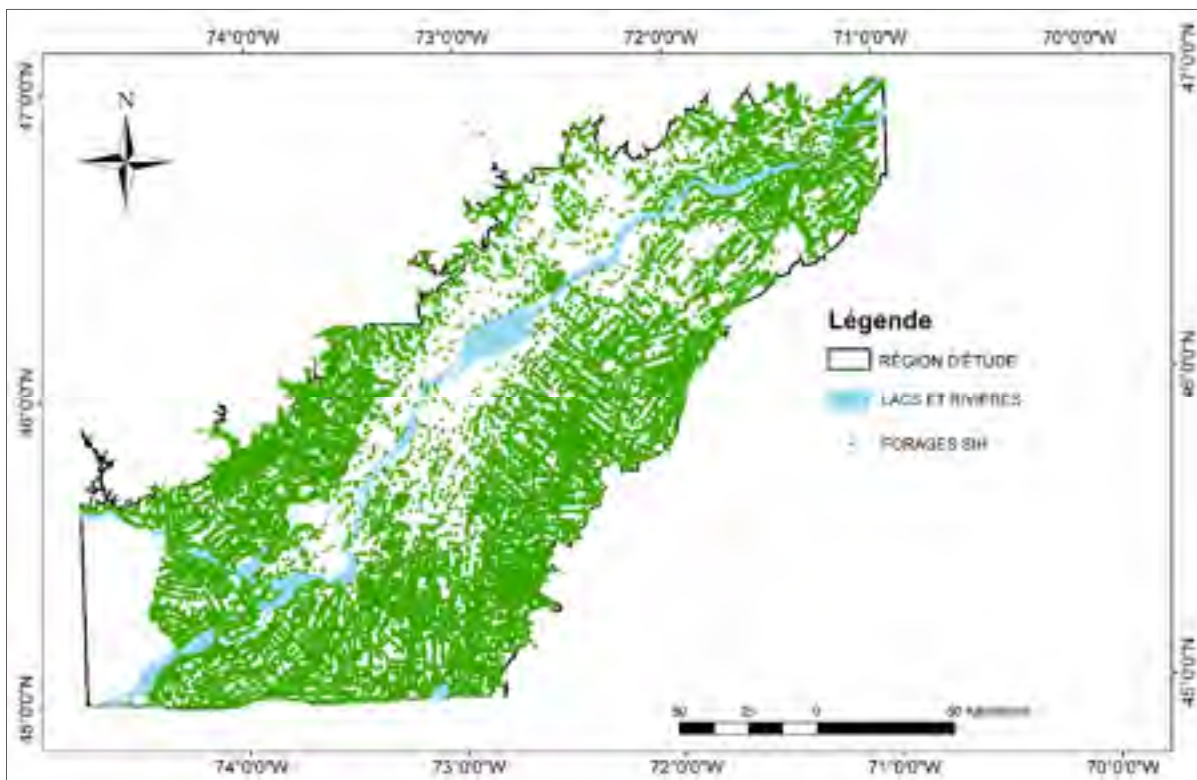


Figure 2.5 Carte des forages du SIH avec hauteur de nappe phréatique

La méthode des voisins naturels (de l'outil d'analyse spatiale d'ArcGIS©) a ensuite été utilisée pour interpoler une hauteur de nappe entre les points de mesures disponibles. Cette méthode trace tout d'abord des polygones de Voronoï (ou de Thiessen) autour de chaque point, puis

retrace à nouveau des polygones dont la surface dépend de la pondération choisie (Sibson, 1981).

La Figure 2.6 représente le toit de la nappe phréatique. Les zones en vert sont les sites où le toit de la nappe est à une profondeur supérieure à 10 mètres et allant jusqu'à 230 m. Les zones en orange ont une profondeur de nappe phréatique plus proche de la surface. Ainsi, 87% de la région d'étude possède une nappe phréatique à moins de dix mètres de la surface contre 13 % pour une plus grande profondeur. Toutefois, il est important de préciser que ces données ont été récoltées au fur et à mesure des forages sans tenir compte des variations saisonnières tel que la fonte des glaces ou des précipitations.

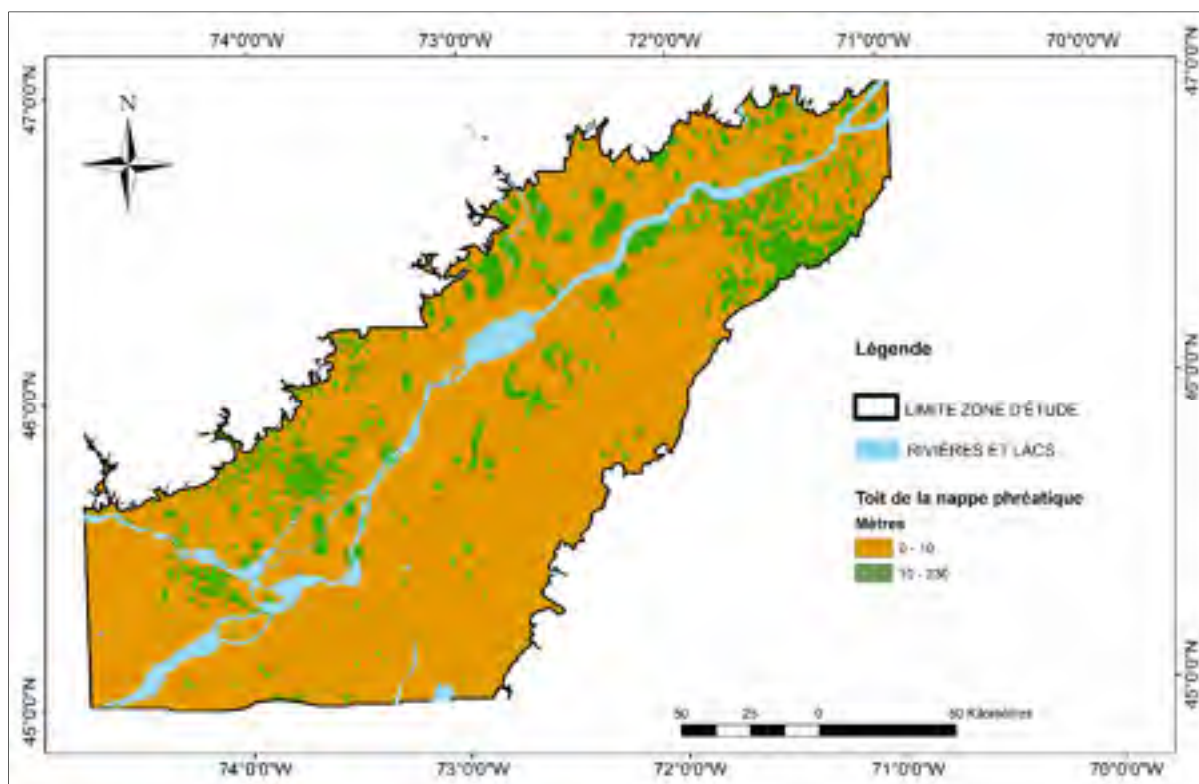


Figure 2.6 Toit de la nappe phréatique à partir des données du SIH

2.5 Topographie et pentes

Les données utilisées pour évaluer les pentes proviennent du modèle numérique de terrain illustré à la Figure 2.7. Le plus récent modèle numérique de terrain pour la zone d'étude provient du site web de l'USGS de la navette spatiale américaine (SRTM) (Farr et al., 2007). Sa résolution est de 1 arc-seconde ce qui équivaut à environ 30 mètres (USGS, 2015). Les données sont disponibles sous forme de tuile d'environ 10 000 km² chacune. Un total de 12 tuiles a dû être rassemblées pour recouvrir toute la zone d'étude. L'outil utilisé à cet effet s'appelle « Mosaic to new raster » (dans la boîte de gestion de données de ArcGIS©).

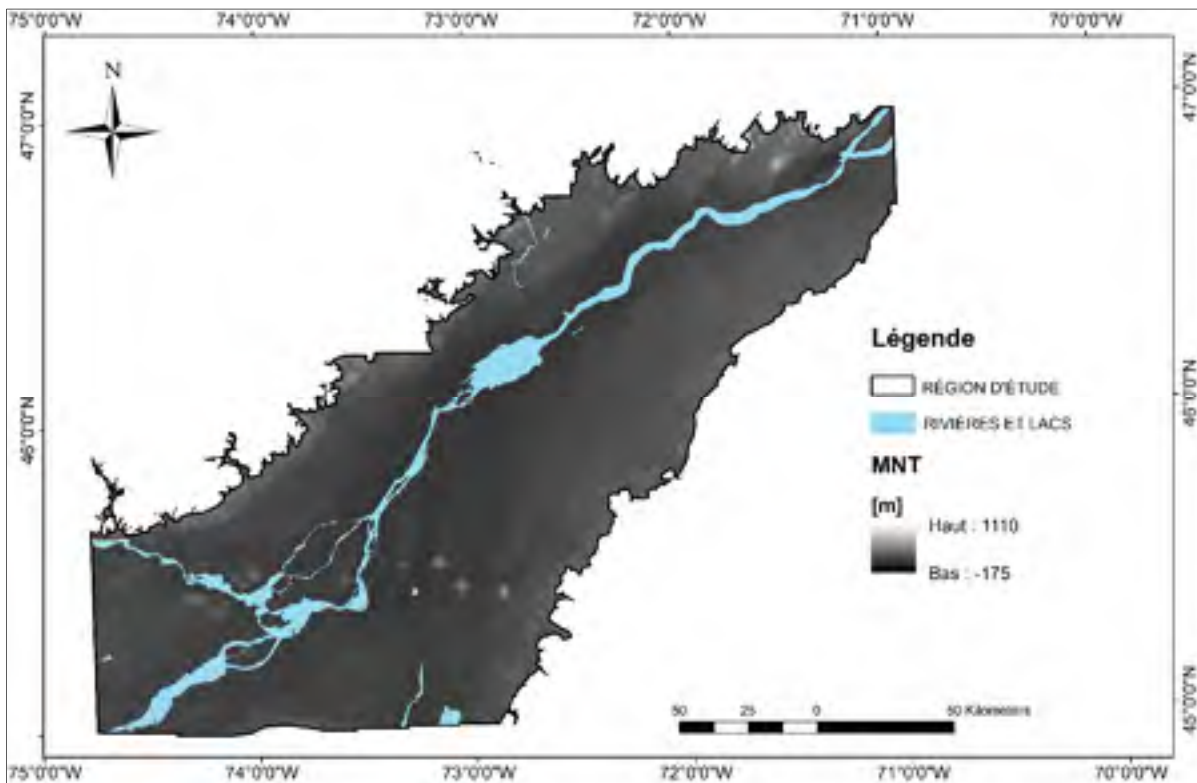


Figure 2.7 Carte de la zone d'étude avec les principales villes et le modèle numérique de terrain à une résolution d'environ 30 mètres

Le point le plus bas se trouve à -175 m et le point le plus haut à 1110 m. La région d'étude ne possède pas beaucoup de reliefs si ce n'est que les collines Montégériennes à l'ouest de Montréal ainsi que les bordures est et ouest. Il n'y a pas non plus de grand lac excepté le lac

Saint-Pierre. Le principal fleuve traversant la zone d'étude en son centre, du sud-ouest au nord-est, est le fleuve du Saint-Laurent. Autour de Montréal, au nord et à l'est, se situent d'anciens chenaux du Saint-Laurent, ce qui laisse penser que le fleuve était bien plus grand à une certaine époque. Les abords du lac Saint-Pierre montrent également des signes que le volume d'eau était plus important. Ainsi, ces terrasses géomorphologiques, le plus souvent placées sur des dépôts non-consolidés sont sujettes aujourd'hui à de l'érosion et à des glissements de terrain. De plus, de nombreuses rivières secondaires se jettent dans le Saint-Laurent avant d'atteindre l'océan Atlantique. Ces dernières drainent les sédiments marins, et de par leur capacité d'érosion, fragilisent les versants. Les sédiments redéposés sont également bien moins consolidés, ce qui amène à induire des effets de site, tels que glissements de terrain ou amplifications (Fransham et Gadd, 1977; Quinn, 2009).

La pente est un facteur extrêmement important pour la stabilité d'un versant. Les experts du programme Hazus (FEMA, 2012) classent les pentes selon six catégories que l'on peut voir sur la Figure 2.8. Ces données proviennent du site web de l'USGS qui propose des modèles numériques de terrain d'une résolution de 30 mètres environ. L'outil « Slope » (dans la boîte d'analyse spatiale d'ArcGIS©) permet d'identifier les pentes grâce au modèle numérique de terrain.

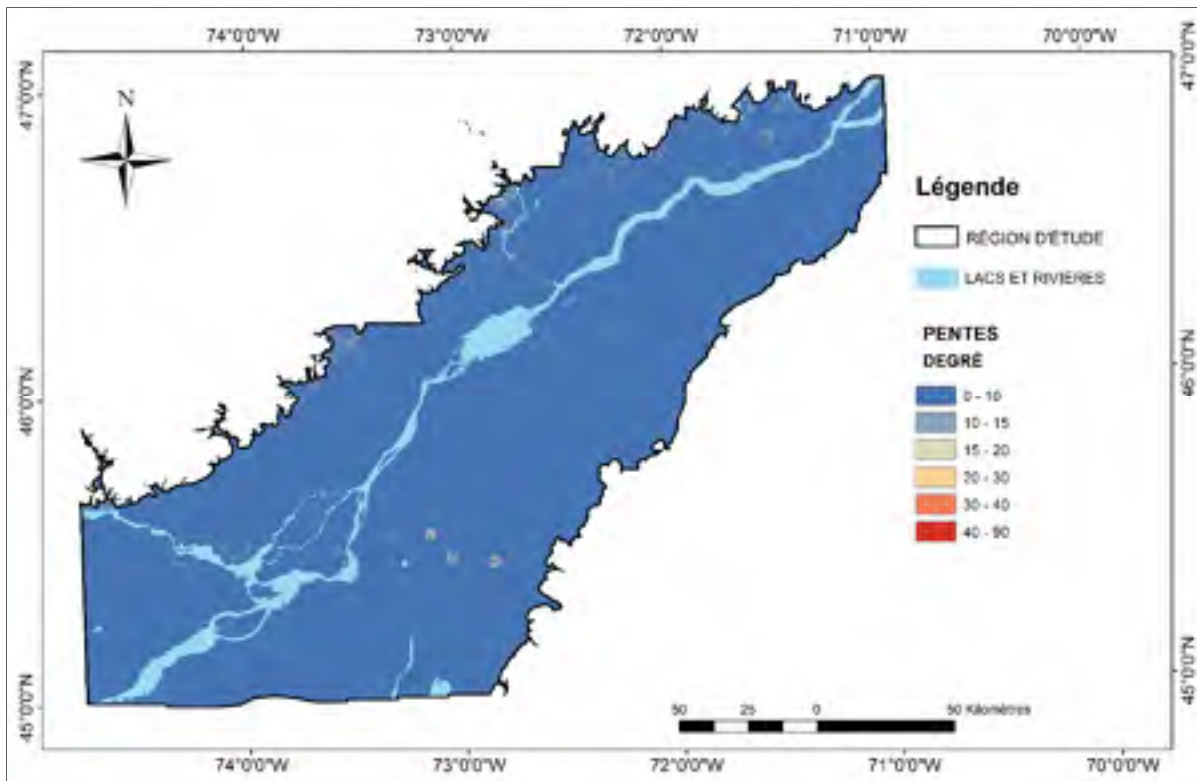


Figure 2.8 Carte de la zone d'étude avec en bleu les zones de pentes faibles et en rouge les zones de pentes fortes

2.6 Cartes de microzonage

Le phénomène d'amplification se mesure le plus souvent par microzonage de la région d'étude selon les catégories d'emplacement sismique en vigueur dans le pays concerné. Ces catégories d'emplacement, aussi appelées classes de sol, définissent le degré d'amplification des ondes sismiques à un site spécifique. En général, les catégories d'emplacement sismique s'identifient par leur vitesse d'onde de cisaillement dans les 30 mètres les plus proches de la surface (Boore, 2004; Finn et Wightman, 2003; Motazedian et al., 2011). Le Code national du bâtiment du Canada (CNBC) définit six catégories d'emplacement, identifiées de « A » à « F ». Les emplacements de catégorie A sont les moins susceptibles à l'amplification et se caractérisent par une vitesse d'onde de cisaillement (V_{s30}) supérieure à 1500 m/s^2 et la catégorie E se caractérise par une V_{s30} inférieure à 180 m/s^2 (IRC-CNRC, 2015a). La sixième catégorie F identifie les emplacements nécessitant des études géotechniques spécifiques (ANNEXE I). Des cartes de microzonage sismique ont été réalisées pour les trois principales régions urbaines de

l'est canadien que sont Ottawa (regroupant les villes d'Ottawa et Gatineau) (Hunter et al., 2010; Motazedian et al., 2011), l'île de Montréal (Chouinard et Rosset, 2012) et la ville de Québec (Leboeuf et al., 2013).

2.6.1 Ville de Québec

La première étude de microzonage du territoire de la ville de Québec a été réalisée en 2004 dans le cadre d'un mémoire de maîtrise (Michaud, 2004) et d'un projet de recherche sur la vulnérabilité sismique des infrastructures et des bâtiments de la Ville de Québec (Leboeuf et Nollet, 2006; Nollet et al., 2008). Ce microzonage a ensuite été complété en collaboration avec la Commission géologique du Canada pour proposer une version plus récente (Leboeuf et al., 2013). L'ensemble des données utilisées pour produire cette dernière carte proviennent principalement de plus de 8 500 forages contenant des informations détaillées : des mesures SPT, scissomètre de chantier, pressiomètre et piézocone pour les essais de terrain, ainsi que de scissomètre de laboratoire, cône suédois, masse volumique du sol et limite plastique et liquide pour les essais en laboratoire (Leboeuf et Nollet, 2006). Il y a également eu des mesures de vibrations ambiantes, 121 mesures d'ondes de surface multi-canaux (MASW)(Park et al., 2007), de la sismique réflexion-réfraction et quatre kilomètres de sismique haute résolution (Pugin et al., 2009). Ensuite ces données ont été utilisées pour une interpolation du type polygones de Voronoï avec un réajustement de certaines frontières en fonction de données provenant de la topographie. La carte, disponible sous forme de dossier public sur le site de Ressources naturelles Canada (Leboeuf et al., 2013) se présente sous forme d'image, il a donc fallu l'éditer à la main avec le programme ArcGIS. Elle est reproduite à la Figure 2.9.

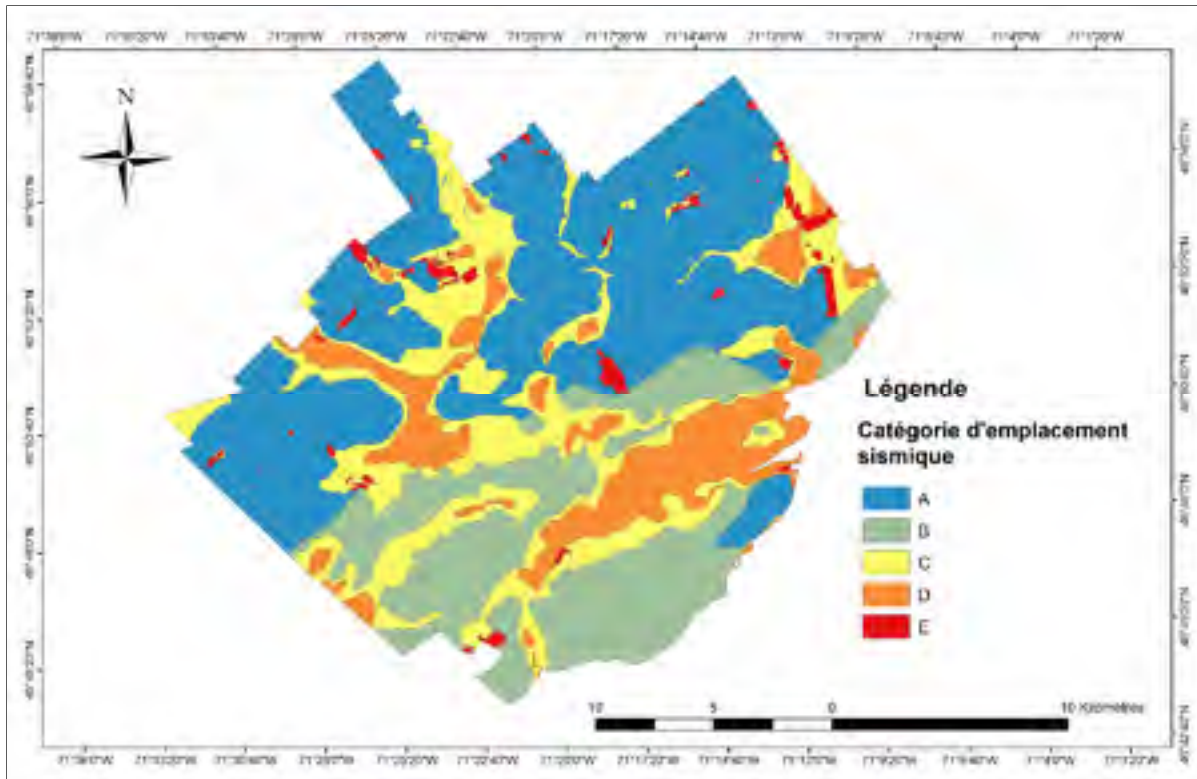


Figure 2.9 Carte de microzonage de la ville de Québec

2.6.2 Ville de Montréal

Plusieurs études de microzonage ont été faites ces dernières années pour la ville de Montréal (Altez, 2005; Chouinard et Rosset, 2012). Au total, plus de 2600 mesures de vibrations ambiantes ont été compilées avec des données sur les dépôts meubles pour un total de 26 600 forages dont 2500 contiennent des informations détaillées sur la nature des sédiments meubles (Chouinard et Rosset, 2012). Afin de mesurer les vitesses d'onde P et S, trois mesures en forages ont été accomplies ainsi que 29 sites de mesures MASW et un total de 7,5 km de ligne sismique réflexion haute résolution. Une des représentations de cette investigation est une carte de microzonage d'une résolution de 50 mètres pour l'île de Montréal datant de 2011 (Chouinard et Rosset, 2011; 2012). Cette carte sous forme de polygones, est reproduite à la Figure 2.10. Elle diffère quelque peu de celle produite en 2012.

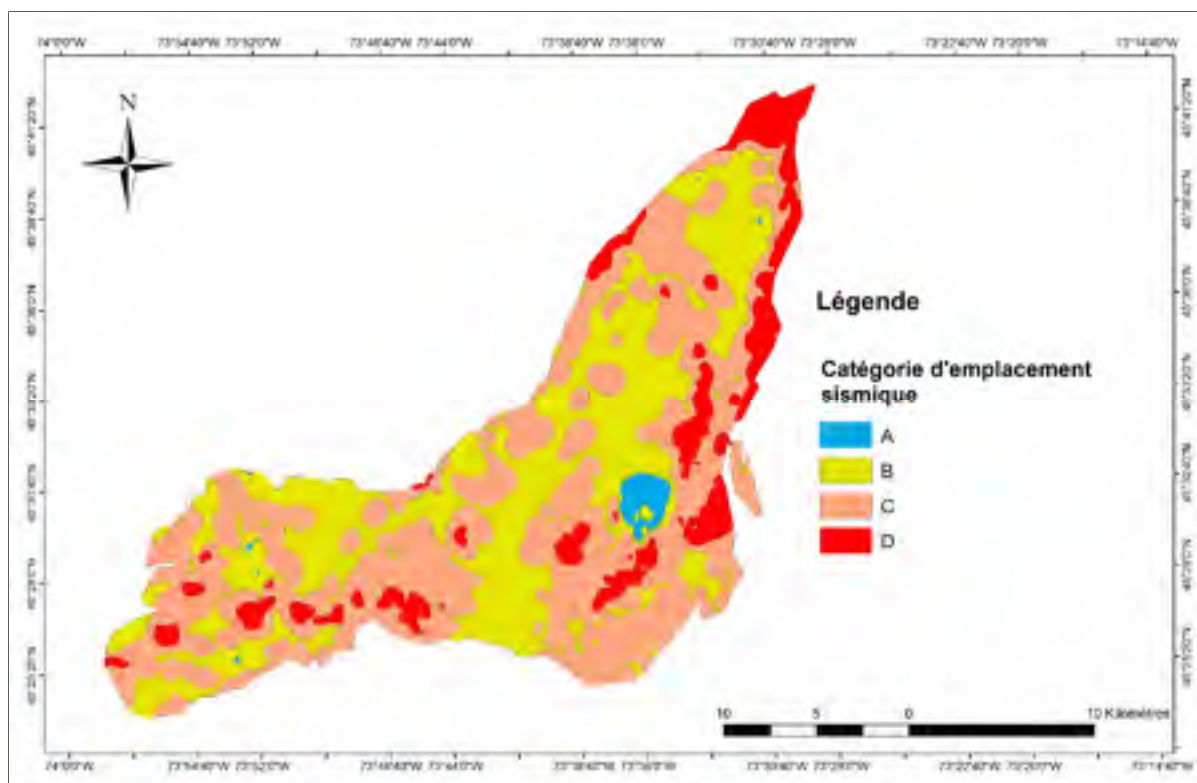


Figure 2.10 Carte de microzonage de la ville de Montréal

2.6.3 Région d'Ottawa-Gatineau

La région d'Ottawa et de Gatineau a également fait l'objet d'études de microzonage (Hunter et al., 2010; Motazedian et al., 2011). Bien que ces deux villes ne soient pas dans la région d'étude, elles présentent néanmoins de grandes similitudes sur la nature des dépôts géologiques, ce qui implique également une ressemblance sur la réponse sismique locale. Afin de développer une carte de microzonage un total de 400 mesures de vibrations ambiantes, ainsi que 15 mesures des ondes S et P en forage, 686 sites de sismique réflexion-réfraction et 25 km de profilage de réflexion des ondes de cisaillement à haute résolution ont été acquises (Motazedian et al., 2011). La carte initiale utilisée se présente sous forme de polygones, mais un fichier de points est également disponible. Elle est reproduite à la Figure 2.11.

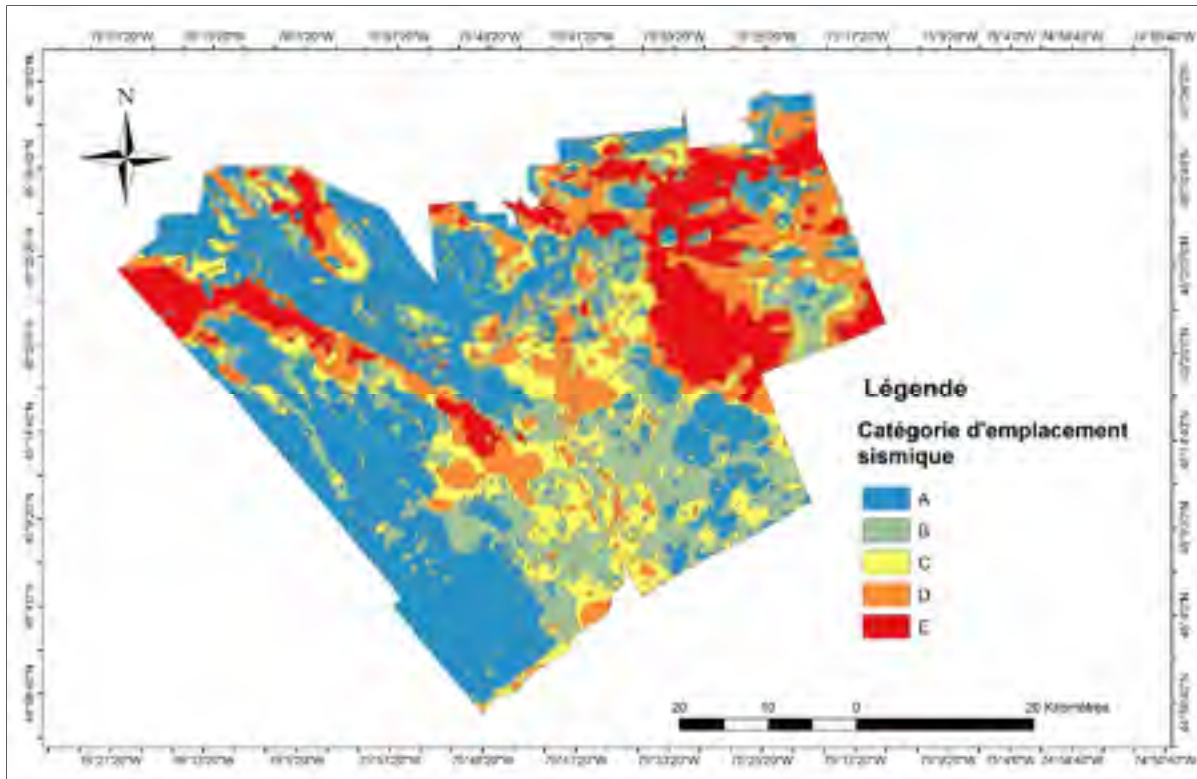


Figure 2.11 Carte de microzonage de la région d'Ottawa regroupant les villes d'Ottawa et de Gatineau

2.7 Inventaires des glissements de terrain

Afin de valider l'approche utilisée pour évaluer la susceptibilité aux glissements de terrain, un inventaire (Figure 2.12) des glissements de terrain survenus dans la zone d'étude est nécessaire. Cet inventaire a été produit et digitalisé par Quinn (2009). Pour la région d'étude, neuf de ces bases de données ont été utilisées. Deux d'entre elles proviennent de photos aériennes de la photothèque nationale de l'air à Ottawa (PQ_research_NTS_31H and air_photo_LS). Les autres proviennent de Carson_Lajoie_LS (Carson et Lajoie, 1981), Desjardins_LS (Desjardins, 1980), Karrow_LS (Karrow, 1972), Karrow_Surf_geol_LS (Karrow, 1959), Lajoie_LS (Lajoie, 1974), Leroueil_Locat_LS (Leroueil et Locat, 1998) and Misc_LS (Clark, 1947; Demers et al., 1999; Eden, 1956; Grondin et Demers, 1996; Morin, 1947; Wilson et MacKay, 1919). Ces fichiers sont soit sous forme de polygones soit sous forme de lignes.

Ces glissements de terrain n'ont pas exclusivement été induits par des séismes, néanmoins ils sont un outil intéressant pour évaluer la validité de notre démarche d'évaluation. Dans sa thèse, Quinn (2009) rappelle les limites de l'usage de son inventaire en précisant qu'elles dépendent de la disponibilité, de la résolution et de la cohérence des données sources, des limites historiques, ainsi que de la taille de la diversité géologique et physiographique de la région d'étude (sa région d'étude correspond à un peu plus du double de la zone d'étude de ce projet).

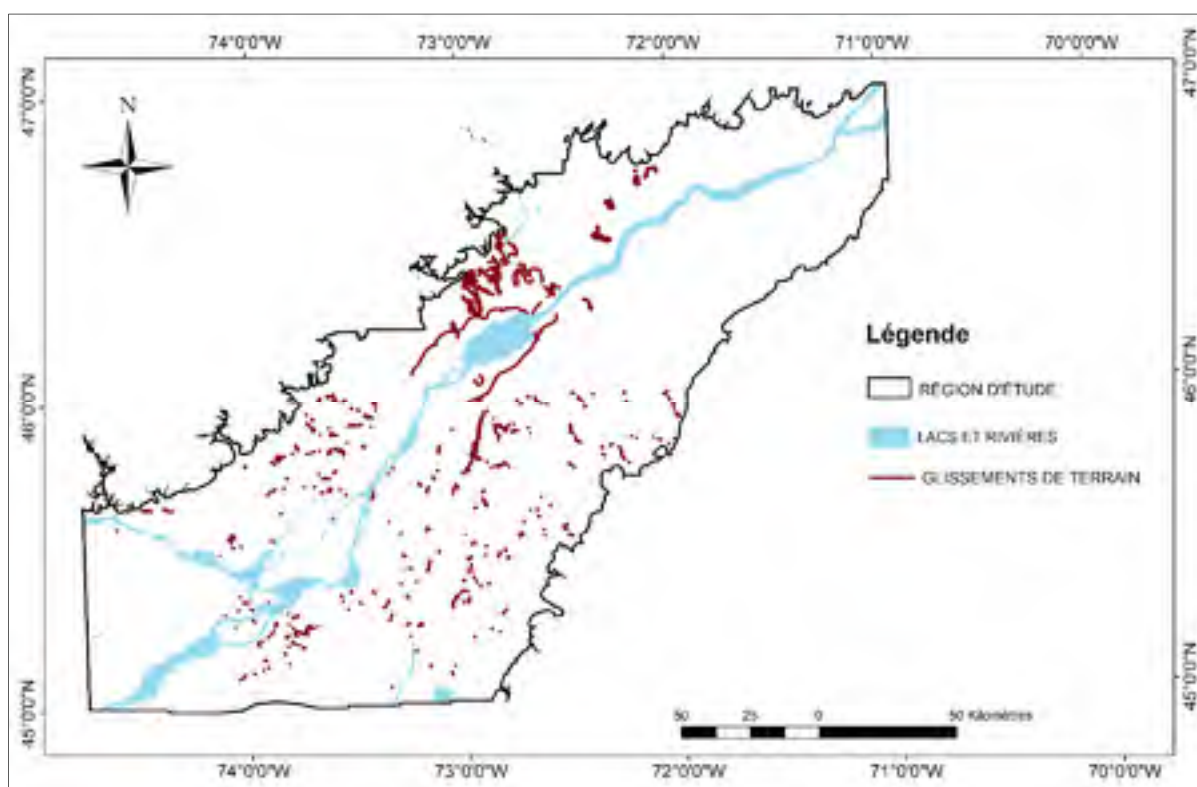


Figure 2.12 Carte de l'inventaire des glissements de terrain, créée à partir de données fournies par Quinn (2009)

2.8 Conclusions

Le contexte physiographique et géologique influence grandement la susceptibilité aux effets de site de la région d'étude. Les différents critères servant à l'étude de ces derniers découlent directement du traitement des données de géologie, géomorphologie ou hydrographie. Dans ce contexte, l'usage d'une plateforme d'information géographique est indispensable à la collecte,

aux traitements et à l'utilisation de ces données. Elle permet l'affichage de carte, l'extraction de données et l'interpolation lorsqu'une carte est incomplète.

CHAPITRE 3

DÉFIS TECHNIQUES ET CADRE MÉTHODOLOGIQUE

Le chapitre 3 propose une méthodologie basée sur le traitement des données à l'aide d'une plateforme de système d'informations géographiques pour les phénomènes d'amplification, de liquéfaction, de glissement de terrain et de chute de bloc.

3.1 Avantage d'une plateforme

Les effets géotechniques induits par les séismes ont la particularité d'être dirigés par des facteurs à large échelle, comme la géologie, la géomorphologie, le réseau hydrographique ou la topographie. Ces différents facteurs sont ainsi mieux analysés lorsqu'ils sont décrits à grande échelle. Les systèmes d'information géographique permettent de représenter ces phénomènes sous formes de cartes.

Les systèmes d'information géographique permettent aussi de compléter ces informations par des données de type structural sur la vulnérabilité des ponts. Ces fichiers peuvent être agencés sous forme de points reliés à des tables où l'information est stockée. À partir de là, ces données peuvent être gérées, complétées, analysées et visualisées. L'agencement de ces informations nous permet de modéliser le territoire avec les facteurs qui nous sont nécessaires ainsi que de visualiser les données géographiques et structurelles à larges échelles (Davidson et Shah, 1997).

3.2 Amplification

3.2.1 Approche méthodologique

Le phénomène d'amplification est le plus souvent représenté sous forme de carte de microzonage tel que pour les régions urbaines de Québec, de Montréal ainsi que d'Ottawa-Gatineau (section Cartes de microzonage). Notre méthode consistera à rechercher une relation entre l'épaisseur des dépôts meubles et la catégorie d'emplacement sismique en fonction de la géologie de surface. Cette relation ne pourra se faire qu'uniquement dans les trois villes précédemment citées où le microzonage a déjà été effectué. Les résultats de cette première estimation seront ensuite appliqués à toute la région d'étude, grâce aux données de géologies de surface et d'épaisseur des dépôts meubles. Lorsque les catégories d'emplacement sismiques ne sont pas disponibles pour certaines configurations géologiques présentes dans le reste de la région d'étude, ou pour vérifier la première approche, on mesurera sur le terrain les vibrations ambiantes pour en extraire, par la méthode H/V (Bonneyoy-Claudet et al., 2009; Bonneyoy-Claudet et al., 2006b; Nakamura, 1989), la fréquence de résonance (Ansal et Pitilakis, 2004). Celle-ci combinée à la profondeur des sédiments non-consolidés pourra nous indiquer une V_{s30} également.

De plus, une récente étude (Nastev et al., 2016b) a cartographié la moyenne des vitesses d'ondes de cisaillement dans les trente premiers mètres, ainsi que les périodes de résonances pour les vallées du Saint-Laurent et d'Ottawa (superficie de la zone d'étude, 72 000 m²) à partir d'un modèle géologique en trois dimensions pour les dépôts quaternaires. En effet, les vitesses d'ondes de cisaillement déjà mesurées pour les trois villes sont compilées avec des mesures provenant d'études hydrogéologiques concernant la Mauricie et Richelieu-Yamaska. Celles-ci servent à alimenter un modèle de vitesse correspondant au modèle géologique 3D. Au total, plus de 6000 mesures de vitesses d'ondes de cisaillement en forages ont été utilisés. Toutefois, cette méthode nécessite la connaissance de la géologie locale en trois dimensions (Nastev et al., 2016a; Nastev et al., 2016b), alors que notre approche se base sur l'épaisseur de l'ensemble des dépôts quaternaires ainsi que la nature de la géologie affleurante.

3.2.2 Données pour l'amplification

Le schéma suivant résume les informations que l'on pourra utiliser pour obtenir une susceptibilité à l'amplification.

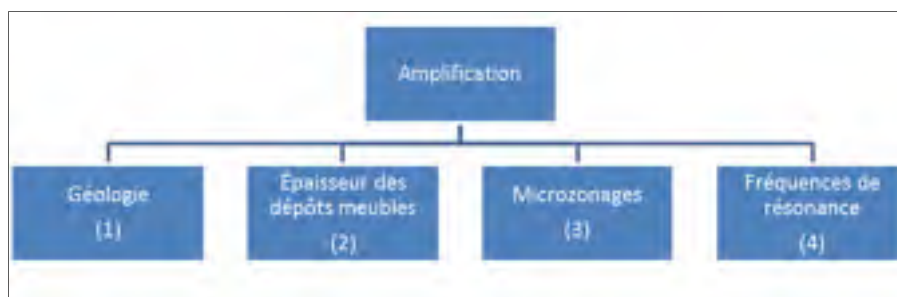


Figure 3.1 Schéma des données utiles pour l'évaluation de la susceptibilité à l'amplification

1. Les données concernant la géologie sont décrites au sous-chapitre 2.2, avec la Figure 2.2. Elles proviennent de Parent et al. (2018) et sont d'une résolution de 500 mètres;
2. Le modèle d'épaisseur des dépôts meubles date de 2004 (Gouvernement du Canada, 2004a). Cette carte provient du site du gouvernement du Canada, qui vise à enrichir les données concernant la géologie urbaine et environnementale, la géologie de surface de la vallée du Saint-Laurent, du centre et de l'est du Canada (Figure 2.3);
3. Les vitesses d'ondes de cisaillement proviennent des trois cartes de microzonage concernant les régions urbaines de Québec (Figure 2.9), Montréal (Figure 2.10) ainsi qu'Ottawa-Gatineau (Figure 2.11);
4. Les fréquences de résonances sont mesurées pour le projet grâce aux mesures de vibrations ambiantes (MVA) et les résultats seront décrits plus tard dans les chapitres les concernant (CHAPITRE 4).

3.3 Liquéfaction

3.3.1 Approche méthodologique

Le phénomène de liquéfaction survient lorsqu'il y a une perte de résistance au cisaillement lors d'une annulation des contraintes effectives due à une augmentation de la pression de pores. D'un point de vue technique les facteurs qui gouvernent la résistance au cisaillement sont la géologie et le degré de saturation du sol, qui sera déterminé par la présence de nappe phréatique proche de la surface (Bird et al., 2006; FEMA, 2012; Mayfield et al., 2009; Zhang, 2010).

La méthodologie utilisée dans le cadre de cette étude s'appuie sur le jugement d'experts, Youd et Perkins (1978), pour caractériser la susceptibilité à la liquéfaction d'un site. La classification de cette méthodologie évalue la géologie selon cinq niveaux de susceptibilité à la liquéfaction de très bas (TB) à très haut (TH), en fonction du faciès et de l'état de compacité, caractérisé par l'âge de la roche (Youd et Perkins, 1978). Cette classification ne correspond toutefois pas toujours avec les dépôts développés dans la région d'étude. Dans ce cas, ce sont les recommandations de géotechniciens qui sont prises en compte. Cette classification est ensuite reliée à la hauteur de nappe phréatique. Le Tableau 3.1 présente ce classement des dépôts en fonction de leur âge et de leur susceptibilité. Les sites où la roche affleure se verront automatiquement attribuer un niveau de susceptibilité nul, c'est-à-dire « Aucun ».

Tableau 3.1 Classement de la susceptibilité à la liquéfaction des différentes lithologies,
Tiré de Youd et Perkins (1978)

| TYPE DE DÉPÔT | Récent | Holocène | Pléistocène | Pré- quaternaire |
|---------------------------------------|-----------------------|-----------------|--------------------|-----------------------------|
| | <500 années | <11ka | 11k-2Ma | >2Ma |
| DÉPÔTS CONTINENTAUX | | | | |
| CANAL DE RIVIÈRE | TH | H | B | TB |
| PLAINE INONDABLE OU DE DÉBORDEMENT | H | M | B | TB |
| CÔNE ALLUVIAL & PLAINE | M | B | B | TB |
| TERRASSES & PLAINES MARINES | - | B | TB | TB |
| DELTA & CÔNE DE DELTA | H | M | B | TB |
| LACUSTRE ET PLAYA | H | M | B | TB |
| COLLUVIONS | H | M | B | TB |
| TALUS | B | B | TB | TB |
| DUNES | H | M | B | TB |
| LOESS | H | H | H | INCONNU |
| TILL GLACIAIRE | B | B | TB | TB |
| TUFF | B | B | TB | TB |
| TEPHRA | H | H | ? | ? |
| SOLS RESIDUELS | B | B | TB | TB |
| SEBKHA | H | M | B | TB |
| ZONE CÔTIÈRE | | | | |
| DELTA | TH | H | B | TB |
| ESTUAIRE | H | M | B | TB |
| PLAGE À FORTE HOULE | M | B | TB | TB |
| PLAGE À FAIBLE HOULE | H | M | B | TB |
| LAGON | H | M | B | TB |
| ZONE INTERTIDALE | H | M | B | TB |
| ARTIFICIEL | | | | |
| REMBLAIS NON COMPACTÉS | TH | - | - | - |
| REMBLAIS COMPACTÉS | B | - | - | - |

Comme celle de Youd et Perkins (1978), cette étude considère que si le toit, c'est-à-dire la limite supérieure de la nappe phréatique, est à moins de dix mètres de la surface, le classement des sites se fait en fonction du faciès et de l'état de compacité tel que décrit dans le Tableau 3.1 (Youd et Perkins, 1978). Si le toit est en revanche plus profond que 10 mètres, Youd et Perkins (1978) considère le site comme ayant un niveau de susceptibilité à la liquéfaction bas ou très bas.. On considère que plus les dépôts sont profonds, plus ils sont compactés et donc moins susceptibles à la liquéfaction également. Il est vrai qu'un phénomène de liquéfaction peut survenir à une profondeur supérieure à 10 m, mais ses dommages sur les constructions seront moins importants, exceptés les barrages, dont les fondations sont souvent plus profondes.

3.3.2 Données pour la liquéfaction

Le schéma suivant résume les informations que l'on pourra utiliser pour obtenir une susceptibilité à la liquéfaction.

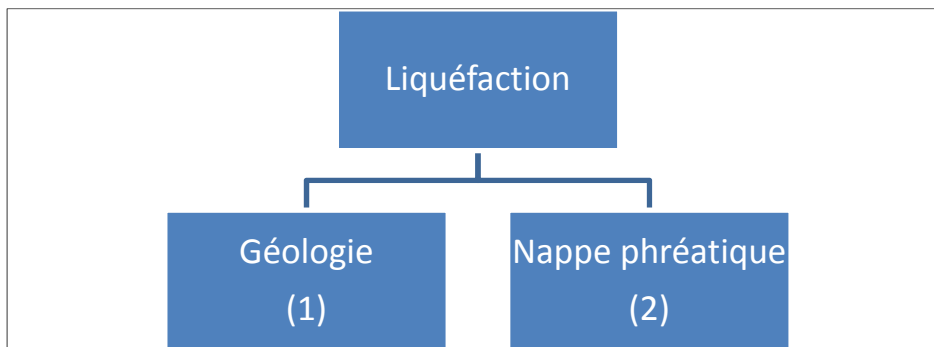


Figure 3.2 Schéma des données utiles pour l'évaluation de la susceptibilité à la liquéfaction

1. Les données concernant la géologie sont décrites au sous-chapitre 2.2 avec la Figure 2.2. Elles proviennent de Parent et al. (2018) et sont d'une résolution de 500 mètres;
2. Les données utilisées pour évaluer la hauteur de la nappe phréatique proviennent du site internet du développement durable, environnement et lutte contre les changements climatiques du gouvernement du Québec (MDDELCC, 2014). Elles sont décrites au sous-chapitre 2.4.

3.4 Glissements de terrain

3.4.1 Approche méthodologique

Les glissements de terrains sont gouvernés par deux composantes principales :

- contrainte de cisaillement;
- résistance au cisaillement.

Ces composantes peuvent être gouvernées par de multiples facteurs. Certains sont dits passifs, tels que la géologie qui gouverne la cohésion du sol, le contexte hydrographique ou l'utilisation du sol ayant été précédemment cités à la section 1.3.3. En revanche, d'autres sont de natures actives c'est-à-dire qu'ils seront de natures à déclencher l'instabilité. Parmi ces derniers, les séismes ont un rôle décisif à jouer. Plus la magnitude du séisme sera forte plus l'aléa face aux instabilités de terrain sera fort. Toutefois cette étude vise l'utilisation des cartes de susceptibilité avec des méthodes indicielles d'évaluation de la vulnérabilité sismique des ouvrages. Ces méthodes intègrent généralement la sismicité de la région. Par exemple, dans la méthode indicielle servant à l'évaluation de la vulnérabilité sismique des ouvrages d'art pour les Basses-Terres du Saint-Laurent, l'indice aléa sismique est défini selon l'AMS de la région (ANNEXE IX). La carte de la susceptibilité aux glissements de terrain développée ici propose de tenir compte des autres composantes gouvernant les mouvements gravitaires.

La FEMA (2012), par l'intermédiaire de son programme Hazus, propose une méthodologie en deux temps. La 1^{ère} consiste à classer les roches selon trois catégories géologiques : 6 catégories de pentes et 2 catégories reliées à l'humidité du sol. Une fois les sites classés, la probabilité de déclenchement est calculée en fonction de l'accélération maximale au sol. Notre méthodologie se base sur la 1^{ère} phase de classification des sites. Les sites sont ainsi classés en 10 catégories de susceptibilité aux mouvements gravitaires selon 3 paramètres:

1. La géologie a un effet sur la cohésion et l'angle de frottement interne, qui régissent la résistance au cisaillement. Moins une roche est consolidée plus elle est susceptible aux glissements de terrain. La méthode Hazus classe les différentes géologies selon trois groupes (A, B ou C), selon leur composition, leur degré de compacité, la cohésion effective et l'angle de friction interne effectif (voir Tableau 3.2)
2. La présence de nappe phréatique influence la pression de pores. En effet, plus le sol en question est gorgé d'eau, moins il y a de contrainte effective (Updike et al., 1988; Wilson et Keefer, 1985). Si la nappe phréatique se trouve à moins de dix mètres de la surface, le sol est considéré comme gorgé d'eau, sinon elle est considérée comme sèche;
3. La pente influence beaucoup la force normale et la contrainte au cisaillement. Plus la pente est forte, plus la région est susceptible. La pente est divisée en six catégories : 0 à 10°, de 10° à 15 °, de 15 ° à 20°, de 20° à 30°, de 30° à 40° et supérieure à 40 °.

Le Tableau 3.2 décrit les 3 groupes de géologies qui sont utilisés pour identifier la susceptibilité aux mouvements gravitaires selon Hazus (FEMA, 2012). Le groupe A peut surtout conduire à des chutes de blocs tandis que les groupes B et C conduisent à des instabilités de versant, tel que glissement de terrain. Il est à noter que les propriétés géotechniques sont délimitées par des valeurs effectives, c'est-à-dire une cohésion et un angle de friction interne dans une géologie drainée. De plus, les sols argileux résistent en partie à la cohésion alors que dans le classement des lithologies, les sols argileux ont une cohésion effective (drainée) nulle. On peut mentionner que les argiles de la région d'étude sont particulièrement sensibles aux phénomènes de glissement de terrain et d'amollissement cyclique. Lorsque la géologie est humide, dans notre étude lorsque la nappe phréatique est proche de la surface (<10m), c'est la cohésion et l'angle de friction interne non drainé qui agissent dans l'instabilité.

Tableau 3.2 Description des trois catégories principales de géologie pour la classification de la susceptibilité aux mouvements gravitaires
Adaptée de FEMA (2012)

| Catégories | Description |
|-------------------|---|
| A | Roches ou sols cohérents (roches cristallines ou grès, ou toutes lithologies dont les propriétés sont $c'=14.4$ kPa (300 psf), $\phi'=35^\circ$) |
| B | Sols faiblement cimentés (sols sableux, et grès peu cimentés), dont les propriétés sont $c'=0$ kPa (0 psf), $\phi'=35^\circ$ |
| C | Sols argileux (schistes argileux remaniés, colluvions, remblais peu compactés), dont les propriétés sont $c'=0$ kPa, $\phi'=20^\circ$ |

Le Tableau 3.3 décrit les dix catégories de susceptibilité selon la méthodologie Hazus en fonction des trois paramètres cités précédemment :

Tableau 3.3 Classement de la susceptibilité aux mouvements gravitaires
Adapté de FEMA (2012)

| Groupe géologique | Angle de la pente en degré | | | | | |
|--|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| | 0-10 | 10-15 | 15-20 | 20-30 | 30-40 | >40 |
| Lithologies sèches (nappe >10m de profondeur) | | | | | | |
| A | aucun | aucun | I | II | IV | VI |
| B | aucun | III | IV | V | VI | VII |
| C | V | VI | VII | IX | IX | IX |
| Lithologies humides (nappe <10m de profondeur) | | | | | | |
| A | aucun | III | VI | VII | VIII | VIII |
| B | V | VIII | IX | IX | IX | X |
| C | VII | IX | X | X | X | X |

Dans la présente étude, les dix catégories de susceptibilité aux mouvements gravitaires sont converties en 6 niveaux de susceptibilité qui varient de « Aucun » à « Très Haut ».

Tableau 3.4 Relation entre les catégories de susceptibilité aux mouvements gravitaires et leur indice de susceptibilité

| Catégories de susceptibilité | Aucun | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X |
|-------------------------------------|-------|---------------|----|---------|----|------------|----|----------|------|----------------|---|
| Niveau de susceptibilité | Aucun | Très Bas (TB) | | Bas (B) | | Modéré (M) | | Haut (H) | | Très Haut (TH) | |

La méthodologie utilisée se base principalement sur celle de Hazus (FEMA, 2012), toutefois nous rajoutons un paramètre supplémentaire qui est la proximité d'un lac ou d'une rivière (Domínguez-Cuesta et Bobrowsky, 2013; Quinn, 2009; Theilen-Willige, 2010; Van Westen et al., 2008), se trouvant à une distance de cent mètres ou moins. En effet, la présence de rivière augmente, entre autre, les processus d'érosion et provoque l'altération et la fissuration en particulier pour les argiles marines (Lefebvre, 1986). Ainsi, l'indice de susceptibilité aux mouvements gravitaires augmentera d'un niveau de susceptibilité pour tous les sites à proximité de lacs ou de rivières. On peut mentionner que l'ajout de ce critère amène parfois à une prise en compte conservatrice de la susceptibilité aux glissements de terrain. Un site de catégorie C avec une pente entre 0 et 10 degré proche du réseau hydrographique sera déjà considéré comme très fortement susceptible alors qu'il était déjà fortement par la précédente approche. En contrepartie, le critère selon lequel un sol est gorgé d'eau si la nappe phréatique se trouve au-dessus de 10 m n'est pas assez conservateur. En effet, certains glissements de terrain se produisent avec des surfaces de rupture d'une profondeur supérieure à 10 m (Quinn, 2009). Le nouveau tableau récapitulatif des niveaux de susceptibilité relatifs aux mouvements gravitaires est présenté Tableau 3.5 .

3.4.2 Données pour les mouvements gravitaires

Le schéma suivant résume les informations que l'on pourra utiliser pour obtenir une susceptibilité aux mouvements gravitaires.

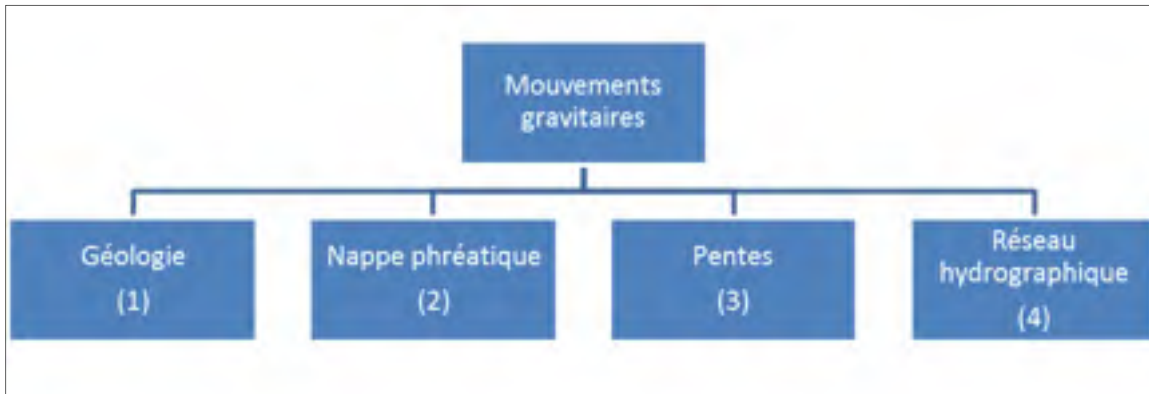


Figure 3.3 Schéma des données utiles pour l'évaluation de la susceptibilité aux mouvements gravitaires

1. Les données concernant la géologie sont décrites au sous-chapitre 2.2 (Figure 2.2) Elles proviennent de Parent et al. (2018) et sont d'une résolution de 500 mètres;
2. Les données utilisées pour évaluer la hauteur de la nappe phréatique proviennent du site internet du développement durable, environnement et lutte contre les changements climatiques du gouvernement du Québec (MDDELCC, 2014). Elles sont décrites au sous-chapitre 2.4;
3. Les données utilisées pour évaluer les pentes proviennent du modèle numérique de terrain décrit à la section 2.5. Le plus récent modèle numérique de terrain pour la zone d'étude provient du site web de l'USGS de la navette spatiale américaine (SRTM) (Farr et al., 2007);
4. Les données considérées pour les lacs et rivières proviennent des cinq sources (Land Information Ontario, 2011; 2015; Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, 2000; 2016; Statistics Canada, 2016). Elles sont décrites à la section 2.3.

3.4.3 Chutes de blocs

Idéalement, les facteurs indicateurs de la susceptibilité aux chutes de bloc se baseraient sur la géologie, la pente, la hauteur de la nappe phréatique; mais cette étude inclurait également des indicateurs de l'état de la roche comme la proximité d'une faille ou d'un pierrier, s'inspirant ainsi de la procédure de Baillifard et al. (Baillifard et al., 2003) pour la cartographie des montagnes de Suisse. Cette procédure n'est pas applicable actuellement, étant donné le manque de données concernant l'état de la roche à l'échelle de l'ensemble de la zone d'étude. La susceptibilité aux chutes de blocs sera évaluée selon les mêmes critères que les glissements de terrain en s'inspirant de la méthode Hazus pour les mouvements gravitaires (FEMA, 2012). En effet, nous appliquerons la même méthodologie inspirée du programme Hazus tel que décrite pour les mouvements gravitaires, mais nous sélectionnerons les zones où la roche affleure (placées dans la catégorie A pour la méthode du programme Hazus), comme carte de susceptibilité aux chutes de blocs. De plus, si pour les glissements de terrain la valeur prise en compte pour la pente correspond à la valeur de la pente à chaque point de mesure; c'est la valeur maximale de la pente dans un rayon de 250 mètres entourant chaque point, qui sera prise en compte pour les chutes de bloc (le rayon de 250 mètres correspondant à la moitié de la valeur de la résolution du fichier de géologie entrant et du fichier final). Cette différence provient du fait que les falaises, propices aux chutes de blocs, n'apparaissent que rarement sur de grandes surfaces dans notre région d'étude (voir Figure 2.8). Ainsi, elles seront sous-représentées si la valeur correspondant à la pente est sélectionnée au hasard tous les 500 mètres. C'est pourquoi lors de l'évaluation de la susceptibilité aux chutes de bloc, c'est la valeur de la pente maximum, dans un rayon de 250 mètres qui sera pris en compte.

3.5 Discussions et conclusions

Les différents niveaux de susceptibilité définis précédemment peuvent ensuite être convertis en indice de susceptibilité numérique selon la méthode d'évaluation. Dans le cadre de ce projet, les niveaux de susceptibilité sont convertis en indices afin de les intégrer à la méthode d'évaluation du MTMDET (voir Section 1.5.5 et CHAPITRE 7). Le CHAPITRE 7 illustrera également l'application des cartes de susceptibilité à l'adaptation de la méthode du MTMDET.

CHAPITRE 4

PHÉNOMÈNE D'AMPLIFICATION

Ce chapitre traitera du phénomène d'amplification. Un indice de susceptibilité à l'amplification est estimé à partir des données de géologie de surface, l'épaisseur des dépôts meubles sur l'ensemble de la zone d'étude. L'hypothèse de cette étude est qu'une colonne sédimentaire est similaire si la géologie de surface et l'épaisseur des dépôts meubles sont similaires. En effet, les catégories d'emplacement sismiques dépendent fortement de la nature des dépôts meubles et de leur épaisseur. Les relations entre ces informations géologiques et la susceptibilité à l'amplification sont définies grâce au croisement avec les cartes de microzonage existantes pour les trois régions urbaines de la ville de Québec, de l'île de Montréal et d'Ottawa-Gatineau présentées à la section Cartes de microzonage et les informations géologiques sur les territoires de ces villes. Cette échelle sera ensuite complétée et validée par des mesures de vibrations ambiantes sur le terrain.

4.1 Échelle de susceptibilité à l'amplification

La susceptibilité à l'amplification est établie sur la base des catégories d'emplacement sismiques auxquelles sont associés des facteurs d'amplification de l'accélération spectrale. En absence d'un microzonage sismique sur la totalité de la zone d'étude, les catégories sismiques sont estimées à partir d'un croisement des épaisseurs des dépôts meubles et de la géologie de surface. L'approche utilisée pour estimer les catégories d'emplacement sismique est décrite à la section suivante (4.2).

Comme mentionné dans l'approche méthodologique, les niveaux de susceptibilité peuvent être convertis en indices numériques de susceptibilité dont la valeur peut être modifiée selon la méthode indicielle utilisée. Cette échelle de susceptibilité, indépendamment de la valeur numérique, pourra être conjuguée à une évaluation du risque sismique des écoles, des hôpitaux

ou encore des infrastructures souterraines, tels que les pipelines. Toutefois, cet indice de susceptibilité à l'amplification ne sert qu'à une évaluation qualitative de l'amplification locale.

Dans cette étude, on illustre ici l'utilisation d'un indice numérique de susceptibilité à l'amplification qui, au CHAPITRE 7, sera intégré à la méthode MTQ₂₀₁₃ (Lemaire, 2013). L'indice varie entre 1 et 1.25 (voir Tableau 4.1) selon les recommandations de Lemaire (2013). Dans l'ensemble nous évaluerons sept niveaux de susceptibilité à l'amplification. Quatre de ces indices correspondent à une catégorie d'emplacement sismique et trois autres sont des valeurs intermédiaires attribuées lorsque les probabilités d'appartenance à une catégorie d'emplacement ne se dégagent pas clairement. Le Tableau 4.1 présente ces indices et, à titre indicatif, les niveaux de susceptibilité. Les catégories d'emplacement A et B ne sont que très peu amplificatrices voire dé-amplificatrices le plus souvent. C'est pourquoi elles sont qualifiées de susceptibilité très très basse. Ces catégories correspondent aux sites où la roche affleure, totalisent 5 % de la région d'étude.

Tableau 4.1 Tableau des niveaux de susceptibilité à l'amplification selon les catégories d'emplacement sismique

| Catégorie d'emplacement sismique | Niveau de susceptibilité à l'amplification |
|---|---|
| A ou B | Très Très Bas (TTB) |
| | <i>Très Bas (TB)</i> |
| C | Bas (B) |
| | <i>Bas à Modéré (BM)</i> |
| D | Modéré (M) |
| | <i>Haut (H)</i> |
| E | Très Haut (TH) |

4.2 Probabilité d'appartenance aux catégories d'emplacement

Cette section présentera la méthode d'attribution des indices de susceptibilité à l'amplification grâce aux croisements des données de microzonage, d'épaisseur des dépôts et la géologie de surface. L'intersection de ces trois types d'information géographique permet d'obtenir une

probabilité d'appartenir ou pas à une catégorie d'emplacement sismique selon l'épaisseur des dépôts meubles et la géologie de surface. Les trois cartes suivantes superposent les informations concernant les catégories d'emplacement sismique avec l'épaisseur des dépôts meubles pour les régions urbaines où le microzonage sismique est cartographié : Ville de Québec (Figure 4.1), Ile de Montréal (Figure 4.2) et région d'Ottawa-Gatineau (Figure 4.3).

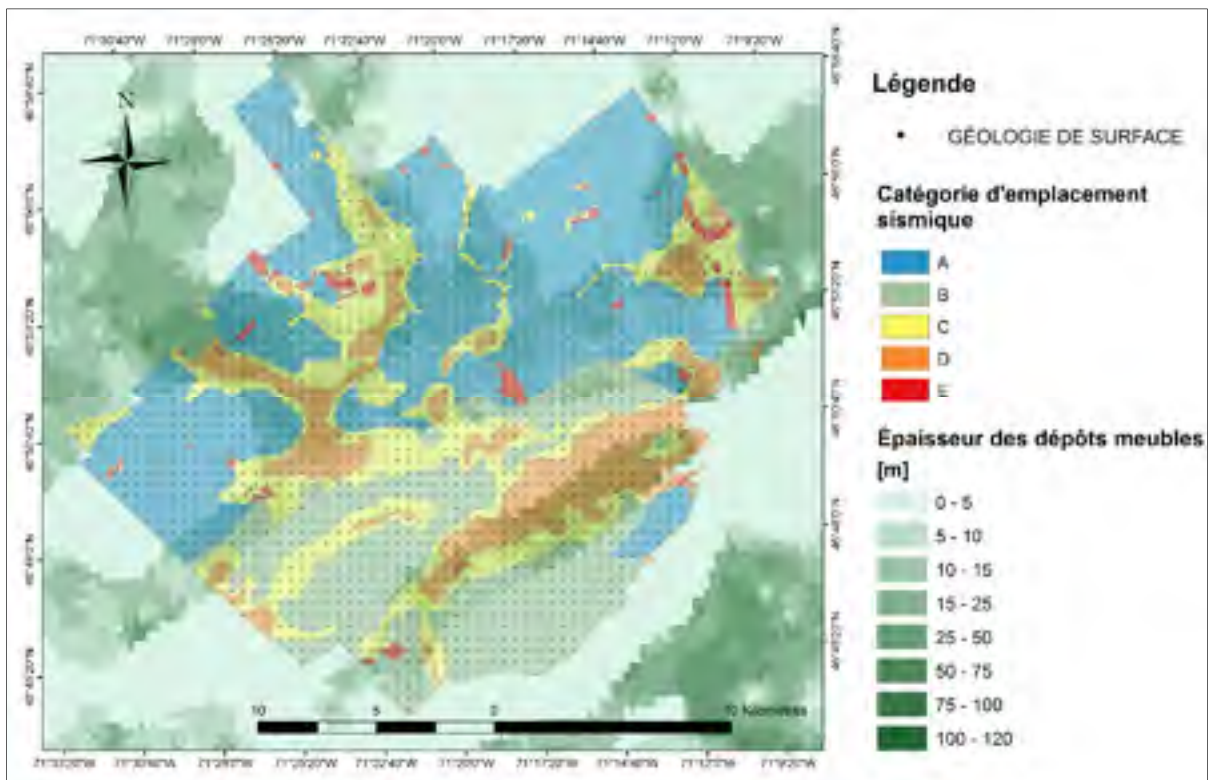


Figure 4.1 Carte de microzonage de la ville de Québec intersectée avec l'épaisseur des dépôts meubles et la géologie de surface

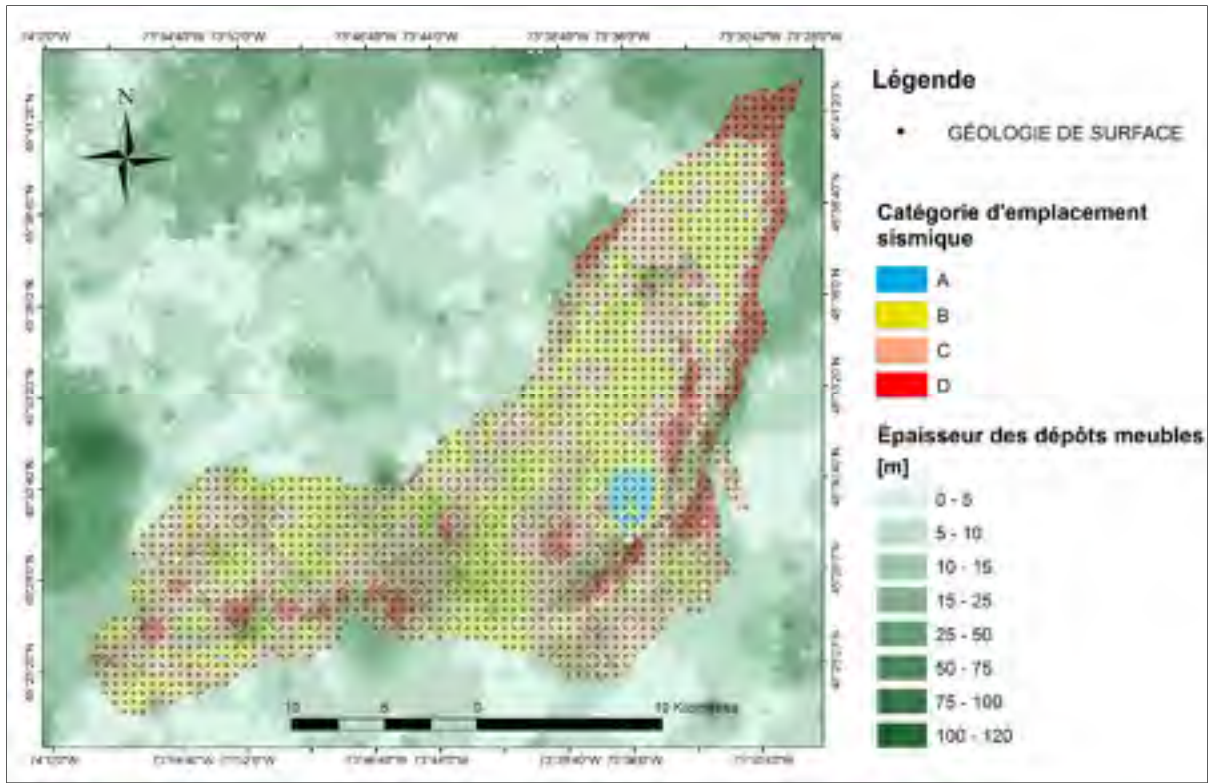


Figure 4.2 Carte de microzonage de la ville de Montréal intersectée avec l'épaisseur des dépôts meubles et la géologie de surface

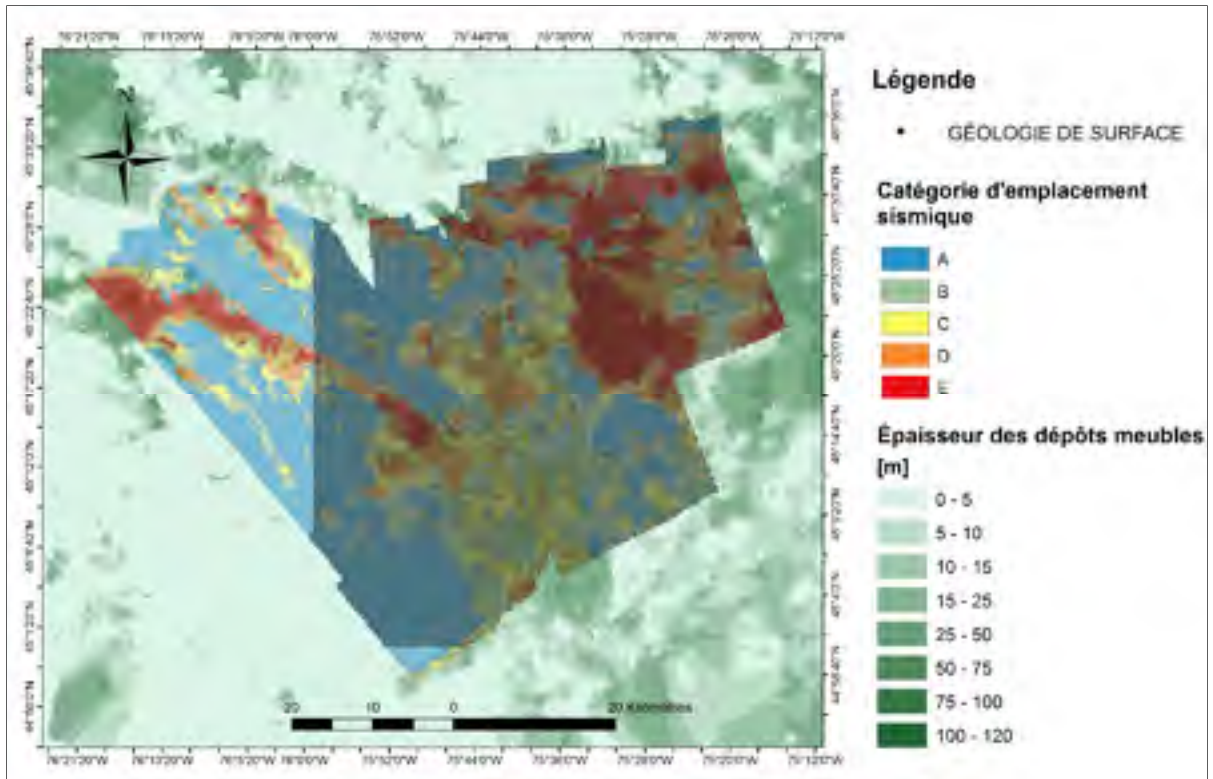


Figure 4.3 Carte de microzonage de la région d'Ottawa (villes d'Ottawa et Gatineau) intersectée avec l'épaisseur des dépôts meubles et la géologie de surface

Ce premier croisement d'information est ensuite analysé pour chaque type de géologie de surface. L'amplification dépend très fortement de la nature des dépôts meubles dans la colonne sédimentaire, mais en l'absence de données complètes sur la géologie de l'ensemble de la colonne, nous faisons l'hypothèse qu'à l'échelle régionale, les sites ayant la même géologie de surface auront une colonne sédimentaire approximativement similaire (Braganza et al., 2016).

Cette étape permet de trouver des probabilités d'appartenir à une certaine catégorie d'emplacement en fonction de la géologie de surface et de l'épaisseur des dépôts meubles. Cette analyse est faite sur la base des trois cartes de microzonage existantes pour la région d'étude et ses alentours. Ces probabilités sont calculées selon douze (12) types de dépôts de surface (incluant le roc affleurant) et cinq (5) catégories d'épaisseur des dépôts meubles suivantes:

- 0 à 5 mètres;
- 5 à 10 mètres;
- 10 à 20 mètres;
- 20 à 30 mètres;
- supérieur à 30 mètres.

Les principaux types de géologies affleurantes pour la région d'étude sont aux nombres de douze (Parent et al., 2018), soit :

- dépôts alluviaux;
- dépôts de versant;
- dépôts éoliens;
- dépôts glaciofluviaux;
- dépôts glaciolacustres;
- dépôts anthropiques;
- dépôts lacustres;
- dépôts marins;
- dépôts organiques;
- roches;
- tills;
- dépôts indifférenciés.

Un niveau de susceptibilité à l'amplification est ensuite attribué selon la probabilité d'appartenir à une catégorie d'emplacement sismique en fonction du type de dépôt et de l'épaisseur du dépôt, en accord avec les niveaux établis au Tableau 4.1. Une roche qui affleure est par définition la moins susceptible à l'amplification, son niveau de susceptibilité sera donc le plus faible, soit très très bas (voir Tableau 4.1). Cela concerne 5 % de la zone d'étude. Pour les autres géologies affleurantes, les résultats sont exposés sous forme d'un tableau spécifique à chaque type de dépôts (voir Tableau 4.2 à 4.9).

À noter que les dépôts anthropiques (Tableau 4.8) et indifférenciés (Tableau 4.9) ne recouvrent qu'une faible surface des trois villes analysées. Ainsi, nous ne disposons pas de données sur ces dépôts, lorsque l'épaisseur totale des dépôts meubles est supérieure à 30 mètres.

Par ailleurs, les dépôts lacustres, éoliens et glaciolacustres n'affleurent pas pour les villes de Québec, Montréal ou la région Ottawa-Gatineau. Ainsi, lors du croisement entre les cartes de microzonage et les informations sur la nature de la géologie, il a été impossible d'estimer un indice pour ces trois types de dépôts.

Le Tableau 4.10 récapitule les indices de susceptibilité selon le type de dépôts de surface et l'épaisseur des dépôts meubles. Ces indices sont toutefois provisoires, car ils doivent être confirmés et ajustés par les mesures sur le terrain (voir section 4.4.4).

Par exemple, selon les trois cartes de microzonage, pour les dépôts alluviaux d'une épaisseur de 0 à 5 mètres de dépôts meubles, la probabilité d'appartenir à une catégorie d'emplacement sismique A ou B est de 45.8%, d'environ 24 % pour C, de 29% pour D et de moins de 1% pour E. C'est-à-dire que lors du croisement des données 45.8% des sites sur dépôts alluviaux où l'épaisseur des dépôts meubles variait entre 0 et 5 m se trouvaient classifiés comme appartenant aux catégories A ou B. Lorsque les données ne permettent pas d'obtenir clairement une catégorie d'emplacement sismique, alors les mesures de bruits ambiant permettent d'investiguer plus en profondeur comme décrit dans la section suivante (4.3).

Tableau 4.2 Dépôts alluviaux : Tableau des probabilités d'appartenance à une catégorie sismique selon l'épaisseur des dépôts meubles, avec niveau de susceptibilité correspondant

| Alluviaux : catégorie\épaisseur | 0 à 5 [m] | 5 à 10 [m] | 10 à 20 [m] | 20 à 30 [m] | >30 [m] |
|--|------------------|-------------------|------------------------|------------------------|-------------------|
| A ou B | 45.80% | 29.25% | 14.46% | 9.57% | 2.52% |
| C | 23.95% | 51.70% | 42.15% | 20.21% | 2.52% |
| D | 29.41% | 8.84% | 33.47% | 42.55% | 33.61% |
| E | 0.84% | 10.20% | 9.92% | 27.66% | 61.34% |
| Indice de susceptibilité | B | B | BM | H | TH |

Tableau 4.3 Dépôts de versant : Tableau des probabilités d'appartenance à une catégorie sismique selon l'épaisseur des dépôts meubles, avec niveau de susceptibilité correspondant

| Versant catégorie\épaisseur | 0 à 5 [m] | 5 à 10 [m] | 10 à 20 [m] | 20 à 30 [m] | >30 [m] |
|--|------------------|-------------------|------------------------|------------------------|-------------------|
| A ou B | 7.14% | 18.18% | 2.27% | 0.00% | 0.00% |
| C | 21.43% | 4.55% | 11.36% | 11.76% | 0.00% |
| D | 42.86% | 40.91% | 54.55% | 29.41% | 21.05% |
| E | 28.57% | 36.36% | 31.82% | 58.82% | 78.95% |
| Indice de susceptibilité | H | H | H | TH | TH |

Tableau 4.4 Dépôts fluvioglaciers : Tableau des probabilités d'appartenance à une catégorie sismique selon l'épaisseur des dépôts meubles, avec niveau de susceptibilité correspondant

| Fluvioglacière catégorie\épaisseur | 0 à 5 [m] | 5 à 10 [m] | 10 à 20 [m] | 20 à 30 [m] | >30 [m] |
|---|------------------|-------------------|------------------------|------------------------|-------------------|
| A, B | 59.62% | 38.98% | 40.40% | 20.00% | 0.00% |
| C | 28.85% | 52.54% | 49.49% | 65.71% | 80.00% |
| D | 3.85% | 5.08% | 8.08% | 14.29% | 20.00% |
| E | 7.69% | 3.39% | 2.02% | 0.00% | 0.00% |
| Indice de susceptibilité | TTB | B | B | B | B |

Tableau 4.5 Dépôts marins : Tableau des probabilités d'appartenance à une catégorie sismique selon l'épaisseur des dépôts meubles, avec niveau de susceptibilité correspondant

| Marins catégorie\épaisseur | 0 à 5 [m] | 5 à 10 [m] | 10 à 20 [m] | 20 à 30 [m] | >30 [m] |
|---------------------------------------|------------------|-------------------|------------------------|------------------------|-------------------|
| A, B | 59.53% | 37.87% | 24.25% | 4.42% | 1.27% |
| C | 25.97% | 36.98% | 33.15% | 18.58% | 2.96% |
| D | 10.80% | 19.59% | 33.74% | 38.69% | 14.38% |
| E | 3.70% | 5.57% | 8.86% | 38.31% | 81.40% |
| Indice de susceptibilité | TB | B | BM | H | TH |

Tableau 4.6 Dépôts organiques : Tableau des probabilités d'appartenance à une catégorie sismique selon l'épaisseur des dépôts meubles, avec niveau de susceptibilité correspondant

| Organiques catégorie\épaisseur | 0 à 5 [m] | 5 à 10 [m] | 10 à 20 [m] | 20 à 30 [m] | >30 [m] |
|---|------------------|-------------------|------------------------|------------------------|-------------------|
| A, B | 95.25% | 78.31% | 50.00% | 12.50% | 0.00% |
| C | 4.16% | 13.25% | 28.21% | 13.64% | 0.00% |
| D | 0.40% | 4.42% | 15.81% | 48.86% | 36.84% |
| E | 0.20% | 4.02% | 5.98% | 25.00% | 63.16% |
| Indice de susceptibilité | TTB | TTB | TB | H | TH |

Tableau 4.7 Tills dépôts glaciaires : Tableau des probabilités d'appartenance à une catégorie sismique selon l'épaisseur des dépôts meubles, avec niveau de susceptibilité correspondant

| Tills catégorie\épaisseur | 0 à 5 [m] | 5 à 10 [m] | 10 à 20 [m] | 20 à 30 [m] | >30 [m] |
|--------------------------------------|------------------|-------------------|------------------------|------------------------|-------------------|
| A, B | 85.52% | 71.15% | 66.48% | 58.44% | 20.00% |
| C | 13.30% | 26.82% | 30.67% | 36.36% | 60.00% |
| D | 0.54% | 2.03% | 2.71% | 2.60% | 20.00% |
| E | 0.63% | 0.00% | 0.14% | 2.60% | 0.00% |
| Indice de susceptibilité | TTB | TB | TB | TB | BM |

Tableau 4.8 Dépôts anthropiques : Tableau des probabilités d'appartenance à une catégorie sismique selon l'épaisseur des dépôts meubles, avec niveau de susceptibilité correspondant

| Anthropiques catégorie\épaisseur | 0 à 5 [m] | 5 à 10 [m] | 10 à 20 [m] | 20 à 30 [m] | >30 [m] |
|---|------------------|-------------------|------------------------|------------------------|-------------------|
| A, B | 40.00% | 16.67% | 9.09% | 0.00% | absent |
| C | 60.00% | 66.67% | 81.82% | 100.00% | absent |
| D | 0.00% | 16.67% | 9.09% | 0.00% | absent |
| E | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | absent |
| Indice de susceptibilité | B | B | B | B | Absent |

Tableau 4.9 Dépôts indifférenciés : Tableau des probabilités d'appartenance à une catégorie sismique selon l'épaisseur des dépôts meubles, avec niveau de susceptibilité correspondant

| Indifférenciés catégorie\épaisseur | 0 à 5 [m] | 5 à 10 [m] | 10 à 20 [m] | 20 à 30 [m] | >30 [m] |
|---|------------------|-------------------|------------------------|------------------------|-------------------|
| A, B | 57.14% | 24.39% | 6.67% | 0.00% | absent |
| C | 42.86% | 68.29% | 73.33% | 50.00% | absent |
| D | 0.00% | 7.32% | 20.00% | 50.00% | absent |
| E | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | absent |
| Indice de susceptibilité | TTB | B | B | BM | Absent |

Le Tableau 4.10 récapitule les niveaux de susceptibilité assignés à partir des probabilités d'appartenance à une certaine catégorie d'emplacement sismique (voir aussi Tableau 4.1). Ainsi, pour un dépôt alluvial de 0 à 5 m d'épaisseur, un niveau de susceptibilité « Bas » est assigné, tel que défini au Tableau 4.2. Toutefois, selon le CNBC (IRC-CNRC, 2015b) et CSA-S6-14 (CAN/CSA, 2014), pour la conception des structures, s'il y a 3 m ou plus de dépôts meubles ou de roches fracturées ou altérées sous les fondations peu importe la valeur de V_{s30} calculée, la catégorie d'emplacement sismique doit être supérieure à B et doit être déterminée en fonction de la V_s du dépôt meubles ANNEXE I). Dans notre cas, nous considérons que la profondeur des fondations est d'environ 3 m. Cette prise en compte de la spécificité des codes induit un changement dans nos niveaux de susceptibilité pour les dépôts organiques d'une épaisseur de 5 à 10 m. En effet, ces dépôts devraient être caractérisés avec un indice de TTB selon les probabilités obtenues grâce aux cartes de microzonage. Toutefois, si on prend en compte la profondeur de la fondation de 3 m, un niveau de susceptibilité de TB est attribué pour ces dépôts entre 5 et 10 m d'épaisseur, car la moyenne des vitesses dans les dépôts meubles n'est pas connue.

Tableau 4.10 Tableau récapitulatif des niveaux de susceptibilité à l'amplification selon l'épaisseur des dépôts meubles et le type de géologie affleurante

| Géologie affleurante\épaisseur du dépôt | 0 to 5 [m] | 5 to 10 [m] | 10 to 20 [m] | 20 to 30 [m] | >30 [m] |
|--|-------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-------------------|
| Dépôts alluviaux | B | B | BM | H | TH |
| Dépôts de versant | H | H | H | TH | TH |
| Dépôts éoliens | Absent | Absent | Absent | Absent | Absent |
| Dépôts glaciofluviaux | TTB | B | B | B | B |
| Dépôts glaciolacustres | Absent | Absent | Absent | Absent | Absent |
| Dépôts anthropiques | B | B | B | B | Absent |
| Dépôts lacustres | Absent | Absent | Absent | Absent | Absent |
| Dépôts marins | TB | B | BM | H | TH |
| Dépôts organiques | TTB | TB** | TB | H | TH |
| Roche* | TTB | Absent | Absent | Absent | Absent |
| Tills-Dépôts glaciaires | TTB | TB | TB | TB | BM |
| Dépôts indifférenciés | TTB | B | B | BM | Absent |

*Les sites où la roche affleure, ont automatiquement un niveau minimum d'amplification.

**Spécificité du CNBC pour la conception, indice supérieur à A ou B en fonction des Vs des dépôts meubles.

4.3 Méthode de validation des indices de susceptibilité par mesures de vibration ambiantes

Afin de préciser et de compléter l'évaluation la première phase d'attribution des niveaux de susceptibilité à l'amplification, une campagne de mesure de MVA a été organisée sur 50 sites. Dans cette optique, trois points devaient être mis en avant dans le choix des sites, afin d'améliorer notre approche :

1. Vérifier les probabilités d'appartenir à une certaine catégorie d'emplacement sismique comme décrit dans le sous-chapitre précédent (4.2);
2. Maintenir une représentativité des mesures selon la surface qu'occupent les différentes configurations géologiques;
3. Compléter les informations pour les géologies qui sont bien présentes dans la région d'étude, mais qui n'ont pas fait l'objet d'étude de microzonage, car absentes pour les trois villes clés, soient les sédiments lacustres ou éoliens.

Les sites ont été choisis en fonction du type de géologie de surface, de l'épaisseur des dépôts meubles et de l'emplacement d'ouvrages d'art sur les routes municipales. Lorsque cela était possible, pour chaque site une mesure était effectuée sur le sol au bord de la route et une autre sur l'ouvrage. De plus, le but de cette campagne était également de recueillir des informations sur la fréquence naturelle des ouvrages d'art et d'essayer de comprendre l'interaction entre ces derniers et les sols afin d'investiguer sur le potentiel de résonance entre sols et structures pour les ouvrages d'art de la région d'étude.

4.3.1 Campagne d'acquisition

Pour chaque site de mesure, 20 minutes d'enregistrement sont prises sur le bord de la route et 20 autres sur l'ouvrage d'art. Les sites de mesure sont choisis uniquement sur des ouvrages appartenant aux routes municipales, ainsi il y a moins d'achalandage lors de l'acquisition et les mesures sont plus précises. Le choix des sites repose sur trois conditions mentionnées précédemment.

1. Lorsque pour une certaine configuration géologique, les probabilités d'appartenir à une certaine catégorie d'emplacement sismique de sol ne sont pas claires, mais se répartissent sur l'ensemble des classes sismiques, alors il sera nécessaire de faire des mesures sur le terrain pour préciser l'approche;
2. La surface occupée par certains dépôts en fonction de l'épaisseur des dépôts meubles est déterminée grâce au Tableau 4.11, en pourcentage par rapport à l'aire totale.

Tableau 4.11 Surface couverte par les dépôts meubles en fonction de l'épaisseur générale des dépôts

| Dépôts de surface épaisseur des dépôts | 0 à 5 [m] | 5 à 10 [m] | 10 à 20 [m] | 20 à 30 [m] | >30 [m] |
|---|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| Dépôts alluviaux | 1.29% | 1.58% | 2.68% | 2.29% | 4.22% |
| Dépôts de versant | 0.05% | 0.03% | 0.06% | 0.12% | 0.25% |
| Dépôts éoliens | 0.16% | 0.45% | 0.37% | 0.11% | 0.01% |
| Dépôts glaciofluviaux | 0.18% | 0.13% | 0.17% | 0.04% | 0.13% |
| Dépôts glaciolacustres | 0.02% | 0.02% | 0.02% | 0.01% | 0.02% |
| Dépôts anthropiques | 0.02% | 0.04% | 0.06% | 0.01% | 0.00% |
| Dépôts lacustres | 0.23% | 0.58% | 1.46% | 1.7% | 1.66% |
| Dépôts marins | 7.74% | 10.53% | 16.29% | 7.8% | 4.83% |
| Dépôts organiques | 0.92% | 1.44% | 1.47% | 0.47% | 0.63% |
| Tills-Dépôts glaciaires | 7.76% | 7.47% | 6.17% | 1.2% | 0.34% |
| Dépôts indifférenciés | 0.02% | 0.03% | 0.02% | 0.01% | 0.00% |

Les dépôts marins sont prédominants, il y aura donc plus de mesures sur des sites où les dépôts marins affleurent, ils sont suivis par les tills et les dépôts alluviaux. En revanche, les dépôts glaciolacustres sont très peu présents, ils ne feront donc pas l'objet de mesure. Les dépôts glaciolacustres seront considérés avec la même susceptibilité que les dépôts fluvioglaciaires, bien qu'ils n'aient pas exactement la même composition que ces derniers. En effet, les dépôts glaciolacustres sont majoritairement composés d'argiles tandis que les dépôts fluvioglaciaires contiennent des dépôts plus grossiers. Ainsi, on pourrait imaginer que la susceptibilité serait la même que pour les dépôts marins d'argiles salées. Toutefois, nous considérons dans cette étude la géologie de surface comme représentative de toute une colonne stratigraphique. Ceci implique que l'âge des dépôts est à considérer, car il agit sur le contenu de la colonne stratigraphique se trouvant sous la géologie de surface. Si la méthode considérait les dépôts meubles prédominants et non pas les dépôts de surface, dans ce cas les dépôts glaciolacustres pourraient être affiliés aux dépôts lacustres composés de silt ou de dépôts marins composés d'argiles salées, sous réserve qu'ils aient le même comportement, car selon certaines études, la présence de salinité dans les argiles indique une plus faible résistance aux cisaillements (Quigley, 1980);

3. Les sédiments lacustres ou éoliens (Tableau 4.10) n'ont pas fait l'objet d'étude de microzonage, car absentes pour les trois villes clés. Les dépôts lacustres sont présents sur 5.6% de la zone d'étude et douze mesures sont effectuées sur ces dépôts, alors que les dépôts éoliens ne sont que très peu présents dans la zone d'étude (1.1%), c'est pourquoi seules deux mesures ont été effectuées sur ces dépôts.

Le choix des mesures dépend de la géologie de surface et de l'épaisseur des dépôts meubles tel que décrit dans le Tableau 4.12. où on recense le nombre de mesures en fonction de la configuration géologique.

Tableau 4.12 Nombre de mesure de bruit ambiant en fonction de la configuration géologique

| Dépôts de surface\épaisseur des dépôts | Nombre de mesures | 0 à 5 [m] | 5 à 10 [m] | 10 à 20 [m] | 20 à 30 [m] | >30 [m] |
|---|--------------------------|------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| Dépôts alluviaux | 8 | 2 | 0 | 2 | 2 | 2 |
| Dépôts éoliens | 2 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Dépôts lacustres | 12 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| Dépôts marins | 14 | 3 | 4 | 4 | 3 | 0 |
| Dépôts organiques | 4 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 |
| Tills-Dépôts glaciaires | 10 | 2 | 3 | 3 | 2 | 0 |
| Total | 50 | 8 | 10 | 15 | 12 | 5 |

La campagne s'est concentrée sur les dépôts marins avec 14 sites de mesure. Il y a également 12 mesures sur les dépôts lacustres et dix sites sur des dépôts glaciaires (tills). La carte suivante permet de visualiser les sites de mesures répartis sur 32 000 km².

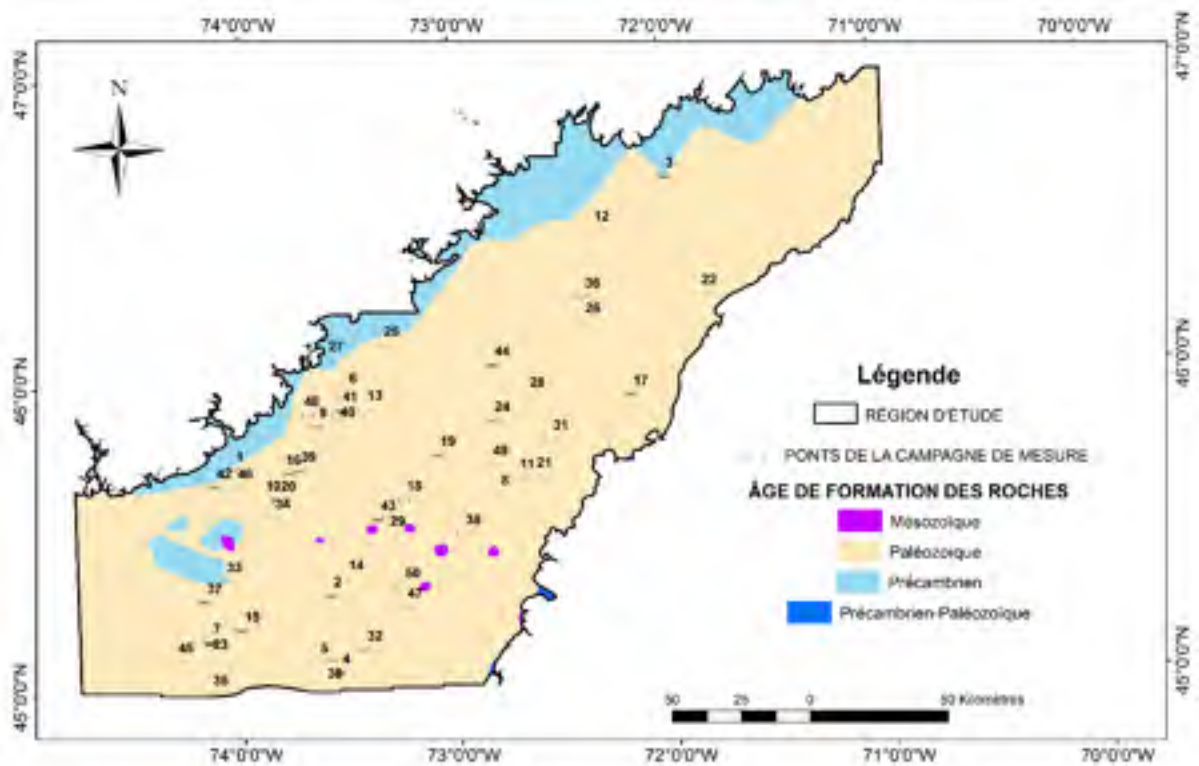


Figure 4.4 Carte de la zone d'étude avec les 50 sites de mesures de vibrations ambiantes et l'âge du roc
Données tirées du Gouvernement du Canada (2004b) et de Gouvernement du Canada (2017)

Sur les cinquante mesures, une mesure se situe sur du socle datant du Précambrien (province de Grenville), 21 se situent dans la province des Appalaches et 28 sur la Plate-forme du Saint-Laurent. Toutes les 49 mesures appartenant à la province des Appalaches et de la Plate-forme du Saint-Laurent sont situées sur de la roche datant du Paléozoïque.

4.3.2 Prise de mesures

La campagne de mesures s'est répartie sur 9 jours, soit : du 28 au 30 septembre, du 18 au 20 octobre, le 27 et le 29 octobre, ainsi que le 2 novembre 2015. Le choix des jours s'est fait selon les conditions météorologiques et la disponibilité des chercheurs. En effet, le vent peut considérablement détériorer les mesures, ainsi que la pluie ou les températures en-dessous de zéro. C'est pourquoi aucune mesure n'a été effectuée sous la pluie et nous avons utilisé une cage en polystyrène que nous avons placé sur le sismomètre lorsque le vent soufflait. Chaque

mesure a duré 20 minutes et comme chaque site comportait une mesure sur le sol (Figure 4.5) et une autre sur l'ouvrage, la majorité des sites ont été investigués en 50 minutes environ.



Figure 4.5 Photo d'une prise de mesure à Terrebonne

4.3.3 Traitement des données

L'acquisition se fait par mesure du bruit ambiant grâce à un sismomètre à trois composantes, deux horizontales et une verticale (Tromino®, 2011). Le traitement se fait ensuite par le logiciel Grilla (fourni avec le sismomètre) qui divise le signal en fenêtres de 20 sec. Ces fenêtres sont filtrées et affinées par un fenêtrage de Bartlett. Une transformée de Fourier y est ensuite appliquée puis le signal est lissé par la méthode des fenêtrages triangulaires. Le rapport entre la moyenne géométrique des composantes horizontales et la composante verticale est ensuite calculée selon l'équation (4.1) (Hunter et al., 2012; Tromino®, 2011):

$$\frac{\sqrt{H_{NS} \times H_{EO}}}{V} \quad (4.1)$$

Où H_{NS} and H_{EO} sont les spectres d'amplitudes lissés des composantes horizontales et V correspond au spectre lissé de la composante verticale. À la fréquence de résonance, les composantes horizontales s'amplifient et la composante verticale s'annule. Le résultat final est une courbe d'amplification avec l'écart-type en fonction des fréquences (SESAME, 2004). Une sélection des fenêtres où le signal est plus clair peut par ailleurs diminuer l'écart-type et préciser la fréquence de résonance. Ce processus est appliqué pour les mesures sur le sol et sur les ouvrages d'art.

Le point de mesure numéro 50 (Figure 4.4) est pris comme exemple. Cette mesure se situe sur des dépôts alluviaux d'une épaisseur de 14 mètres; le socle sous les dépôts meubles date du paléozoïque, il est d'une vitesse de 1500 m/s (Nastev et al., 2016a). La courbe de mesure des vibrations ambiantes de la Figure 4.6 indique une fréquence de résonance à 4.3 Hertz.

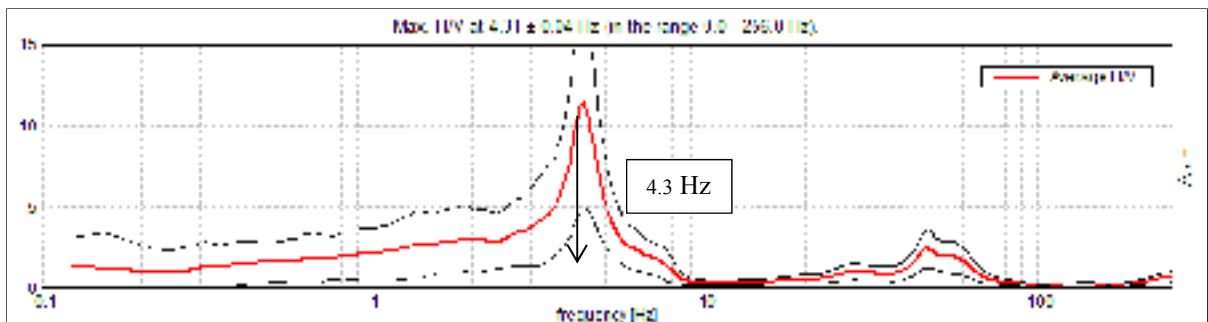


Figure 4.6 Courbe de vibrations ambiantes pour le site numéro 50

À partir de cette fréquence de résonance on peut déterminer la vitesse des ondes de cisaillement dans les 14 premiers mètres constitués de dépôts meubles (1.3). Le résultat de ce calcul est de 240.1 m/s. Afin de déterminer une catégorie d'emplacement sismique des sols, il faut calculer la vitesse des ondes de cisaillements moyenne dans les 30 premiers mètres (1.5). Il faudra donc considérer 14 mètres de dépôts à V_s de 240.1 m/s ainsi que les 16 autres mètres de socle rocheux d'une vitesse de 1500 m/s. Le résultat de ce calcul est de 436 m/s comme moyenne

dans les 30 premiers mètres. Cette valeur correspond à un site de catégorie d'emplacement sismique C. Cette même démarche est effectuée pour les 50 mesures. Toutefois la mesure n°8 n'a pas permis de déterminer une fréquence particulière, car le signal était trop désordonné (voir en ANNEXE V). Les courbes des mesures sur les sites figurent à l'ANNEXE V avec un tableau récapitulatif à l'ANNEXE VI. Les courbes des mesures sur les ouvrages d'art figurent à l'ANNEXE VII avec un tableau récapitulatif à l'ANNEXE VIII.

4.4 Résultats de la campagne de MVA

4.4.1 Fréquences de résonance des sites

Les fréquences de résonance des sites sont récapitulées au Tableau 4.13 et varient entre 1 et 25 Hz (Tableau 4.13, ANNEXE V et VI).

Tableau 4.13 Table récapitulative des fréquences de résonance pour les mesures de bruit ambiant en Hertz

| Dépôts de surface\épaisseur des dépôts meubles | 0 à 5 [m] | 5 à 10 [m] | 10 à 20 [m] | 20 à 30 [m] | >30 [m] |
|--|--------------|--------------------|--------------------------|-------------------|--------------------|
| Dépôts alluviaux | 1.9 - 2.28 | | 4.3 - 9.25 | 1 - 3.95 | 1.6 - 5.6 |
| Dépôts éoliens | | 8.09 | 7 | | |
| Dépôts lacustres | 30 | 11.25 - 15 | 2.5 - 4.1 - 7.5 | 1.25 - 2.8 - 3.25 | 1.06 - 1.22 - 1.22 |
| Dépôts marins | 7- 10- 16.25 | 3.8 - 9.7- 15 - 25 | 1.22 - 3.4 - 4.16 - 5.28 | 1.56 - 2 - 2.19 | |
| Dépôts organiques | | | 8.34 -22 | 2.31 - 7.8 | |
| Tills-Dépôts glaciaires | 23 | 13 - 14.7 - 18 | 4.9 - 5.8 - 11.2 | 1.45 - 3.44 | |

La majorité des résultats, dépôt par dépôt, suit la relation établie à l'équation 1.3 qui implique qu'à V_s constante, plus l'épaisseur des dépôts augmente, plus la fréquence fondamentale diminue; à l'exception des dépôts alluviaux où les deux mesures de fréquence entre 0 à 5 mètres d'épaisseur sont très faibles. L'enregistrement est très bruité et l'écart type est grand pour le

site où les résultats du bruit ambiant donnent pour fréquence de résonance 2.28 Hz. Cependant la courbe d'amplification pour l'enregistrement dont la fréquence de résonance est de 1.9 Hz est claire (voir ANNEXE V).

4.4.2 Validation des MVA

En général, les valeurs de fréquences de résonances obtenues augmentent lorsque l'épaisseur des dépôts meubles diminue selon la relation de l'équation 1.3 (Braganza et al., 2016). Cependant, il convient tout de même de valider les mesures.

On peut définir une courbe de tendance à partir de 47 de nos données (Figure 4.7) sur les 49 fréquences mesurées. Une régression de puissance a été effectuée et un coefficient de corrélation de 0.8 a été déterminé pour l'équation ci-dessous :

$$F_0 = 83.954h^{-1.063} \quad (4.2)$$

Toutefois deux des fréquences de résonances mesurées (sous forme de croix dans la figure 4.6) ont été supprimées, car elles sont à l'écart des autres résultats. En effet, ces mesures présentent des fréquences basses et sont situées sur des dépôts meubles de faibles épaisseurs. Ces deux fréquences proviennent de mesures effectuées sur des dépôts alluviaux (mesures 1 et 14 voir ANNEXE V et VI). Ces basses fréquences pourraient être reliées à des dépôts ayant une faible résistance au cisaillement. En effet, on a déjà pu voir dans le Tableau 4.10 que les dépôts alluviaux sont reliés à des catégories d'emplacement sismique plus amplificatrice que la majorité des autres dépôts. Seuls les dépôts de versant ont un potentiel plus amplificateur. La composition des dépôts alluviaux est très variable, elle dépend à la fois du réseau de drainage et de la qualité des roches érodées. Elle dépend également de la vitesse d'écoulement qui déposera les gros galets au centre du cours d'eau où la vitesse est forte, et les sédiments fins au bord du cours d'eau où la vitesse est faible. Pour la région d'étude, on peut trouver à la fois des tills remaniés, de l'argile remanié, du sable, des graviers et des silts. Leur état de compacité peut également varier, car l'âge des dépôts est également très différent (Caron et al., 2014;

Fransham et Gadd, 1977; Godbout, 2013; Tremblay, 2008). L'ensemble de ces facteurs peuvent influencer la vitesse des ondes de cisaillement du dépôt. De plus, l'étude de Paultre et al. (1993) confirme la forte susceptibilité à l'amplification des dépôts alluviaux, car elle montre des dommages plus importants sur les sites correspondant à des dépôts alluviaux après le séisme de Saguenay en 1988.

Les études menées par Rosset et al. (2015) pour la ville de Montréal et celle menées par Motazedian et al. (2011) ont également trouvé un lien entre les fréquences de résonance et la profondeur des dépôts meubles par l'intermédiaire d'une vitesse d'onde de cisaillement moyenne ($V_{s_{moy}}$). L'équation (4.3a) donne la relation calculée pour la région de Montréal pour une profondeur allant de 0 à 120 mètres, pour la vitesse d'onde de cisaillement moyenne ($V_{s_{moy}}$) et pour la fréquence de résonance moyenne (Braganza et al., 2016).

$$V_{s_{moy}} = -0.0058h^2 + 2.2401h + 205.5356 \quad (4.3a)$$

$$F_0 = V_{s_{moy}} / (4h) \quad (4.3b)$$

Pour la région d'Ottawa, la relation calculée pour une profondeur allant de 0 à 120 mètres est donnée par l'équation (4.4a) (Braganza et al., 2016).

$$V_{s_{moy}} = -0.88h + 123.86 \quad (4.4a)$$

$$F_0 = V_{s_{moy}} / (4h) \quad (4.4b)$$

La relation entre les données de Montréal (ligne pointillée rouge, Figure 4.7) et les données récoltées pendant cette campagne sont plus proches que la relation obtenue pour les données de la région d'Ottawa-Gatineau (ligne pointillée verte, Figure 4.7). En effet, la campagne de mesures effectuée dans cette étude est bien plus proche géographiquement de la ville de Montréal que de celle d'Ottawa, ce qui peut influencer la nature des dépôts et ainsi les vitesses de propagation des ondes de cisaillement. De plus, il semblerait que de manière générale les

données de Montréal et les données de notre étude soient plus élevées que pour Ottawa. Les dépôts d'Ottawa sont donc en moyenne des vitesses d'onde de cisaillements plus faible que pour notre zone d'étude.

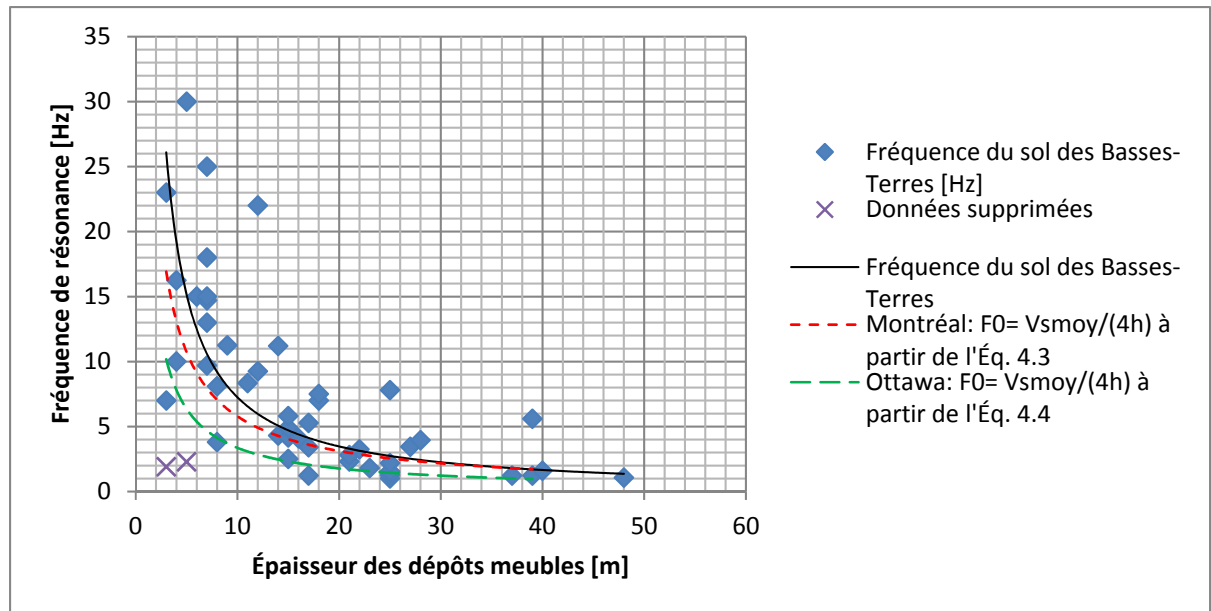


Figure 4.7 Fréquences de résonance en fonction de l'épaisseur des dépôts meubles

4.4.3 Calcul des V_{s30} des sites

À partir de l'équation 1.3, on déduit le V_s selon la fréquence de résonance et l'épaisseur des dépôts meubles. Une fois ce calcul fait, l'équation 1.5 permet de définir une V_{s30} en fonction de la vitesse des ondes de cisaillement de la roche. Pour ce faire, plusieurs études sont à prendre en compte. En effet, grâce à la Figure 1.1 il est possible de calculer les V_{s30} en prenant en compte les V_s du roc selon que le socle appartient à l'orogène Appalachien, la Plate-forme du Saint-Laurent ou la province de Grenville. Pour la région d'Ottawa-Gatineau, les vitesses fluctuent entre 1000 et 4800 m/s avec une moyenne arithmétique de 2800 m/s (Hunter et al., 2010), le socle dans cette région fait partie de la Plate-forme du Saint-Laurent. Pour l'île de Montréal, toujours sur la Plate-forme du Saint-Laurent, les vitesses du socle ont une moyenne de 2300 m/s (Rosset et al., 2015). Pour la ville de Québec, les vitesses sont égales ou au-

dessous de 1000 m/s (Hunter et al., 2012). L'étude de Nastev et al. (2016a), qui couvre les vallées du Saint-Laurent et Ottawa, considère une moyenne de 1500 m/s pour les roches datant du paléozoïque telles que la Plate-forme du Saint-Laurent ou l'orogène Appalachien; une moyenne de 2500 m/s est considérée pour les roches du Précambrien telles que le socle de la province de Grenville et les roches intrusives des montagnes Montérégiennes (Nastev et al., 2016a). L'étendue de la zone d'étude nous conduit à considérer les mêmes vitesses moyennes que l'étude de Nastev et al. (2016a), soient 1500 m/s pour les 48 sites placés sur du socle datant du paléozoïque et 2500 m/s pour le site placé sur du socle datant du Précambrien de la province de Grenville (mesure n° 27). Nos mesures, tel qu'on le voit à la Figure 4.4 sont toutes sur des roches paléozoïques, exceptée une sur le socle de la province de Grenville. Le calcul des V_{s30} en fonction des fréquences de résonances est résumé au Tableau 4.14.

Les niveaux de susceptibilité à l'amplification sont ajustés pour considérer les exigences des codes tel qu'expliqué à la section 4.2. Cette prise en compte de la définition des catégories d'emplacement selon les codes de conception des structures, induit un changement dans nos catégories d'emplacements sismiques pour certains sites situés sur des dépôts lacustres, marins et les tills d'une épaisseur de 5 à 10 m (ANNEXE I). En effet, pour 7 de ces valeurs les V_{s30} calculées correspondent à des catégories d'emplacements sismiques B. C'est pourquoi pour ces 7 mesures, le calcul des V_s apparentes dans les dépôts meubles a également été effectué (voir Tableau 4.14).

Tableau 4.14 Tableau récapitulative des V_{s30} pour les mesures de bruit ambiant en m/s

| Dépôts de surface\épaisseur des dépôts meubles | 0 à 5 [m] | 5 à 10 [m] | | 10 à 20 [m] | 20 à 30 [m] | >30 [m] |
|--|-----------------|------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|---------------|
| | | V_{s30}^* | V_s^* | | | |
| Dépôts alluviaux | 201 - 238 | | | 436 - 769 | 118 - 464 | 256 - 874 |
| Dépôts éoliens | | 658 | | 686 | | |
| Dépôts lacustres | 1562 | 828 - 918 | 360 - 405 | 273 - 427 - 726 | 148 - 315 - 364 | 181-190 - 204 |
| Dépôts marins | 559 - 709 - 917 | 373 - 730 | | 140 - 365 - 428 - 536 | 185 - 209 - 255 | |
| | | 938 - 1184 | 429 - 700 | | | |
| Dépôts organiques | | | | 704 - 1284 | 263 - 848 | |
| Tills-Dépôts glaciaires | 1039 | 868 - 928 - 1027 | 364 - 412 - 504 | 492 - 565 - 909 | 171 - 402 | |

* Spécificité du CNBC pour la conception, indice supérieur à A ou B en fonction des V_s des dépôts meubles.

Pour la majorité des résultats, les V_{s30} suivent les fréquences de résonance et diminuent en fonction de l'épaisseur des dépôts meubles. En effet, plus l'épaisseur des dépôts meubles est grande plus les V_{s30} seront faibles. Les résultats montrent toutefois des V_{s30} très basses pour les dépôts alluviaux à faible épaisseur de dépôts meubles, ainsi qu'une valeur relativement élevée (874 m/s) pour une épaisseur supérieure à 30 m. Les dépôts alluviaux peuvent être très variables, tant dans leur composition (voir section 2.2), que dans la rapide variation de leur épaisseur. On peut mentionner que les V_{s30} les plus fortes sont attribuées aux dépôts de tills. Ces dépôts sont les plus vieux de la colonne sédimentaire, ils sont ainsi, les plus consolidés.

4.4.4 Ajustement des niveaux de susceptibilité à l'amplification suite aux MVA

Le calcul des V_{s30} effectué à la section Fréquences de résonance des sites permet d'attribuer à chaque site de mesure une catégorie d'emplacement sismique selon le CNBC (ANNEXE I). Le Tableau 4.15 décrit les catégories sismiques établies à partir des MVA pour les différentes configurations géologiques.

Tableau 4.15 Tableau récapitulative des catégories d'emplacement sismique selon les dépôts de surface et l'épaisseur des dépôts meubles

| Dépôts de surface \ épaisseur des dépôts meubles | 0 à 5 [m] | 5 à 10 [m] | | 10 à 20 [m] | 20 à 30 [m] | >30 [m] |
|--|-----------|-----------------|-----------------|-------------|-------------|---------|
| | | V_{s30}^* | V_s^* | | | |
| Dépôts alluviaux | D-D** | | | B-C | C-E | B-D |
| Dépôts éoliens | | C | | C | | |
| Dépôts lacustres | A | B-B | C-C | C-C-D | C-D-E | D-D-D |
| Dépôts marins | B-C-C | C- C- C-C | B- B- C C | C-C-C-E | D-D-D | |
| Dépôts organiques | | | | B-C | B-D | |
| Tills-Dépôts glaciaires | B | B- B-B | C- C-C | B-C-C | C-E | |

*Spécificité du CNBC pour la conception, catégorie d'emplacement doit être différente de A ou B et établie en fonction du V_s des dépôts meubles.

**Catégorie d'emplacement sismique déterminée à partir des MVA et à corriger pour tenir compte des tendances notées pour les plus grandes épaisseurs de dépôts meubles.

Pour la majorité des résultats, la prévalence des catégories d'emplacement sismique D et E augmente en fonction de l'augmentation de l'épaisseur des dépôts meubles. Seuls les sites où les dépôts alluviaux affleurent ne suivent pas cette tendance. En effet, les classes de sol D sont attribuées pour une épaisseur des dépôts meubles de 0 à 5 m, ce qui va à l'encontre de la tendance observée pour ces mêmes dépôts de plus grandes épaisseurs. Ainsi les niveaux de susceptibilité à l'amplification seront ajustés pour considérer la tendance du dépôt. La plupart des résultats confirment les niveaux préétablis par la 1^{ère} approche (Tableau 4.10). Les niveaux de susceptibilité ajustés suite aux MVA sont surlignés en jaune dans le Tableau 4.16. Pour les dépôts alluviaux, les niveaux de susceptibilité sont ajustés pour considérer les valeurs de

vitesse très faibles obtenues pour les dépôts de moins de cinq mètres. Ainsi, un niveau BM est attribué pour les épaisseurs de dépôts de zéro à dix mètres tout comme pour les épaisseurs allant jusqu'à 20 mètres. De plus, pour une épaisseur de dépôt supérieur à 30 m, le niveau passe de TH à H. Selon les données de terrain, les Tills-Dépôts glaciaires auraient une catégorie d'emplacement sismique variant de C à E pour une épaisseur de dépôts meubles entre vingt et trente mètres, une des mesures correspondant à une classe E. Ce résultat est différent de ce qui a été établi en étudiant les données de microzonage (Tableau 4.10). On observait pour cette tranche d'épaisseur de dépôts meubles que la probabilité d'être dans la catégorie d'emplacement sismique A, B ou C était bien plus forte que celle d'appartenir à la catégorie D ou E. Le niveau de susceptibilité à l'amplification pour cette configuration géologique est ajusté à la hausse pour tenir compte des données de mesures de bruit ambiant. Pour les dépôts éoliens, un niveau stable de Bas a été attribué pour tous les dépôts meubles d'une épaisseur variant de 5 à 20 m suivant les MVA. En effet, deux mesures effectuées sur des épaisseurs de dépôts meubles variant de 5 à 20 mètres permettent de déterminer une catégorie d'emplacement sismique de C correspondant à un niveau « Bas » pour les dépôts éoliens. À partir de là un niveau TB est attribué pour une épaisseur plus fine (0 à 5 m). De plus, pour une épaisseur de plus de 20 m, un niveau de susceptibilité BM est attribué, puisque, l'analyse des cartes de microzonage n'a pas permis d'attribuer des niveaux de susceptibilité à ce type de dépôts (Tableau 4.10). Pour les dépôts lacustres, n'apparaissant pas lors de l'analyse des cartes de microzonage, les douze MVA permettent l'attribution de niveau de susceptibilité à l'amplification pour toutes les tranches d'épaisseur de dépôts meubles. Enfin pour les tranches de dépôts entre 5 et 10 m pour les dépôts lacustres, marins et tills, tel qu'expliqué à la section à la section 4.2, les codes de conception suggèrent de calculer les V_s des dépôts meubles et non pas les V_s pour les 30 m, si ces derniers correspondent à une catégorie A ou B.

Le tableau suivant décrit les nouveaux niveaux de susceptibilité à l'amplification selon la synthèse entre les deux approches précédemment décrites. Tel qu'attendu, plus l'épaisseur des dépôts meubles est grande plus le niveau de susceptibilité à l'amplification est grand. Pour les dépôts organiques entre 5 et 10 m d'épaisseur, le niveau est supérieur à TTB, car il prend en considération la spécificité des codes sur la conception (CAN/CSA, 2014; IRC-CNRC, 2015b)

tel qu'expliqué à la section à la section 4.2. Le code spécifie de prendre en considération dans ce cas les V_s des dépôts meubles seulement (ANNEXE I). Comme les données pour les dépôts organiques ne sont pas disponibles le niveau TB est attribué. Pour les dépôts marins et les tills, les niveaux de susceptibilité ne changent pas, que ce soit les V_{s30} ou les V_s . Toutefois, pour les dépôts lacustres représentant 0.58% de la zone d'étude, le niveau de susceptibilité à l'amplification pourrait varier de TB à B selon les deux méthodes de calcul. On peut mentionner également que cette spécificité du code Canadien n'est entrée en vigueur qu'à partir de la version 2010 et il n'est pas certains que les cartes de microzonage aient pris en compte les V_s de la couche de dépôts meubles. En effet, dans sa version 2005 le code propose implicitement d'attribuer un site de catégorie C dans ces situations, tel que (IRC-CNRC, 2005, p.J-34) : « Les deux catégories de sol rocheux, soit les emplacements de types A et B, ne doivent pas être utilisées s'il y a plus de 3 m de sol entre la surface de la roche et la sous-face de la semelle de répartition ou du radier, même si la moyenne calculée des vitesses des ondes de cisaillement est supérieure à 760 m/s ». Notre approche propose d'attribuer un niveau de susceptibilité intermédiaire de TB pour ces dépôts.

Tableau 4.16 Tableau récapitulatif des niveaux de susceptibilité à l'amplification selon l'épaisseur des dépôts meubles et le type de dépôt de surface

| Géologie affleurante\épaisseur du dépôt | 0 to 5 [m] | 5 to 10 [m] | 10 to 20 [m] | 20 to 30 [m] | >30 [m] |
|--|------------------|------------------|--------------|-------------------|------------------|
| Dépôts alluviaux | BM* au lieu de B | BM* au lieu de B | BM | H | H* au lieu de TH |
| Dépôts de versant | H | H | H | TH | TH |
| Dépôts éoliens | TB* | B* | B* | BM* | BM* |
| Dépôts glaciofluviaux et glaciolacustres | TTB | B | B | B | B |
| Dépôts anthropiques | B | B | B | B | Absent |
| Dépôts lacustres | TTB* | TB* | BM* | M* | M* |
| Dépôts marins | TB | B | BM | H | TH |
| Dépôts organiques | TTB | TB** | TB | H | TH |
| Roche | TTB | Absent | Absent | Absent | Absent |
| Tills-Dépôts glaciaires | TTB | TB | TB | BM* au lieu de TB | BM |
| Dépôts indifférenciés | TTB | B | B | BM | Absent |

*En surbrillance les indices ajustés suite à la prise en compte des MVA

**Spécificité du CNBC pour la conception, indice supérieur à A ou B selon Vs des dépôts meubles.

Selon les niveaux de susceptibilité à l'amplification établis (Tableau 4.16), les dépôts de versant sont les plus susceptibles d'amplifier les ondes sismiques. Ces résultats sont probables, car les dépôts de versant correspondent aux dépôts les moins consolidés. Les dépôts de surface alluviaux viennent en deuxième position en termes de susceptibilité à l'amplification. On retrouve en effet une corrélation entre la présence de dépôts alluviaux et des dommages aux constructions suite au séisme de Saguenay en 1988 (Paultre et al., 1993). De plus, ces dépôts, de par leur emplacement souvent proche d'un cours d'eau, sont probablement plus sujet à de l'altération ou de la fissuration, tels que pour les dépôts d'argiles de Champlain (Lefebvre, 1986). Le troisième dépôt de surface ayant les indices les plus hauts sont les dépôts de types

marins. Ceux-ci sont connus pour avoir une faible résistance au cisaillement de par leur propriété physico-chimique (Quigley, 1980).

Le Tableau 4.16 sert de guide pour l'élaboration d'une carte de la susceptibilité à l'amplification pour la région d'étude. Toutefois, pour les villes de Québec et Montréal, les indices correspondant aux classes sismiques de sol déjà calculés par le microzonage seront maintenus.

Au total 75% des niveaux attribués pour ces deux villes correspondent aux catégories d'emplacement déterminées par microzonage ou à un niveau intermédiaire lui étant rattaché (voir Tableau 4.17). Les niveaux correspondant à d'autres catégories d'emplacement sismique comptabilisent donc un total de 25%. Pour 15% des sites dans les 2 villes la méthodologie de cette étude surévalue l'amplification et pour 10% elle sous-évalue le phénomène. On peut également mentionner que 10% des sites sont surévalués par plus de 2 niveaux de susceptibilité et 2% sont sous-évalués par plus de deux niveaux de susceptibilité.

Tableau 4.17 Tableau de corrélation entre les niveaux de susceptibilité à l'amplification finaux et les catégories d'emplacements sismiques pour les villes de Montréal et Québec par de précédentes études

| | A et B | C | D | E |
|--------------------------|---------------|----------|----------|----------|
| TTB (cat. A et B) | 20,71% | 5,85% | 0,20% | 0,15% |
| TB | 15,06% | 13,29% | 1,24% | 0,08% |
| B (cat. C) | 4,91% | 6,68% | 1,67% | 0,28% |
| BM | 7,87% | 9,22% | 6,43% | 0,35% |
| M (cat. D) | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| H | 0,58% | 1,70% | 3,57% | 0,00% |
| TH (cat. E) | 0,00% | 0,08% | 0,35% | 0,00% |

La carte suivante décrit la zone d'étude selon les indices de susceptibilité à l'amplification selon Tableau 4.16 et les définitions des niveaux de susceptibilité associés aux niveaux tels que donnés au Tableau 4.1.

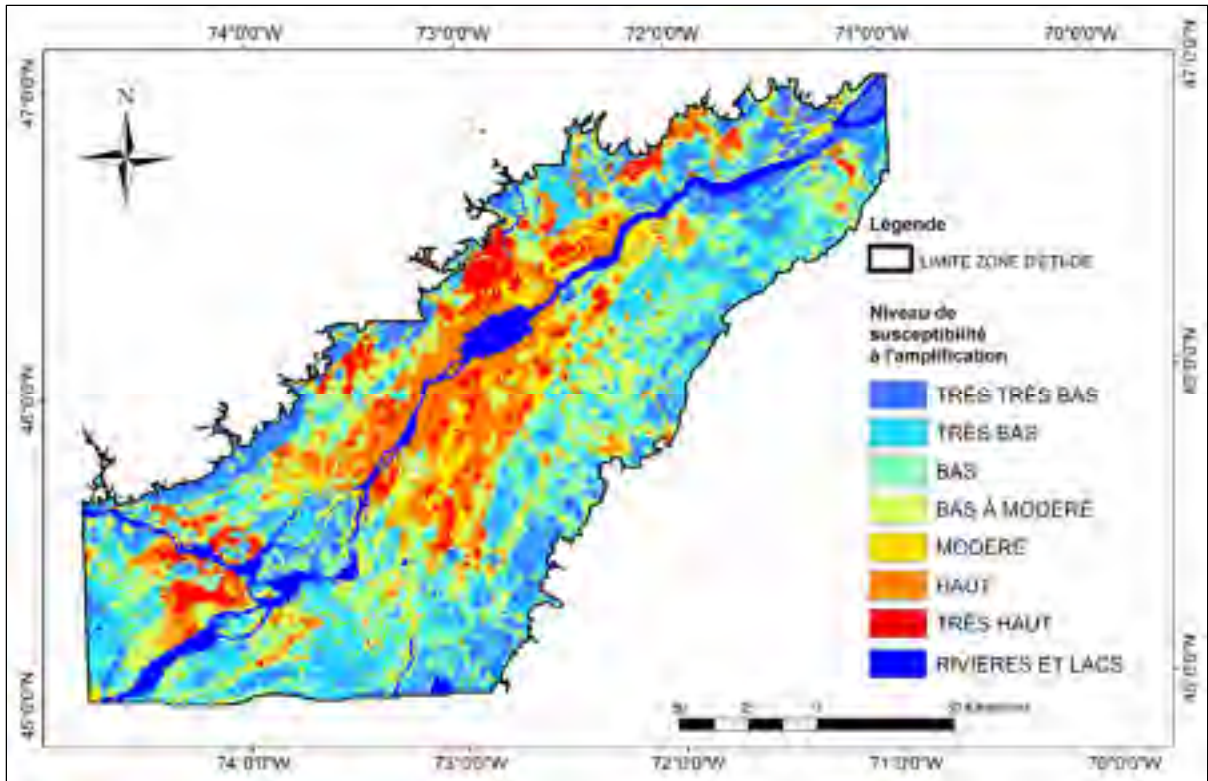


Figure 4.8 Carte de susceptibilité à l'amplification pour les Basses-Terres du Saint-Laurent :
 très très bas = 1; très bas = 1.025; bas = 1.05; bas à modéré = 1.1, modéré = 1.15;
 haut= 1.2; très haut = 1.25

Les régions les plus susceptibles se trouvent au centre de la région d'étude, en rouge ou à l'ouest de l'île de Montréal. Elles correspondent particulièrement avec l'augmentation des dépôts meubles, mais également avec le type de géologie affleurante.

La carte finale est à une résolution de 403.5 m, ce qui correspond à la moyenne quadratique (Koch et Link, 2002) entre les informations reliées à la géologie de surface et celles reliées à l'épaisseur des dépôts meubles (section 2.2).

La Figure 4.9 décrit la couverture qu'occupe chaque niveau de susceptibilité à l'amplification en fonction de l'ensemble de la zone d'étude.

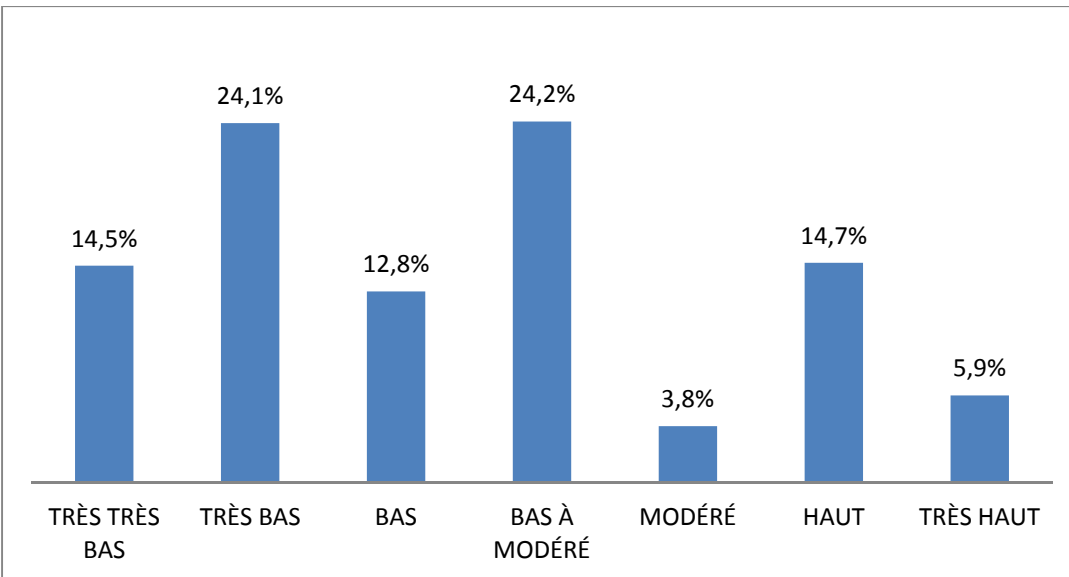


Figure 4.9 Histogramme de la couverture des niveaux de susceptibilité à l'amplification en pourcentage par apport à la zone d'étude

Les niveaux de susceptibilité à l'amplification se répartissent entre 4 et 24 pourcent, le plus bas étant le niveau modéré correspondant à la catégorie d'emplacement sismique D (Tableau 4.1). Les catégories d'emplacement sismique A et B correspondent au niveau très très bas; le choix d'attribuer le même niveau pour les deux catégories d'emplacement sismique se justifie, car à elles deux, elles ne regroupent que 14.5 % de la zone d'étude.

4.4.5 Amplitude du pic de MVA et amplification réelle

Les mesures de vibrations ambiantes dégagent une amplitude à une certaine fréquence correspondant à la fréquence de résonance. Cette mesure correspond à la moyenne géométrique des composantes horizontales sur la composante verticale. Elle peut parfois être corrélée au réel phénomène d'amplification et parfois moins (Bonney-Claudet et al., 2006b). Nous savons que le phénomène d'amplification varie avec la nature des dépôts et leur épaisseur. Plus un dépôt est consolidé moins il sera amplificateur (Braganza et al., 2016). Les études sur l'amplitude du pic dégagé par mesure de vibrations ambiantes indiquent qu'en réalité l'amplitude dépend surtout du contraste d'impédance entre la roche et les dépôts meubles (Bonney-Claudet et al., 2009; Nakamura, 2000). De plus, les variations des sources de ces

vibrations jouent également un rôle. Nous savons par exemple que les conditions météorologiques ou l'activité humaine telle que le trafic routier sont également des sources de vibration et que leur variation peut avoir un effet sur l'amplitude du pic de fréquence (Bonnefoy-Claudet et al., 2006b).

Nous avons calculé à partir des mesures de vibrations ambiantes des moyennes d'amplitude du pic de fréquence pour les six principaux dépôts étudiés. Ces derniers sont classés dans la Figure 4.10 par ordre décroissant en fonction de la capacité d'amplification déterminée précédemment dans ce chapitre (Tableau 4.16) grâce aux cartes de microzonage et des V_s calculées à partir des MVA. Les pics d'amplitude varient entre 1.2 et 14, seule une des mesures sur les dépôts organiques (mesures 43 : $A_o = 24$, ANNEXE V et VI) a été supprimée des calculs, car son amplitude était bien plus haute que la moyenne. En effet, cette mesure a été effectuée à Boucherville sur le croisement entre l'autoroute de l'Acier (A-30) et la rue Eiffel, lors d'une période de fort achalandage. Les résultats (Figure 4.10) montrent une légère corrélation, mais pas une corrélation nette entre le phénomène d'amplification évalué précédemment et l'amplitude du pic de fréquence mesurée par vibrations ambiantes. Seuls les dépôts glaciaires et lacustres semblent ne pas respecter cette tendance. Ceci peut être dû à de plus fortes sources de vibrations lors des mesures comme décrit précédemment.

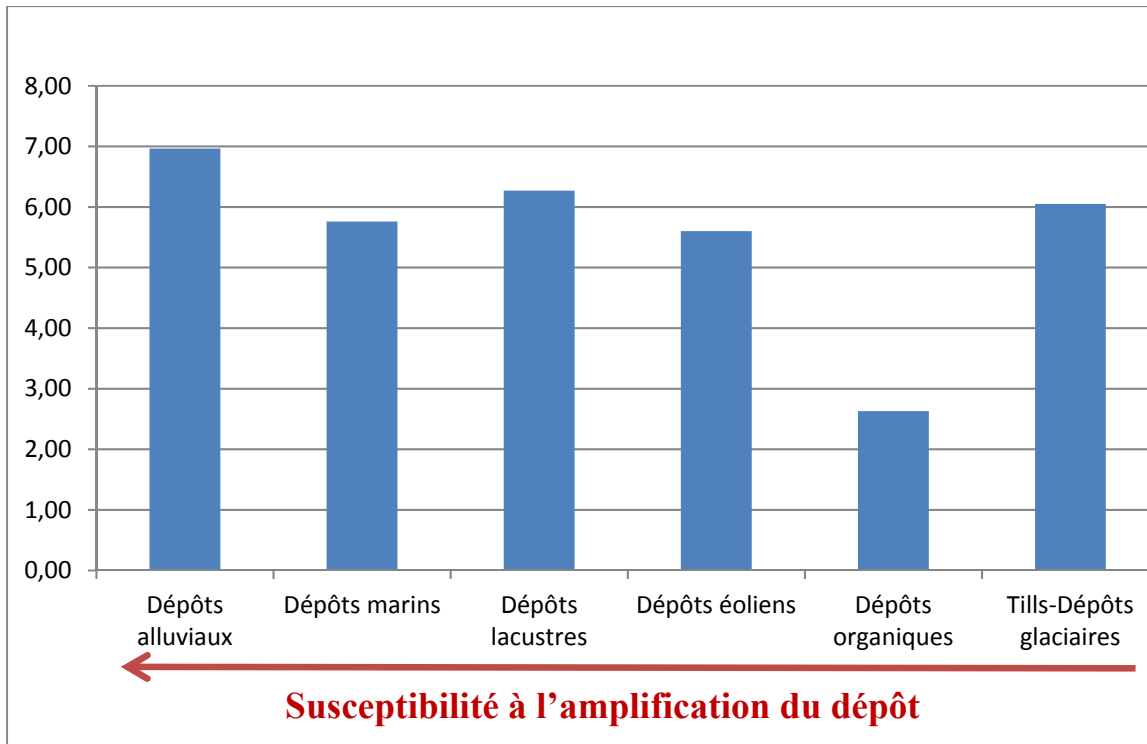


Figure 4.10 Histogramme des moyennes d'amplitudes du pic de fréquence H/V en fonction des différents types de dépôts de surface

4.4.6 Phénomène de résonance entre les ponts ou viaducs et le sol

Des mesures de vibrations ambiantes sur les ponts ou viaducs ont également été effectuées sur 46 des sites où les vibrations du sol ont été mesurées. En effet, quatre ouvrages d'art ne présentaient pas les conditions nécessaires pour effectuer les mesures. Au total, quinze mesures ont été effectuées sur des ouvrages à travée simple en béton, quatre sur des ouvrages à travées multiples, 14 ont été effectuées sur des ponceaux, cinq sur des ouvrages en acier et bois, quatre en acier et béton, 2 sur des ouvrages d'acier, de béton et de bois et un dernier sur un pont en maçonnerie et bois (ANNEXE VIII). Les fréquences mesurées varient de 1.25 à 100 Hz. Sur les 19 mesures effectuées sur les ouvrages en béton, six ont des contenus fréquentiels proches des fréquences de résonances trouvées pour les sols; cet écart oscille entre zéro et un Hz. Toutefois, il est difficile à l'état actuel d'interpréter ces mesures de fréquence des ouvrages en fonction de leurs caractéristiques structurales. En effet, il faudrait également plus de données sur les caractéristiques structurales des ouvrages afin de calculer leur fréquence de résonance

et de valider les résultats obtenus. Il serait intéressant de les comparer avec des mesures sur d'autres ouvrages (Altez, 2005; Gul et Catbas, 2008; Zhang, 2007)

4.5 Discussion et conclusion

Des niveaux de susceptibilité à l'amplification sont attribués dans un premier temps aux sites grâce au croisement entre les données concernant la géologie de surface, l'épaisseur des dépôts meubles et les catégories d'emplacements sismiques. Cette première série de niveau de susceptibilité provient de la probabilité d'appartenance à une certaine catégorie d'emplacement sismique selon une tranche d'épaisseur des dépôts meubles et de la nature des dépôts en surface. Lorsque ce croisement ne permet pas d'obtenir une probabilité claire d'appartenance à une catégorie d'emplacement sismique, un niveau intermédiaire est attribué. On peut également ajouter que les cartes de microzonage ayant servi à la calibration peuvent être améliorées par de nouvelles mesures et qu'ainsi, l'utilisation de données plus précises peut également changer et améliorer la définition des niveaux de susceptibilité à l'amplification.

Une campagne de mesures de vibrations ambiantes a permis de confirmer et préciser la première phase d'attribution des niveaux de susceptibilité. Les sites de mesure sont choisis selon trois critères : (i) lorsqu'une configuration géologique ne permet pas de dégager une probabilité nette pour un niveau de susceptibilité; (ii) si une configuration géologique est présente dans la zone d'étude, mais qu'elle ne l'est pas dans les trois principales régions urbaines (ville de Québec, île de Montréal et Ottawa-Gatineau) à partir desquelles les probabilités d'appartenance à une certaine catégorie d'emplacement sismique ont été extraites; et (iii) lorsqu'une configuration géologique est très souvent rencontrée dans la région d'étude, il est utile de conforter les premiers résultats à l'aide de mesures de vibrations ambiantes.

Les résultats de la campagne d'acquisition permettent d'extraire des fréquences de résonance. La comparaison entre les fréquences de résonances mesurées et l'épaisseur des dépôts meubles montre qu'une relation de puissance existe entre ces dernières. De plus, cette relation est proche

de celles mesurées pour la ville de Montréal et dans une moindre mesure d'Ottawa (Braganza et al., 2016).

Dans un deuxième temps, le calcul des V_{s30} à partir des fréquences de résonances et de l'épaisseur des dépôts meubles permettent de valider la première approche. Seules 4 configurations géologiques sur 39 se sont vues attribuées de nouveaux niveaux de susceptibilité. De plus, dix configurations géologiques nouvelles, non présentes dans les trois villes se sont vues assignées des niveaux de susceptibilité à l'amplification (dépôts lacustres et dépôts éoliens). Les résultats indiquent que plus l'épaisseur des dépôts meubles est grande plus les indices de susceptibilité à l'amplification augmentent. De plus, les dépôts de versants, alluviaux et marins sont les plus susceptibles à l'amplification. Une comparaison a été effectuée entre les nouveaux indices de susceptibilité à l'amplification et les cartes de microzonage des villes de Québec et Montréal. Dans environ 75% des cas les indices indiquent soit la catégorie exacte soit l'indice intermédiaire. La corrélation peut être considérée comme bonne. La même comparaison pourrait être faite pour les données de la région d'Ottawa-Gatineau.

Dans cette étude, l'AMS n'est pas intégrée dans la carte de susceptibilité à l'amplification. Dans une perspective d'évaluation qualitative du risque sismique des ouvrages d'art, l'AMS sera prise en compte par le biais d'un indice d'aléa qui sera décrit au CHAPITRE 7.

Les résultats des amplitudes des MVA ont été comparés à l'échelle finale des susceptibilités à l'amplification. Un léger lien a été constaté entre l'amplitude du pic calculé par les mesures de bruits ambiants et les indices de susceptibilité à l'amplification. Toutefois les mesures sur les dépôts glaciaires et les dépôts lacustres ne semblent pas se comporter en accord avec ce principe. On peut mentionner que certaines études (Bonneyoy-Claudet et al., 2006b; Nakamura, 2000) remettent en cause un lien direct entre amplification sur un site et amplitude du pic mesuré et mettent en avant le rôle de la source des vibrations ambiantes sur l'amplitude du pic mesuré.

CHAPITRE 5

SUSCEPTIBILITÉ À LA LIQUÉFACTION

Ce chapitre présente une étude sur la susceptibilité à la liquéfaction des sols. Le but est de qualifier les sites selon leur degré de susceptibilité. Le phénomène de liquéfaction est complexe, il requiert très souvent une étude géotechnique approfondie qui caractérise les différentes couches géologiques en présence sur un site spécifique ainsi que leur teneur en eau. En l'absence de telles données et dans l'objectif de classer les sites sur une relativement large zone de 32 000 km², l'utilisation d'une plateforme de système d'information géographique et de données générales sur le contexte géologique et la nappe phréatique permettent d'obtenir une première évaluation de la susceptibilité relative à la liquéfaction.

La méthodologie utilisée pour évaluer la susceptibilité à la liquéfaction provient de jugements d'experts tel que synthétisé par Youd et Perkins (1978). La susceptibilité à la liquéfaction est identifiée selon la lithologie et la nappe phréatique par opposition à certaines méthodes quantitatives pour évaluer la sensibilité à la liquéfaction basée sur la contrainte effective (Priestley, 1996). Le classement des lithologies se fait d'une part sur le type de dépôt et d'autre part selon l'âge des lithologies (indiquant l'état de compacité). Cette classification ne correspond toutefois pas toujours avec les dépôts développés dans la région d'étude. Dans ce cas, ce sont les recommandations de géotechniciens qui sont prises en compte. Les sols à sable saturés en eau sont plus susceptibles à la liquéfaction (Seed et Idriss, 1971; Winkley, 2013; Youd et Perkins, 1978).

La nappe phréatique indique si le sol est saturé en eau ou pas. Lorsque le toit de la nappe se trouve au-delà de la valeur seuil de dix mètres de profondeur, la susceptibilité à la liquéfaction pour ce site sera basse ou très basse. Si le toit de la nappe est plus proche de la surface que d'une profondeur de dix mètres, le type de dépôts indiquera la susceptibilité à la liquéfaction tel que suggéré par Youd et Perkins (1978).

On peut également mentionner que l'épandage latéral, souvent accentué par une contrainte de cisaillement statique liée à la pente ne sera pas pris en compte dans ce chapitre, mais sera considéré comme un mouvement gravitaire.

5.1 Échelle de susceptibilité à la liquéfaction

L'échelle de susceptibilité à la liquéfaction est établie selon le classement de Youd et Perkins (1978) selon cinq niveaux de très bas à très haut avec un niveau supplémentaire qualifié « aucun » pour les sites où la roche affleurent.

L'échelle selon les six niveaux de susceptibilité est composée de:

- aucun;
- très bas (TB);
- bas (B);
- modéré (M);
- haut (H);
- très haut (TH).

5.2 Paramètres

5.2.1 La géologie

Classement des lithologies

Comme vu dans l'introduction, il existe plusieurs types de dépôts quaternaires dans la zone d'étude, susceptibles d'être liquéfiés. C'est le cas généralement des sables et des silts saturés en eau, tel que les dépôts de delta en zone côtière, les dépôts alluviaux ou les dépôts lacustres lorsqu'ils sont saturés en eau par la nappe phréatique.

Les dépôts de la zone d'étude sont classifiés selon leur similitude avec les lithologies présentées au Tableau 3.1. (Youd et Perkins, 1978). Cette classification est présentée au Tableau 5.1. À noter que les roches ne figurent pas dans ce tableau car elles sont considérées comme non susceptibles à la liquéfaction. Les dépôts fluvioglaciaires et glaciolacustres n'ont pas d'équivalent dans cette classification. Ils seront donc qualifiés de « indéterminé ». De plus, les tills remaniés et d'ablation sont faiblement compactés indépendamment de leur âge, ils ne seront donc pas classés comme les autres tills plus compacts sous la catégorie « till glaciaire ». Les sédiments marins de l'est du Canada composés d'argiles sont également très sensibles au phénomène d'amollissement cyclique conduisant à un glissement de terrain (Carson et Lajoie, 1981; Quinn, 2009). Ce phénomène survient surtout aux abords des berges (Leroueil et al., 1983). Bien que ce phénomène ne soit pas à proprement parler de la liquéfaction, il sera partiellement traité dans ce chapitre. C'est pourquoi ils seront classés en indéterminés, excepté pour les dépôts d'origines deltaïques ou de plage, qui seront liés aux dépôts de delta.

Tableau 5.1 Corrélation entre les lithologies de la zone d'étude et celles considérées dans Youd et Perkins (1978)

| Lithologies dans la zone d'étude | Lithologies dans Youd et Perkins (1978) |
|---|--|
| A - Sédiments alluviaux: dépôts non différenciés | CANAL DE RIVIÈRE |
| Ai, Ap, At et Av - Sédiments alluviaux: sédiments estuariens et intertidaux, alluvions de plaine d'inondation, alluvions de terrasse fluviale, sédiments en couverture mince et discontinue | LIT MAJEUR |
| C - Dépôts de versants: dépôts d'éboulis et dépôts de glissement | COLLUVIONS |
| E - Sédiments éoliens | LOESS |
| GF - Sédiments fluvioglaciaires | INDÉTERMINÉS |
| GL - Sédiments glaciolacustres | INDÉTERMINÉS |
| H - Dépôts anthropiques: non différenciés | REMBLAIS NON COMPACTÉ |
| L - Sédiments lacustres | LACUSTRE ET PLAYA |
| M - Sédiments marins: sédiments non différenciés | INDÉTERMINÉS |
| Md et Mr - Sédiments marins: sédiments deltaïques et de plage | DELTA |
| O - Sédiments organiques: dépôts non différenciés | SOLS RESIDUELS |
| T - Sédiments glaciaires: till et sédiments non différenciés | TILL GLACIAIRE |
| Tf et Tz - Sédiments glaciaires: till remanié et d'ablation | INDÉTERMINÉS |
| U - Dépôts non différenciés | REMBLAIS NON COMPACTÉS |

Il est ensuite nécessaire de classer les dépôts selon leur âge :

- récent < 500 années;
- holocène < 11 000 années;
- pléistocène 11 000 à 2 000 000 années;
- pré-quaternaire > 2 000 000 années.

Les lithologies les plus vieilles qui affleurent aux Basses-Terres du Saint-Laurent sont les roches. La formation de ces roches est antérieure au quaternaire, elles sont fortement consolidées ce qui les rend non susceptibles à la liquéfaction.

Les premières formations quaternaires que l'on trouve sont des tills (Savard, 2013; Tremblay, 2008). Ils datent de l'époque glaciaire, lorsque le glacier du Wisconsin (de 12 000 à 20 000 ans BP) recouvrait la région. Pendant la même époque, des sédiments fluvioglaciaires provenant d'eskers et des sédiments glaciolacustres se sont également déposés (Savard, 2013; Tremblay, 2008).

À la fonte du glacier, des sédiments marins se sont déposés provenant de la mer de Champlain de la mer Laflamme et de la mer Goldthwait (Dionne, 1977). Les sédiments marins de la mer de Champlain sont généralement datés de 12 000 à 10 000 BP (Savard, 2013), toutefois l'époque interglaciaire se situe à l'holocène, c'est pourquoi nous considérerons les sédiments marins en tant que dépôts appartenant à l'holocène. Suite à cela des épisodes de dépôts lacustres, alluvionnaires, éoliens ainsi que des dépôts organiques sont survenus par endroits dans la zone d'étude. Tous ces dépôts sont datés de l'holocène également, exceptés les sédiments alluviaux qui continuent de se déposer aujourd'hui (Godbout, 2013; Savard, 2013). Ainsi une hypothèse conservatrice est adoptée pour les dépôts alluviaux en considérant qu'ils sont tous d'âge récent.

Ainsi, les seuls dépôts que nous considérons comme récents, sont les dépôts alluviaux, les colluvions, les dépôts d'origines anthropiques ou les dépôts non différenciés. On préfère identifier les dépôts d'origines anthropiques ou les dépôts non différenciés selon le niveau de susceptibilité le plus élevé, quant aux dépôts de versant ils sont identifiés selon un niveau élevé. On peut ajouter que les dépôts glaciolacustres sont principalement composés de silt et d'argiles, de granulométrie très faible, donc hautement susceptibles à la liquéfaction. Les sédiments fluvioglaciaires sont composés de sables de toutes tailles et de graviers. Ils seront également classés comme hautement susceptible. Les tills d'ablation et remaniés ont un degré de compactage faible ce qui les rend hautement susceptible également.

Les sédiments marins de l'est du Canada composés d'argiles sont très sensibles au phénomène d'amollissement cyclique conduisant à un glissement de terrain (aussi appelé glissement de type rétrogressif) (Carson et Lajoie, 1981; Quinn, 2009) . Ce phénomène survient surtout aux abords des berges (Leroueil et al., 1983). Ces dépôts et leur instabilité est particulièrement mise en avant dans le CHAPITRE 6 sur les mouvements gravitaires. Dans ce chapitre, les dépôts d'origines deltaïques ou de plage, seront hautement susceptible, tandis que les autres dépôts marins seront modérément susceptibles à la liquéfaction.

Échelle finale et carte de susceptibilité

Le classement final se résume grâce au Tableau 5.2, où la susceptibilité à la liquéfaction est identifiée par : Très Haut (TH), Haut (H), Modéré (M), Bas (B), Très Bas (TB). Le niveau « Aucun » est réservé pour les sites où la roche affleure.

Tableau 5.2 Résumé des niveaux de susceptibilité à la liquéfaction des différents dépôts trouvés dans la limite de la zone d'étude

| Lithologie | Récent <500 ans | Holocène 0.5-11ka | Pléistocène 11k-2M | Pré- quarte r >2Ma |
|---|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--|
| A - Sédiments alluviaux: dépôts non différenciés | TH | | | |
| Ai, Ap, At et Av - Sédiments alluviaux: sédiments estuariens et intertidaux, alluvions de plaine d'inondation, alluvions de terrasse fluviale, sédiments en couverture mince et discontinue | H | | | |
| Ca - Dépôts de versants: dépôts d'éboulis et dépôts de glissement | H | | | |
| E - Sédiments éoliens | | H | | |
| GF - Sédiments fluvioglaciaires | | | H | |
| GL - Sédiments glaciolacustres: sédiments non différenciés | | | H | |
| H - Dépôts anthropiques: non différenciés | TH | | | |
| L - Sédiments lacustres | | M | | |
| M - Sédiments marins | | M | | |
| Md et Mr - Sédiments marins: sédiments deltaïques et de plage | | H | | |
| O - Sédiments organiques | | B | | |
| T - Sédiments glaciaires: till et sédiments non différenciés | | | TB | |
| Tf et Tz - Sédiments glaciaires: till remanié et d'ablation | | | H | |
| U - Dépôts non différenciés | TH | | | |

À partir de cette dernière table, il est possible de tracer une carte des susceptibilités à la liquéfaction en fonction de la géologie de surface. Aucune des lithologies présentes dans le Tableau 5.2 ne correspond à un niveau de susceptibilité nul. En effet, le minimum se situe avec des niveaux de susceptibilité de niveau très bas. Seuls les sites où la roche affleure sont considérés comme ayant un niveau de susceptibilité classé « aucun ». La carte suivante expose les différents niveaux de susceptibilité selon leur milieu de dépôt et leur âge (Figure 5.1). Elle représente en bleu pâle, les sites où la roche affleure ou les sites sous l'eau où l'on ne possède

pas d'information relative à la géologie. En couleurs claires sont dessinées les lithologies de faibles susceptibilités et en couleurs foncées les lithologies les plus susceptibles. Le centre de la région d'étude où prédominent les dépôts marins et alluviaux sont de susceptibilité modérée à haute, tandis que le nord et le sud où il y a une prédominance de tills (ni d'ablation, ni remanié) sont moins susceptibles.

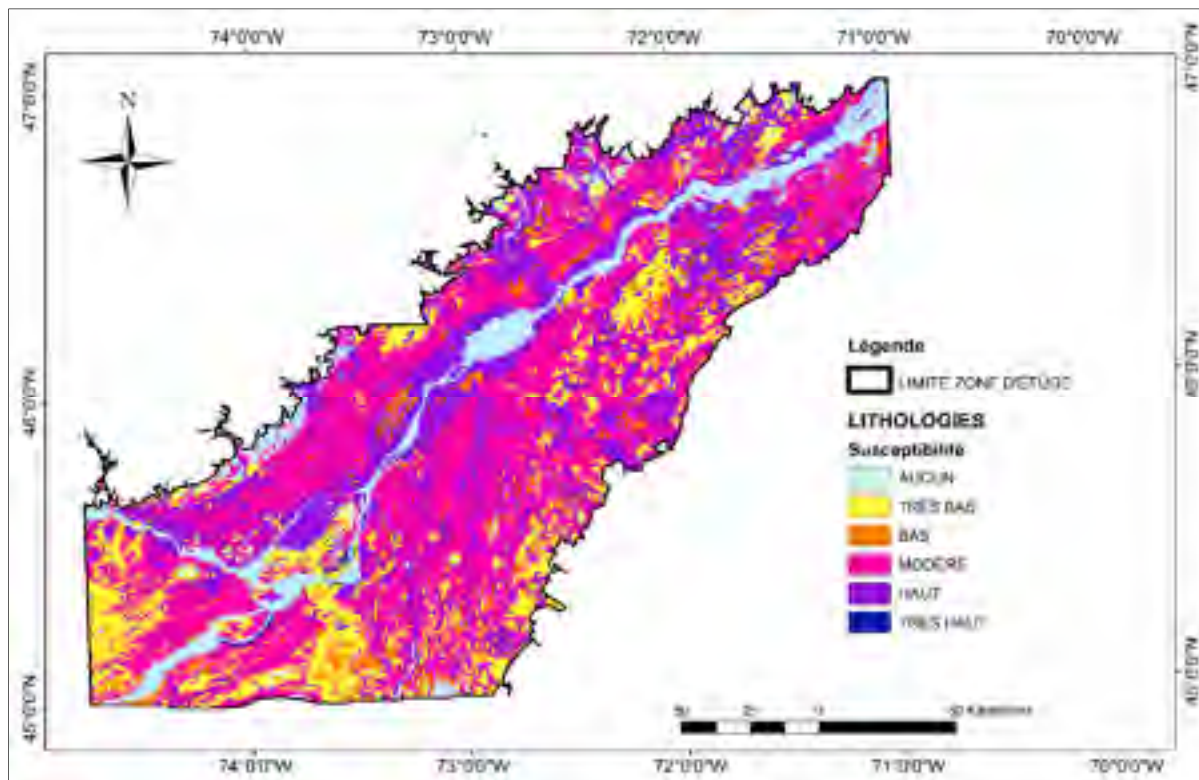


Figure 5.1 Carte de la susceptibilité à la liquéfaction des différentes lithologies

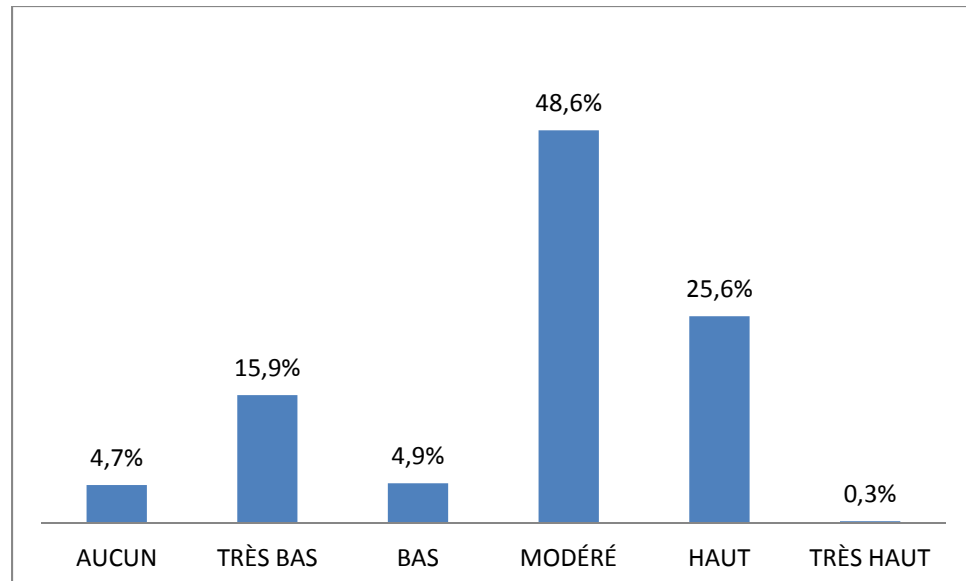


Figure 5.2 Distribution des susceptibilités à la liquéfaction en fonction de la géologie

Les sites en présence sont en majorité de susceptibilité modérée à la liquéfaction (48.6%) (Figure 5.2). Une grande partie de la zone d'étude est également de susceptibilité haute (25.6%). Environ 15.9% des sites sont de susceptibles très basses et 4.9% sont de susceptibilité basse. Seulement 0.3% sont de susceptibilité très haute et 4.7% ne sont pas susceptibles, correspondant aux sites où la roche affleure.

5.2.2 Nappe phréatique

Lorsque le toit de la nappe est inférieur à dix mètres, c'est l'échelle de susceptibilité liée à la géologie qui prévaut. Lorsque la nappe est en dessous, les lithologies dont les susceptibilités étaient basses et très basses deviennent très basses et les susceptibilités modérées, hautes ou très hautes deviennent basses. Nous utiliserons les données sur le toit de la nappe phréatique (voir section 2.4) et le seuil de 10 mètres fixé par Youd et Perkins (1978) pour la liquéfaction. 87% de la région d'étude possède une nappe phréatique à moins de dix mètres de la surface contre 13 % pour une plus grande profondeur.

5.3 Carte finale de la susceptibilité à la liquéfaction

Afin de joindre l'information concernant la géologie (dossier de points tous les 500 mètres, appelé « Geo_3D ») et celle concernant la hauteur de la nappe phréatique (appelé « hydro »), l'outil « *extract value to point* » (de la boîte d'analyse spatiale) est utilisé. Il permet pour chaque coordonnée X, Y du dossier de géologie d'extraire l'information concernant la hauteur de la nappe et ainsi de combiner les deux informations sous forme de table. Ce fichier point est ensuite transformé en fichier raster pour couvrir l'ensemble de la région d'étude sans espace entre les points, grâce à l'outil « *point to raster* » (également dans la boîte de conversion).

Grâce au *ModelBuilder*, nous pouvons créer un outil qui permet d'établir le niveau de susceptibilité à la liquéfaction. *ModelBuilder* nous permet également de visualiser les étapes qui conduisent à ces résultats, tel qu'illustré à la Figure 5.3.

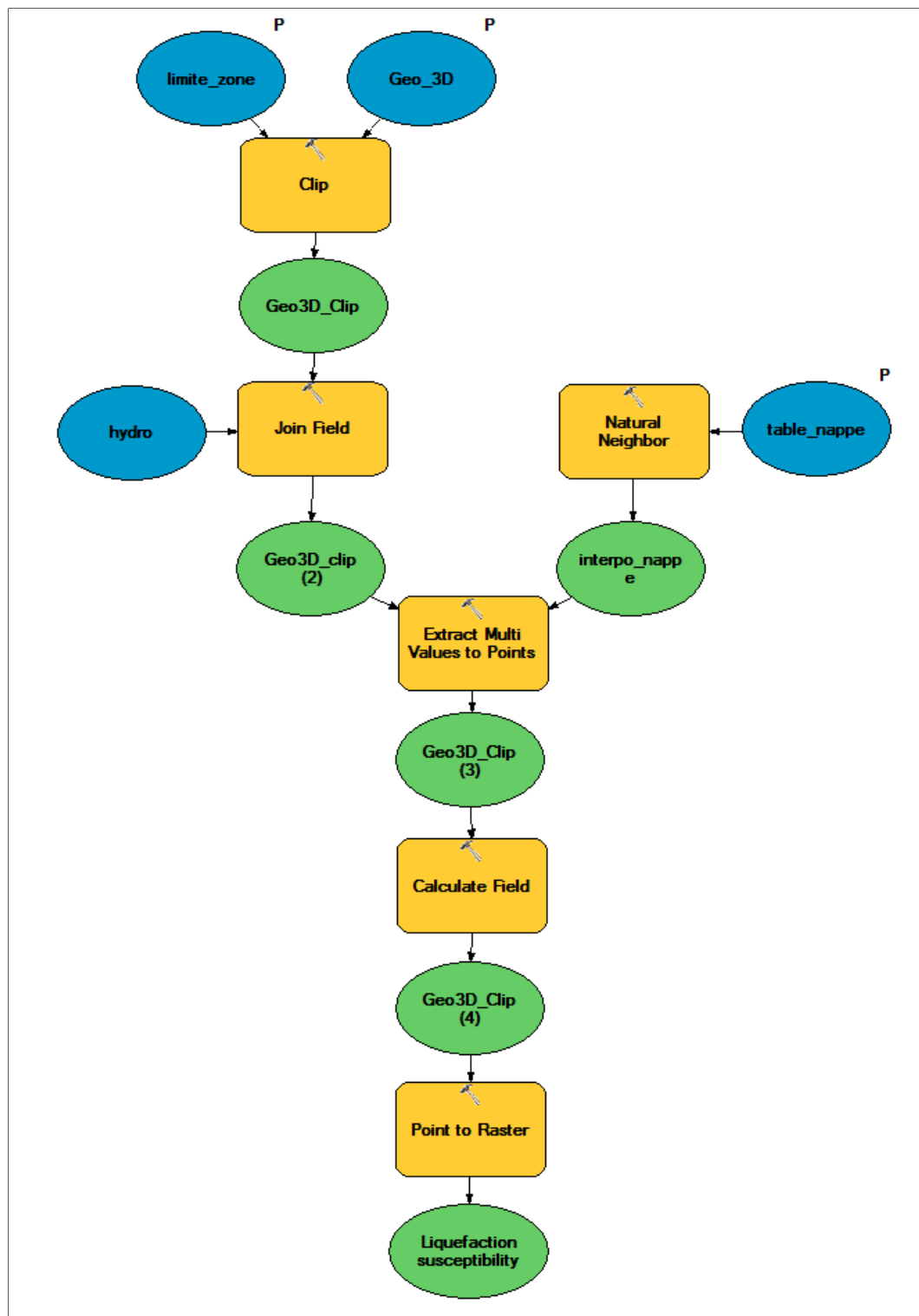


Figure 5.3 Graphique des différentes opérations à effectuer pour obtenir une carte de susceptibilité à la liquéfaction

Les bulles bleues correspondent aux données d'entrée, les rectangles orange sont les outils utilisés et les bulles vertes sont les résultats intermédiaires.

La carte présentée à la Figure 5.4 illustre les différents niveaux de susceptibilité à la liquéfaction dans la zone d'étude selon les codes de couleur ; rouge pour les sites très susceptibles, et bleu pour les sites peu susceptibles. Le centre de la région d'étude est dominé par des dépôts marins et alluviaux en majorité de susceptibilité modérée et haute, c'est pourquoi le jaune et l'orange prédominent dans cette région. Le nord et le sud en revanche sont prédominés par des tills de très basse susceptibilité à la liquéfaction. Les régions colorées en bleu claire (susceptibilité basse) correspondent aux dépôts organiques ou aux régions où la nappe phréatique n'est pas proche de la surface et où les lithologies sont classées de modérées à plus fortement susceptibles. Très peu de régions sont colorées en rouge, correspondant à une très forte susceptibilité, car les dépôts anthropiques, indifférenciés et alluviaux indifférenciés ne sont que très peu présents.

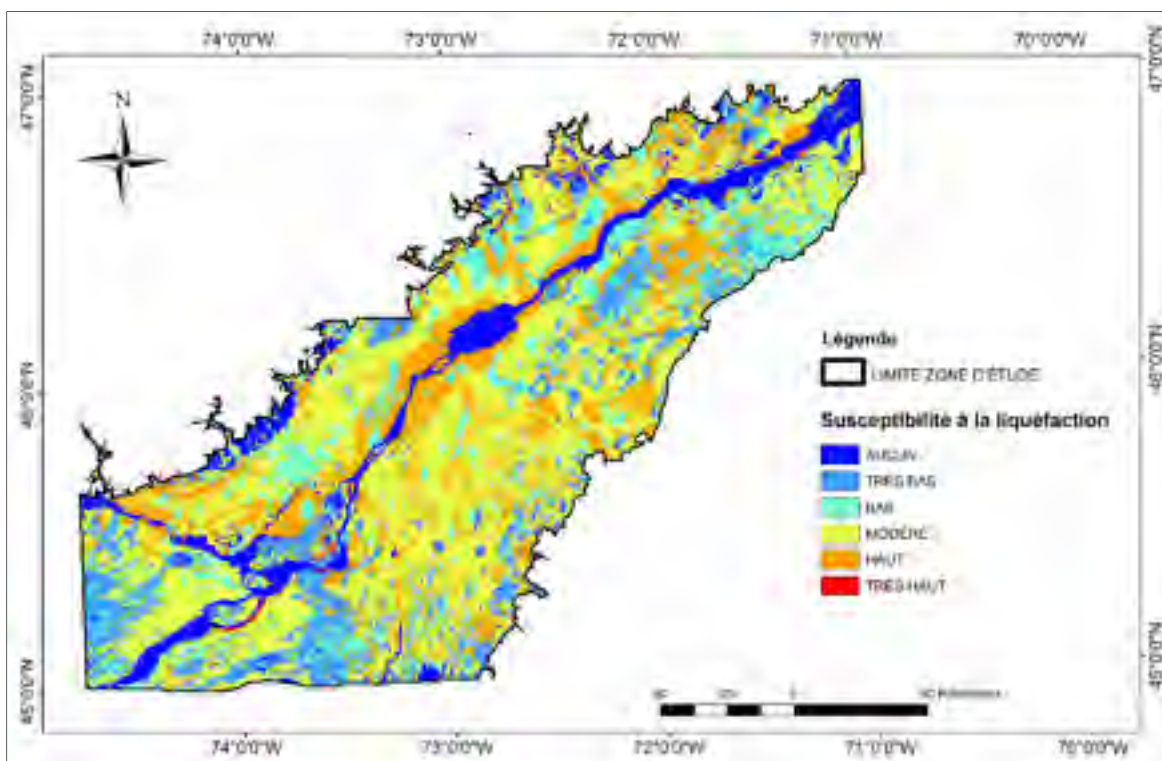


Figure 5.4 Carte finale de la susceptibilité à la liquéfaction

La carte finale est à une résolution de 500 m tout comme la carte de base sur la géologie de surface.

La plupart de la zone d'étude est modérément susceptible à la liquéfaction (42,3%) et hautement susceptible n'est aucunement, très faiblement à faiblement susceptible, soit environ 64%, alors que 23% sont modérément susceptibles et 13% pourcent ont une susceptibilité haute. Moins de ½ % de la zone d'étude a une susceptibilité très haute (Figure 5.5).

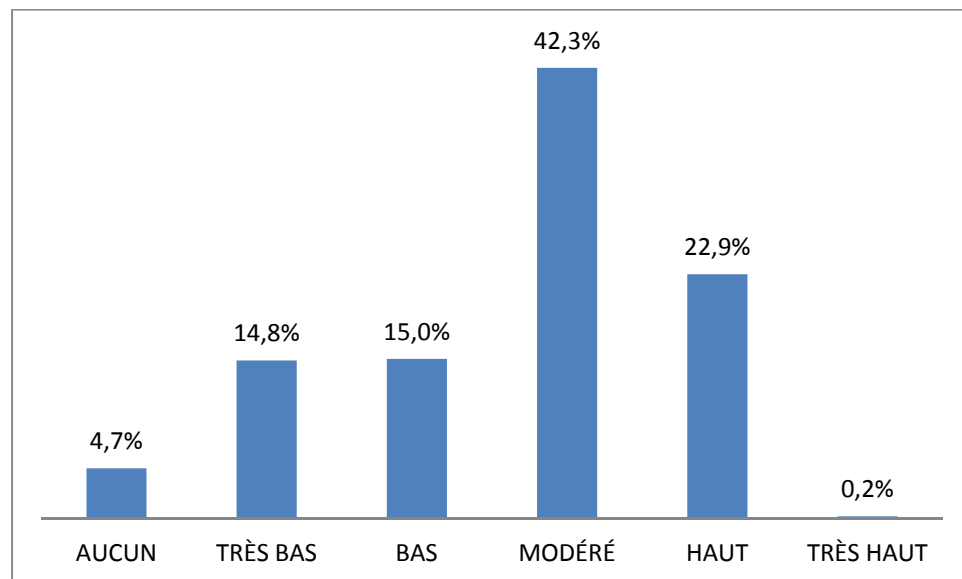


Figure 5.5 Distribution des susceptibilités à la liquéfaction pour les Basses-Terres du Saint-Laurent

Un moyen de confirmer les résultats sur la susceptibilité à la liquéfaction pour la zone d'étude ou de tester la validité de ces résultats serait d'obtenir un grand nombre de mesures sur le terrain de la rigidité des sols comme par exemple des données SPT (Quinn et al., 2015) ou d'autres données telles que la résistance du sol non drainé au cisaillement (IRC-CNRC, 2015a) ou la contrainte effective et la contrainte cisailante (Priestley, 1996). En effet, cela permettrait de croiser plusieurs types d'information pour améliorer l'estimation de la susceptibilité à la liquéfaction. Malheureusement ce type de données n'est pas disponible. En revanche, nous pouvons comparer notre approche avec les quelques sites où se sont produits des phénomènes de liquéfaction par le passé. En effet, durant le séisme de Charlevoix-Kamouraska en 1925,

des phénomènes de liquéfaction des sols ont été constatés dans le vieux port de la ville de Québec (Lamontagne, 2008). Cet emplacement est constitué d'alluvions de terrasse fluviale (At) que nous avons considérés comme fortement susceptible.

De plus, lors du séisme de Saguenay en 1988, cinq sites dans la région de Ferland et Boileau, entre 25 à 30 km de l'épicentre, ont été endommagés par des phénomènes de liquéfaction. La vallée Ferland-Boileau est principalement constituée de dépôts glaciaires, tels que tills (T), fluvioglaciaires (GF) et glaciolacustres (GL) (Tuttle et al., 1990; Tuttle et Seeber, 1991), ces dépôts sont considérés comme de susceptibilité haute pour les GF et GL ainsi que pour certains tills d'ablation ou de tills remaniés. Au bord de la rivière des Ha Ha, se trouvent certains sites où des dépôts de terrasses alluviales (At) affleurent, les mêmes dépôts qu'au vieux port de Québec que nous avons considérés comme fortement susceptibles. Le phénomène de liquéfaction est complexe et prend souvent en compte un agencement de plusieurs couches lithologiques et non seulement la lithologie de surface. En effet, la perméabilité des couches proches de la surface joue un rôle quant à la formation de filons de sables riches en eau, qui remonte à la surface en se liquéfiant (Tuttle et Seeber, 1991). Toutefois, cette méthodologie permet dans un contexte d'étude à large échelle (32 000 km²), de faire un classement préliminaire des sites et d'évaluer un potentiel de liquéfaction (Youd et Perkins, 1978). On peut également mentionner, que le phénomène de liquéfaction est grandement dépendant de l'AMS et que ce dernier sera fort, plus des phénomènes de liquéfaction sont constatés.

5.4 Discussion et conclusion

La méthodologie utilisée pour évaluer la susceptibilité à la liquéfaction provient de jugements d'experts synthétisés par Youd et Perkins (1978). Cette classification ne correspond toutefois pas toujours avec les dépôts de la région d'étude. Dans ce cas, ce sont les recommandations de géotechniciens qui sont prises en compte.

Lorsque la nappe phréatique est présente dans les dix premiers mètres sous la surface, ce sont les lithologies en présence qui détermineront la susceptibilité à la liquéfaction. En revanche,

s'il y a une absence d'eau dans les dix premiers mètres les susceptibilités ne seront que faibles ou très faibles, tel que décrit dans la section 3.3. La plupart des niveaux observés de nappes phréatiques sont proches de la surface (87% sont au-dessus de 10 m), c'est-à-dire que la plupart de la zone d'étude est saturée en eau, c'est pourquoi, dans notre étude, la géologie de surface joue un grand rôle dans l'évaluation de la susceptibilité à la liquéfaction. En effet, la répartition des indices de susceptibilité à la liquéfaction sur l'ensemble de la zone d'étude ressemble beaucoup à la susceptibilité des lithologies à la liquéfaction. La plupart des niveaux se répartissent entre modérés et hauts. Il serait intéressant d'extraire des données sur les zones habitées afin de comparer la répartition des niveaux de susceptibilité sur ces zones.

Une comparaison des résultats avec des données de résistance du sol non drainé au cisaillement (S_u) ou un inventaire plus fourni pourrait permettre de mieux valider cette approche pour la région d'étude.

De plus, il est important de mentionner que le déclenchement d'un phénomène de liquéfaction dépend également de l'AMS et de la magnitude, mais que ce chapitre tente d'évaluer un potentiel de liquéfaction qualitatif et non quantitatif. L'AMS sera prise en compte par le biais d'un autre indice indépendant de la liquéfaction dans la définition de l'indice de risque sismique au CHAPITRE 7.

Cette carte de la susceptibilité à la liquéfaction, bien qu'elle simplifie le phénomène, permet dans un contexte d'évaluation du risque sismique des ouvrages d'art une première classification pour une grande région d'étude. L'intégration de cette carte évite qu'en l'absence de données, ce phénomène soit, soit négligé ou soit, pris en compte de manière trop conservatrice.

CHAPITRE 6

SUSCEPTIBILITÉ AUX MOUVEMENTS GRAVITAIRES

Ce chapitre traite de la susceptibilité aux mouvements gravitaires, soient les glissements de terrain et les chutes de blocs. La démarche utilisée est la même pour les deux phénomènes. Toutefois les chutes de blocs n'apparaissent que lorsqu'il y a de la roche en présence et non pas des dépôts meubles. La zone d'étude sera alors divisée en deux catégories liées à la géologie; la zone où la roche affleure, 5 % de la zone d'étude, sera l'objet d'étude sur la susceptibilité aux chutes de bloc et le reste de la zone d'étude 95%, sera l'objet d'une étude sur la susceptibilité aux glissements de terrain. La méthode utilisée pour caractériser la susceptibilité aux mouvements gravitaires prend en compte quatre facteurs : la géologie, la hauteur du toit de la nappe phréatique, la pente ainsi que la proximité à une rivière ou un lac. Chacun de ces paramètres fera l'objet d'un sous-chapitre.

6.1 Échelle de susceptibilité aux mouvements gravitaires

L'échelle de susceptibilité aux mouvements gravitaires comporte six niveaux et est établie selon un classement à 11 niveaux inspiré de Hazus (FEMA, 2012) tel que l'on peut le voir au Tableau 6.1

Tableau 6.1 Relation entre les catégories de susceptibilité aux mouvements gravitaires et leur indice de susceptibilité

| Catégories de susceptibilité | Aucun | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X |
|-------------------------------------|-------|---------------|----|---------|----|------------|----|----------|------|----------------|---|
| Niveau de susceptibilité | Aucun | Très Bas (TB) | | Bas (B) | | Modéré (M) | | Haut (H) | | Très Haut (TH) | |

6.2 Paramètres

6.2.1 Géologie

La méthode utilisée par le logiciel Hazus pour évaluer la susceptibilité aux mouvements gravitaires divise la géologie en trois groupes (A, B ou C), selon leur composition, leur degré de compacité, la cohésion effective et l'angle de frottement interne effectif (voir Tableau 6.2). En effet, ces facteurs agissent sur la résistance au cisaillement, qui est essentielle dans l'évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain. La méthodologie tirée du programme Hazus ne distingue pas les chutes de blocs des glissements de terrain, malgré que les chutes de blocs dépendent également du degré de fracturation de la roche (tel que discuté à la section 1.3.4). Cette étude différencie les chutes de blocs des glissements de terrain à travers les trois groupes géologiques proposée par la méthodologie du programme Hazus. La catégorie A regroupe les roches fortement cimentées, elle représente selon notre approche toutes les roches susceptibles aux chutes de blocs. Les catégories B et C intègrent toutes les lithologies susceptibles aux glissements de terrain.

Le Tableau 6.2 décrit les 3 groupes de géologies qui sont utilisés pour identifier la susceptibilité aux mouvements gravitaires selon Hazus (FEMA, 2012).

Tableau 6.2 Description des trois catégories principales de géologie pour la classification de la susceptibilité aux mouvements gravitaires
Adaptée de FEMA (2012)

| Catégories | Description |
|------------|---|
| A | Roches ou sols cohérents (roches cristallines ou grès, ou toutes lithologies dont les propriétés sont $c' = 14.4 \text{ kPa}$ (300 psf), $\phi' = 35^\circ$) |
| B | Sols faiblement cimentés (sols sableux, et grès peu cimentés), dont les propriétés sont $c' = 0 \text{ kPa}$ (0 psf), $\phi' = 35^\circ$ |
| C | Sols argileux (schistes argileux remaniés, colluvions, remblais peu compactés), dont les propriétés sont $c' = 0 \text{ kPa}$, $\phi' = 20^\circ$ |

Dans ce projet, ces groupes sont associés aux douze différents types d'affleurement présents dans la zone d'étude selon leur degré de compacité et leur composition (Tableau 6.3). Ainsi, on inclut dans le groupe A tous les types de socles rencontrés (R), telles que roches précambriennes du bouclier Canadien ou paléozoïques de la Plate-forme du Saint-Laurent ou de l'orogène des Appalaches ou encore les roches intrusives des collines Montérégiennes. La catégorie A, regroupe la géologie susceptible aux chutes de bloc.

Pour les glissements de terrain, ce sont les catégories B et C qui sont prises en compte. La catégorie C est la plus susceptible, puis vient la catégorie B. La classification des différentes lithologies se fait grâce aux descriptions recueillies au CHAPITRE 2. La catégorie B contient les dépôts alluviaux (A), les sédiments éoliens (E), glaciofluviaux (GF), lacustres (L) et les tills (T) (voir Tableau 6.3) (Robertson, 1990). Dans la catégorie C nous rassemblons les dépôts non-consolidés du type dépôt de versant (C), les argiles glaciolacustres (GL) et marines (M), les dépôts organiques (O), et par une approche conservatrice les dépôts anthropogènes (H) et indifférenciés (U) dont nous ne connaissons pas les propriétés.

Tableau 6.3 Tableau de classification de la géologie selon leur degré de compacité, composition, angle de friction interne effectif et cohésion effective

| Type d'affleurement | A | B | C |
|---|---|---|---|
| A-Dépôts alluviaux | | x | |
| C-Dépôts de versant | | | x |
| E-Dépôts éoliens | | x | |
| GF-Dépôts glaciofluviaux | | x | |
| GL-Dépôts glaciolacustres | | | x |
| H-Dépôts anthropiques | | | x |
| L-Dépôts lacustres | | x | |
| M-Dépôts marins | | | x |
| O-Dépôts organiques | | | x |
| T-Tills-Dépôts glaciaires | | x | |
| U-Dépôts indifférenciés | | | x |
| R-Socle rocheux (pour chutes de blocs) | x | | |

La Figure 6.1 permet d'obtenir une carte qui classifie les lithologies selon les trois groupes tel que décrit par le Tableau 6.3. Les roches, autrement dit le groupe A sont en orange. Elles sont principalement au nord et à l'ouest. En magenta sont décrites les lithologies du groupe B et en violet foncé les lithologies du groupe C.

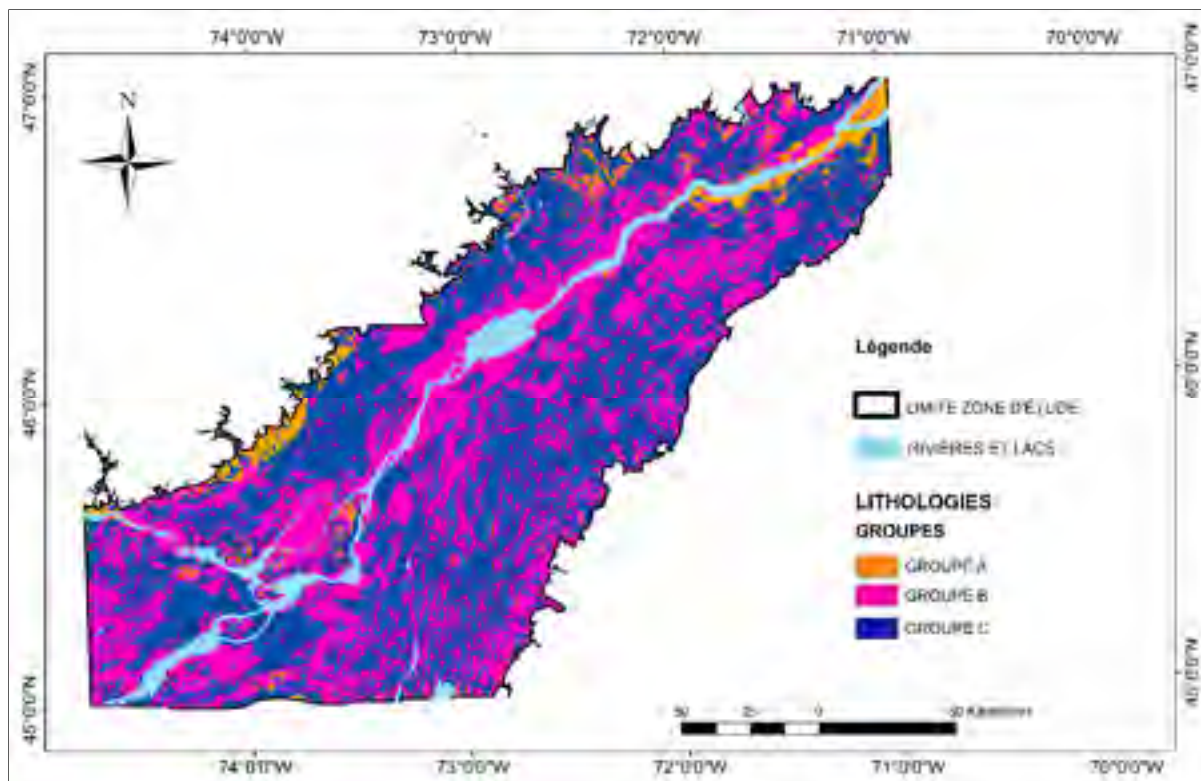


Figure 6.1 Carte de la répartition des trois groupes géologiques

Le groupe C dans lequel se situent notamment les argiles Champlain recouvre environ 53% (Figure 6.2) de la région contre 42% pour le groupe B et 5% pour le groupe A.

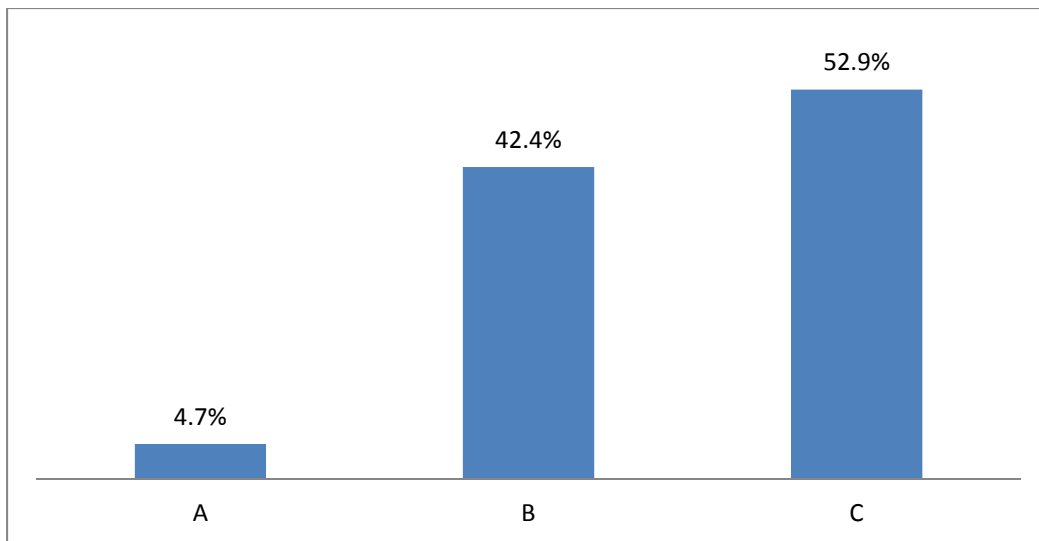


Figure 6.2 Distribution des trois groupes géologiques

6.2.2 Toit de la nappe phréatique

La méthodologie (FEMA, 2012), dans son processus de prise en compte des mouvements gravitaires distingue les lithologies sèches, des lithologies humides. En effet, la présence d'eau modifiera la pression de pores et ainsi diminuera la résistance au cisaillement, ce qui contribuera à la déstabilisation d'un versant. Ainsi pour distinguer les lithologies sèches, des lithologies humides, nous utiliseront les données sur le toit de la nappe phréatique (voir section 2.4) et le seuil de 10 mètres fixé par Youd et Perkins (1978) pour la liquéfaction. Selon ce critère, 87% de la région d'étude possède une nappe phréatique à moins de dix mètres de la surface contre 13 % pour une plus grande profondeur. On peut mentionner que ce seuil de 10 m reste discutable, car des glissements de terrain peuvent se produire à des profondeurs supérieures à ce seuil.

6.2.3 Pente

La pente est un facteur extrêmement important pour la stabilité d'un versant. Plus la pente est forte plus les chances de déclenchement d'un mouvement gravitaire est grand. Les experts du programme Hazus (FEMA, 2012) classent les pentes selon six classes (Figure 2.8), telles que décrite à la section 3.4. La région d'étude se situe dans la vallée du Saint-Laurent. Ainsi, il n'y

a que très peu de relief. Plus de 98% de la région d'étude se situe sur une pente en-dessous de 10 degrés, excepté les collines Montérégiennes du crétacé, situées à l'est de la ville de Montréal principalement et sur le Mont-Royal. Les limites est et ouest de la zone d'étude ont également plus de relief. Ces reliefs ne constituent toutefois que 2% de la région d'étude.

6.2.4 Réseau hydrographique

La présence de cours d'eau peut rendre le terrain instable à cause de l'érosion notamment. De plus, Lefebvre (1986) décrit que les argiles Champlain sont particulièrement susceptibles aux abords des berges là où il y a altération et fissuration.

Les données considérées pour les lacs et rivières proviennent des cinq sources (Land Information Ontario, 2011; 2015; Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, 2000; 2016; Statistics Canada, 2016) et constituent un total de 105 046 entités (voir section 2.3).

Une zone tampon de 100 mètres autour de ces entités a été délimitée comme zone sensible. Cela veut dire que si un site est à proximité de 100 m ou moins du réseau hydrographique, le niveau de susceptibilité est augmenté de un. Ce seuil a été fixé grâce à l'étude de cartes de risque de glissements pour certaines municipalités régionales de comté (MRC) situées dans les Basses-Terres du Saint-Laurent (MTQ, 2012; 2013a; 2013b). À proximité des lacs et rivières, la susceptibilité augmentera d'un niveau selon le classement inspiré de FEMA (). Pour la zone d'étude, 20% des sites se situent à proximité d'un cours d'eau ou d'un lac. Le Tableau 3.5 permet l'attribution des niveaux de susceptibilité aux mouvements gravitaires, selon les quatre critères énumérés précédemment.

6.3 Outil pour générer la carte de susceptibilité aux mouvements gravitaires

Grâce au *ModelBuilder*, nous pouvons créer un outil qui permet de calculer la susceptibilité aux mouvements gravitaires. *ModelBuilder* permet également de visualiser les étapes qui conduisent à ces résultats, tel qu'illustré dans la Figure 6.3.

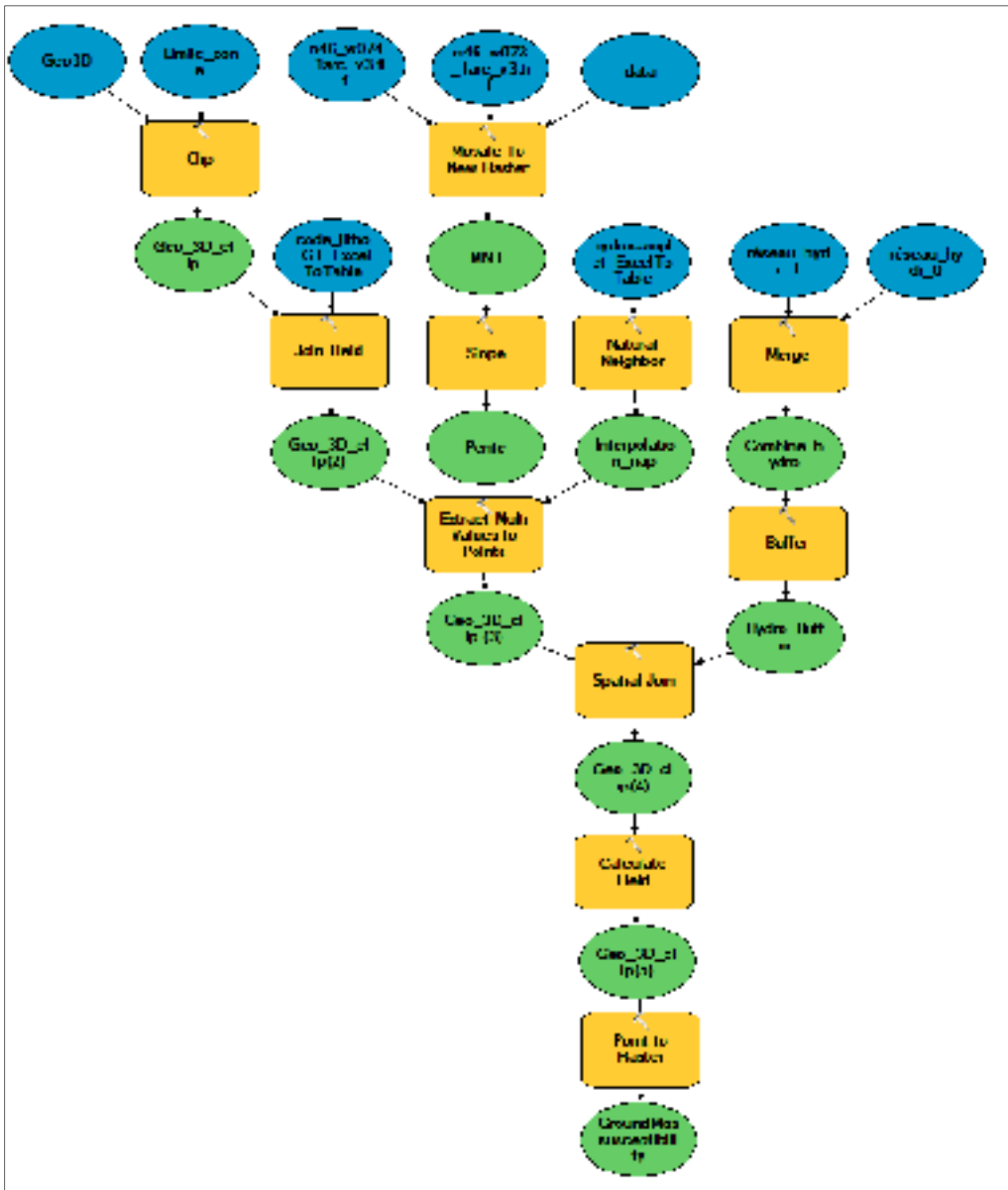


Figure 6.3 Graphique des différentes opérations à effectuer pour obtenir une carte de susceptibilité aux mouvements gravitaires

Tout d’abord, on peut voir que le modèle géologique a été extrait pour la région d’étude. Afin de produire un MNT pour l’ensemble de la région d’étude, des tuiles ont été jointes. Ces tuiles ont ensuite été utilisées pour extraire les pentes de la région d’étude. Pour la nappe phréatique, les différents points de données de forages ont fait l’objet d’interpolation par la méthode des

voisins naturels. Pour le critère de proximité au point d'eau, c'est l'outil de combinaison « merge », qui est utilisé pour fusionner les cinq fichiers nécessaires. Ensuite, l'outil « buffer » permet de définir la zone tampon de 100 m. Enfin, les données sont compilées dans le fichier résultant de la sélection de la géologie pour la région d'étude.

6.4 Glissements de terrain

6.4.1 Carte finale de la susceptibilité aux glissements de terrain

La carte finale de la susceptibilité aux glissements de terrain est décrite à la Figure 6.4. Ces niveaux de susceptibilités sont obtenus grâce à la géologie, la pente, le niveau de la nappe phréatique et la proximité à un cours d'eau (voir Tableau 6.4).

Tableau 6.4 Classement de la susceptibilité aux mouvements gravitaires avec la prise en compte de la proximité à un point d'eau

| Échelle de susceptibilité aux mouvements gravitaires | | | | | | | | | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Angle de la pente (degré) | 0-10 | | 10-15 | | 15-20 | | 20-30 | | 30-40 | | > 40 | |
| Proximité à un point d'eau | > 100 | ≤ 100 | > 100 | ≤ 100 | > 100 | ≤ 100 | > 100 | ≤ 100 | > 100 | ≤ 100 | > 100 | ≤ 100 |
| Groupe géologique | Lithologies sèches (nappe >10m de profondeur) | | | | | | | | | | | |
| Groupe A Chute de bloc | Aucun | | Aucun | | TB | B | TB | B | B | M | M | H |
| Groupe B Glissement | Aucun | | B | M | B | M | M | H | M | H | H | TH |
| Groupe C Glissement | M | H | M | H | H | TH | TH | TH | TH | TH | TH | TH |
| | Lithologies humides (nappe <10m de profondeur) | | | | | | | | | | | |
| Groupe A Chute de bloc | Aucun | | B | M | M | H | H | TH | H | TH | H | TH |
| Groupe B Glissement | M | H | H | TH | TH | TH | TH | TH | TH | TH | TH | TH |
| Groupe C Glissement | H | TH | TH | TH | TH | TH | TH | TH | TH | TH | TH | TH |

On peut mentionner que l'ajout d'un critère (relié à la proximité au réseau hydrographique) amène parfois à une prise en compte trop conservatrice de la susceptibilité aux glissements de

terrain. Un site de catégorie C avec une pente entre 0 et 10 degré proche du réseau hydrographique sera déjà considéré comme très fortement susceptible alors qu'il était déjà fortement par la précédente approche. Toutefois, l'utilisation du seul seuil de 10 mètre de profondeur n'est lui pas assez conservateur.

En rouge, les susceptibilités les plus fortes et en bleu les plus faibles. La plus grande majorité de la région est partagée entre les susceptibilités modérées et hautes. Très peu de régions sont de susceptibilités basses à très basses.

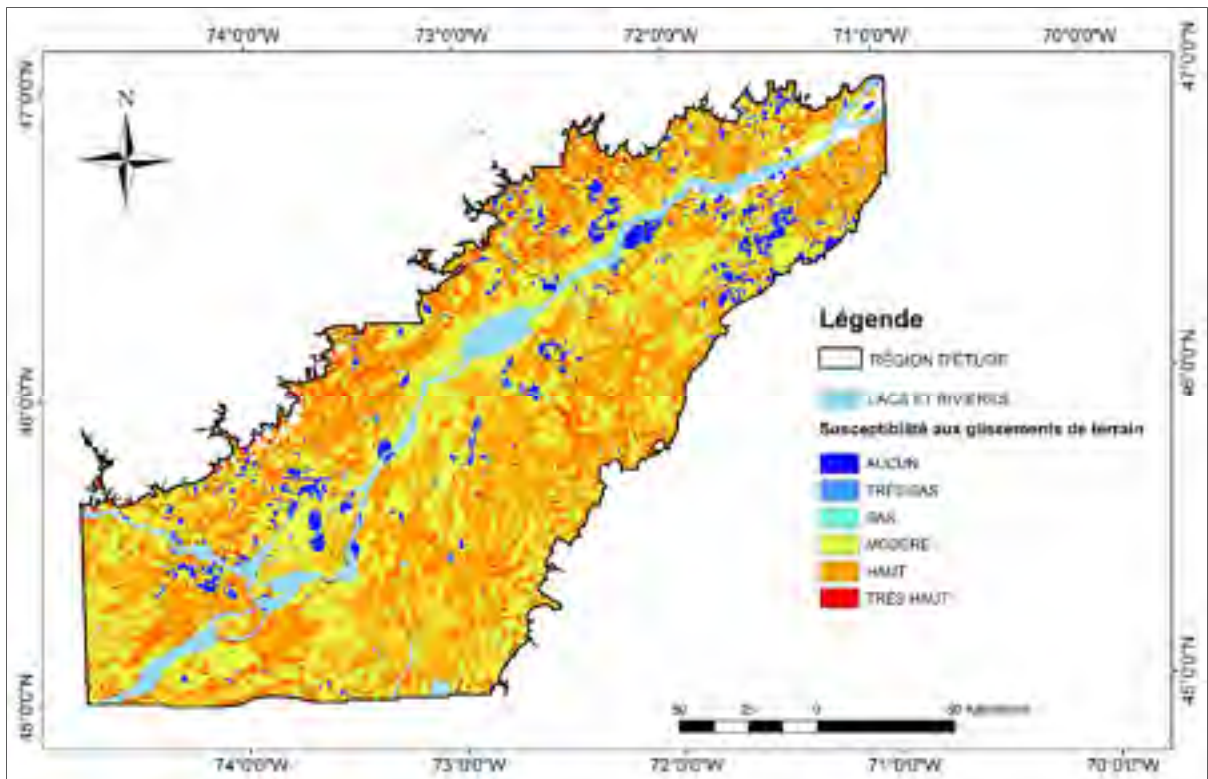


Figure 6.4 Carte finale de la susceptibilité aux glissements de terrain

La carte finale est à une résolution de 354.2 m, ce qui correspond à la moyenne quadratique (Koch et Link, 2002) entre la grille d'informations reliées à la géologie de surface (section 2.2) et celles reliées à la topographie (section 2.5).

La distribution des susceptibilités aux glissements de terrain (Figure 6.5) montre que 10% des sites sont de susceptibilité très haute. La majorité est de susceptibilité haute (47 %) et une grande partie de susceptibilité moyenne (37%).

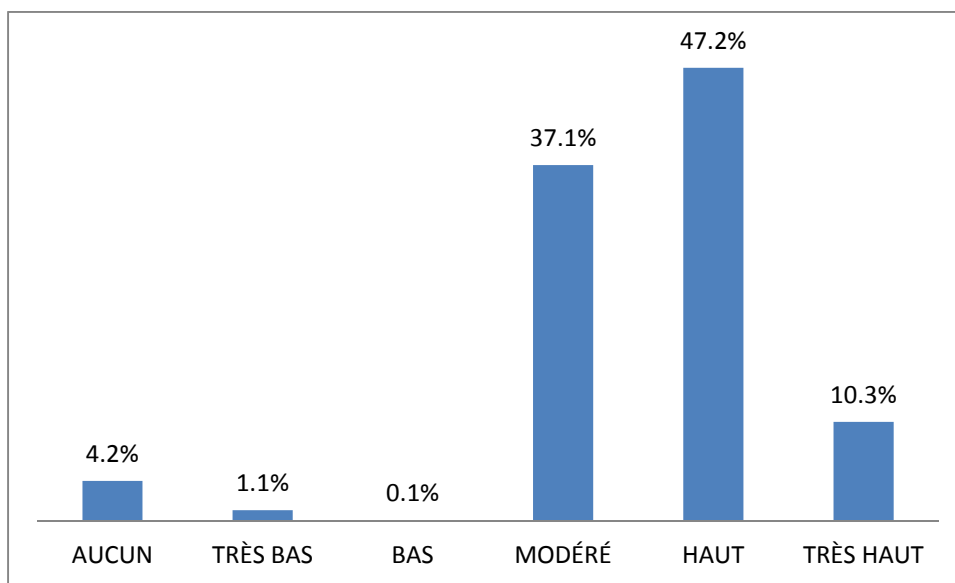


Figure 6.5 Distribution des susceptibilités aux glissements pour les Basses-Terres du Saint-Laurent

6.4.2 Validation de la méthode d'évaluation à la susceptibilité aux glissements de terrain

Afin de valider l'approche précédemment utilisée pour évaluer la susceptibilité aux glissements de terrain, un inventaire (Figure 2.12) a été comparé à la carte créée et présentée à la Figure 6.4. Ces glissements de terrain n'ont pas exclusivement été induits par des séismes, néanmoins ils constituent un outil pour évaluer la validité de notre démarche d'évaluation.

La carte des susceptibilités aux glissements de terrain a été comparée à l'inventaire (voir section 2.7). Pour ce faire, l'outil « *near* » a permis d'extraire tous les points de susceptibilités aux glissements de terrain proches de 250 mètres et moins des glissements de terrain provenant de l'inventaire. Le seuil de 250 mètres a été choisi, car il correspond à la moitié de la distance entre chaque point.

Les résultats (Figure 6.6) montrent que 23.7% des points à proximité des glissements de terrain provenant de l'inventaire, se situe sur des zones évaluées comme très fortement susceptibles (en rouge). Ceci est plus du double de chance d'appartenir de manière totalement aléatoire à un site très fortement susceptible sur la zone d'étude (10.3% en bleu). De plus, 44.1% des glissements de terrain provenant de l'inventaire se sont produits sur des zones évaluées comme hautement susceptibles (contre 47% aléatoirement). En conséquence, plus de 67 % des points proches des glissements de terrain sont sur des zones évaluées comme fortes ou de très fortes susceptibilités. Ces résultats permettent de confirmer que l'approche est relativement efficace dans l'évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain.

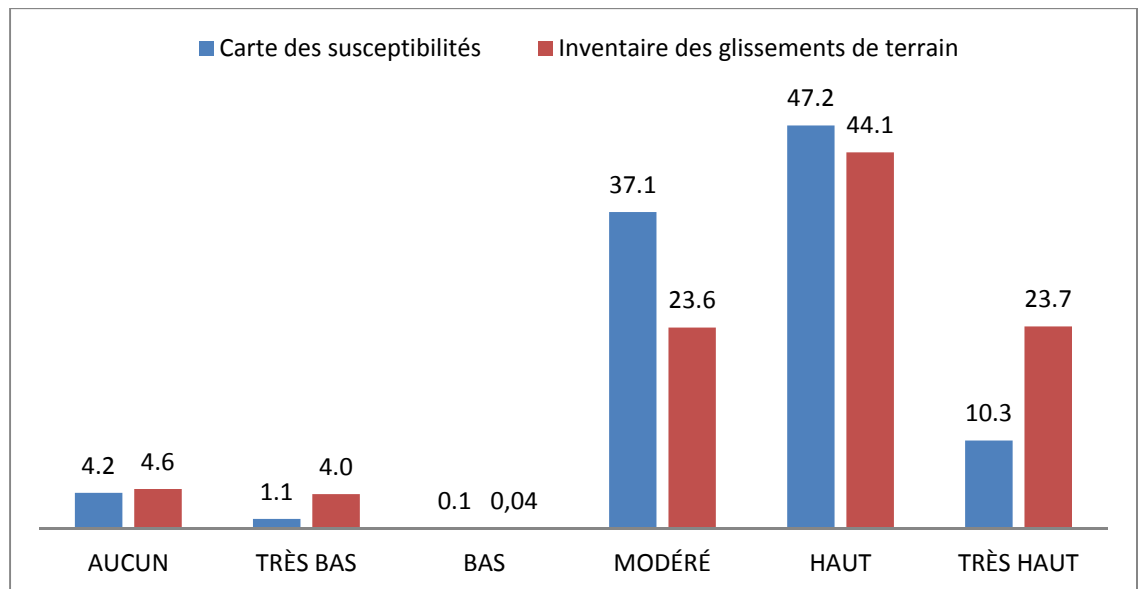


Figure 6.6 Comparaison des distributions de susceptibilité pour l'ensemble de la zone d'étude et pour l'inventaire des glissements de terrain

6.5 Chutes de blocs

Les chutes de blocs ne sont possibles que sur 1530 km², c'est-à-dire 5% de la zone d'étude c'est pourquoi la carte (Figure 6.7) a de nombreuses zones blanches. Toutefois on distingue que la plupart des sites sont en bleu, ce qui se traduit par aucune susceptibilité. Les zones de

susceptibilité modérée à très haute sont situées principalement sur le nord et l'ouest de la région d'étude ainsi que sur les collines Montérégiennes.

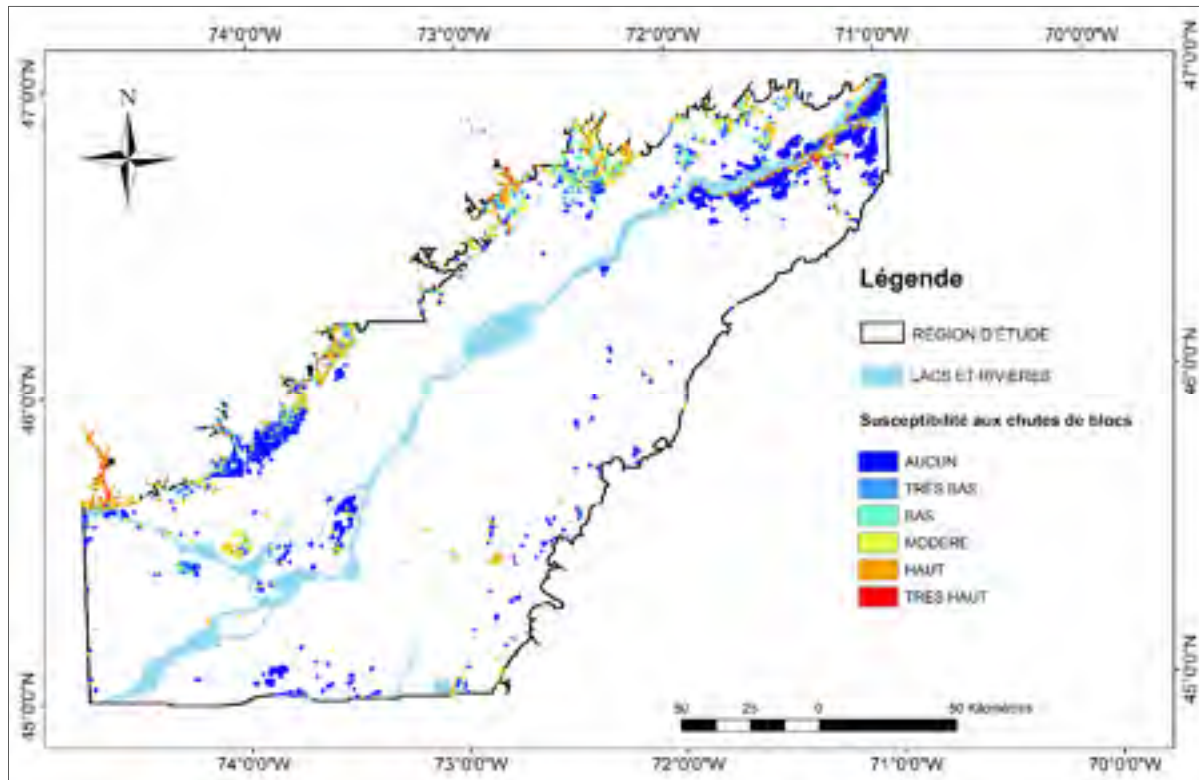


Figure 6.7 Carte finale de la susceptibilité aux chutes de blocs

La majorité des sites où la roche affleure n'est pas susceptible (47%) (Figure 6.8). Environ 20% des sites sont de susceptibilité très basse à basse. Ceci est principalement dû aux très faibles reliefs de la région d'étude. Toutefois, près de 20% des sites sont de susceptibilité forte à très forte.

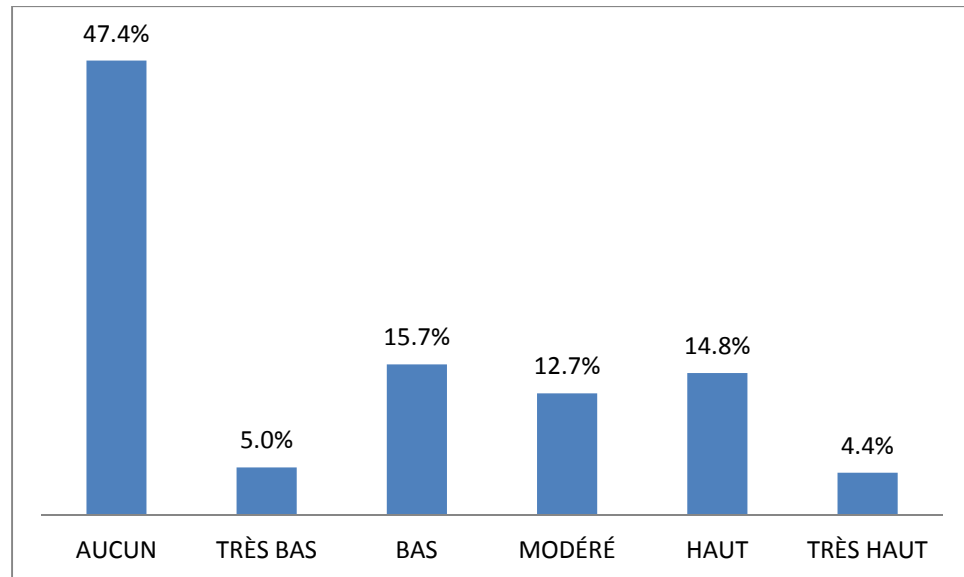


Figure 6.8 Distribution des susceptibilités aux chutes de blocs pour les Basses-Terres du Saint-Laurent

Afin de valider cette approche, il serait intéressant de comparer nos résultats avec un inventaire. À notre connaissance aucun inventaire n'a été réalisé sur la zone d'étude. Il n'en demeure pas moins que le Promontoire de Québec est funestement célèbre pour ces chutes de bloc ayant causées la mort d'environ 88 personnes au cours des 250 dernières années (Jaboyedoff et al., 2008). La région du promontoire de Québec est bien identifiée comme un site où la roche affleure selon nos données. La pente peut monter jusqu'à 46°. Toute cette région est identifiée comme fortement susceptible aux chutes de bloc. Elle englobe environ six points de références. Il est intéressant de noter que sans la prise en compte de la valeur maximale de pente, un seul point de référence sur les plaines d'Abraham serait évalué comme fortement susceptible. Cette méthodologie permet une bonne estimation de la susceptibilité aux chutes de bloc pour le promontoire de Québec.

6.6 Discussion et conclusion

La méthode utilisée pour caractériser la susceptibilité aux mouvements gravitaires se base sur le jugement d'experts qui ont conçu la méthodologie du programme Hazus. Cette méthode prend en compte, la géologie, la pente et la nappe phréatique. Toutefois le contexte géologique

des Basses-Terres du Saint-Laurent et en particulier la forte présence d'argiles Champlain particulièrement sensible à l'érosion, à la fissuration et à l'altération à proximité des berges incite à prendre en considération un facteur supplémentaire concernant la proximité d'un site à un cours d'eau ou un lac. Cette proximité fixée à un seuil de 100 mètres permet une meilleure distribution des niveaux de susceptibilité. En effet, la topographie très faible en relief de la zone d'étude maintient des niveaux de susceptibilité aux mouvements gravitaires plutôt bas.

Toutefois, on peut mentionner que l'ajout d'un nouveau critère augmentant les niveaux de susceptibilité rend l'approche plus conservatrice. En outre, il est important de rappeler que le déclenchement d'un mouvement gravitaire dépend fortement de l'AMS ou de la magnitude d'un séisme. Cette étude propose une approche qualitative qui cartographie dans un premier temps les caractéristiques intrinsèques d'un site, puis les combine avec un indice relié à l'AMS dans un second temps (CHAPITRE 7).

Bien que la méthode produise de bons résultats, elle peut être améliorée par la prise en compte d'autres paramètres comme l'utilisation du sol. Par exemple, une végétation dense diminue les instabilités de glissements de terrain, grâce à l'évapotranspiration qui permet d'absorber une grande partie de l'humidité à travers les racines. En revanche, ces mêmes racines peuvent avoir un effet déstabilisant pour les chutes de blocs, car elles peuvent être la cause de fissuration des roches. Les variations météorologiques jouent également un rôle important puisqu'elles peuvent fortement déstabiliser un versant ou une falaise. De plus, elles ont un effet direct sur la nappe phréatique. On peut mentionner que pour une meilleure prise en compte de la hauteur de la nappe phréatique, il aurait fallu faire les mesures de niveaux, à la fin du printemps, c'est-à-dire, à la saison de fonte des glaces. Toutefois il est important de prendre en compte que les 87% de la zone d'étude sont déjà considérées comme ayant une nappe phréatique d'une hauteur à déstabiliser un versant ou une falaise.

La méthodologie de cette étude différencie les glissements de terrain des chutes de blocs, car les chutes de blocs ne peuvent être provoquées que sur des sites où de la roche est présente tandis que les glissements de terrain ne se produisent que sur des dépôts meubles. Cette

distinction est pertinente dans la mesure où les différents mouvements gravitaires n'affectent pas de la même façon un ouvrage d'art. Bien que la méthode du MTMDET prenne en compte la vulnérabilité du tablier ou des piles, important face à l'aléa lié aux chutes de blocs et qu'elle prenne en compte la vulnérabilité des fondations et des culées face à l'aléa lié aux glissements de terrain, certains autres éléments comme les mesures de protections externes peuvent être prise en compte dépendamment du type d'aléa considéré. Ainsi la méthode SETRA considère également les types de grillages ou de pare-blocs ou de fosse face aux chutes de blocs; pour les glissements de terrain, des mesures de drainage peuvent également réduire le risque. De plus, l'aléa relié aux chutes de bloc peut être amélioré grâce à la prise en compte de l'état de la roche en place comme par exemple la proximité à une faille ou la présence d'éboulis (Baillifard et al., 2003; Baillifard et al., 2004; Pantelidis, 2009).

Un inventaire des glissements de terrain pour la région d'étude permet de valider les résultats. En effet, 24 pour cent des sites où un glissement de terrain a été inventorié, se situe sur un site dont la susceptibilité a été estimée à très forte, contre 10 pour cent de manière aléatoire. En tout, 68% des sites sont considérés comme fortement ou très fortement susceptibles. Ces résultats sont très proches de ceux obtenus par Quinn (2009) lors son étude du risque de glissements de terrain pour les infrastructures linéaires où il avait évalué que 67% des sites étaient de susceptibilité modérée à haute, niveau de susceptibilité considéré comme le plus haut. Toutefois ces comparaisons sont de natures qualitatives et peuvent être modifié selon l'application que l'on fait de ces échelles de susceptibilité aux mouvements gravitaires.

En revanche, la faible occurrence des chutes de blocs ne permet pas un inventaire fourni qui viendrait valider la méthodologie adoptée pour celles-ci. Toutefois, pour le promontoire du Québec l'approche a bien identifié la région comme fortement susceptible aux chutes de bloc. La caractéristique des falaises extrêmement susceptibles aux chutes de bloc, est qu'elles n'occupent qu'une très petite surface dans notre région d'étude. Il est donc facilement possible de passer à côté et d'éviter leur identification dans la prise en compte de la pente lors d'une évaluation de la susceptibilité aux chutes de bloc. Cette caractéristique peut être corrigée par la prise en compte de la valeur maximale de pente dans un rayon de 250 mètres autour de

chaque point d'évaluation. Cette particularité n'est toutefois valable que pour les chutes de bloc, car la géomorphologie concernant les glissements de terrain est bien différente. En effet, les sédiments susceptibles aux glissements de terrain, ont des caractéristiques géotechniques tel que l'angle de frottement interne qui permettent rarement la formation de falaise à pentes fortes, mais le plus souvent engendre la formation de versant à pente plus faible, mais recouvrant de plus grandes surfaces.

CHAPITRE 7

INTÉGRATION DES CARTES DE SUSCEPTIBILITÉ AUX MÉTHODES INDICIELLES

Les quatre échelles de susceptibilité correspondant aux effets de site développées aux chapitres précédents (4, 5 et 6) peuvent être intégrées à plusieurs méthodes indicielles autant pour les ponts que pour les bâtiments. À titre d'exemple, ce chapitre propose d'intégrer ces échelles à la méthode indicielle d'évaluation de la vulnérabilité sismique des ponts du MTMDET, selon la version proposée par (Lemaire, 2013). Il est important de mentionner que les phénomènes d'effets de site, tels que l'amplification, liquéfaction ou mouvements gravitaires sont tous influencés par l'AMS et la magnitude du séisme. Dans un contexte de prise en compte qualitative du risque sismique des ouvrages d'art, ces phénomènes seront évalués individuellement et combinés selon une procédure de calcul indiciel.

7.1 Données utilisées

Cette étude dispose d'une base de données de 733 ouvrages d'art de la direction territoriale de la capitale nationale, transmise par le MTMDET dans le cadre du développement d'IVS₂₀₁₃ par Lemaire (2013). Cette population de ponts est jugée représentative de l'ensemble des ponts de la province du Québec. Sur les 733 ouvrages, 451 se trouvent dans notre région d'étude et disposent à la fois d'un IVS₂₀₁₃ calculé par Lemaire (2013) et d'un ISE (voir Section 1.5.5).

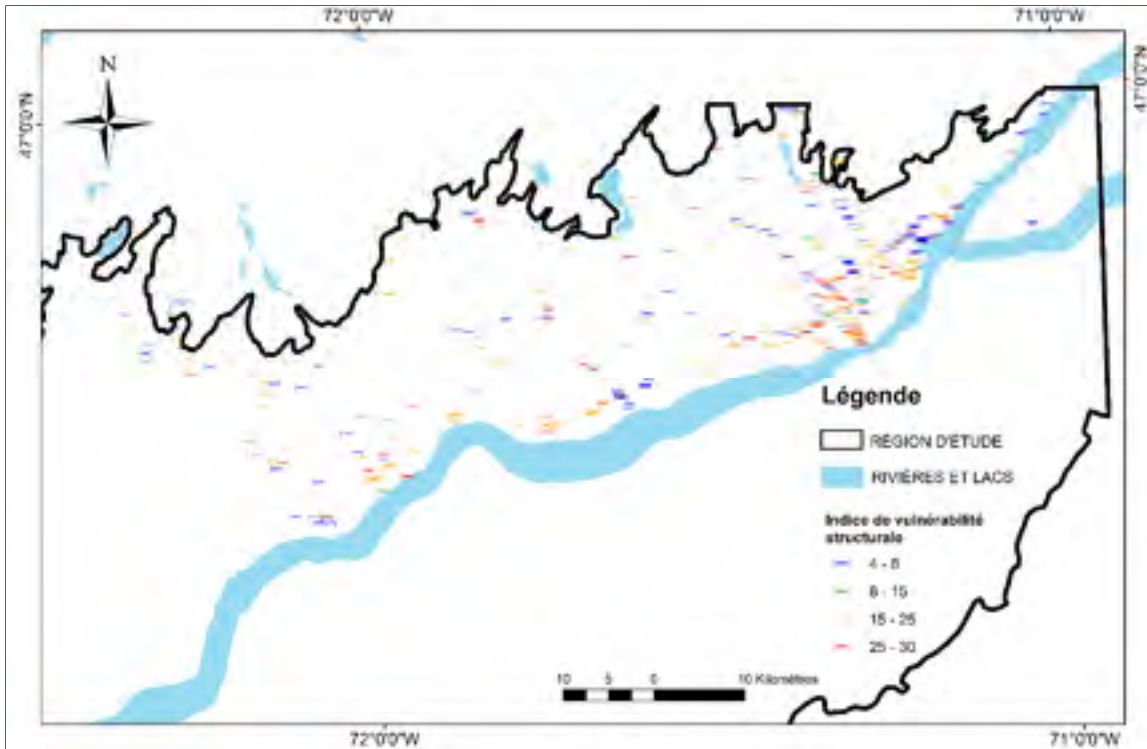


Figure 7.1 Carte des indices de vulnérabilité structurale des ouvrages d'art de la direction territoriale de la capitale nationale

Le nouvel indice s'appellera indice de risque sismique, car il intégrera à la fois la vulnérabilité structurale des ouvrages d'art et l'aléa relatif à chacun des sites. Cet indice doit toutefois être couplé à l'ISE relatif à chaque ouvrage afin d'obtenir une analyse du risque dans son ensemble. Le nouvel indice sera énoncé selon l'équation (7.1):

$$IRS_{2018} = (F_{\text{aléa}} \times F_{\text{site}} \times (F_{\text{glissement de terrain}} + F_{\text{chute de bloc}})) \times V_{\text{vulnérabilité structurale}} \quad (7.1)$$

L'objectif de ce chapitre est d'intégrer les nouvelles données relatives aux effets de site à la méthode du MTMDET (Lemaire, 2013)(Figure 7.2), en respectant les relations logiques entre chacun des phénomènes. Pour ce faire, le rappel de quelques notions de probabilité est nécessaire.

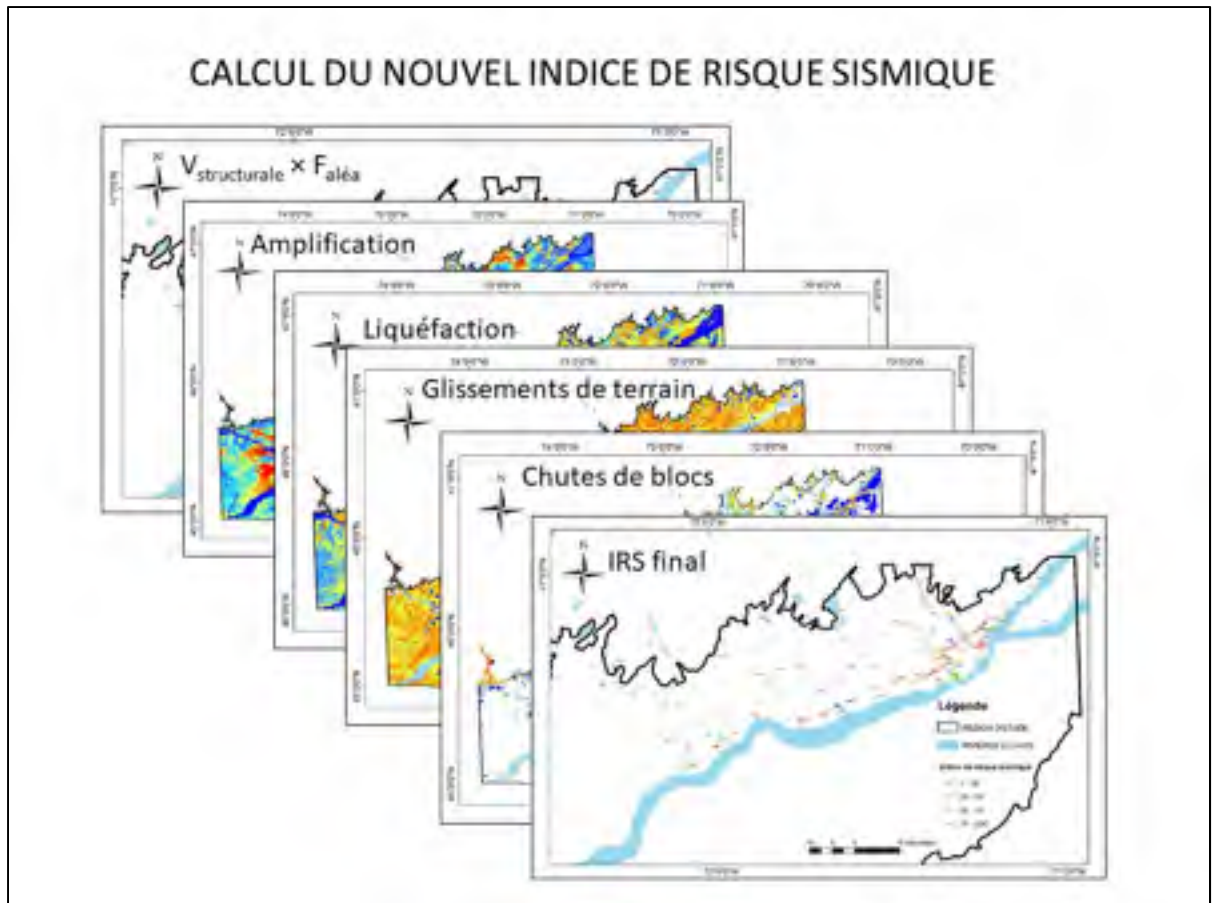


Figure 7.2 Illustration de la prise en compte des effets de sites dans la méthode d'évaluation de la vulnérabilité sismique des ouvrages d'art pour les Basses-Terres du Saint-Laurent

7.2 Rappel de quelques notions de probabilité

Soit deux événements A et B et leur probabilité P (A) et P (B).

1. Si A et B sont des événements compatibles alors leur relation s'exprimera selon l'équation ci-dessous:

$$P(A \cap B) = P(A) \times P(B) \quad (7.2)$$

2. Si A et B sont des événements exclusifs, c'est-à-dire incompatibles, alors leur relation s'exprimera selon l'équation ci-dessous:

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) \quad (7.3)$$

Le cas 1 s'applique pour deux événements tels que l'amplification et les glissements de terrain, car ces deux événements peuvent survenir sur le même ouvrage simultanément. L'un n'exclut pas l'autre.

En revanche, nous avons vu dans le CHAPITRE 6 qu'il est impossible qu'il y ait à la fois une probabilité non nulle d'avoir des chutes blocs et une probabilité non nulle d'avoir des glissements de terrain. En effet, le contexte géologique provoque soit un événement soit l'autre, et non les deux. Ceux-ci suivent le cas 2 d'événements incompatibles.

7.3 Calcul d'un nouvel indice de risque sismique

Le but de cette présente étude est d'intégrer l'ensemble des effets de site au nouvel indice de risque sismique sans toutefois modifier le poids de l'indice relié à la vulnérabilité structurale, celui-ci ayant été calibré pour obtenir, sur une échelle de 1 à 100, une répartition des indices, représentative des vulnérabilités relatives des ponts (voir section 1.5.5). Cet indice varie de 1 à 32. La méthode précédente MTQ₂₀₁₃, prenait déjà en compte la vulnérabilité des fondations qui pouvait jouer un rôle lors d'un phénomène de liquéfaction. La vulnérabilité des culées jouant un rôle prédominant dans la vulnérabilité face aux glissements de terrain, ainsi que la vulnérabilité du tablier et des piles face à des chutes de bloc. C'est pourquoi cette étude propose de modifier l'aléa sans pour autant diminuer l'indice de vulnérabilité relatif à la structure propre de l'ouvrage d'art.

Comme vue dans la section 1.5.5, la version MTQ₂₀₁₃ suggère un indice variant de 1 à 2.5 pour l'aléa général ($F_{aléa}$). Les valeurs pour l'aléa général ont été calculées à partir des cartes d'AMS de la commission géologique datant de 2015 (Halchuk et al., 2015). Ces valeurs ont ensuite été converties dans un premier temps en un $F_{aléa}$ selon la méthode suggérée par (Lemaire, 2013). Dans une perspective de conception, et de classification l'aléa est pris en compte selon l'AMS, mais dans d'autres contextes il pourrait être pris en compte selon un scénario sismique. Le

second indice (F_{site}) varie de 1 à 1.25 pour l'amplification, en l'absence de liquéfaction. Ainsi une valeur combinée de $F_{aléa} \times F_{site}$ varie de 1 à 3.125 voire Équation (1.11) en l'absence de liquéfaction.

De plus, F_{site} de l'IVS₂₀₁₃ peut prendre une valeur de 10 lorsqu'un site est susceptible à la liquéfaction afin de le classer parmi les plus vulnérables (Lemaire, 2013). En effet, la liquéfaction est un phénomène très destructeur, ainsi la prise en compte de la liquéfaction augmente très fortement l'indice général. Cette présente étude a cartographié la susceptibilité à la liquéfaction au CHAPITRE 5. Le nouvel IRS₂₀₁₇, doit également respecter l'importance de la prise en compte du phénomène de liquéfaction dans l'évaluation du risque sismique des ouvrages d'art. C'est pourquoi le nouveau F_{site} sera d'une valeur de 10 lorsque la susceptibilité à la liquéfaction sera très forte et il prendra une valeur de 2 lorsque la susceptibilité sera forte; pour le reste des cas, la liquéfaction ne sera pas prise en compte et le F_{site} variera de 1 à 1.25 en fonction de l'amplification. Il est à noter, que la valeur maximum de l'IRS₂₀₁₇ se maintiendra toujours à 100 comme pour l'IVS₂₀₁₃ que soit la valeur de F_{site} .

Afin d'intégrer les mouvements gravitaires (glissement de terrain et chute de bloc) à l'indice de risque sismique, il est nécessaire de réfléchir sur la compatibilité ou l'exclusivité des différents effets de site. En effet, les mouvements gravitaires sont compatibles vis-à-vis des phénomènes d'amplification ou de liquéfaction. C'est-à-dire qu'un même ouvrage d'art, peut être à la fois touché par une forte amplification et par un glissement de terrain ou des chutes de blocs. Toutefois, on peut mentionner que s'il y a amplification ou liquéfaction, le potentiel de susceptibilité aux mouvements gravitaires augmente également. Ainsi, les indices liés aux mouvements gravitaires seront arithmétiquement connectés sous forme de produit avec les autres effets de site. En revanche, les glissements de terrain et les chutes de blocs sont eux, exclusifs. Si le terrain est susceptible aux glissements de terrain, il ne le sera pas aux chutes de bloc et réciproquement. C'est pourquoi les indices reliés à ces deux phénomènes seront arithmétiquement additionnés. Ces derniers varieront comme pour l'amplification entre 1 et 1.25, selon les niveaux de susceptibilité identifiés au CHAPITRE 6. Si un nouveau facteur

variant de 1 à 1.25, concernant les mouvements gravitaires, doit être intégré, le poids de l'aléa général doit alors être diminué dans les mêmes proportions.

Les poids relatifs entre la vulnérabilité structurale de l'ouvrage qui varie de 0 à 32 et l'aléa qui varie de 1 à 3.125 doivent être conservés car ils ont été établis par une étude de sensibilité (Lemaire, 2013). Ces poids respectifs permettent de s'assurer que les ouvrages montrant plusieurs déficiences sismiques seront identifiés parmi les ouvrages au risque élevé même pour des conditions du site favorable, alors que les ouvrages récents sans déficience sismique seront identifiés parmi les ouvrages au risque faible à modéré. Il est possible de définir un nouvel indice de risque sismique où $F_{aléa}$ variera de 1 à 2 (voir ANNEXE IX), F_{site} de 1 à 1.25 (2 ou 10 en cas de susceptibilité à la liquéfaction) et deux nouveaux indices $F_{glissement\ de\ terrain}$ et $F_{chutes\ de\ bloc}$, qui ensemble varieront entre 1 et 1.25, comme pour F_{site} . Ainsi, la valeur combinée de ces quatre facteurs ($F_{aléa} \times F_{site} \times F_{glissement\ de\ terrain}$ et $F_{chutes\ de\ bloc}$), varie de 1 à 3.125 en l'absence de liquéfaction forte ou très forte, conservant la plage de valeur de l'indice $V_{vulnérabilité\ structurale}$ entre 1 et 32, pour un IRS_{2017} maximum de 100.

7.4 Intégration de la susceptibilité à l'amplification et à la liquéfaction dans la prise en compte de l'aléa

Ainsi cette étude maintient un indice de 1 à 1.25 pour l'amplification, telle que la version du MTMDET le suggère (Lemaire, 2013). Cet indice (ANNEXE X) est calculé en fonction de l'épaisseur des dépôts meubles et le type de dépôt de surface, tel que nous l'avons défini au CHAPITRE 4. Les niveaux de susceptibilité sont convertis en indices selon le tableau ci-dessous.

Tableau 7.1 Tableau des indices de susceptibilité à l'amplification selon les niveaux de susceptibilité à l'amplification et les catégories d'emplacements sismiques

| Catégorie d'emplacement sismique | Niveau de susceptibilité à l'amplification | Indice de susceptibilité à l'amplification |
|----------------------------------|--|--|
| A ou B | Très Très Bas (TTB) | 1 |
| | <i>Très Bas (TB)</i> | <i>1.025</i> |
| C | Bas (B) | 1.05 |
| | <i>Bas à Modéré (BM)</i> | <i>1.1</i> |
| D | Modéré (M) | 1.15 |
| | <i>Haut (H)</i> | <i>1.2</i> |
| E | Très Haut (TH) | 1.25 |

Le même indice prend une valeur de 2 ou 10 s'il y a, respectivement, une forte ou une très forte susceptibilité à la liquéfaction. En effet, la liquéfaction est un phénomène très destructeur et il est important de le mettre en valeur, lorsque le danger, qui est relié est fort ou très fort. Dans notre cas, lorsque l'échelle de susceptibilité à la liquéfaction est de forte ou très forte (CHAPITRE 5) l'indice F_{site} prend la valeur de 2 et 10 respectivement. Seulement moins de 13 % de la région d'étude est évaluée telle que fortement ou très fortement susceptible au phénomène de liquéfaction des sols (voir Figure 5.5). Dans notre échantillon de 431 ponts de la Capitale Nationale, aucun ne se trouve attribué un F_{site} de 10, mais 234 se trouvent attribués un F_{site} de 2.

La distribution des ouvrages d'art selon leur indice F_{site} (Figure 7.3) montre que 19.8 % ont un indice minimum d'une valeur de 1; 16.5 % ont des indices de 1.025 à 1.05; 5.9 % ont une valeur de 1.1, 6.2 % une valeur entre 1.15 et 1.25; Ces indices sont relatifs à l'amplification. Pour les 51.5 % restant, ils prennent une valeur de 2, correspondant à un niveau de susceptibilité haute à la liquéfaction; Aucun des ouvrages ne se situe sur un site très hautement susceptible à la liquéfaction.

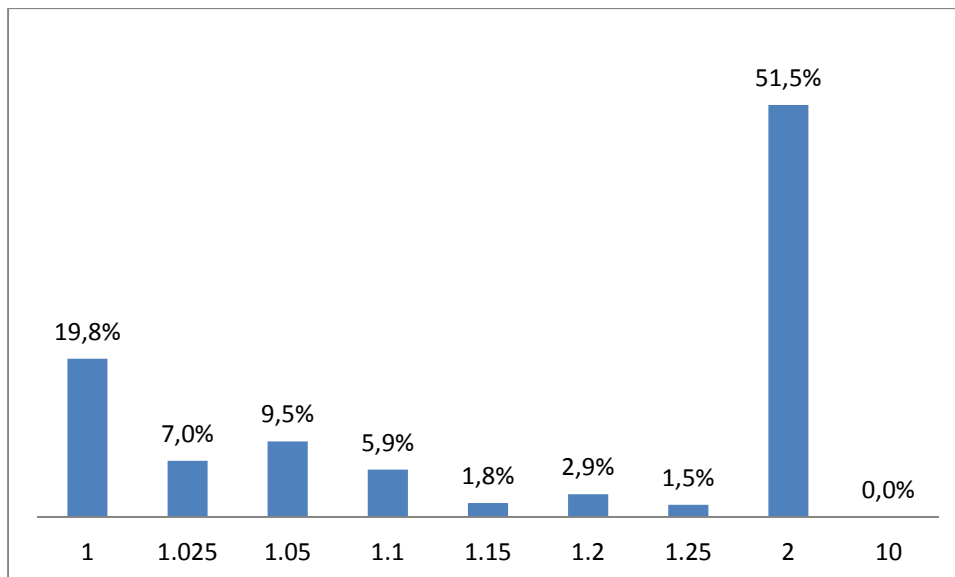


Figure 7.3 Distribution des ouvrages d'art en fonction de leur indice F_{site}

La Figure 7.4 montre la répartition des IRS sans facteur d'amplification (en vert) et en tenant compte de l'amplification et de la liquéfaction (en lilas), en fonction de l'ISE. Les IRS sans facteur d'amplification varient de 6 à 44 et les ISE de 6 à 75, alors qu'avec l'amplification et la liquéfaction les nouveaux IRS varient de 7 à 98. Les IRS sans effet de site sont donc plus faibles de 17 points par rapport aux IRS avec amplification et liquéfaction.

Les ouvrages d'art situés dans le quadrant I sont les plus prioritaires leur IRS et leur ISE sont supérieurs à cinquante, viennent ensuite ceux dans le quadrant II dont l'IRS est supérieur à cinquante, mais pas l'ISE qui est en-dessous, puis ceux du quadrant III dont l'ISE est au-dessus de cinquante, mais pas l'IRS; enfin le dernier quadrant IV est le moins prioritaire.

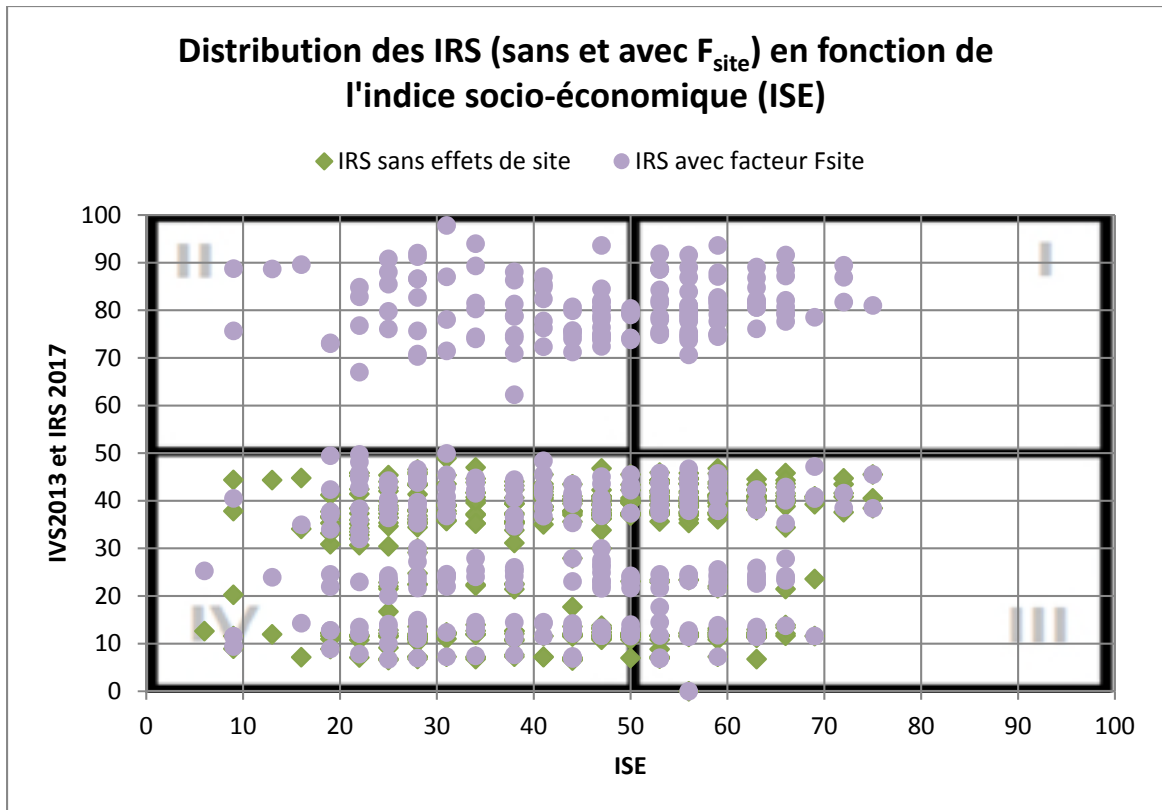


Figure 7.4 Cartographie du risque sismique pour la population de ponts de la Capitale Nationale en tenant compte du nouvel indice F_{site}

Aucun ouvrage ne se situe dans le premier quadrant en tenant uniquement en compte l'aléa général. En revanche, en tenant compte de l'amplification et de la liquéfaction, 76 ouvrages d'art se retrouvent dans le quadrant I et 74 ouvrages dans le quadrant II, soit en tout 33 % des ouvrages (Tableau 7.2). Lorsque l'on ne considère que l'amplification et la liquéfaction comme effet de site, 19.3 % des ouvrages se trouvent dans le quadrant III, et 47.5 % dans le IV (Tableau 7.2).

Tableau 7.2 Effectifs dans les quadrants de priorisation avec et sans tenir compte de l'amplification

| Quadrant | Effectif | | Pourcentage | |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Sans F_{site} | Avec F_{site} | Sans F_{site} | Avec F_{site} |
| I | 0 | 76 | 0 % | 16.9 % |
| II | 0 | 74 | 0 % | 16.4 % |
| III | 165 | 87 | 36.6 % | 19.3 % |
| IV | 286 | 214 | 63.4 % | 47.5 % |

7.5 Intégration de la susceptibilité aux mouvements gravitaires dans la prise en compte de l'aléa

Comme décrit dans la première section de ce chapitre, les mouvements gravitaires sont partiellement indépendants du phénomène d'amplification, c'est-à-dire que l'on peut avoir à la fois de l'amplification et à la fois des mouvements gravitaires. En revanche, on ne peut pas avoir une susceptibilité non nulle à un glissement de terrain et à des chutes de bloc. Lorsqu'un site est exposé aux glissements de terrain, son indice sera de 0 pour les chutes de blocs et inversement. De plus, nous avons distingué dans le CHAPITRE 6, les glissements de terrain des chutes de blocs, car des mesures de protection adaptées à chacun des phénomènes existent et si à l'avenir des informations sur ces mesures de protections peuvent être incluent dans l'IRS, il est préférable de conserver cette distinction.

Le Tableau 7.3 présente comment convertir les niveaux de susceptibilité déterminés au CHAPITRE 6 en indices variant de 1 à 1.25, tel que vu dans l'équation 7.3.

Tableau 7.3 Conversion des niveaux de susceptibilité en indice de susceptibilité pour le calcul d'IRS des ouvrages d'art des Basses-Terres du Saint-Laurent

| Niveau de susceptibilité | Indice de susceptibilité |
|--------------------------|--------------------------|
| Très Haut (TH) | 1.25 |
| Haut (H) | 1.2 |
| Moyen (M) | 1.15 |
| Bas (B) | 1.1 |
| Très Bas (TB) | 1.05 |
| Aucun | 1 |

Sur l'ensemble des ouvrages d'art situés sur notre région d'étude, 15,5 % se trouvent sur des sites très fortement susceptibles. Ce nombre monte à 37,5% pour les sites fortement susceptibles et 35,1% pour les sites modérément susceptibles. Les autres catégories ne regroupent que 12% (voir Figure 7.5).

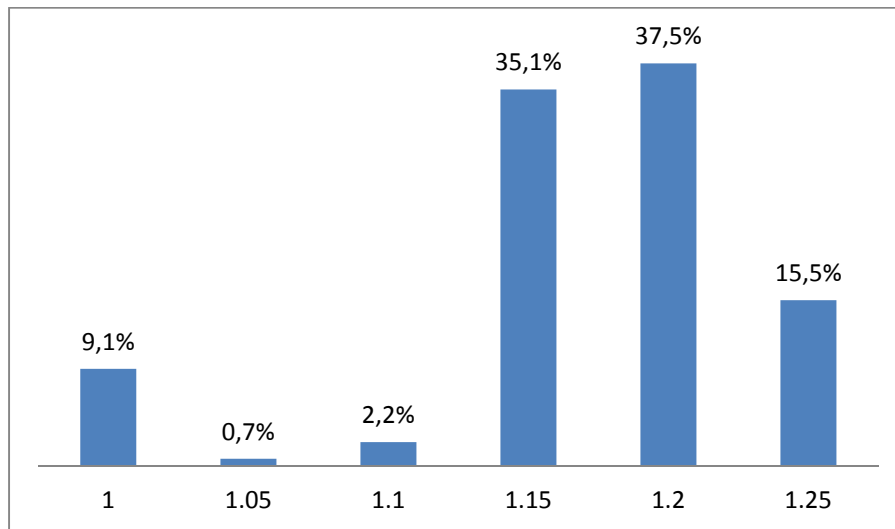


Figure 7.5 Distribution des ouvrages d'art en fonction de leur indice relatif aux mouvements gravitaires

Lorsque l'IRS calculé est à plus de cent, alors un plafond de cent est appliqué. La cartographie des indices de risques avec la prise en compte des mouvements gravitaires selon la nouvelle

méthodologie en fonction de l'ISE montre que 33 ouvrages atteignent l'IRS maximal de 100, ce qui correspond à 7.5 %. Les quadrants I et II les plus à risque, contiennent 44.4 % des ouvrages, soit 11.1 % de plus que lors de la prise en compte des phénomènes d'amplification et de liquéfaction des sols (Figure 7.6 et Tableau 7.4). De plus, la répartition entre les quatre quadrants des IRS₂₀₁₇ est bonne et permet une meilleure sélection des ouvrages d'art à rénover.

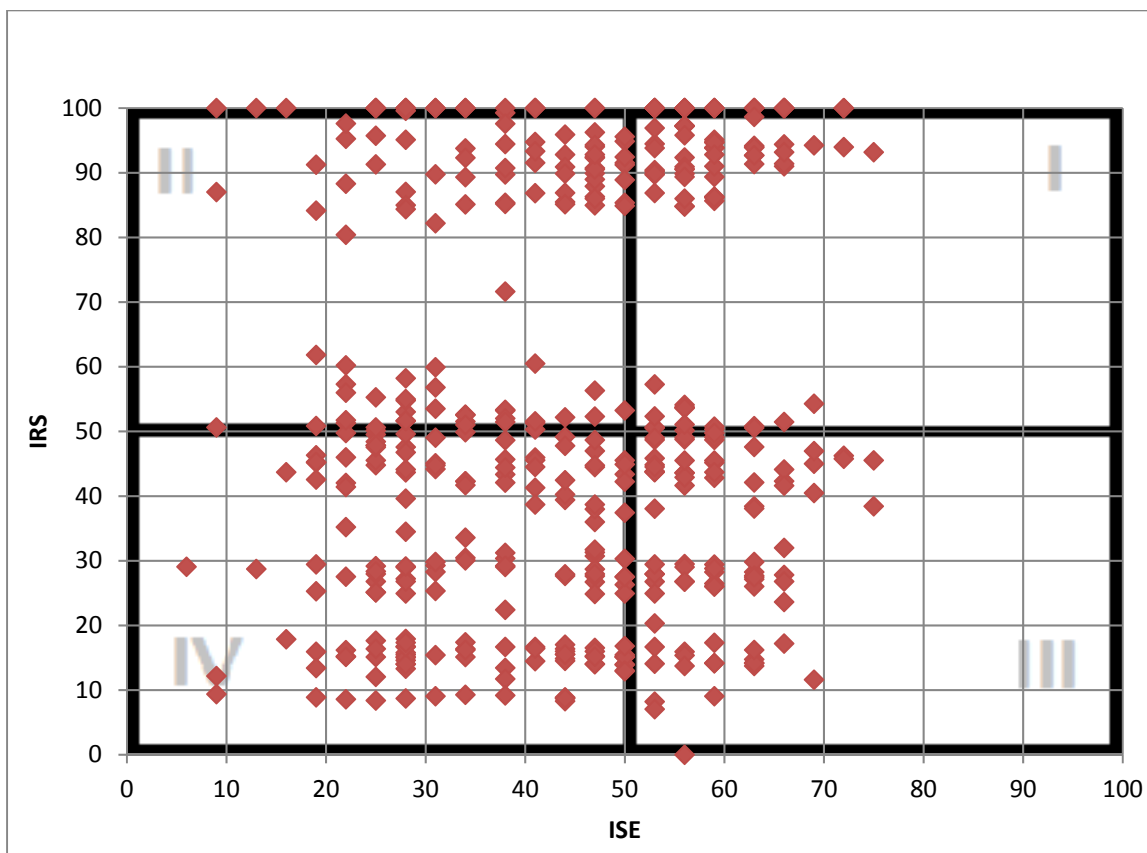


Figure 7.6 Cartographie du risque sismique pour la population de ponts de la Capitale Nationale en tenant compte de l'amplification, de la liquéfaction et des mouvements gravitaires

Au total, environ 55.7 % des ouvrages se trouvent dans les quadrants III et IV lorsque les mouvements gravitaires, la liquéfaction et l'amplification sont pris en compte dans le nouvel IRS.

Tableau 7.4 Effectifs dans les quadrants de priorisation avec la prise en compte des mouvements gravitaires

| Quadrant | Effectif | Pourcentage |
|----------|----------|-------------|
| I | 87 | 19.3 % |
| II | 113 | 25.1 % |
| III | 78 | 17.3 % |
| IV | 173 | 38.4 % |

Les 451 ouvrages d'art présents sur la zone d'étude et dont les caractéristiques structurales ont été transmises par le MTMDET sont cartographiés dans la carte ci-dessous (Figure 7.7) selon leur nouvel indice de risque sismique calculé en tenant compte des effets de sites.

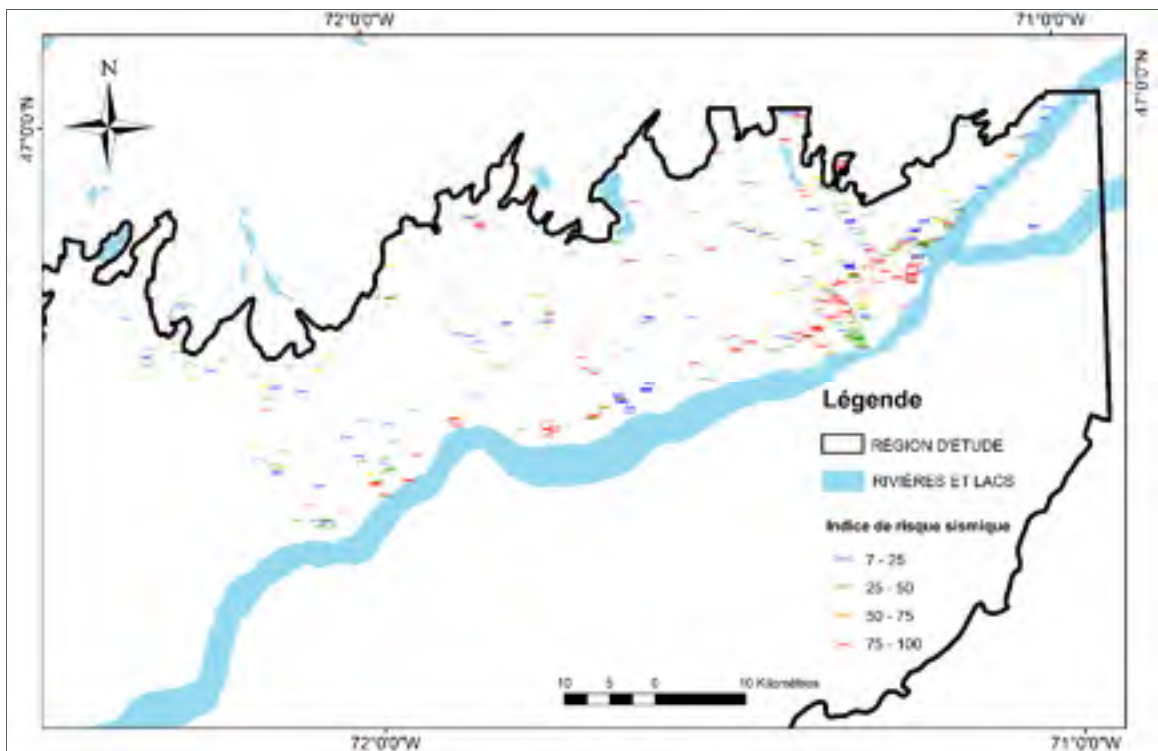


Figure 7.7 Carte des indices de risques sismiques des ouvrages d'art de la direction territoriale de la capitale nationale

7.6 Discussion et conclusion

Les indices d'aléa ont été recalculés selon les nouvelles données d'AMS de 2015 (Halchuk et al., 2015). Afin d'intégrer au mieux les mouvements gravitaires à l'indice de vulnérabilité sismique calculé par Lemaire (2013), l'indice d'aléa général a été diminué de 20%. Les mouvements gravitaires de leur côté peuvent varier de 1 à 1.25, c'est-à-dire augmenter jusqu'à 25% l'IRS. Ceci a permis aux nouveaux IRS d'une part de ne pas dépasser des scores de plus de 100, et d'autre part de maintenir les poids relatifs à la vulnérabilité structurale. Ainsi, on respecte le cas selon Lemaire (2013), où un ouvrage récent sans déficience apparente, possède un IRS inférieur à 50 même s'il se trouve sur un site où l'aléa général est maximum (AMS >0.4g), où l'amplification est maximum et où l'un des mouvements gravitaires est maximum. Cela présume pour les ouvrages à très faible vulnérabilité structurale, que la conception de l'ouvrage a pris en compte l'aléa amplification et l'aléa relié aux mouvements gravitaires.

La liquéfaction est en revanche prise en compte que partiellement, c'est-à-dire que seules les susceptibilités fortes à très fortes sont prises en compte. Toutefois, lorsqu'elle est prise en compte, la liquéfaction augmente drastiquement l'IRS₂₀₁₇, car le phénomène est très destructeur. Ainsi un indice d'une valeur de 10 est maintenu tel que dans le calcul de l'IVS₂₀₁₃ pour les sites à susceptibilité très forte et un indice d'une valeur de 2 est attribué aux sites à susceptibilité forte.

Au total 44.4% de l'ensemble des ouvrages d'art ont un indice de risque sismique supérieure à 50 (quadrant I et II), ce qui est légèrement supérieur au 37% calculés pour les 733 ouvrages par Lemaire (2013), sans la prise en compte des mouvements gravitaires et la prise en compte partielle du phénomène de liquéfaction (IVS₂₀₁₃). Ceci peut s'expliquer en partie par la nouvelle prise en compte du phénomène de liquéfaction qui concerne 234 des ouvrages dans notre étude contre seulement deux dans la base de données de Lemaire (2013).

Les effets de sites, bien qu'ils soient fortement liés à l'AMS sont considérés séparément dans cette étude, c'est-à-dire que ce sont différentes cartes qui les caractérisent et différents indices.

En effet, leur prise en compte reste qualitative avec une analyse du potentiel intrinsèque relatif de chaque site et non pas un seuil de déclenchement précis. Ainsi, l'indice final tient compte à la fois de l'AMS, de l'amplification, de la liquéfaction et des mouvements gravitaires.

Enfin, comme déjà mentionné au CHAPITRE 6, il pourrait être intéressant d'inclure un nouvel indice relatif aux mesures de protection extérieure aux ouvrages d'art, qui auraient pour rôle de diminuer l'impact des mouvements gravitaires sur ces derniers.

CHAPITRE 8

MODÉLISATION D'UN TRONÇON D'AUTOROUTE SUITE À L'EFFONDREMENT PARTIEL D'OUVRAGES D'ART

Ce chapitre traitera de l'impact de la perte de fonctionnalité partielle d'un certain nombre d'ouvrages d'art suite à un séisme hypothétique sur un tronçon de l'autoroute A40 à la hauteur de la ville de Québec. Bien que la méthode actuelle d'évaluation du risque sismique des ouvrages d'art du MTMDET prenne en compte un indice socio-économique afin d'estimer la valeur des éléments exposés, cette étude tentera d'illustrer l'importance de la planification des mesures d'urgence et de mitigation pour les ouvrages d'art au sein du réseau routier. Cette étude propose d'évaluer le temps supplémentaire nécessaire pour atteindre depuis plusieurs écoles, un hôpital en passant par une autoroute partiellement fermée due aux dommages hypothétiques de certains ouvrages d'art suite à un éventuel séisme.

Le logiciel utilisé pour ce chapitre se nomme Synchro® Studio 10 par Trafficware (2018). Il permet de modéliser un trajet et de calculer le temps nécessaire à une évacuation d'un groupe de véhicules. Ce logiciel est utilisé pour la modélisation du trafic routier et la planification routière. Il permet d'obtenir le temps supplémentaire pour un parcours donné lorsque des travaux sont en cours.

8.1 Choix du trajet modélisé

La ville de Québec n'est pas à l'abri d'un séisme. En effet, elle se trouve dans une région à l'aléa modérée. Abo Abo El Ezz et al. (2015) ont estimé lors d'une étude, que selon un scénario pour un séisme d'une magnitude M6.2 dont l'épicentre se situerait à 10 km de profondeur à 10 km du centre de la ville de Québec, ayant une probabilité d'occurrence de 2% en 50 ans (période de retour de 2500 ans) en accord avec le code national du bâtiment du Canada de 2010 (IRC-CNRC, 2010), 61% des bâtiments du centre de la ville de Québec serait au moins

légèrement endommagés. Les dommages aux ponts n'ont pas été évalués dans cette étude, mais cela donne un aperçu des éventuels dommages que les ouvrages pourraient subir. En effet, 41 % des ponts de la ville de Québec ont été bâtis avant 1970, lorsque les connaissances en construction parasismique étaient encore déficientes et que le Code canadien sur le calcul des ponts routiers considérait que la réponse d'une structure à une sollicitation sismique se maintenait à un comportement élastique (Galy et al., 2013).

Le trajet modélisé prend comme point de départ la bretelle d'entrée sur l'autoroute A-40 en direction est à la rue Létourneau. En effet, cette bretelle relie à l'autoroute l'école secondaire La Camaradière et l'école Jean-XXIII (Capitale, 2016). Ces deux écoles ont une capacité respective de 1200 et 235 élèves. Le point d'arrivée se situe à l'hôpital Enfants-Jésus situé au bord du Boulevard Henri-Bourassa; principal hôpital disposant d'un service de traumatologie pour la ville de Québec.

Le trajet depuis la bretelle de la rue Létourneau jusqu'à l'hôpital Enfant-Jésus est de huit km, dont 5.6325 km sur l'autoroute A-40 (Figure 8.1). Sur l'autoroute, un total de dix ouvrages d'art sera sur le trajet, dont 6 ouvrages ont comme voie principale l'autoroute et quatre qui ont comme obstacle cette même autoroute (voir Tableau 8.1). De plus, cinq de ces dix ouvrages d'art, soit 50 % d'entre eux possèdent un indice de risque sismique entre 91 et 100, ce qui les classe parmi les 23% des ouvrages les plus vulnérables du réseau étudié comprenant 451 ponts et viaducs. Il est donc raisonnable de supposer qu'en cas de séisme ces ponts pourraient subir des dommages limitant leur utilisation ou même l'interdisant totalement.



Figure 8.1 Modélisation d'un tronçon d'autoroute A40 à la hauteur de la ville de Québec

Tableau 8.1 Caractéristiques des dix ouvrages d’art sur le tronçon de route modélisé

| Ouvrages d’art | Route | Obstacle | IRS |
|----------------|--|--------------------------------|-----|
| 1 | Autoroute 40 | Rivière du Berger | 27 |
| 2 | Autoroute 740 | Autoroute 40 | 100 |
| 3 | Autoroute 740 | Autoroute 40 | 91 |
| 4 | Autoroute 40 | Bd Pierre-Bertrand (dir. N) | 93 |
| 5 | Autoroute 40 | Autoroute 973 | 94 |
| 6 | Autoroute 40 | 3 ^{ème} avenue Ouest | 32 |
| 7 | Autoroute 40 | 1 ^{ère} avenue Nord | 28 |
| 8 | Autoroute 40 | 4 ^{ème} avenue Est | 29 |
| 9 | Piste cyclable : Corridor des Cheminots | Autoroute 40 | 92 |
| 10 | Boulevard Henri-Bourassa | Autoroute 40 | 28 |

8.2 Données utilisées

Nous considérons un séisme qui a lieu pendant la semaine, car la probabilité est plus élevée (5 sur 7). L’heure choisie est 15h30, ce qui correspond à la fin de l’école et au début des heures les plus achalandées de la journée sur l’autoroute. Les heures d’achalandage surviennent avec une probabilité plus faible, que les heures ordinaires, mais permettent d’émettre l’hypothèse la plus conservatrice. Afin de s’assurer d’utiliser des données réalistes le débit de véhicules a été évalué par comptage. Le comptage des véhicules a ainsi été réalisé entre 16h00 et 18h00 le mardi 3 octobre 2017 à cinq sites différents indiqués au Tableau 8.2.

Tableau 8.2 Récapitulatif des données nécessaires à la modélisation

| N° du site | Localisation | Distance (km) | Volume (véhicules) | | Vitesse limite (km/h) | Voie |
|------------|---|---------------|--------------------|-----------------|-----------------------|------|
| | | | Durée 1 (Heure) | Durée 2 (Heure) | | |
| 1 | Bretelle d'entrée d'autoroute A40, rue Létourneau (46.822; -71.305) | 0.225 | 167 | 315 | 65 | 1 |
| 2 | Autoroute A40 dir. Est (46.834; -71.271) | 5.6325 | 6338 | 12005 | 100 | 3 |
| 3 | Bretelle de sortie d'autoroute A40 (46.848; -71.237) | 0.3 | 1077 | 2020 | 65 | 1 |
| 4 | Rue Antoine Silvy (46.847; -71.236) | 0.28 | 647 | 1220 | 50 | 2 |
| 5 | Bd Henri-Bourassa (46.8427; -71.2356) | 1.4 | 582 | 1098 | 50 | 3 |

Chaque site représente un tronçon spécifique avec sa propre limite de vitesse, son nombre de voies de circulation, sa longueur et son débit de véhicule pour la 1^{ère} heure et les deux heures de comptage. L'entrée de l'autoroute comporte une voie d'accélération de type « parallèle » d'une longueur de 130 m. Pour l'autoroute (site 2), c'est le site le plus achalandé selon les données du MTMDET qui a été pris comme référence pour le comptage (MTMDET, 2017a). La sortie d'autoroute est quant à elle de type « section en biseau » d'une longueur de 155 m. Pour le site 4, c'est une section de la rue Antoine Silvy qui a fait l'objet du comptage alors que

le tronçon regroupe également une section de l'avenue Champfleury. De plus, des feux de circulation sont localisés à l'intersection entre la 28^{ème} rue et le Boul. Henri-Bourassa.

Les données disponibles pour ce trajet sont inférieures aux valeurs standards nécessaires pour la modélisation avec ce programme. En effet, il aurait fallu connaître le volume de véhicules dans les 15 minutes de pointe, la classification des véhicules (proportion de motos ou d'autobus) ou encore la cadence des feux de circulation (Aashto, 2004; Garber et Hoel, 2009). Afin de pallier à ces déficiences, les valeurs utilisées dans cette étude seront calibrées selon le temps moyen calculé par Google Maps pour se rendre du point de départ au point d'arrivée c'est-à-dire entre 12 et 22 minutes (Google, 2017). De plus, il est nécessaire de mentionner que les conducteurs de véhicules pourraient simplement prendre une autre route voyant que l'autoroute est bloquée. Ce chapitre a pour but d'illustrer ce que la modélisation peut apporter à l'étude du risque sismique des ouvrages d'art, plus que de définir avec précision le temps nécessaire pour se rendre à cet hôpital depuis le point de départ.

Le logiciel Synchro® Studio 10 prend en compte les 15 minutes les plus achalandées sur une heure de comptage par le coefficient des heures de pointes (CHP). En théorie, ce coefficient se calcule selon la formule ci-dessous (Garber et Hoel, 2009):

$$\text{CHP} = \frac{\text{Volume durant l'heure de pointe}}{4 \times \text{Volume des 15 minutes de pointe}} \quad (8.1)$$

Dans notre étude, c'est la valeur par défaut de 0.92 qui est retenue. Il en est de même avec la classification des véhicules, c'est la valeur par défaut de 2% de véhicules lourds qui est retenu. Un grand pourcentage de véhicules lourds sur le réseau va ralentir la circulation alors qu'un grand pourcentage de motos fluidifie le trafic.

En théorie, la cadence des feux de circulation dépend de la géométrie de l'intersection telle qu'on peut le voir à la Figure 8.2. et du trafic moyen sur chacune des voies (Garber et Hoel, 2009). La cadence des feux de circulation a été prise par défaut selon le logiciel et son outil

d'optimisation qui permet d'avoir le meilleur cycle en fonction de la géométrie de l'intersection, c'est-à-dire 150 secondes. Toutefois le flux de voitures sur chacune des voies a été établi afin de respecter le temps de parcour de référence (12 à 22 minutes) (Google, 2017), car ces données spécifiques à l'intersection n'ont pas pu être recueillies. Le détail des volumes de véhicules se trouve dans L'ANNEXE XI.

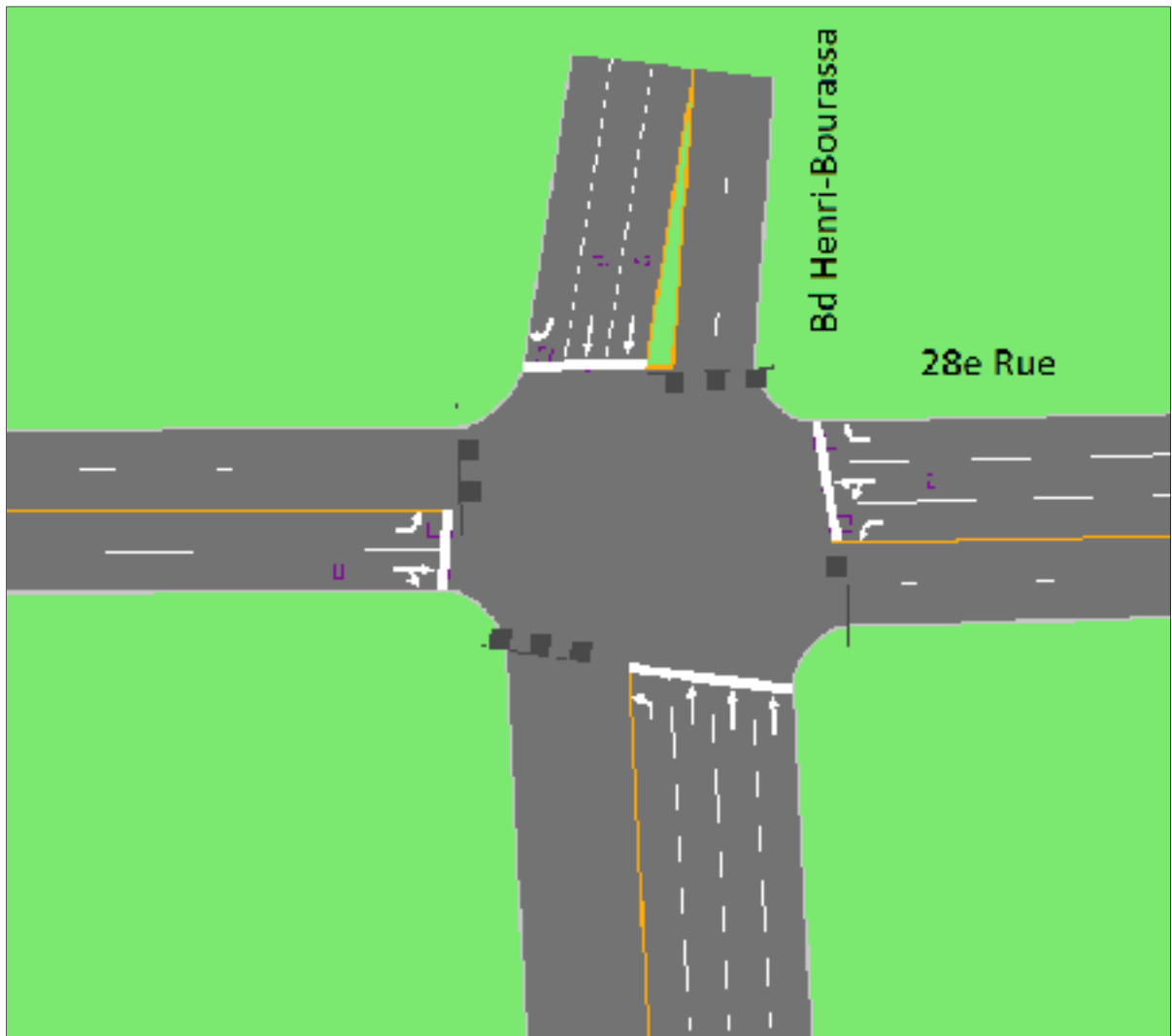


Figure 8.2 Géométrie de l'intersection entre la 28^{ème} rue et le Bd. Henri-Bourassa

Les données sur les entrecroisements, qui ralentissent considérablement la circulation auraient également dues être connues. Sur le tronçon d'autoroute, nous avons compté 4 zones d'entrecroisement. Ainsi, pour ralentir la circulation sur l'autoroute nous avons placé à l'entrée de l'autoroute modélisée, des feux de signalisation d'un cycle de 150 secondes, avec une priorité pour les véhicules circulant déjà sur l'autoroute. En effet, sur ce cycle de 150 secondes, 120 secondes au minimum sont attribuées à un feu vert pour les véhicules circulant déjà sur l'autoroute. Pour les 30 secondes restantes, elles peuvent être attribuées, soit aux véhicules déjà présents sur l'autoroute, soit aux véhicules situés sur la voie d'entrée dépendamment du volume situé en aval sur l'autoroute.

Le choix du nombre de véhicules supplémentaires se pose également. Une étude de Hazus Canada 2.1 pour la ville de Montréal estime qu'un séisme de $M_w=7$, dont l'épicentre serait sur l'île de Montréal à 10 km de profondeur, engendrerait 9579 trajets de véhicule dont moins de 1% concernerait un hôpital (Tamima et Chouinard, 2013). Hazus considère le nombre de blessés modéré avec hospitalisation ainsi que le nombre de blessés dont la vie est en jeu pour déterminer un nombre de déplacements engendré pour se rendre à un hôpital. Le rapport entre la population de Montréal et le nombre de trajet total est de 0.23%. En faisant l'hypothèse que l'aléa et la vulnérabilité sont les mêmes pour les villes de Montréal et de Québec; si ce rapport s'applique à la population de la ville de Québec on obtient un total de 1902 déplacements, dont 19 déplacements en destination d'un hôpital.

Nous faisons l'hypothèse dans cette étude d'une augmentation de 5%, 10% puis 15% de plus de circulation sur chacun des tronçons du trajet pour l'heure qui suit le séisme. Cela correspond pour le tronçon le plus achalandé, c'est-à-dire l'autoroute A-40 direction Est, respectivement 317, 326 et 334 de véhicules en plus engagés dans le trafic (voir Tableau 8.3). Pour le Boul. Henri-Bourassa, en direction de l'hôpital, c'est un ajout de 29 véhicules pour un ajout de 5% au volume compté.

Tableau 8.3 Récapitulatif des volumes durant l'heure de pointe avant et après un séisme

| N° du site | Localisation | Débits | | | |
|------------|---|--------|------|------|------|
| | | 1H | +5% | +10% | +15% |
| 1 | Bretelle d'entrée d'autoroute A40, rue Létourneau (46.822; -71.305) | 167 | 175 | 184 | 192 |
| 2 | Autoroute A40 dir. Est (46.834; - 71.271) | 6338 | 6655 | 6972 | 7289 |
| 3 | Bretelle de sortie d'autoroute A40 (46.848; -71.237) | 1077 | 1131 | 1185 | 1239 |
| 4 | Rue Antoine Silvy (46.847; - 71.236) | 647 | 679 | 712 | 744 |
| 5 | Bd Henri-Bourassa (46.8427; - 71.2356) | 582 | 611 | 640 | 669 |

8.3 Résultats

Nous faisons tout d'abord l'hypothèse, que les dommages subis sur les 10 ouvrages d'art suite au séisme n'impactent pas le trafic routier et que les trois voies de l'autoroute sont pleinement utilisables. Dans un deuxième temps, nous estimons que les 5 ouvrages d'art dont les indices de risque sismique sont évalués entre 91 et 100 obstruent les voies d'autoroute de telle manière que les dommages subis sont équivalents à la suppression simple d'une des voies de l'autoroute. Le dernier cas prend en compte, que les dommages subis par les ouvrages d'art conduisent aux mêmes conséquences que la perte totale de deux des trois voies de l'autoroute.

Le premier résultat obtenu par la modélisation correspond au volume de véhicule compté sur le terrain et des données obtenues avec la calibration. Le temps estimé du trajet est de 21 minutes après calibration, lorsque les trois voies de l'autoroute sont ouvertes.

Lorsque seulement deux voies sont ouvertes, en supposant que des dommages sur les ouvrages d'art aient obstrué l'équivalent d'une voie de l'autoroute, le temps pour parcourir le trajet monte à 25 minutes, soit 4 minutes de plus. Lorsque l'on estime que seulement l'équivalent d'une voie peut être utilisée sur l'autoroute, nous obtenons un trajet d'une durée de 39 minutes, soit 15 minutes de plus. Ces valeurs se trouvent au Tableau 8.4.

Tableau 8.4 Durée du trajet en minutes en fonction du nombre de voies ouvertes sur l'autoroute et du volume de véhicule engagés dans le trafic

| Nombre de voies\Volume | 100% | 105% | 110% | 115% |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 3 voies | 21 | 22 | 24 | 25 |
| 2 voies | 25 | 27 | 29 | 31 |
| 1 voie | 39 | 42 | 45 | 48 |

Lorsque le trafic augmente, par exemple lorsque 15% de véhicules en plus sont entrés en circulation, le temps de parcourt augmente également progressivement de 21 minutes à 25 minutes. De plus, le temps de parcourt s'élève jusqu'à 48 minutes lorsqu'il ne reste qu'une seule voie de circulation pour un trafic routier de 15% plus achalandé. Ainsi, si les dommages subis par les 10 ouvrages d'art suite au séisme empêchent la circulation de façon équivalente à la suppression de deux des trois voies d'autoroute, le retard augmentera à 27 minutes de plus que le temps normal sans ajout de véhicules (48-21).

8.4 Discussion et conclusion

Ce chapitre présente une manière différente de prendre en compte la valeur des éléments exposés par rapport à celle proposée par l'indice socio-économique du MTMDET. En effet, certains logiciels sont capables de calculer le temps supplémentaire nécessaire à un groupe de véhicules pour atteindre une destination, si certaines des voies du trajet sont obstruées (Tamima, 2016; Tamima et Chouinard, 2013; Trafficware, 2018). Il est toutefois recommandé

pour calculer le temps réel, de prendre en compte toutes les autres rues qui permettent d'atteindre l'hôpital.

Un trajet a été choisi, qui relie des écoles avec plus de 1400 élèves au principal hôpital de la ville de Québec ayant un service de traumatologie. Afin d'obtenir une idée du trafic routier sur le parcours, une journée de comptage a été organisée. Les données collectées ont été combinées aux valeurs par défaut du logiciel ainsi qu'avec le temps proposé par le site « google map » pour obtenir une situation initiale.

Les indices IRS calculés intégrant les effets de sites induits pour les ouvrages se situant sur le parcours ont été utilisés pour déterminer quelles voies pourraient être obstruées en cas de séisme. Il est supposé que les ponts dont l'IRS est le plus élevé peuvent subir suffisamment de dommages pour obstruer une ou plusieurs voies. Par ailleurs, les événements sismiques génèrent toujours une augmentation du trafic relié à l'évacuation des personnes vers les centres d'hébergement et hôpitaux. Le trajet augmente de 4 minutes si l'on ajoute au trafic routier 15% de véhicules. De plus, il augmente de 18 minutes si avec le volume initial deux des voies de l'autoroute sont obstruées, c'est-à-dire à 39 minutes de trajet. À titre indicatif, les standards Californiens recommandent un trajet de 8 minutes jusqu'à un hôpital (Tamima, 2016).

Ce chapitre propose de prendre en compte l'évaluation relative du risque sismique des ouvrages d'art afin d'évaluer le temps supplémentaire nécessaire pour atteindre depuis plusieurs écoles, un hôpital en passant par une autoroute partiellement fermée due aux dommages hypothétiques de certains ouvrages d'art suite à un éventuel séisme. Ces informations concernant le temps supplémentaire nécessaire pourraient ensuite être prise en compte dans l'évaluation de l'indice socio-économique déterminé par le MTMDET.

CONCLUSION

Cette étude propose une analyse à critères multiples afin d'estimer une susceptibilité pour les effets de site présents pour les Basses-Terres du Saint-Laurent. Les effets de sites considérés dans la zone d'étude sont l'amplification, la liquéfaction, les glissements de terrain et chutes de blocs. L'avantage de la plateforme SIG permet de réunir des informations faciles d'accès, telles que des données géologiques, hydrologiques et géomorphologiques, mais également de différentes natures tel que le niveau de la nappe phréatique dans un forage à un emplacement (X;Y). En effet, les SIG permettent de compiler les données ponctuelles telles les données structurales des ouvrages d'art avec des informations à plus grandes échelles telles que les formations géologiques (socles rocheux, géologie de surface ou épaisseur des dépôts meubles) ou la topographie de la région d'étude. Dans un premier temps la plateforme SIG a permis de traiter ces données de différentes natures pour les rendre toutes compatibles entre elles. Dans un second temps, des échelles de susceptibilité pour chacun des effets de site ont été déterminées. Ces échelles ont ensuite servi à cartographier la région d'étude. Les SIG permettent l'extraction pour chaque ouvrage d'art des indices relatifs à ces susceptibilités afin de calculer un nouvel indice intégrant la vulnérabilité structurale et les effets de sites.

Les cartes en résultant peuvent être utilisées pour différentes applications, lorsqu'il est difficile d'aller effectuer des études géotechniques site par site. Ces cartes comblent le manque d'information spécifique aux sites des ouvrages et permettent une estimation sur un plus large territoire. Cette étude a pour but d'intégrer ces échelles de susceptibilité à une méthode indiciaire d'évaluation de la vulnérabilité sismique des ouvrages d'art. Les échelles de susceptibilité permettent le calcul d'un nouvel indice, qui évalue à la fois l'aléa (incluant les effets de site) relié aux ouvrages d'art et à la fois la vulnérabilité structurelle reliée à ces derniers.

Susceptibilité à l'amplification

L'amplification est évaluée dans cette étude selon la géologie de surface et l'épaisseur des dépôts meubles. L'hypothèse de cette étude est qu'une colonne sédimentaire est similaire si la géologie de surface et l'épaisseur des dépôts meubles sont similaires. Dans un premier temps, ces données sont comparées avec les précédentes études de microzonage pour les régions d'Ottawa-Gatineau, Montréal et Québec. Cela a permis d'obtenir des probabilités d'appartenir à une certaine catégorie d'emplacement sismique selon la configuration géologique d'un site. La susceptibilité à l'amplification est souvent définie sur la base de l'appartenance à une catégories d'emplacement sismique. Les sites classés E seront plus amplificateurs que les sites classés A ou B, ce qui permet de définir une susceptibilité relative selon la catégorie d'emplacement sismique. Selon les codes de conception, ces catégories d'emplacement sismique permettent de déterminer le facteur d'amplification de l'accélération spectrale selon la période de la structure pour déterminer l'accélération de conception. Toutefois, les sites de catégories D et E ne sont pas toujours amplificateurs. En effet, selon le CNB 2015 (IRC-CNRC, 2015a) pour des périodes inférieures à 0.2 secondes, c'est la catégorie C qui est la plus amplificatrice. De plus, on peut mentionner que l'amplification est également dépendante du contenu fréquentiel du séisme en lui-même.

Cette méthodologie a servi à produire des niveaux de susceptibilité à l'amplification selon des probabilités d'appartenance aux différentes catégories d'emplacement sismique. Dans ce cadre, huit types de dépôts de surface ont été recensés pour les trois régions ciblées par le microzonage ainsi que cinq tranches d'épaisseur de dépôts meubles. De plus, les sites où la roche affleure sont directement classés au plus bas niveau d'amplification.

Suite à cette première phase, une campagne de mesures de vibrations ambiantes (MVA) a été mise en place pour confirmer les résultats déjà obtenus et compléter lorsqu'il est nécessaire les données relatives à certains dépôts non présents dans les trois régions précédemment citées. Les fréquences de résonances déterminées grâce aux MVA sont comparées aux données relatives aux épaisseurs de dépôts meubles et une relation de type puissance existe entre elles.

Cette corrélation est proche de différentes études de MVA menées dans les régions de Montréal et Ottawa-Gatineau.

Les fréquences une fois validées, permettent de calculer des V_{s30} et de confirmer les niveaux de susceptibilité déterminés lors de la première approche. Seules quatre configurations géologiques se sont vues attribuées de nouveaux niveaux de susceptibilité à l'amplification. De plus, cette étape a permis de déterminer de nouveaux niveaux de susceptibilité pour deux types de géologie affleurante, non présente dans les régions ciblées par le microzonage (dépôts lacustres et dépôts éoliens). Plus l'épaisseur des dépôts meubles augmente, plus les niveaux de susceptibilité à l'amplification sont élevés. Les dépôts de versant, alluviaux ou marins sont les plus amplificateurs.

Afin de valider l'approche générale, les nouveaux niveaux de susceptibilité à l'amplification sont comparés aux cartes de microzonage préétablies et une corrélation de 75% est trouvée entre les catégories d'emplacements sismiques et la répartition des nouveaux niveaux de susceptibilité à l'amplification pour les villes de Québec et Montréal déjà ciblées par des études de microzonage.

Cette étude permet grâce à des informations réduites telles que la géologie de surface et l'épaisseur de dépôts meubles d'obtenir une évaluation avant tout qualitative du phénomène d'amplification. Le phénomène d'amplification ne se résume toutefois pas uniquement à la géologie de surface et à l'épaisseur des dépôts meubles, mais surtout à la nature de l'ensemble de la colonne sédimentaire, qui à la fois, a une incidence sur les V_{s30} , mais surtout sur les fréquences de résonance du sol. C'est pourquoi, cette étude permet d'évaluer la susceptibilité à l'amplification, à une échelle régionale pour les Basses-Terres du Saint-Laurent. De plus, cette échelle de susceptibilité peut également être utilisée lorsque l'on estime qu'une colonne sédimentaire est similaire à l'une de celles existantes dans notre région d'étude.

De plus, la campagne de mesures de MVA a aussi permis de recueillir des données sur 46 ouvrages d'art. Celles-ci pourraient être utilisées à l'avenir afin de mieux quantifier les

phénomènes d'interaction du sol avec les structures. Toutefois, il faudrait avoir plus de données sur les structures des ouvrages en question afin de valider ces mesures.

Susceptibilité à la liquéfaction

Cette étude à critères multiples permet d'obtenir une carte de susceptibilité à la liquéfaction selon six niveaux de nul à très forte. Elle est basée sur le jugement d'experts proposé par Youd et Perkins (1978) et a été adaptée à la géologie de la zone d'étude. L'approche combine les données de géologie affleurante avec la présence de nappe phréatique proche de la surface. Les dépôts sédimentaires de la région d'étude sont classés selon leur similitude avec des classes de dépôts dont la susceptibilité a été auparavant évaluée. L'âge des dépôts est également utilisé pour déterminer l'état de compacité des sédiments. Lorsque les dépôts en présence dans la région d'étude ne correspondent pas à une des catégories classifiées par le jugement d'expert, ce sont les recommandations de géotechniciens qui sont suivies. Lorsque la nappe phréatique est proche de la surface c'est-à-dire à moins de 10 mètres, c'est la susceptibilité des sédiments en surface qui est déterminante, lorsque la nappe phréatique est plus profonde, les niveaux de susceptibilité à la liquéfaction varient entre bas et très bas. Le seuil de 10 m tel que suggéré par Youd et Perkins (1978) correspond à un niveau auquel un phénomène de liquéfaction n'aurait que peu d'incidence sur une structure. Toutefois en présence d'un barrage, ce seuil devrait être augmenté. Le niveau « aucun » n'est réservé qu'aux sites où la roche affleure. La majorité des sites sont de susceptibilités modérées, toutefois 23% sont de susceptibilités hautes à très hautes.

Le séisme de Charlevoix-Kamouraska en 1925 a induit de la liquéfaction au Vieux port de la ville de Québec. Ce site est caractérisé par des dépôts alluviaux relativement récents. Ainsi leurs niveaux de susceptibilité varient entre forts et très forts. Il est intéressant de relever que part une approche différente lors de l'évaluation de la susceptibilité à l'amplification, ce sont ces mêmes dépôts alluviaux qui sont considérés comme amplificateur et dont la résistance au cisaillement est faible.

Des phénomènes de liquéfaction ont également été recensés durant le séisme de Saguenay en 1988 dans la vallée Ferland-Boileau proche de la zone d'étude. Cette vallée est couverte de dépôts fluvioglaciaires, glaciolacustres, de tills et de dépôts alluviaux. Ces dépôts sont qualifiés de hautement susceptibles dans notre étude. Ces épisodes montrent également la complexité du phénomène de liquéfaction qui dépend souvent d'une séquence particulière de couches et non simplement de la lithologie en surface. En effet, c'est sous forme de filon gorgé d'eau du à un piégeage de la nappe phréatique sous une couche imperméable en surface, que le phénomène de liquéfaction a été constaté sur ces sites.

La carte de susceptibilité à la liquéfaction de cette étude n'a pas pour objectif de déterminer le potentiel de liquéfaction d'un site, mais plutôt de servir d'outil de gestion pour identifier les ouvrages devant faire l'objet d'une attention accrue à ce niveau. En effet, la liquéfaction est également reliée étroitement à la magnitude d'un séisme et à l'AMS d'un sol. Les mesures de mitigation pour éviter des phénomènes de liquéfaction incluent le traitement du sol par des techniques de vibroflottation ou de compactage. Pour diminuer l'impact de la liquéfaction lors de la conception d'un ouvrage d'art, il est conseillé que celui-ci soit construit avec des fondations profondes ou des colonnes ballastées.

Susceptibilité aux mouvements gravitaires

La méthode à critères multiples hybride utilisée dans cette étude s'inspire des jugements d'expert de du logiciel Hazus, en l'adaptant au contexte géologique. En effet, elle prend en compte la pente grâce à la télédétection, la géologie selon trois groupes et la présence de nappe phréatique à la surface. Cette méthode est toutefois adaptée à la région d'étude et à la présence des argiles dites de « Champlain » particulièrement instables et sensible à l'érosion sur les versants aux abords des points d'eaux. Ainsi un critère supplémentaire relié à la présence d'un point d'eaux dans les 100 mètres autour d'un site est également pris en compte.

La méthode distingue également les glissements de terrain des chutes de bloc. Bien que la vulnérabilité des ouvrages d'art face aux glissements de terrain soit prise en compte par le biais

de la qualité des fondations et celles des chutes de blocs par le biais des caractéristiques de la superstructure et du nombre de colonne par pile, il n'en reste pas moins que d'autres critères peuvent venir s'additionner et améliorer cette prise en compte des mouvements gravitaires dans l'évaluation du risque sismique des ouvrages d'art. Ainsi certaines méthodes considèrent la présence de faille et la condition de la roche pour les chutes de blocs. De plus, des mesures de protections externes comme une forêt ou la présence de grillages face aux chutes de blocs peut être pris en compte. Pour les glissements de terrain, des mesures de drainage peuvent également réduire l'impact sur l'ouvrage. Il convient également pour l'ensemble des infrastructures dites sensibles, tels qu'hôpitaux, barrages ou écoles de calculer un facteur de sécurité spécifique au site, lorsque l'on se trouve à proximité d'un versant.

Pour les glissements de terrain, la plupart des sites sont considérés de susceptibilité modérée à haute dans la région d'étude. Un inventaire a permis de valider l'approche. En effet, les deux tiers des sites où des glissements de terrain ont eu lieu par le passé sont évalués comme susceptibles par notre approche.

L'aléa relié aux chutes de bloc est présent dans 5 % de la région d'étude où la roche affleure. La majeure partie correspond à une absence de susceptibilité toutefois 32 pourcents de cette région est modérément, fortement ou très fortement susceptible. Pour le promontoire de Québec, connu pour ses chutes de bloc, la région a été identifié comme fortement susceptible. Un inventaire de l'ensemble de la région d'étude serait nécessaire pour valider l'approche.

Intégration des cartes de susceptibilité aux méthodes indicielles

Les quatre échelles de susceptibilité aux effets de site peuvent être intégrées aux méthodes indicielles pour l'évaluation du risque sismique des ouvrages. À titre d'exemple les échelles de susceptibilité développées ont été intégrées à la méthode indicielle d'évaluation de la vulnérabilité sismique des ponts du MTMDET pour définir un nouvel indice de risque sismique IRS₂₀₁₇ au lieu de l'indice de vulnérabilité sismique proposé par Lemaire (2013), IVS₂₀₁₃. L'indice d'aléa sismique est mis à jour selon les dernières données de la commission

géologique du Canada (2015). Le calcul de l'indice relié à l'aléa général est maintenu tel que calculé pour l'IVS₂₀₁₃, toutefois il est diminué de 20% afin de maintenir le rapport entre la vulnérabilité structurale d'un ouvrage d'art et l'aléa avec effets de site relié à ce dernier. En effet, les mouvements gravitaires seront pris en compte grâce à un nouvel indice à six niveaux variant de 1 à 1.25.

De plus, cette étude permet de prendre en compte l'amplification selon sept niveaux pour l'ensemble de la zone d'étude. L'indice concernant l'amplification varie entre 1 et 1.25 tel que pour le calcul de l'IVS₂₀₁₃. Il permet une meilleure estimation pour les Basses-Terres du Saint-Laurent que la méthode précédente (2013). De plus, ce même indice se voit enrichir par une meilleure prise en compte de la liquéfaction. En effet, la nature destructrice de ce phénomène conduit à choisir des indices particulièrement élevés, lorsque les niveaux de susceptibilité oscillent entre fort et très fort. Les valeurs correspondent respectivement à des facteurs de 2 et 10, ce qui augmente considérablement les IRS finaux.

La prise en compte des effets de site conduit à une meilleure estimation de l'aléa. La distribution des IRS est bien répartie entre les quatre quadrants de référence ce qui permet une meilleure sélection des ouvrages d'art nécessitant une étude plus détaillée de leur vulnérabilité. En outre, environ 45 pourcents des IRS finaux sont supérieurs à 50, valeur limite au-delà de laquelle un ouvrage d'art est considéré comme potentiellement à risque.

Modélisation d'un tronçon d'autoroute endommagé suite à l'effondrement partiel d'ouvrages d'art

Bien que la méthode actuelle d'évaluation du risque sismique des ouvrages d'art du MTMDET prenne en compte un indice socio-économique afin d'estimer la valeur des éléments exposés, cette étude propose d'évaluer le temps supplémentaire nécessaire à un certain nombre de véhicules pour atteindre un hôpital en passant par une autoroute partiellement fermée due aux dommages hypothétiques de certains ouvrages d'art suite à un séisme quelconque. Les IRS des ponts sur le parcours identifié sont pris en compte pour définir les scénarios de voies obstruées

sur le parcours. Les logiciels de simulations de trafic routier peuvent constituer un bon outil lors de la planification du réseau routier post-séisme.

RECOMMANDATIONS

La qualité et la résolution des cartes finales (405 m pour l'amplification et 355 m pour les mouvements gravitaires) dépendent de la qualité et de la résolution des cartes d'origine. De nouvelles cartes de susceptibilités aux effets de sites peuvent être créées pour l'est du Canada, grâce aux méthodes à critères multiples développées. Les cartes de susceptibilités peuvent être appliquées à d'autres méthodes indicielles telles que pour des hôpitaux, des écoles ou des chemins de fer.

L'évaluation de l'amplification a pu se faire grâce à de précédentes études comprenant de nombreuses mesures pour les trois régions de Québec, Montréal et Ottawa–Gatineau. Ainsi cette étude peut être améliorée, soit par présence d'autres cartes de microzonage, soit par une campagne de mesure plus importante qui combinerait des mesures de vibrations ambiantes ou des mesures de sismique réflexion, de sismique réfraction ou des mesures en forage (SPT) ainsi que des mesures des ondes de surface multicanaux (MASW). Ces données additionnelles permettraient de mieux calibrer l'échelle de susceptibilité en fonction de la géologie de surface et de la profondeur du roc.

Afin de mieux mesurer l'efficacité de la méthodologie appliquée pour l'évaluation de la susceptibilité à la liquéfaction sur notre région d'étude, il serait recommandé soit d'obtenir un inventaire plus fourni de ce phénomène, soit de comparer les sites avec des données S_u qui donnent une idée de la résistance du sol non-drainé au cisaillement. De plus, les mesures collectées pour la hauteur de la nappe phréatique, n'ont pas été identiques d'un forage à un autre. Il pourrait être plus précis d'obtenir des mesures lors de la même période pour tous les forages et particulièrement au début du printemps lors de la fonte des glaces, lorsque la nappe phréatique atteint son maximum. Un inventaire plus complet des phénomènes de liquéfaction pourrait venir valider l'approche.

Pour les glissements de terrain, un inventaire a permis de valider l'approche, toutefois de nombreuses études prennent également en considération un critère lié à la couverture et

l'utilisation des sols grâce à des données de télédétection. En effet, selon son utilisation, la capacité d'un sol à absorber l'eau est modifiée, ce qui peut fortement influencer la susceptibilité aux glissements de terrain. Les précipitations sont parfois un phénomène déclencheur des mouvements gravitaires mais en tout cas un phénomène déstabilisant. L'ajout de données concernant les précipitations peut ainsi améliorer l'approche à critères multiples adoptée pour l'évaluation de la susceptibilité aux mouvements gravitaires lors de cette étude.

De plus, l'évaluation de la susceptibilité aux chutes de bloc pourrait être améliorée par la prise en compte de données relatives aux conditions de la roche comme la fréquence des fractures, leurs orientations et leurs pendages à plus petite échelle et la proximité d'une faille ou d'éboulis à large échelle. Un inventaire sur les chutes de blocs plus complet pourrait venir valider l'approche.

Les mouvements gravitaires peuvent faire l'objet sur le terrain, de mesures de stabilisation. Pour les glissements de terrain, des mesures de drainage peuvent être très efficaces. Pour de petites surfaces, la construction de murs de soutènement peut également protéger une construction. Ces mesures dites actives sont également valables pour les chutes de bloc. D'autres mesures de protections actives, tels que des filets ou des grillages plaqués sont spécifiques aux chutes de blocs. Dans les mesures passives, la présence de fosse, de merlons renforcés ou de filets, permettent de contenir les blocs à la fin de leur chute. Certaines de ces mesures de protection sont déjà prises en compte pour l'évaluation préliminaire du risque sismique des ouvrages d'art, comme la méthode du SÉTRA et sont fortement recommandées étant donné leur impact sur l'aléa relié aux mouvements gravitaires. Pour en finir avec les mesures de protections, la présence de végétation permet à la fois d'augmenter la cohésion pour diminuer l'aléa relié aux glissements de terrain, mais également de ralentir, voire d'arrêter certains blocs après leur détachement d'une falaise.

Bien que la méthode actuelle d'évaluation du risque sismique des ouvrages d'art du MTMDET prenne en compte un indice socio-économique afin d'estimer la valeur des éléments exposés, il serait intéressant de rajouter une composante concernant le temps de ralentissement que

causerait la perte partielle d'un ouvrage d'art sur un parcours routier, spécifiquement si ce dernier est proche d'une infrastructure sensible.

ANNEXE I

CLASSEMENT DES CATÉGORIES SISMQUES DES SOLS SELON LE CNBC

| Catégorie d'emplacement | Profil du sol ¹⁾ | Propriétés moyennes des 30 premiers mètres d'après la note A-4.1.8.4. 3) et Tableau 4.1.8.4.-A | | |
|-------------------------|--------------------------------|--|--|---|
| | | Vitesse moyenne des ondes de cisaillement, \bar{V}_{s30} (m/s) | Résistance moyenne à la pénétration standard, \bar{N}_{60} | Résistance du sol non drainé au cisaillement, s_u |
| A | Roche dure ²⁾ | $\bar{V}_{s30} > 1500$ | s/o | s/o |
| B | Roche ²⁾ | $760 < \bar{V}_{s30} \leq 1500$ | s/o | s/o |
| C | Sol très dense et roche tendre | $360 < \bar{V}_{s30} < 760$ | $\bar{N}_{60} > 50$ | $s_u > 100$ kPa |
| D | Sol consistant | $180 < \bar{V}_{s30} < 360$ | $15 \leq \bar{N}_{60} \leq 50$ | $50 \text{ kPa} < s_u \leq 100 \text{ kPa}$ |
| E | Sol meuble | $\bar{V}_{s30} < 180$ | $\bar{N}_{60} < 15$ | $s_u < 50$ kPa |
| | | Tout profil de plus de 3 m d'épaisseur et dont le sol a les caractéristiques suivantes : <ul style="list-style-type: none"> • indice de plasticité : $PI > 20$; • teneur en eau : $w \geq 40$ %; et • résistance du sol non drainé au cisaillement : $s_u < 25$ kPa. | | |
| 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 la note A-4.1.8.4. 3) et Tableau 4.1.8.4.-A).

²⁾ Lorsque la vitesse, \bar{V}_{s30} , a été mesurée sur place, il est permis de multiplier les valeurs de $\bar{V}(T)$ dérivées des tableaux 4.1.8.4.-B à 4.1.8.4.-G par le facteur $0,94 + (1500/\bar{V}_{s30})^2$.

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 détachement en raison de charges dues aux séismes;
- b) la tourbe et les argiles à forte teneur en matières organiques dont l'épaisseur dépasse 2 m;
- c) les argiles ayant une grande plasticité ($PI > 75$) dont l'épaisseur dépasse 6 m; et
- d) les argiles molles, de molles à moyennes, dont l'épaisseur dépasse 30 m.

Figure-A I-1 Classification des sols selon le CNBC
Tirée de (IRC-CNRC, 2015a)

ANNEXE II

MÉTHODE RAPIDE DE CLASSEMENT SISMIQUE DES PONTS ET VIADUCS DU QUÉBEC

L'indice de vulnérabilité sismique (IVS) est calculé de 0 à 100 où 100 est la situation sismique la plus précaire et 0 la plus favorable (Tinawi et al., 1993b).

$$IVS = (\alpha(CI_{GS}) + \beta(CI_{G\text{NON-S}})) * FF * RS \quad (\text{AII-1})$$

- les coefficients α et β sont des coefficients de pondération
- où FF est fonction du type de sol avec un indice de 1 pour un sol dense et compact; Et 2 pour un sol très mou à fort potentiel de liquéfaction tel que dans la méthode MTQ95 (Lemaire, 2013).
- où RS correspond au même zonage sismique effectué par le MTQ95 avec un indice variant de 0 à 5.
- CI_{GS} correspond à la somme des coefficients séismiques structuraux pondérés selon le tableau suivant :

Tableau-A II-1 Coefficients d'influence sismiques structuraux,
Adapté de Tinawi et al. (1993b)

| Description | Poids relatif |
|--|---------------|
| Type de construction | 25% |
| Complexité structurale | 25% |
| Nombre de discontinuité dans la superstructure (tablier) | 17.5% |
| Redondance des éléments de support verticaux | 15% |
| Conditions d'appui | 15% |
| Biais | 2.5% |

- $CI_{G\text{ NON-S}}$ correspond à la somme des coefficients séismiques non-structuraux pondérés selon le tableau suivant

Tableau-A II-2 Coefficient d'influence séismiques non-structuraux,
Adapté de Tinawi et al. (1993b)

| Description | Poids relatif |
|---|----------------------|
| Type de route supportée par le pont | 30% |
| Détour | 25% |
| Trafic journalier moyen circulant sur le pont | 20% |
| Type de route enjambée par le pont | 15% |
| Transport de service | 10% |

ANNEXE III

DÉFINITION DES FACTEURS ET COEFFICIENTS SISMQUES DE LA FORMULATION DU MTQ2013

Tableau-A III-1 Définition des facteurs et des coefficients sismiques de la formulation MTQ2013
Tiré de Lemaire (2013)

| 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"> • Type de pont (C_{Struct}); • De l'âge du pont (C_{Age}); • L'endommagement /l'état (C_{Endom}); | 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"> • Type d'appareil d'appui (C_{Appui}); • De la longueur d'appui ($C_{LongApp}$, comprend le biais); • Nombre de discontinuités (de joints) (C_{Joint}); • Nombre de poutres (C_{Poutre}); • Des particularités de conception (C_{Part}). | Entre 0 et 1,0 |
| $V_{Culée}$ | Vulnérabilité des culées | Calculé en fonction de : <ul style="list-style-type: none"> • Type de culée ($C_{TypeCulée}$); • Du sol (C_{Sol}); • Du type de fondation ($C_{Fondation}$). | Entre 0 et 1,0 |
| V_{Pile} | Vulnérabilité des piles | Calculé en fonction de : <ul style="list-style-type: none"> • Type de pile et redondance ($C_{TypePile}$); • Irrégularité verticale des piles (C_{Irreg}); • Du sol (C_{Sol}); • Du type de fondation ($C_{Fondation}$). | Entre 0 et 1,0 |

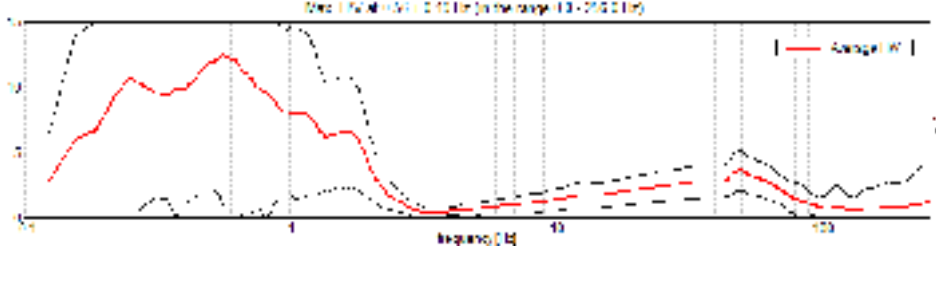
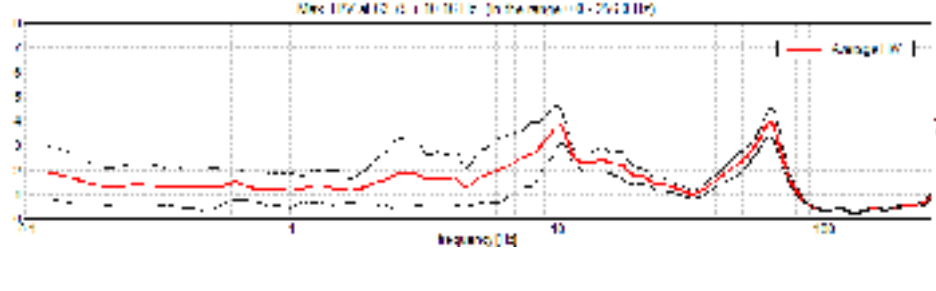
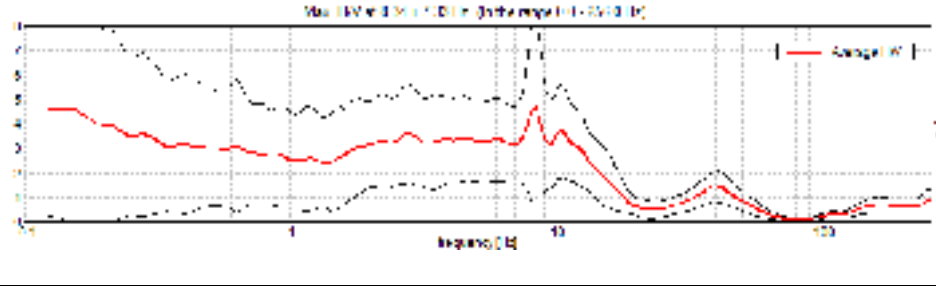
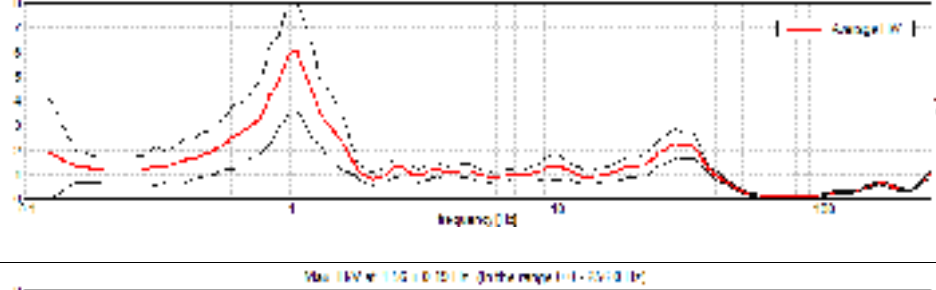
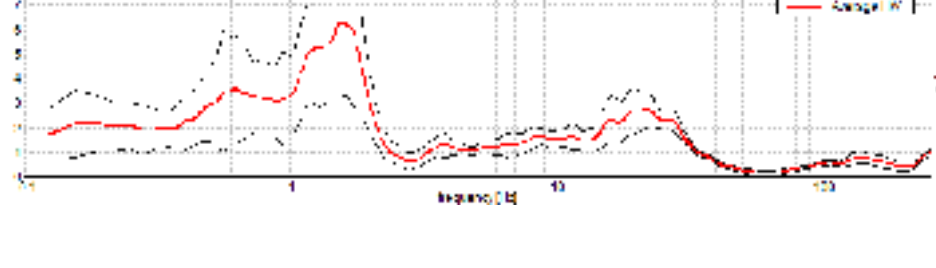
ANNEXE IV

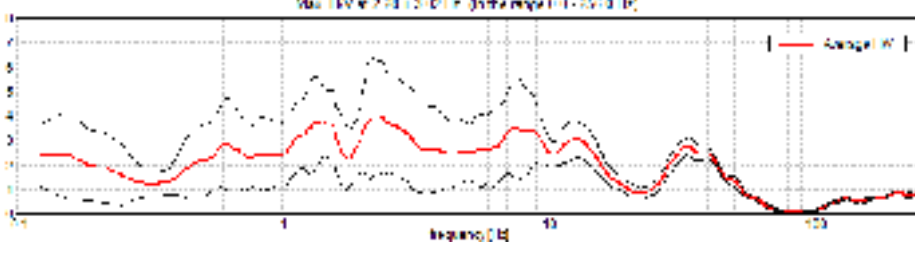
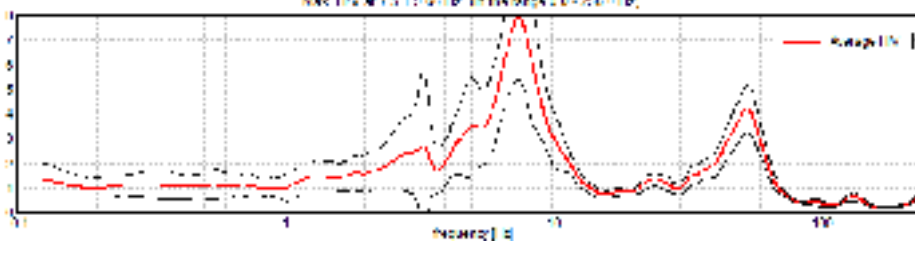
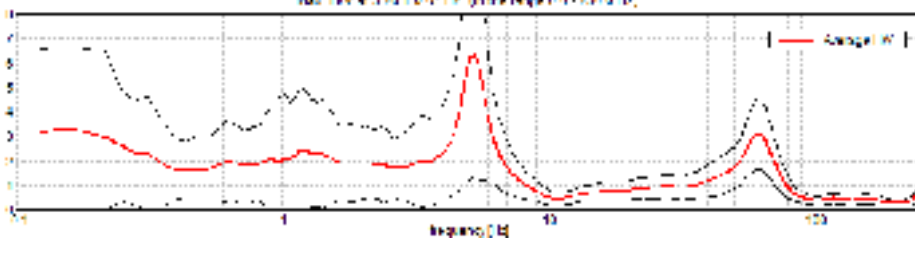
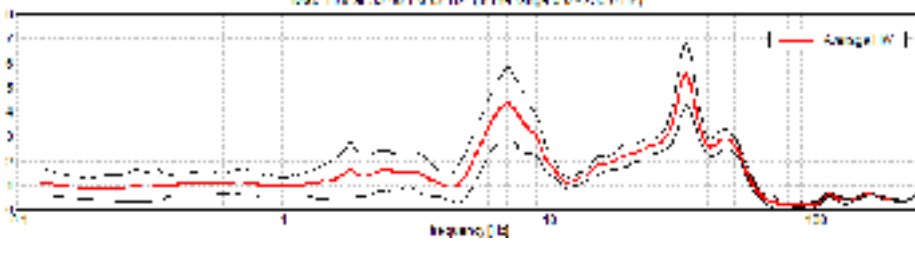
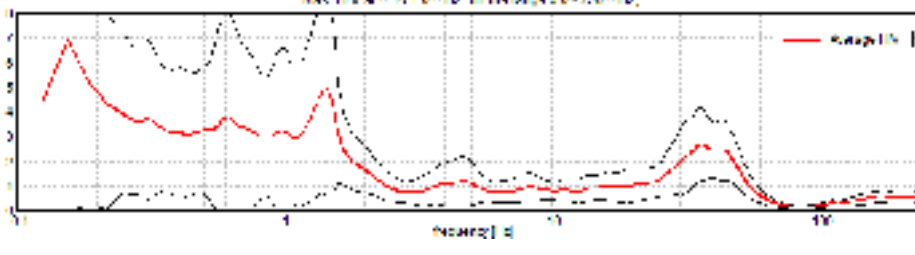
ÉCHELLE DES TEMPS GÉOLOGIQUES

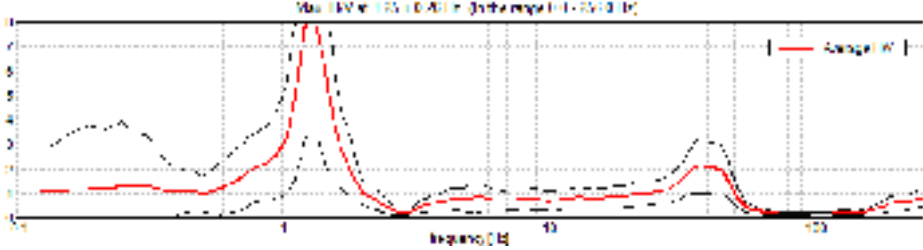
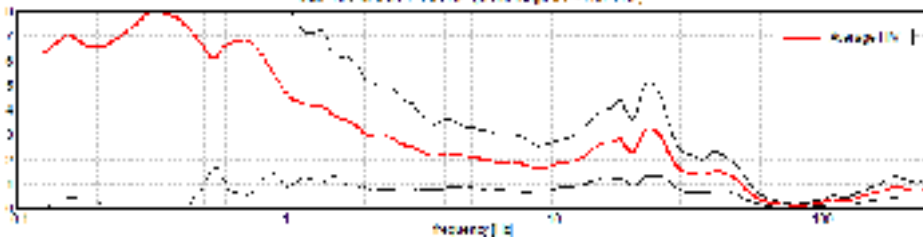
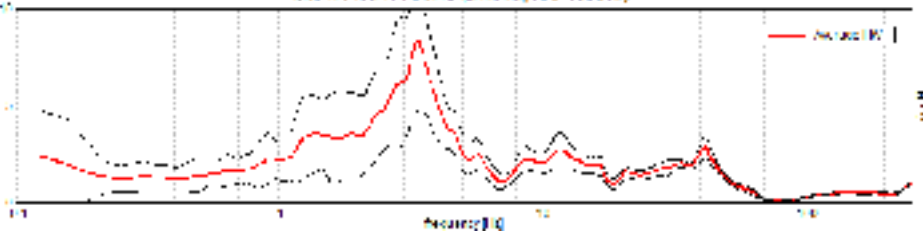
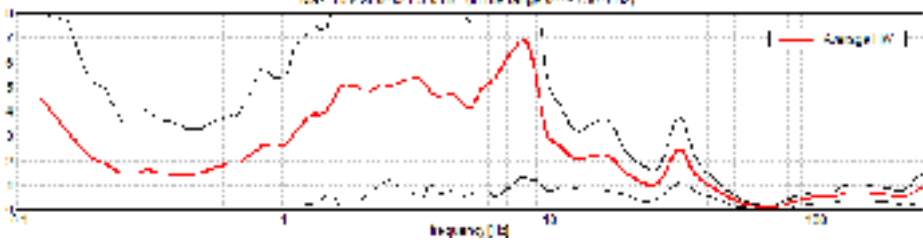
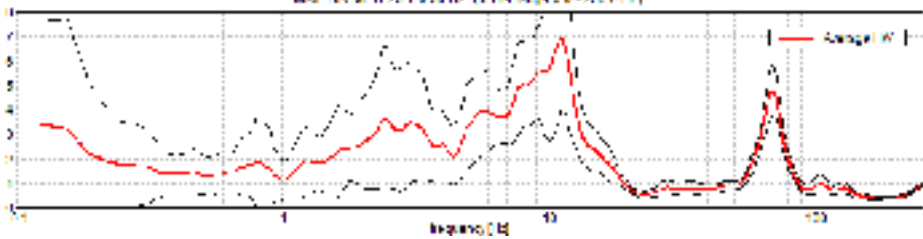
| | | | | | |
|-------------|---------------|-----------|-------------|---------|--------|
| CENOZOÏQUE | QUATERNAIRE | NEOGÈNE | HOLOCÈNE | 10 ka | |
| | | | PLEISTOCÈNE | 1,8 Ma | |
| | | | PLIOCÈNE | 5,3 Ma | |
| | TERTIAIRE | PALEOGÈNE | MIOCÈNE | 23,8 Ma | |
| | | | OLIGOCÈNE | 33,7 Ma | |
| | | | EOCÈNE | 54,8 Ma | |
| | | | PALEOCÈNE | 65 Ma | |
| | | | CRETACE | | 142 Ma |
| | | | JURASSIQUE | | 206 Ma |
| TRIAS | | 248 Ma | | | |
| PALÉOZOÏQUE | PERMIEN | | 292 Ma | | |
| | CARBONIFÈRE | | 354 Ma | | |
| | DEVONIEN | | 417 Ma | | |
| | SILURIEN | | 443 Ma | | |
| | ORDOVICIEN | | 495 Ma | | |
| | CAMBRIEN | | 545 Ma | | |
| | PROTÉROZOÏQUE | | 2,5 Ga | | |
| PRÉCAMBRIEN | ARCHEEN | | Vers 4,5 Ga | | |

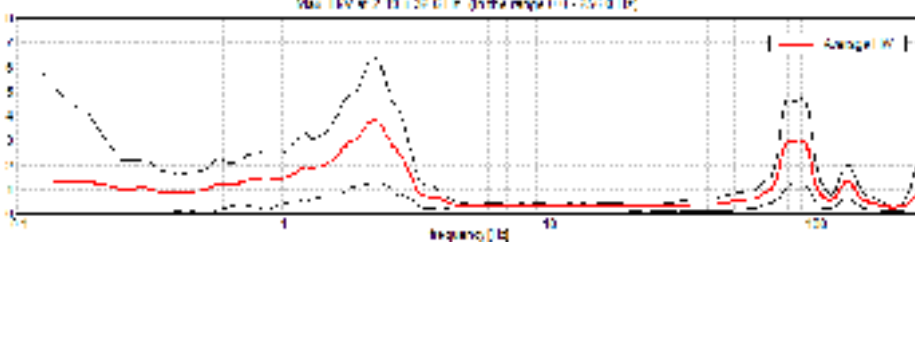
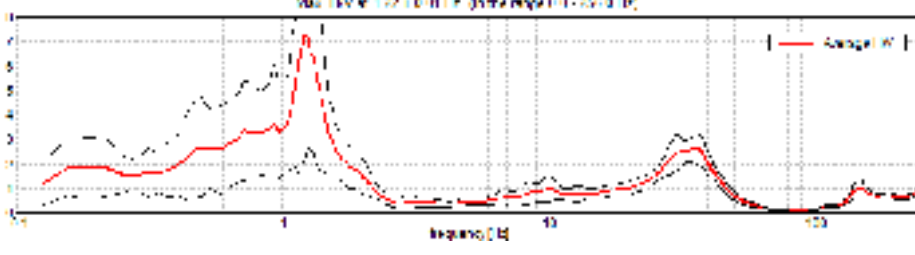
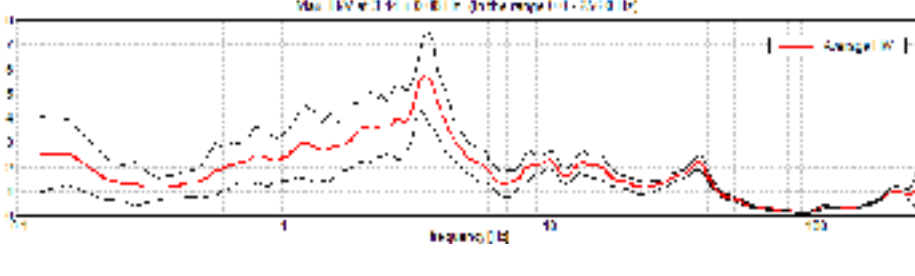
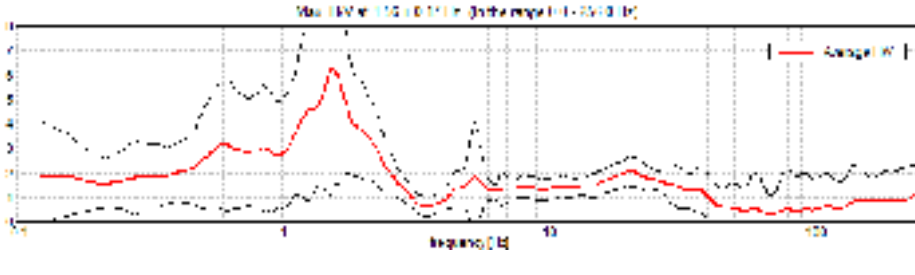
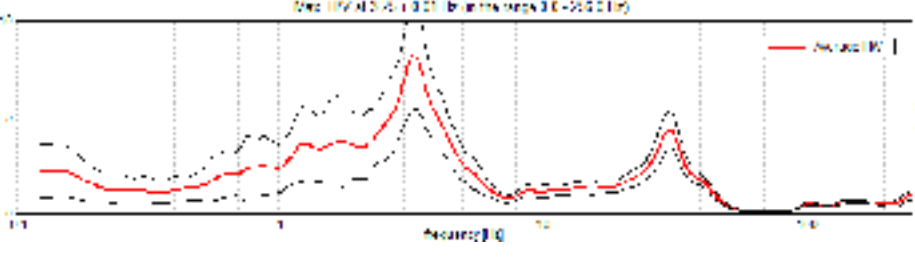
Figure A IV-1 Échelle des temps géologiques

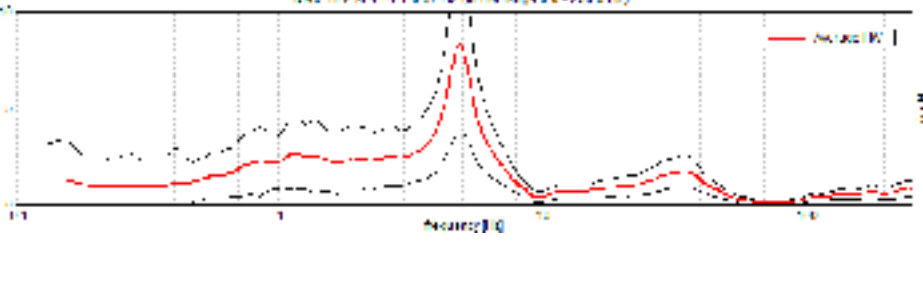
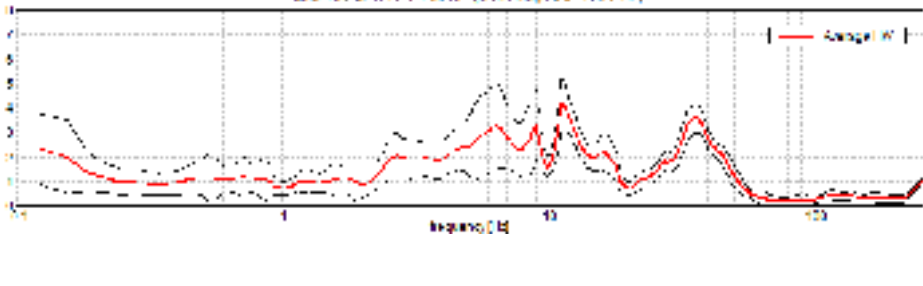
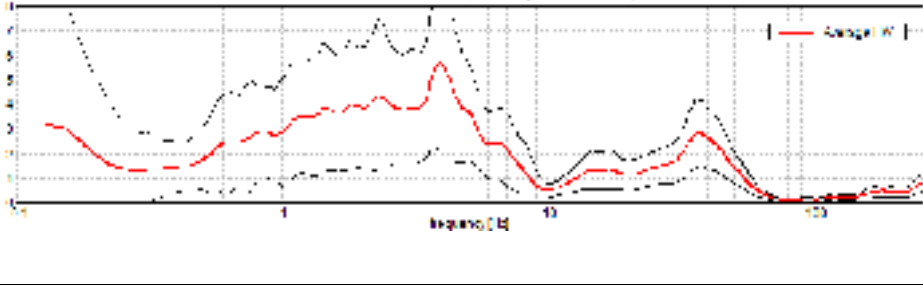
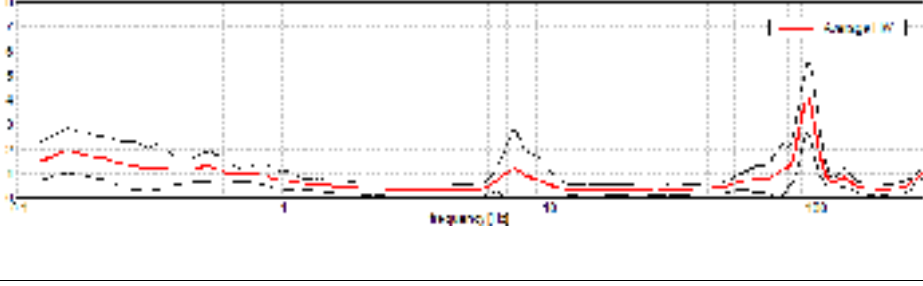
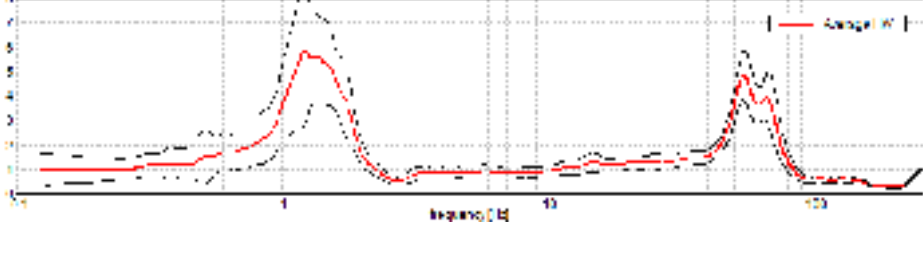
| Courbes de vibrations ambiantes | Caractéristiques du site |
|---------------------------------|---|
| | <p>Site 4 POINT X : -73.5627706365 POINT Y : 45.0720157198 f₀ : 18 Hz a₀ : 3.2</p> |
| | <p>Site 5 POINT X : -73.6629620727 POINT Y : 45.1084649730 f₀ : 22 Hz a₀ : 2</p> |
| | <p>Site 6 POINT X : -73.5090950361 POINT Y : 45.9886911309 f₀ : 25 Hz a₀ : 4</p> |
| | <p>Site 7 POINT X : -74.1577530927 POINT Y : 45.17477016590 f₀ : 15 Hz a₀ : 7.4</p> |
| | <p>Site 8 POINT X : -72.8080134735 POINT Y : 45.6435284468 Pas de résultat</p> |

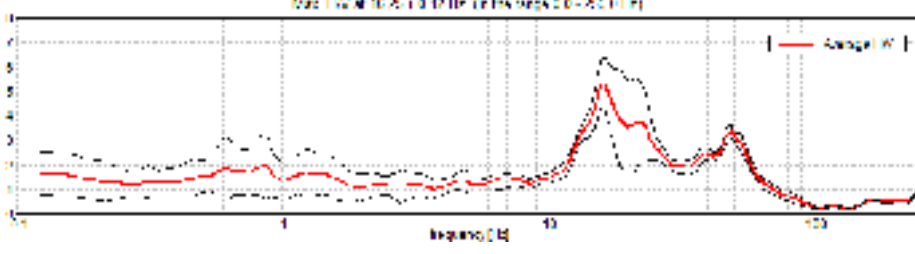
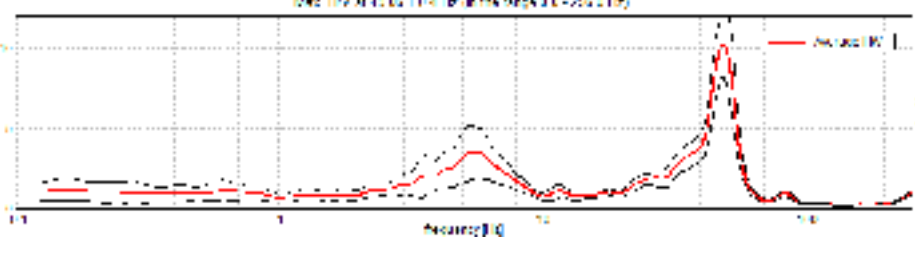
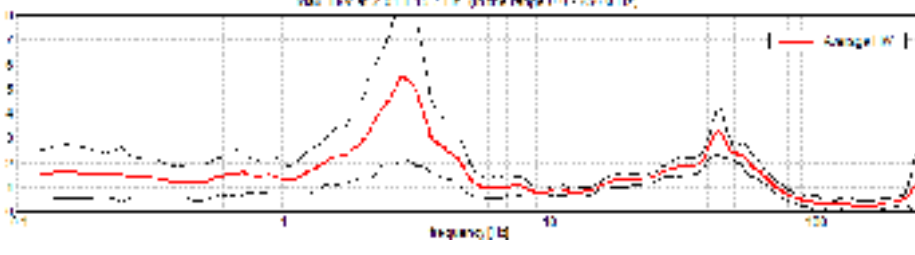
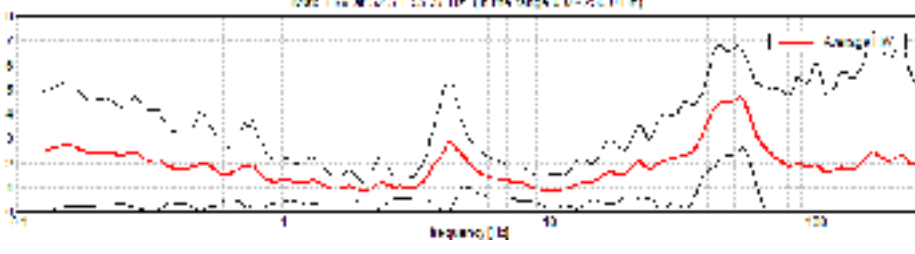
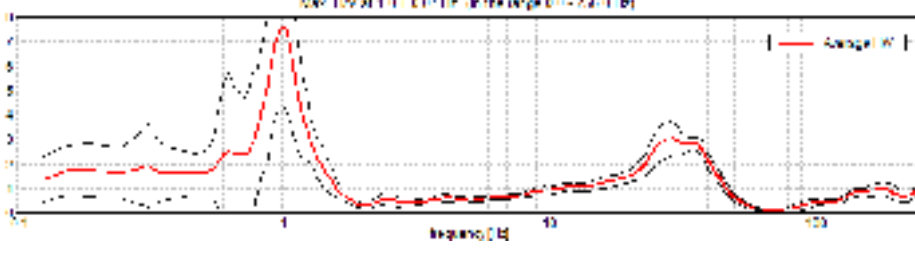
| Courbes de vibrations ambiantes | Caractéristiques du site |
|--|--|
|  | Site 9 POINT X : -73.6501071763 POINT Y : 45.8770928583 f_0 : 2Hz (non visible) |
|  | Site 10 POINT X : -73.8299711180 POINT Y : 45.6392115589 f_0 : 10 Hz a_0 : 4 |
|  | Site 11 POINT X : -72.7173337465 POINT Y : 45.6954298586 f_0 : 8.34 Hz a_0 : 4.7 |
|  | Site 12 POINT X : -72.3333821150 POINT Y : 46.4957221470 f_0 : 1.06 Hz a_0 : 6 |
|  | Site 13 POINT X : -73.4247911534 POINT Y : 45.9310411240 f_0 : 1.6 Hz a_0 : 6.3 |

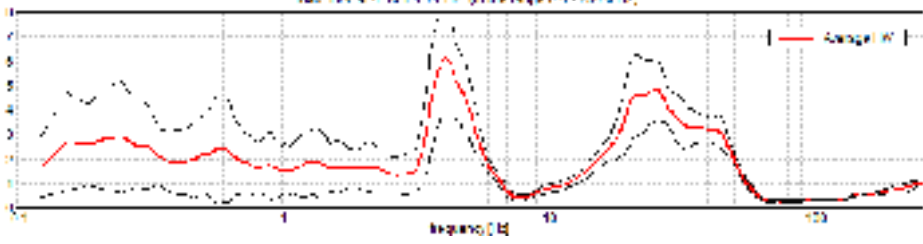
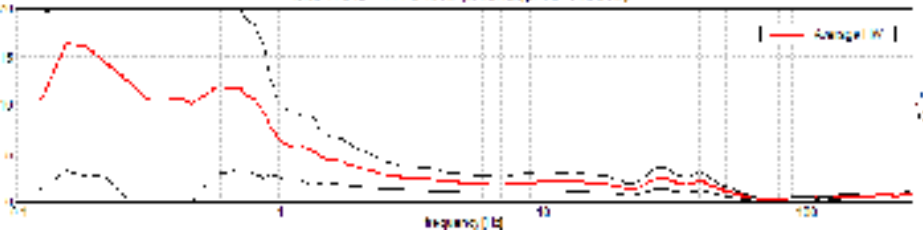
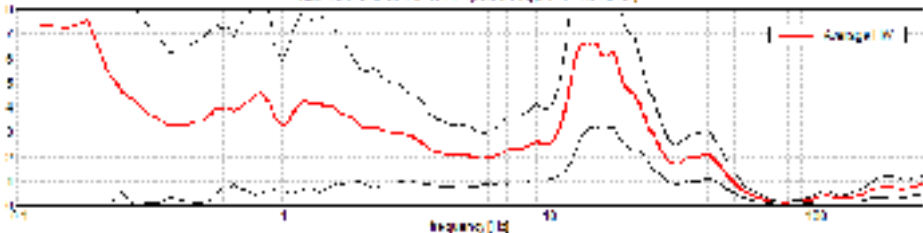
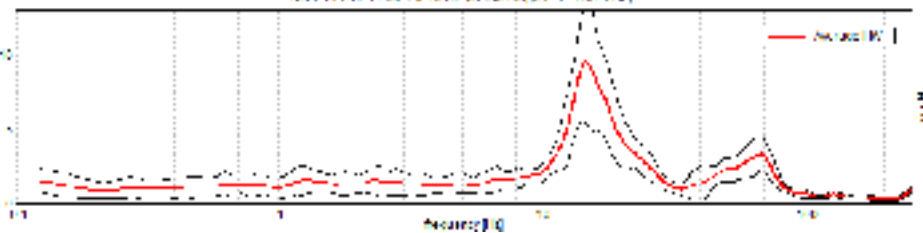
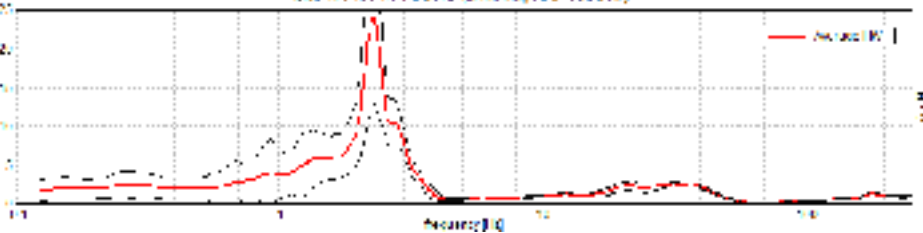
| Courbes de vibrations ambiantes | Caractéristiques du site |
|--|---|
|  | <p>Site 14</p> <p>POINT X : -73.5266116972</p> <p>POINT Y : 45.3773862246</p> <p>f₀ : 2.28 Hz</p> <p>a₀ : 4</p> |
|  | <p>Site 15</p> <p>POINT X : -74.0124198973</p> <p>POINT Y : 45.2136189281</p> <p>f₀ : 7.5 Hz</p> <p>a₀ : 7.9</p> |
|  | <p>Site 16</p> <p>POINT X : -73.7820430120</p> <p>POINT Y : 45.7246027704</p> <p>f₀ : 5.28Hz</p> <p>a₀ : 6.3</p> |
|  | <p>Site 17</p> <p>POINT X : -72.1762202316</p> <p>POINT Y : 45.9565539726</p> <p>f₀ : 7 Hz</p> <p>a₀ : 4.2</p> |
|  | <p>Site 18</p> <p>POINT X : -73.2484255715</p> <p>POINT Y : 45.6331799292</p> <p>f₀ : 1.45 Hz</p> <p>a₀ : 6.9</p> |

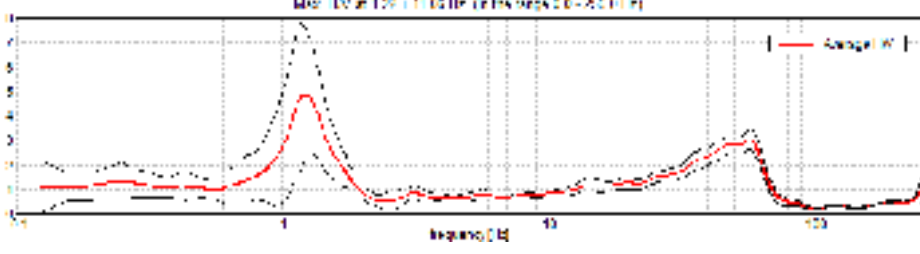
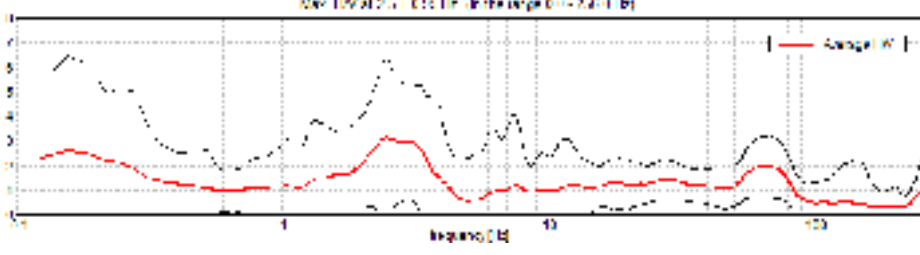
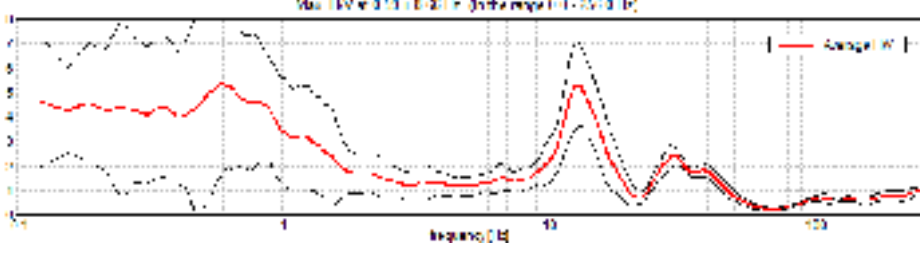
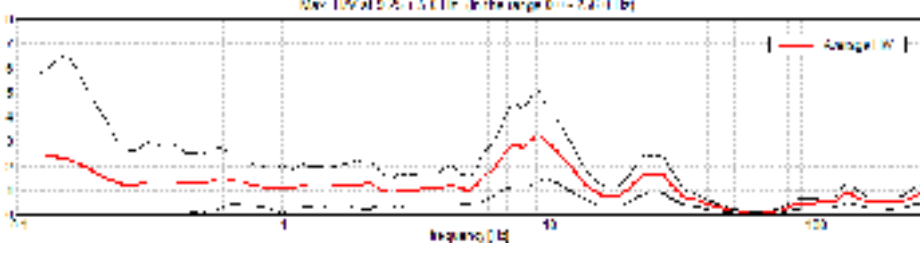
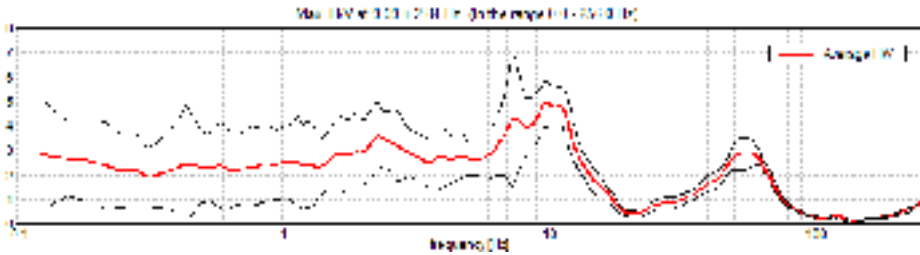
| Courbes de vibrations ambiantes | Caractéristiques du site |
|--|---|
|  | <p>Site 19</p> <p>POINT X : -73.0874288276</p> <p>POINT Y : 45.7756150598</p> <p>f_0 : 1.25 Hz</p> <p>a_0 : 8.4</p> |
|  | <p>Site 20</p> <p>POINT X : -73.8353438246</p> <p>POINT Y : 45.6378632154</p> <p>f_0 : 23 Hz</p> <p>a_0 : 3.2</p> |
|  | <p>Site 21</p> <p>POINT X : -72.6387136203</p> <p>POINT Y : 45.6977935620</p> <p>f_0 : 3.4 Hz</p> <p>a_0 : 7.6</p> |
|  | <p>Site 22</p> <p>POINT X : -71.8371365388</p> <p>POINT Y : 46.2770498394</p> <p>f_0 : 8.09 Hz</p> <p>a_0 : 7</p> |
|  | <p>Site 23</p> <p>POINT X : -74.1593201436</p> <p>POINT Y : 45.1715591653</p> <p>f_0 : 11.25 Hz</p> <p>a_0 : 7</p> |

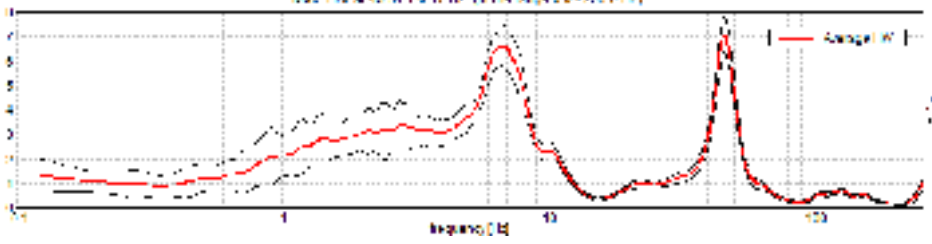
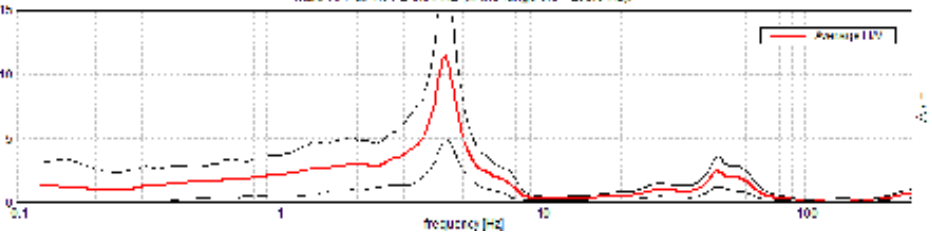
| Courbes de vibrations ambiantes | Caractéristiques du site |
|--|--|
|  | <p>Site 24</p> <p>POINT X : -72.8278776476</p> <p>POINT Y : 45.8847023878</p> <p>f₀ : 2.19 Hz</p> <p>a₀ : 3.9</p> |
|  | <p>Site 25</p> <p>POINT X : -73.3401892404</p> <p>POINT Y : 46.1374541122</p> <p>f₀ : 1.22 Hz</p> <p>a₀ : 7.2</p> |
|  | <p>Site 26</p> <p>POINT X : -72.3901332213</p> <p>POINT Y : 46.1971222566</p> <p>f₀ : 3.44 Hz</p> <p>a₀ : 5.76</p> |
|  | <p>Site 27</p> <p>POINT X : -73.6011948251</p> <p>POINT Y : 46.0933329450</p> <p>f₀ : 1.56 Hz</p> <p>a₀ : 6.3</p> |
|  | <p>Site 28</p> <p>POINT X : -72.6622970473</p> <p>POINT Y : 45.9606889565</p> <p>f₀ : 3.25 Hz</p> <p>a₀ : 8.23</p> |

| Courbes de vibrations ambiantes | Caractéristiques du site |
|--|--|
|  | Site 29 POINT X : -73.3279133946 POINT Y : 45.5758932164 f_0 : 4.9 Hz a_0 : 8.3 |
|  | Site 30 POINT X : -73.5934887001 POINT Y : 45.1146658763 f_0 : 11.2 Hz a_0 : 4.2 |
|  | Site 31 POINT X : -72.5572080510 POINT Y : 45.8187602858 f_0 : 3.95 Hz a_0 : 5.7 |
|  | Site 32 POINT X : -73.4456636527 POINT Y : 45.1450779869 f_0 : 7.8 Hz a_0 : 1.2 |
|  | Site 33 POINT X : -74.0917684862 POINT Y : 45.3757684035 f_0 : 1.22 Hz a_0 : 5.8 |

| Courbes de vibrations ambiantes | Caractéristiques du site |
|--|---|
|  <p>Site 34 (f₀ = 16.25 Hz) (in the range 0.1 - 100 Hz)</p> | <p>Site 34 POINT X : -73.8626484922 POINT Y : 45.5813734208 f₀ : 16.25 Hz a₀ : 5.36</p> |
|  <p>Site 35 (f₀ = 5.6 Hz) (in the range 0.1 - 100 Hz)</p> | <p>Site 35 POINT X : -74.1609924319 POINT Y : 45.0070132849 f₀ : 5.6 Hz a₀ : 3.5</p> |
|  <p>Site 36 (f₀ = 2.8 Hz) (in the range 0.1 - 100 Hz)</p> | <p>Site 36 POINT X : -72.3877727764 POINT Y : 46.2790682706 f₀ : 2.8 Hz a₀ : 5.5</p> |
|  <p>Site 37 (f₀ = 4.1 Hz) (in the range 0.1 - 100 Hz)</p> | <p>Site 37 POINT X : -74.1850244120 POINT Y : 45.3063853381 f₀ : 4.1 Hz a₀ : 3</p> |
|  <p>Site 38 (f₀ = 1 Hz) (in the range 0.1 - 100 Hz)</p> | <p>Site 38 POINT X : -72.9767879214 POINT Y : 45.5183055697 f₀ : 1 Hz a₀ : 7.6</p> |

| Courbes de vibrations ambiantes | Caractéristiques du site |
|--|---|
|  | Site 39 POINT X : -73.7393898443 POINT Y : 45.7329569285 f_0 : 4.16 Hz a_0 : 6.14 |
|  | Site 40 POINT X : -73.5519296946 POINT Y : 45.9103731655 f_0 : 3.8 Hz a_0 : (non visible) |
|  | Site 41 POINT X : -73.5401086922 POINT Y : 45.9277125694 f_0 : 15 Hz a_0 : 6.6 |
|  | Site 42 POINT X : -74.1336461730 POINT Y : 45.6824365571 f_0 : 14.7 Hz a_0 : 9.5 |
|  | Site 43 POINT X : -73.3717184602 POINT Y : 45.5691562293 f_0 : 2.31 Hz a_0 : 24 |

| Courbes de vibrations ambiantes | Caractéristiques du site |
|--|---|
|  | <p>Site 44 POINT X : -72.8223882092 POINT Y : 46.0648869687 f₀ : 1.22 Hz a₀ : 4.9</p> |
|  | <p>Site 45 POINT X : -74.3196260429 POINT Y : 45.1141385993 f₀ : 2.5 Hz a₀ : 3.14</p> |
|  | <p>Site 46 POINT X : -74.0354397827 POINT Y : 45.6809657862 f₀ : 13 Hz a₀ : 5.2</p> |
|  | <p>Site 47 POINT X : -73.2550172383 POINT Y : 45.2819529285 f₀ : 9.25 Hz a₀ : 3.2</p> |
|  | <p>Site 48 POINT X : -73.6904843419 POINT Y : 45.9145212614 f₀ : 9.7 Hz a₀ : 4.9</p> |

| Courbes de vibrations ambiantes | Caractéristiques du site |
|---|---|
|  <p>Max 1.52 m/s² at 0.12 Hz on the range 0.0 - 200 Hz</p> | <p>Site 49</p> <p>POINT X : -72.8431302925</p> <p>POINT Y : 45.7417413624</p> <p>f₀ : 7 Hz</p> <p>a₀ : 6.8</p> |
|  <p>Max 1.0V at 4.31 s 0.04 Hz on the range 0.0 - 200.0 Hz</p> | <p>Site 50</p> <p>POINT X : -73.2648243065</p> <p>POINT Y : 45.3483299289</p> <p>f₀ : 4.3 Hz</p> <p>a₀ : 11.4</p> |

ANNEXE VI

RÉSULTATS DES CALCULS POUR LA CAMPAGNE DE MESURE

Tableau-A VI-1 Résultats détaillés de la campagne de mesure

| ID | POINT_X | POINT_Y | Dépôts de surface | Épaisseur des dépôts meubles [m] | Âge de formation du socle | Vitesses du socle [m/s] | Fréquence du sol [Hz] | Vs moy. | | Classification sismique | |
|----|----------------|---------------|-------------------|----------------------------------|---------------------------|-------------------------|-----------------------|---------|-----|-------------------------|----|
| | | | | | | | | Vs30 | Vs | Vs30 | Vs |
| 1 | -74.0438514298 | 45.7369580108 | Alluviaux | 3 | Paléozoïque | 1500 | 1.9 | 201 | | | D |
| 2 | -73.5976320665 | 45.3232601126 | Tills | 15 | Paléozoïque | 1500 | 5.8 | 565 | | | C |
| 3 | -71.9855794172 | 46.6625193497 | Lacustres | 5 | Paléozoïque | 1500 | 30 | 1562 | | | A |
| 4 | -73.5627706365 | 45.0720157198 | Tills | 7 | Paléozoïque | 1500 | 18 | 1027 | 504 | B | C |
| 5 | -73.6629620727 | 45.1084649730 | Organique | 12 | Paléozoïque | 1500 | 22 | 1284 | | | B |
| 6 | -73.5090950361 | 45.9886911309 | Marins | 7 | Paléozoïque | 1500 | 25 | 1184 | 700 | B | C |
| 7 | -74.1577530927 | 45.1747701659 | Lacustres | 6 | Paléozoïque | 1500 | 15 | 918 | 360 | B | C |
| 8 | -72.8080134735 | 45.6435284468 | Tills | 3 | Paléozoïque | 1500 | - | - | | | - |
| 9 | -73.6501071763 | 45.8770928583 | Marins | 23 | Paléozoïque | 1500 | 2 | 209 | | | D |
| 10 | -73.8299711180 | 45.6392115589 | Marins | 4 | Paléozoïque | 1500 | 10 | 709 | | | C |
| 11 | -72.7173337465 | 45.6954298586 | Organique | 11 | Paléozoïque | 1500 | 8.34 | 704 | | | C |
| 12 | -72.3333821150 | 46.4957221470 | Lacustres | 48 | Paléozoïque | 1500 | 1.06 | 204 | | | D |
| 13 | -73.4247911534 | 45.9310411240 | Alluviaux | 40 | Paléozoïque | 1500 | 1.6 | 256 | | | D |
| 14 | -73.5266116972 | 45.3773862246 | Alluviaux | 5 | Paléozoïque | 1500 | 2.28 | 238 | | | D |
| 15 | -74.0124198973 | 45.2136189281 | Lacustres | 18 | Paléozoïque | 1500 | 7.5 | 726 | | | C |
| 16 | -73.7820430120 | 45.7246027704 | Marins | 17 | Paléozoïque | 1500 | 5.28 | 536 | | | C |
| 17 | -72.1762202316 | 45.9565539726 | Eoliens | 18 | Paléozoïque | 1500 | 7 | 686 | | | C |
| 18 | -73.2484255715 | 45.6331799292 | Tills | 25 | Paléozoïque | 1500 | 1.45 | 171 | | | E |
| 19 | -73.0874288276 | 45.7756150598 | Lacustres | 25 | Paléozoïque | 1500 | 1.25 | 148 | | | E |
| 20 | -73.8353438246 | 45.6378632154 | Tills | 3 | Paléozoïque | 1500 | 23 | 1039 | | | B |

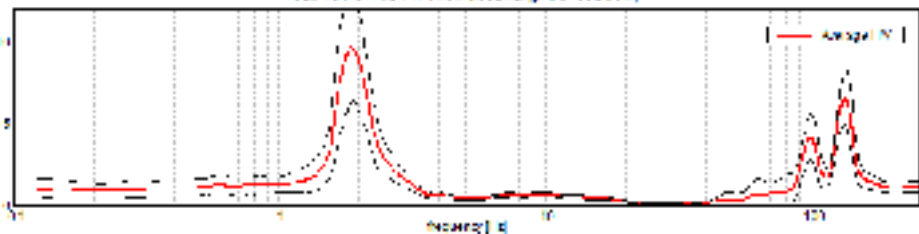
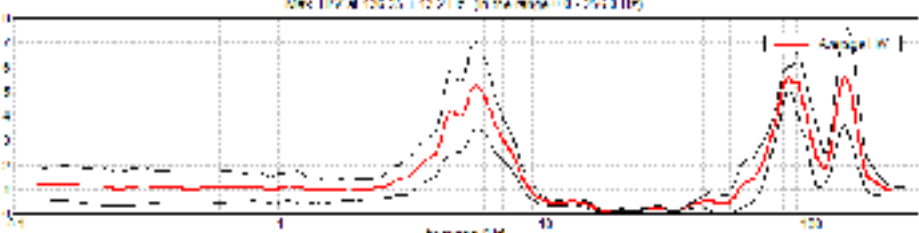
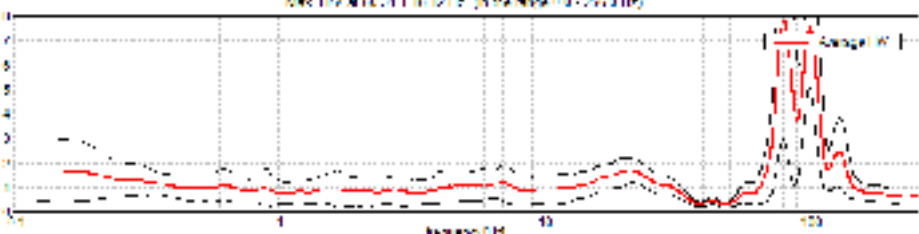
| ID | POINT_X | POINT_Y | Dépôts de surface | Épaisseur des dépôts meubles [m] | Vitesses du socle [m/s] | Fréquence du sol [Hz] | Vs moy. | | Classification sismique | |
|----|----------------|---------------|-------------------|----------------------------------|-------------------------|-----------------------|---------|-------|-------------------------|------|
| | | | | | | | Vs30 | Vs | Vs | Vs30 |
| 21 | -72.6387136203 | 45.6977935620 | Marins | 17 | 1500 | 3.4 | 365 | | C | |
| 22 | -71.8371365388 | 46.2770498394 | Eoliens | 8 | 1500 | 8.09 | 658 | | C | |
| 23 | -74.1593201436 | 45.1715591653 | Lacustres | 9 | 1500 | 11.25 | 828 | 405 | B C | |
| 24 | -72.8278776476 | 45.8847023878 | Marins | 25 | 1500 | 2.19 | 255 | | D | |
| 25 | -73.3401892404 | 46.1374541122 | Marins | 17 | 2500 | 1.22 | 140 | | E | |
| 26 | -72.3901332213 | 46.1971222566 | Tills | 27 | 1500 | 3.44 | 402 | | C | |
| 27 | -73.6011948251 | 46.0933329450 | Marins | 25 | 1500 | 1.56 | 185 | | D | |
| 28 | -72.6622970473 | 45.9606889565 | Lacustres | 22 | 1500 | 3.25 | 365 | | C | |
| 29 | -73.3279133946 | 45.5758932164 | Tills | 15 | 1500 | 4.9 | 492 | | C | |
| 30 | -73.5934887001 | 45.1146658763 | Tills | 14 | 1500 | 11.2 | 909 | | B | |
| 31 | -72.5572080510 | 45.8187602858 | Alluviaux | 28 | 1500 | 3.95 | 464 | | C | |
| 32 | -73.4456636527 | 45.1450779869 | Organiques | 25 | 1500 | 7.8 | 848 | | B | |
| 33 | -74.0917684862 | 45.3757684035 | Lacustres | 39 | 1500 | 1.22 | 190 | | D | |
| 34 | -73.8626484922 | 45.5813734208 | Marins | 4 | 1500 | 16.25 | 917 | | B | |
| 35 | -74.1609924319 | 45.0070132849 | Alluviaux | 39 | 1500 | 5.6 | 874 | | B | |
| 36 | -72.3877727764 | 46.2790682706 | Lacustres | 21 | 1500 | 2.8 | 315 | | D | |
| 37 | -74.1850244120 | 45.3063853381 | Lacustres | 16 | 1500 | 4.1 | 427 | | C | |
| 38 | -72.9767879214 | 45.5183055697 | Alluviaux | 25 | 1500 | 1 | 118 | | E | |
| 39 | -73.7393898443 | 45.7329569285 | Marins | 15 | 1500 | 4.16 | 428 | | C | |
| 40 | -73.5519296946 | 45.9103731655 | Marins | 8 | 1500 | 3.8 | 373 | | C | |
| 41 | -73.5401086922 | 45.9277125694 | Marins | 7 | 1500 | 15 | 938 | 420 | B C | |
| 42 | -74.1336461730 | 45.6824365571 | Tills | 7 | 1500 | 14.7 | 928 | 411.6 | B C | |
| 43 | -73.3717184602 | 45.5691562293 | Organiques | 21 | 1500 | 2.31 | 263 | | D | |
| 44 | -72.8223882092 | 46.0648869687 | Lacustres | 37 | 1500 | 1.22 | 181 | | D | |
| 45 | -74.3196260429 | 45.1141385993 | Lacustres | 15 | 1500 | 2.5 | 273 | | D | |
| 46 | -74.0354397827 | 45.6809657862 | Tills | 7 | 1500 | 13 | 868 | 364 | B C | |

| ID | POINT_X | POINT_Y | Dépôts de surface | Épaisseur des dépôts meubles [m] | Âge de formation du socle | Vitesses du socle [m/s] | Fréquence du sol [Hz] | Vs30 ou Vs(0) | Classification sismique |
|----|----------------|---------------|-------------------|----------------------------------|---------------------------|-------------------------|-----------------------|---------------|-------------------------|
| 47 | -73.2550172383 | 45.2819529285 | Alluviau | 12 | Paléozoïque | 1500 | 9.25 | 769 | B |
| 48 | -73.6904843419 | 45.9145212614 | Marins | 7 | Paléozoïque | 1500 | 9.7 | 730 | C |
| 49 | -72.8431302925 | 45.7417413624 | Marins | 3 | Paléozoïque | 1500 | 7 | 559 | C |
| 50 | -73.2648243065 | 45.3483299289 | Alluviau | 14 | Paléozoïque | 1500 | 4.3 | 436 | C |

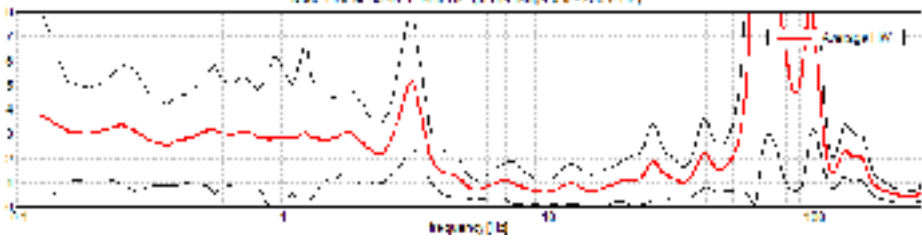
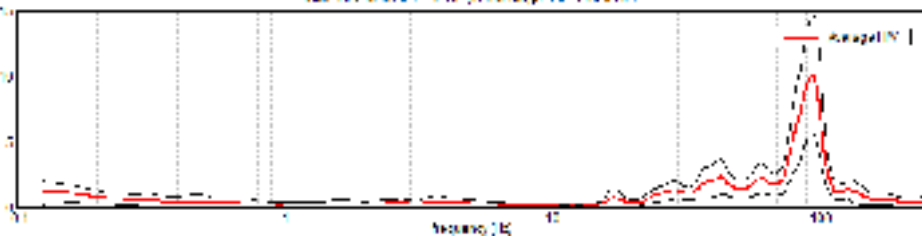
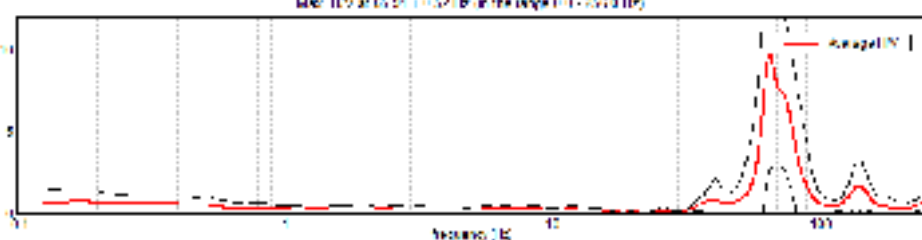
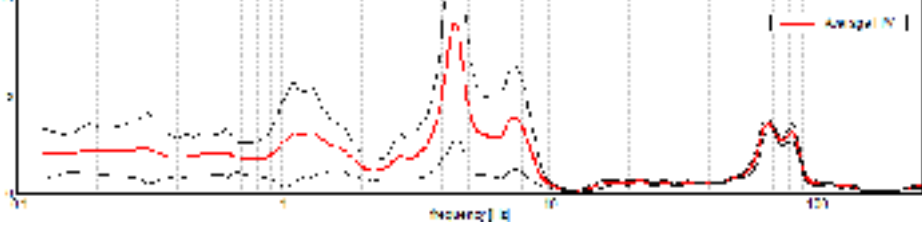
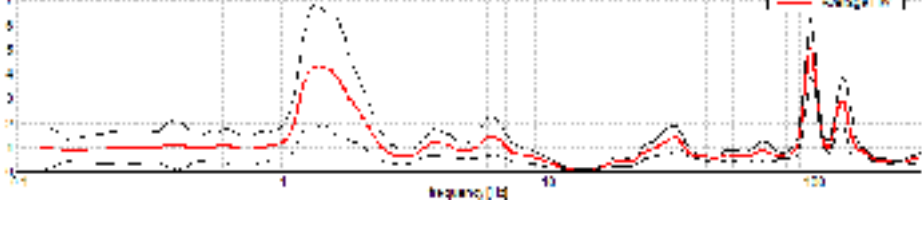
ANNEXE VII

CAMPAGNE DE MESURE : RÉSULTATS DES COURBES H/V RÉALISÉES SUR LES PONTS

Tableau-A VII-1 Résultats : Détails des courbes et des fréquences de résonances identifiées pour les mesures de vibrations ambiantes sur les ponts

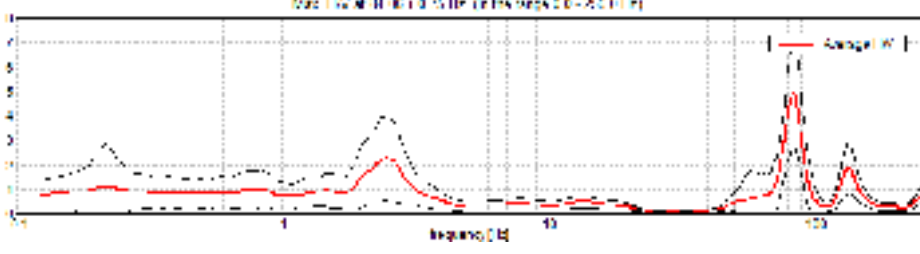
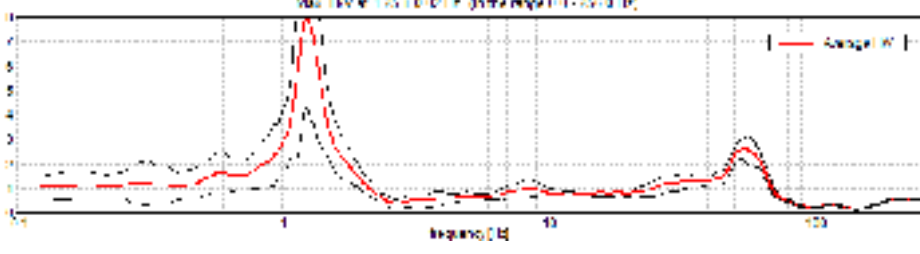
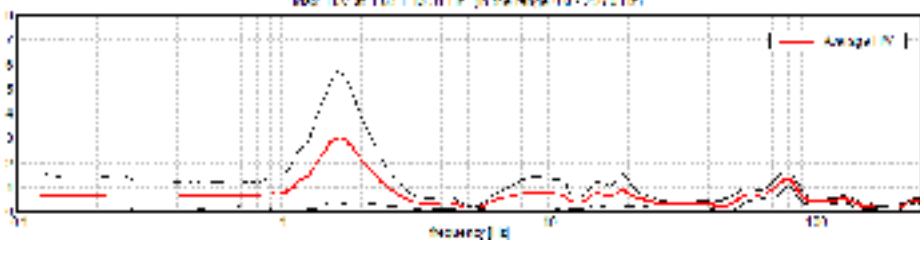
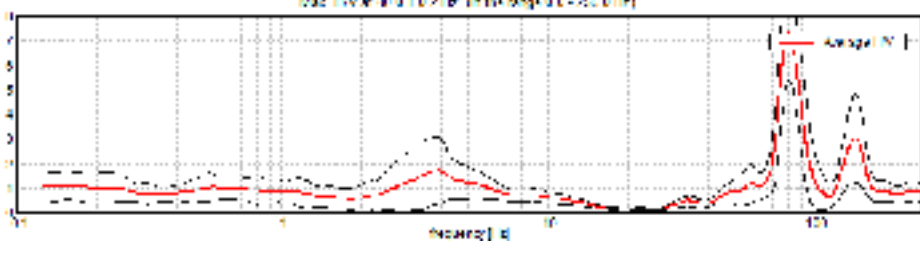
| Courbes de vibrations ambiantes | Caractéristiques du site |
|--|---|
|  | <p>Site 1</p> <p>POINT X : -74.0438514298</p> <p>POINT Y : 45.7369580108</p> <p>f₀ : 1.9 Hz</p> <p>a₀ : 9.7</p> |
|  | <p>Site 2</p> <p>POINT X : -73.5976320665</p> <p>POINT Y : 45.3232601126</p> <p>f₀ : 5.5 Hz</p> <p>a₀ : 5.1</p> |
|  | <p>Site 3</p> <p>POINT X : -71.9855794172</p> <p>POINT Y : 46.6625193497</p> <p>f₀ : 80 Hz</p> <p>a₀ : 7.9</p> |

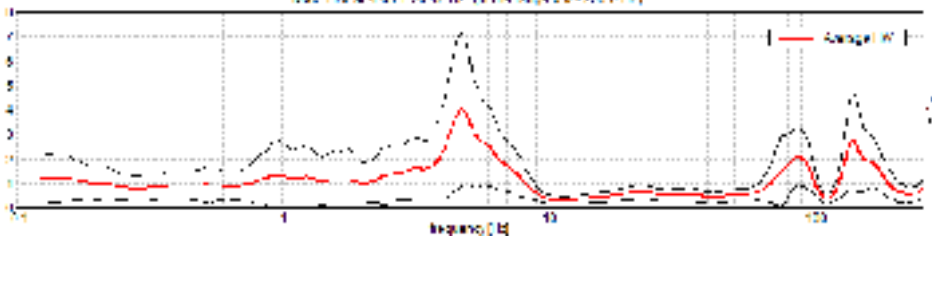
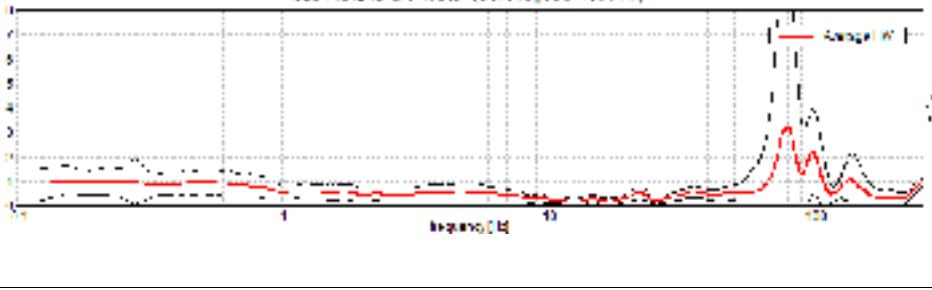
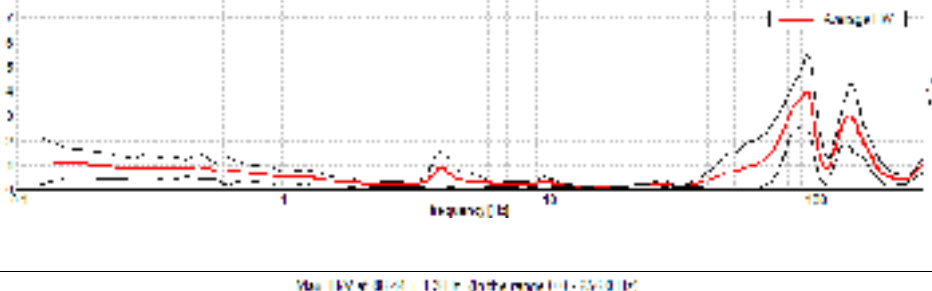
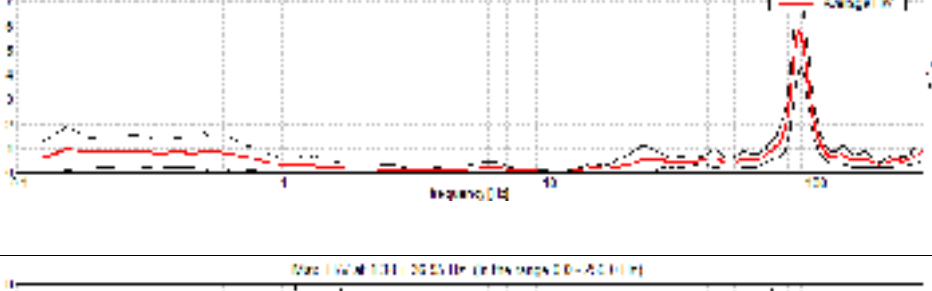
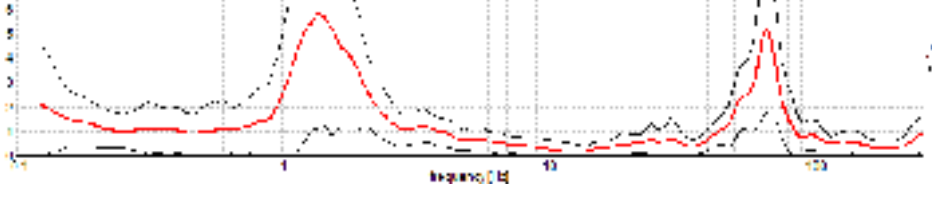
| Courbes de vibrations ambiantes | Caractéristiques du site |
|---------------------------------|---|
| | <p>Site 4</p> <p>POINT X : -73.5627706365</p> <p>POINT Y : 45.0720157198</p> <p>f₀ : 74.4Hz</p> <p>a₀ : 4.7</p> |
| | <p>Site 5</p> <p>POINT X : -73.6629620727</p> <p>POINT Y : 45.1084649730</p> <p>f₀ : 83Hz</p> <p>a₀ : 8.7</p> |
| | <p>Site 6</p> <p>POINT X : -73.5090950361</p> <p>POINT Y : 45.9886911309</p> <p>f₀ : 26Hz</p> <p>a₀ : 1.9</p> |
| | <p>Site 7</p> <p>POINT X : -74.1577530927</p> <p>POINT Y : 45.17477016590</p> <p>f₀ : 7.4 Hz</p> <p>a₀ : 11</p> |
| | <p>Site 8</p> <p>POINT X : -72.8080134735</p> <p>POINT Y : 45.6435284468</p> <p>f₀ : 10Hz</p> <p>a₀ : 2.1</p> |

| Courbes de vibrations ambiantes | Caractéristiques du site |
|--|--|
|  | <p>Site 9</p> <p>POINT X : -73.6501071763</p> <p>POINT Y : 45.8770928583</p> <p>f₀ : 3Hz</p> <p>a₀ : 5</p> |
|  | <p>Site 10</p> <p>POINT X : -73.8299711180</p> <p>POINT Y : 45.6392115589</p> <p>f₀ : 95 Hz</p> <p>a₀ : 10.2</p> |
|  | <p>Site 11</p> <p>POINT X : -72.7173337465</p> <p>POINT Y : 45.6954298586</p> <p>f₀ : 66Hz</p> <p>a₀ : 9.7</p> |
|  | <p>Site 12</p> <p>POINT X : -72.3333821150</p> <p>POINT Y : 46.4957221470</p> <p>f₀ : 4.5 Hz</p> <p>a₀ : 8.7</p> |
|  | <p>Site 13</p> <p>POINT X : -73.4247911534</p> <p>POINT Y : 45.9310411240</p> <p>f₀ : 1.6Hz</p> <p>a₀ : 4.2</p> |

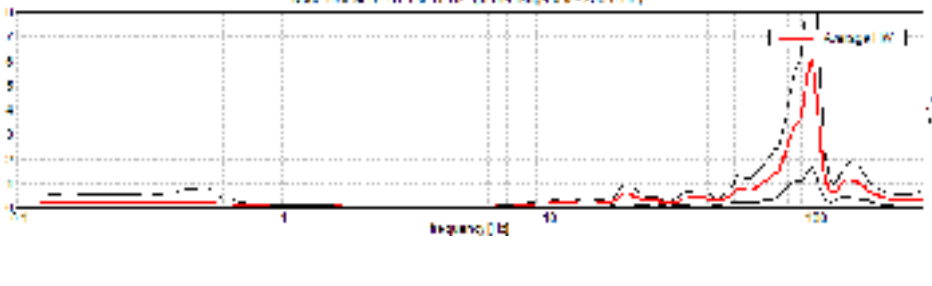
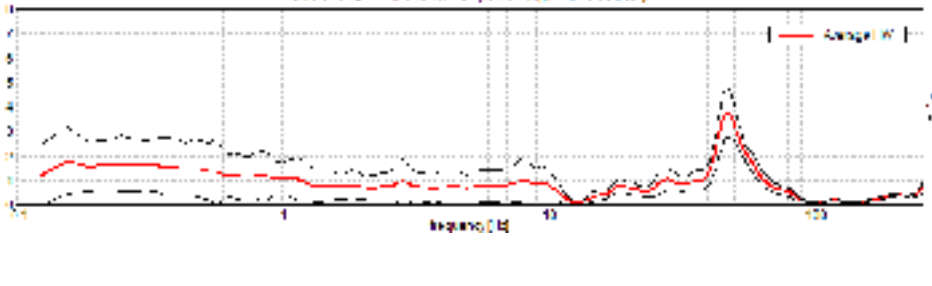
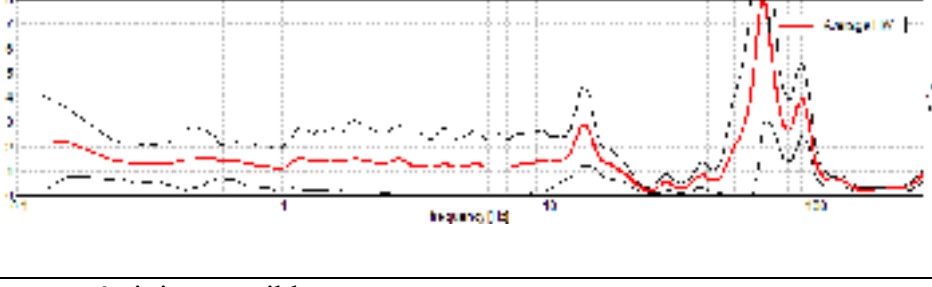
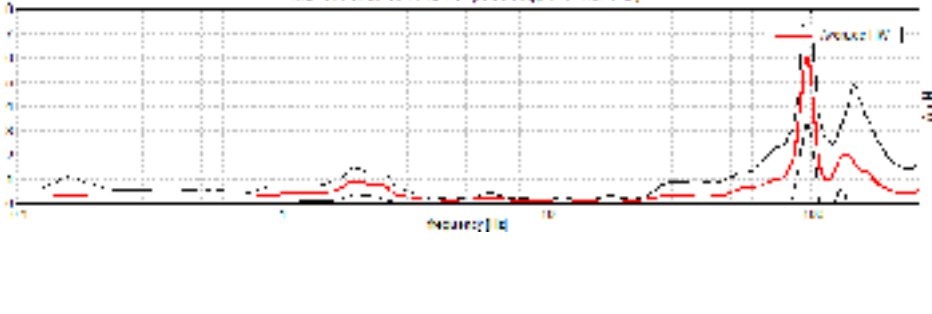
| Courbes de vibrations ambiantes | Caractéristiques du site |
|---------------------------------|---|
| | <p>Site 14</p> <p>POINT X : -73.5266116972</p> <p>POINT Y : 45.3773862246</p> <p>f₀ : 97Hz</p> <p>a₀ : 10.5</p> |
| | <p>Site 15</p> <p>POINT X : -74.0124198973</p> <p>POINT Y : 45.2136189281</p> <p>f₀ : 100Hz</p> <p>a₀ : 3</p> |
| | <p>Site 16</p> <p>POINT X : -73.7820430120</p> <p>POINT Y : 45.7246027704</p> <p>f₀ : 76Hz</p> <p>a₀ : 2</p> |
| | <p>Site 17</p> <p>POINT X : -72.1762202316</p> <p>POINT Y : 45.9565539726</p> <p>f₀ : 7Hz</p> <p>a₀ : 2</p> |
| | <p>Site 18</p> <p>POINT X : -73.2484255715</p> <p>POINT Y : 45.6331799292</p> <p>f₀ : 1.4Hz</p> <p>a₀ : 6.5</p> |

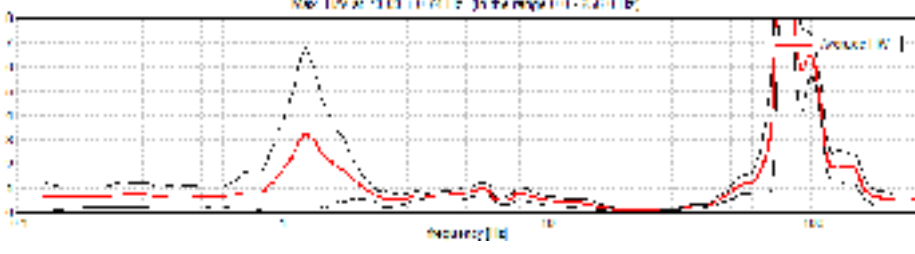
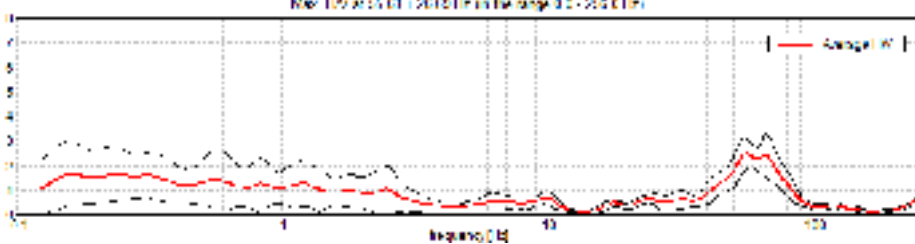
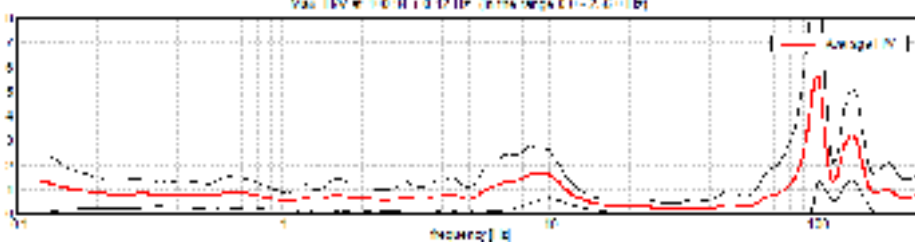
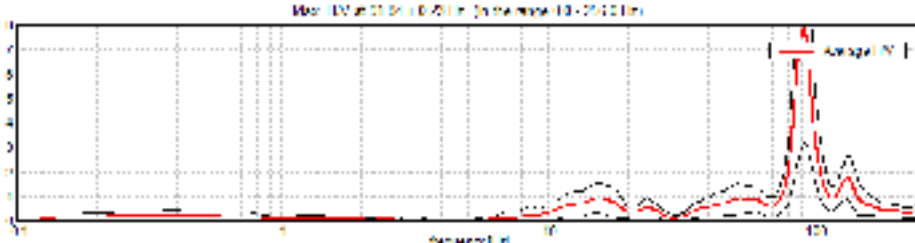
| Courbes de vibrations ambiantes | Caractéristiques du site |
|---------------------------------|---|
| | Site 19 POINT X : -73.0874288276 POINT Y : 45.7756150598 f_0 : 1.3Hz a_0 : 13.1 |
| | Site 20 POINT X : -73.8353438246 POINT Y : 45.6378632154 f_0 : 82.2Hz a_0 : 10.12 |
| | Site 21 POINT X : -72.6387136203 POINT Y : 45.6977935620 f_0 : 68.8Hz a_0 : 3 |
| | Site 22 POINT X : -71.8371365388 POINT Y : 46.2770498394 f_0 : 80Hz a_0 : 7.4 |
| | Site 23 POINT X : -74.1593201436 POINT Y : 45.1715591653 f_0 : 66.9Hz a_0 : 4.1 |

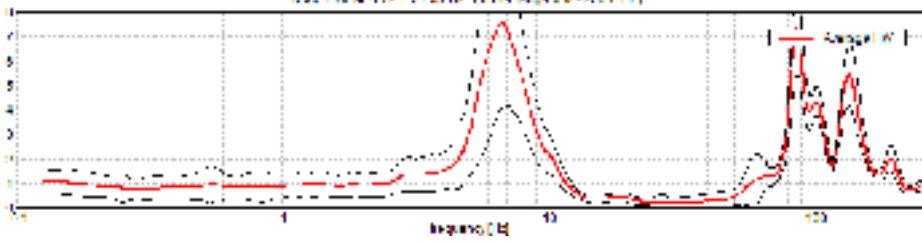
| Courbes de vibrations ambiantes | Caractéristiques du site |
|--|---|
|  | <p>Site 24</p> <p>POINT X : -72.8278776476</p> <p>POINT Y : 45.8847023878</p> <p>f₀ : 2.5Hz</p> <p>a₀ : 2.2</p> |
|  | <p>Site 25</p> <p>POINT X : -73.3401892404</p> <p>POINT Y : 46.1374541122</p> <p>f₀ : 1.25 Hz</p> <p>a₀ : 8.3</p> |
| <p>Le pont était inaccessible</p> | <p>Site 26</p> <p>POINT X : -72.3901332213</p> <p>POINT Y : 46.1971222566</p> |
|  | <p>Site 27</p> <p>POINT X : -73.6011948251</p> <p>POINT Y : 46.0933329450</p> <p>f₀ : 1.6Hz</p> <p>a₀ : 3</p> |
|  | <p>Site 28</p> <p>POINT X : -72.6622970473</p> <p>POINT Y : 45.9606889565</p> <p>f₀ : 4Hz</p> <p>a₀ : 1.9</p> |

| Courbes de vibrations ambiantes | Caractéristiques du site |
|--|--|
|  | Site 29 POINT X : -73.3279133946 POINT Y : 45.5758932164 f_0 : 4.7 Hz a_0 : 4 |
|  | Site 30 POINT X : -73.5934887001 POINT Y : 45.1146658763 f_0 : 79 Hz a_0 : 3.2 |
|  | Site 31 POINT X : -72.5572080510 POINT Y : 45.8187602858 f_0 : 4 Hz a_0 : 1 |
|  | Site 32 POINT X : -73.4456636527 POINT Y : 45.1450779869 f_0 : 88Hz a_0 : 6 |
|  | Site 33 POINT X : -74.0917684862 POINT Y : 45.3757684035 f_0 : 1.4Hz a_0 : 5.8 |

| Courbes de vibrations ambiantes | Caractéristiques du site |
|---------------------------------|---|
| | <p>Site 34 POINT X : -73.8626484922 POINT Y : 45.5813734208 f₀ : 89 Hz a₀ : 5.8</p> |
| | <p>Site 35 POINT X : -74.1609924319 POINT Y : 45.0070132849 f₀ : 75 Hz a₀ : 4.2</p> |
| | <p>Site 36 POINT X : -72.3877727764 POINT Y : 46.2790682706 f₀ : 3Hz a₀ : 4.9</p> |
| | <p>Site 37 POINT X : -74.1850244120 POINT Y : 45.3063853381 f₀ : 82.6Hz a₀ : 4</p> |
| | <p>Site 38 POINT X : -72.9767879214 POINT Y : 45.5183055697 f₀ : 5 Hz a₀ : 3.7</p> |

| Courbes de vibrations ambiantes | Caractéristiques du site |
|--|--|
|  | <p>Site 39 POINT X : -73.7393898443 POINT Y : 45.7329569285 f₀ : 97.8Hz a₀ : 6</p> |
|  | <p>Site 40 POINT X : -73.5519296946 POINT Y : 45.9103731655 f₀ : 47.2Hz a₀ : 3.8</p> |
|  | <p>Site 41 POINT X : -73.5401086922 POINT Y : 45.9277125694 f₀ : 15Hz a₀ : 3</p> |
| <p>Le pont était inaccessible</p> | <p>Site 42 POINT X : -74.1336461730 POINT Y : 45.6824365571</p> |
|  | <p>Site 43 POINT X : -73.3717184602 POINT Y : 45.5691562293 f₀ : 97.2Hz a₀ : 6.1</p> |

| Courbes de vibrations ambiantes | Caractéristiques du site |
|--|--|
|  | <p>Site 44 POINT X : -72.8223882092 POINT Y : 46.0648869687 f₀ : 1.4 Hz a₀ : 3.2</p> |
|  | <p>Site 45 POINT X : -74.3196260429 POINT Y : 45.1141385993 f₀ : 55.6Hz a₀ : 2.5</p> |
| <p>Le pont était inaccessible</p> | <p>Site 46 POINT X : -74.0354397827 POINT Y : 45.6809657862</p> |
|  | <p>Site 47 POINT X : -73.2550172383 POINT Y : 45.2819529285 f₀ : 10Hz a₀ : 1.8</p> |
|  | <p>Site 48 POINT X : -73.6904843419 POINT Y : 45.9145212614 f₀ : 91.8Hz a₀ : 8</p> |

| Courbes de vibrations ambiantes | Caractéristiques du site |
|--|---|
|  <p>Max (Val) 1.77 - 1.21 Hz (en Hz) (sur 20-200 Hz)</p> <p>Amplitude [m/s²]</p> <p>fréquence [Hz]</p> | <p>Site 49</p> <p>POINT X : -72.8431302925</p> <p>POINT Y : 45.7417413624</p> <p>f_0 : 6.7Hz</p> <p>a_0 : 7.5</p> |
| <p>Le pont était inaccessible</p> | <p>Site 50</p> <p>POINT X : -73.2648243065</p> <p>POINT Y : 45.3483299289</p> |

ANNEXE VIII

RÉSULTATS DES MESURES MVA POUR LES OUVRAGES D'ART

Tableau-A VIII-1 Résultats des mesures de MVA pour les ouvrages d'art

| ID | POINT_X | POINT_Y | Type de pont | Fréquence du pont [Hz] | Fréquence du sol [Hz] |
|----|----------------|---------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| 1 | -74.0438514298 | 45.7369580108 | Travée simple en béton | 1.9 | 1.9 |
| 2 | -73.5976320665 | 45.3232601126 | Travée simple en béton | 5.5 | 5.8 |
| 3 | -71.9855794172 | 46.6625193497 | Ponceau | 80 | 30 |
| 4 | -73.5627706365 | 45.0720157198 | Ponceau | 74.4 | 18 |
| 5 | -73.6629620727 | 45.1084649730 | Travée simple en béton | 83 | 22 |
| 6 | -73.5090950361 | 45.9886911309 | Travée simple en béton | 26 | 25 |
| 7 | -74.1577530927 | 45.1747701659 | Acier-Bois-Béton | 7.4 | 15 |
| 8 | -72.8080134735 | 45.6435284468 | Travée simple en béton | 10 | - |
| 9 | -73.6501071763 | 45.8770928583 | Travées multiples | 3 | 2 |
| 10 | -73.8299711180 | 45.6392115589 | Travée simple en béton | 95 | 10 |
| 11 | -72.7173337465 | 45.6954298586 | Ponceau | 66 | 8.34 |
| 12 | -72.3333821150 | 46.4957221470 | Acier-Bois | 4.5 | 1.06 |
| 13 | -73.4247911534 | 45.9310411240 | Acier-Béton | 1.6 | 1.6 |
| 14 | -73.5266116972 | 45.3773862246 | Travées multiples | 97 | 2.28 |
| 15 | -74.0124198973 | 45.2136189281 | Ponceau | 100 | 7.5 |
| 16 | -73.7820430120 | 45.7246027704 | Acier-Bois | 76 | 5.28 |
| 17 | -72.1762202316 | 45.9565539726 | Ponceau | 7 | 7 |
| 18 | -73.2484255715 | 45.6331799292 | Travée simple en béton | 1.4 | 1.45 |
| 19 | -73.0874288276 | 45.7756150598 | Travée simple en béton | 1.3 | 1.25 |
| 20 | -73.8353438246 | 45.6378632154 | Travée simple en béton | 82.2 | 23 |
| 21 | -72.6387136203 | 45.6977935620 | Acier-Béton | 68.8 | 3.4 |
| 22 | -71.8371365388 | 46.2770498394 | Acier-Béton | 80 | 8.09 |
| 23 | -74.1593201436 | 45.1715591653 | Travée simple en béton | 66.9 | 11.25 |

| ID | POINT_X | POINT_Y | Type de pont | Fréquence du pont [Hz] | Fréquence du sol [Hz] |
|----|----------------|---------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| 24 | -72.8278776476 | 45.8847023878 | Ponceau | 2.5 | 2.19 |
| 25 | -73.3401892404 | 46.1374541122 | Ponceau | 1.25 | 1.22 |
| 26 | -72.3901332213 | 46.1971222566 | - | - | 3.44 |
| 27 | -73.6011948251 | 46.0933329450 | Acier-Bois | 1.6 | 1.56 |
| 28 | -72.6622970473 | 45.9606889565 | Ponceau | 4 | 3.25 |
| 29 | -73.3279133946 | 45.5758932164 | Ponceau | 4.7 | 4.9 |
| 30 | -73.5934887001 | 45.1146658763 | Ponceau | 79 | 11.2 |
| 31 | -72.5572080510 | 45.8187602858 | Ponceau | 4 | 3.95 |
| 32 | -73.4456636527 | 45.1450779869 | Travée simple en béton | 88 | 7.8 |
| 33 | -74.0917684862 | 45.3757684035 | Travée simple en béton | 1.4 | 1.22 |
| 34 | -73.8626484922 | 45.5813734208 | Travée simple en béton | 89 | 16.25 |
| 35 | -74.1609924319 | 45.0070132849 | Bois-Maçonnerie | 75 | 5.6 |
| 36 | -72.3877727764 | 46.2790682706 | Acier-Bois-Béton | 3 | 2.8 |
| 37 | -74.1850244120 | 45.3063853381 | Travée simple en béton | 82.6 | 4.1 |
| 38 | -72.9767879214 | 45.5183055697 | Travées multiples | 5 | 1 |
| 39 | -73.7393898443 | 45.7329569285 | Travée simple en béton | 97.8 | 4.16 |
| 40 | -73.5519296946 | 45.9103731655 | Acier-Bois | 47.2 | 3.8 |
| 41 | -73.5401086922 | 45.9277125694 | Travée simple en béton | 15 | 15 |
| 42 | -74.1336461730 | 45.6824365571 | - | - | 14.7 |
| 43 | -73.3717184602 | 45.5691562293 | Travées multiples | 97.2 | 2.31 |
| 44 | -72.8223882092 | 46.0648869687 | Ponceau | 1.4 | 1.22 |
| 45 | -74.3196260429 | 45.1141385993 | Acier-Bois | 55.6 | 2.5 |
| 46 | -74.0354397827 | 45.6809657862 | - | - | 13 |
| 47 | -73.2550172383 | 45.2819529285 | Ponceau | 10 | 9.25 |
| 48 | -73.6904843419 | 45.9145212614 | Acier-Béton | 91.8 | 9.7 |
| 49 | -72.8431302925 | 45.7417413624 | Ponceau | 6.7 | 7 |
| 50 | -73.2648243065 | 45.3483299289 | - | - | 4.3 |

ANNEXE IX

CALCUL DE L'ALÉA GÉNÉRAL SELON L'AMS

Tableau-A IX-1 Valeurs du $F_{Aléa}$ pour une utilisation sur l'ensemble de la Province
Adapté de Lemaire (2013)

| Aléa sismique relatif | $F_{Aléa}$ |
|--|---|
| Faible : $AMS \leq 0.1 \text{ g}$ | 1 |
| Modéré : $0.1 \text{ g} \leq AMS \leq 0.4 \text{ g}$ | $(1.75 + \left(\frac{AMS - 0.1}{0.4 - 0.1}\right) \times 0.5) \times 0.8 \leq 1.8$ |
| Élevé : $AMS \geq 0.4 \text{ g}$ | $(2.25 + \left(\frac{AMS - 0.4}{AMS_{MAX} - 0.4}\right) \times 0.25) \times 0.8 \leq 2$ |

ANNEXE X

INDICE DE SUSCEPTIBILITÉ À L'AMPLIFICATION

Tableau-A X-1 Dépôts alluviaux : Tableau des probabilités d'appartenance à une catégorie sismique selon l'épaisseur des dépôts meubles, avec indice de susceptibilité correspondant

| Alluviaux : catégorie\épaisseur | 0 à 5 [m] | 5 à 10 [m] | 10 à 20 [m] | 20 à 30 [m] | >30 [m] |
|--|------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| A ou B | 45.80% | 29.25% | 14.46% | 9.57% | 2.52% |
| C | 23.95% | 51.70% | 42.15% | 20.21% | 2.52% |
| D | 29.41% | 8.84% | 33.47% | 42.55% | 33.61% |
| E | 0.84% | 10.20% | 9.92% | 27.66% | 61.34% |
| Indice de susceptibilité | 1,05 | 1,05 | 1,1 | 1,2 | 1,25 |

Tableau-A X-2 Dépôts de versant : Tableau des probabilités d'appartenance à une catégorie sismique selon l'épaisseur des dépôts meubles, avec indice de susceptibilité correspondant

| Versant catégorie\épaisseur | 0 à 5 [m] | 5 à 10 [m] | 10 à 20 [m] | 20 à 30 [m] | >30 [m] |
|--|------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| A ou B | 7.14% | 18.18% | 2.27% | 0.00% | 0.00% |
| C | 21.43% | 4.55% | 11.36% | 11.76% | 0.00% |
| D | 42.86% | 40.91% | 54.55% | 29.41% | 21.05% |
| E | 28.57% | 36.36% | 31.82% | 58.82% | 78.95% |
| Indice de susceptibilité | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,25 | 1,25 |

Tableau-A X-3 Dépôts fluvioglaciers : Tableau des probabilités d'appartenance à une catégorie sismique selon l'épaisseur des dépôts meubles, avec indice de susceptibilité correspondant

| Fluvioglacière catégorie\épaisseur | 0 à 5 [m] | 5 à 10 [m] | 10 à 20 [m] | 20 à 30 [m] | >30 [m] |
|---|------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| A, B | 59.62% | 38.98% | 40.40% | 20.00% | 0.00% |
| C | 28.85% | 52.54% | 49.49% | 65.71% | 80.00% |
| D | 3.85% | 5.08% | 8.08% | 14.29% | 20.00% |
| E | 7.69% | 3.39% | 2.02% | 0.00% | 0.00% |
| Indice de susceptibilité | 1 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 |

Tableau-A X-4 Dépôts marins : Tableau des probabilités d'appartenance à une catégorie sismique selon l'épaisseur des dépôts meubles, avec indice de susceptibilité correspondant

| Marins catégorie\épaisseur | 0 à 5 [m] | 5 à 10 [m] | 10 à 20 [m] | 20 à 30 [m] | >30 [m] |
|---------------------------------------|------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| A, B | 59.53% | 37.87% | 24.25% | 4.42% | 1.27% |
| C | 25.97% | 36.98% | 33.15% | 18.58% | 2.96% |
| D | 10.80% | 19.59% | 33.74% | 38.69% | 14.38% |
| E | 3.70% | 5.57% | 8.86% | 38.31% | 81.40% |
| Indice de susceptibilité | 1,025 | 1,05 | 1,1 | 1,2 | 1,25 |

Tableau-A X-5 Dépôts organiques : Tableau des probabilités d'appartenance à une catégorie sismique selon l'épaisseur des dépôts meubles, avec indice de susceptibilité correspondant

| Organiques catégorie\épaisseur | 0 à 5 [m] | 5 à 10 [m] | 10 à 20 [m] | 20 à 30 [m] | >30 [m] |
|---|------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| A, B | 95.25% | 78.31% | 50.00% | 12.50% | 0.00% |
| C | 4.16% | 13.25% | 28.21% | 13.64% | 0.00% |
| D | 0.40% | 4.42% | 15.81% | 48.86% | 36.84% |
| E | 0.20% | 4.02% | 5.98% | 25.00% | 63.16% |
| Indice de susceptibilité | 1 | 1 | 1,025 | 1,2 | 1,25 |

Tableau-A X-6 Tills dépôts glaciaires : Tableau des probabilités d'appartenance à une catégorie sismique selon l'épaisseur des dépôts meubles, avec indice de susceptibilité correspondant

| Tills catégorie\épaisseur | 0 à 5 [m] | 5 à 10 [m] | 10 à 20 [m] | 20 à 30 [m] | >30 [m] |
|--------------------------------------|------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| A, B | 85.52% | 71.15% | 66.48% | 58.44% | 20.00% |
| C | 13.30% | 26.82% | 30.67% | 36.36% | 60.00% |
| D | 0.54% | 2.03% | 2.71% | 2.60% | 20.00% |
| E | 0.63% | 0.00% | 0.14% | 2.60% | 0.00% |
| Indice de susceptibilité | 1 | 1,025 | 1,025 | 1,025 | 1,1 |

Tableau-A X-7 Dépôts anthropiques : Tableau des probabilités d'appartenance à une catégorie sismique selon l'épaisseur des dépôts meubles, avec indice de susceptibilité correspondant

| Anthropiques catégorie\épaisseur | 0 à 5 [m] | 5 à 10 [m] | 10 à 20 [m] | 20 à 30 [m] | >30 [m] |
|---|------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| A, B | 40.00% | 16.67% | 9.09% | 0.00% | absent |
| C | 60.00% | 66.67% | 81.82% | 100.00% | absent |
| D | 0.00% | 16.67% | 9.09% | 0.00% | absent |
| E | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | absent |
| Indice de susceptibilité | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | absent |

Tableau-A X-8 Dépôts indifférenciés : Tableau des probabilités d'appartenance à une catégorie sismique selon l'épaisseur des dépôts meubles, avec indice de susceptibilité correspondant

| Indifférenciés catégorie\épaisseur | 0 à 5 [m] | 5 à 10 [m] | 10 à 20 [m] | 20 à 30 [m] | >30 [m] |
|---|------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| A, B | 57.14% | 24.39% | 6.67% | 0.00% | absent |
| C | 42.86% | 68.29% | 73.33% | 50.00% | absent |
| D | 0.00% | 7.32% | 20.00% | 50.00% | absent |
| E | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | absent |
| Indice de susceptibilité | 1 | 1,05 | 10,5 | 1,1 | absent |

Tableau-A X-9 Tableau récapitulatif des indices de susceptibilité à l'amplification selon l'épaisseur des dépôts meubles et le type de dépôt de surface (final)

| Type de dépôts à la surface/épaisseur de dépôts meubles | 0 to 5 [m] | 5 to 10 [m] | 10 to 20 [m] | 20 to 30 [m] | >30 [m] |
|---|-----------------|-----------------|--------------|------------------|-----------------|
| Dépôts alluviaux | 1,1 Non 1,05 | 1,1 Non 1,05 | 1,1 | 1,2 | 1,2 Non 1,25 |
| Dépôts de versant | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,25 | 1,25 |
| Dépôts éoliens | 1,025 | 1,05 | 1,05 | 1,1 | 1,1 |
| Dépôts glaciofluviaux et glaciolacustres | 1 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 |
| Dépôts anthropiques | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | Absent |
| Dépôts lacustres | 1 | 1,025 | 1,1 | 1,15 | 1,15 |
| Dépôts marins | 1,025 | 1,05 | 1,1 | 1,2 | 1,25 |
| Dépôts organiques | 1 | 1,025 | 1,025 | 1,2 | 1,25 |
| Tills-Dépôts glaciaires | 1 | 1,025 | 1,025 | 1,1 Non 1,025 | 1,1 |
| Dépôts indifférenciés | 1 | 1,05 | 1,05 | 1,1 | Absent |

ANNEXE XI

VOLUME DE TRAFIC SUR L'INTERSECTION

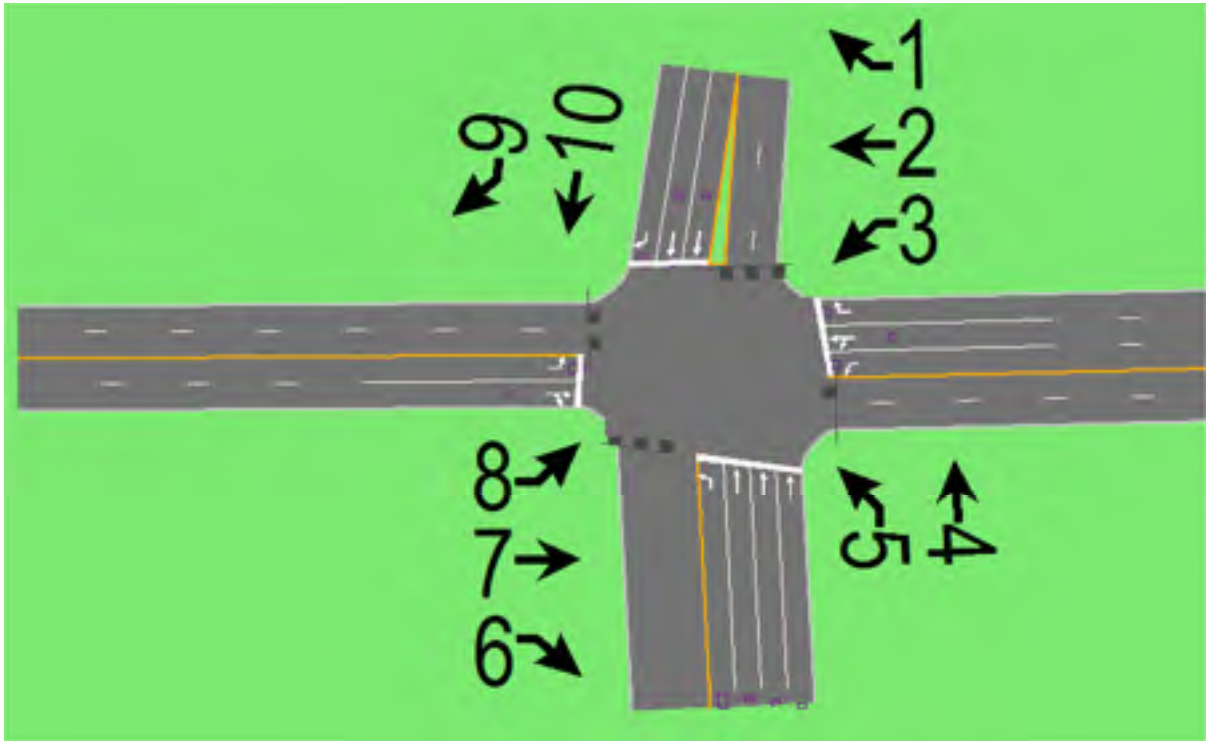


Figure-A XI-1 Géométrie de l'intersection entre la 28^{ème} rue et le Bd. Henri-Bourassa avec position pour les volumes de véhicules

Tableau-A XI-1 Tableau récapitulatif des volumes de véhicules sur l'intersection Henri-Bourassa et 28^{ème} rue

| Position\Volume | 100% | 105% | 110% | 115% |
|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | 107 | 112 | 118 | 123 |
| 2 | 650 | 683 | 715 | 748 |
| 3 | 22 | 23 | 24 | 25 |
| 4 | 266 | 279 | 293 | 306 |
| 5 | 550 | 578 | 605 | 633 |
| 6 | 60 | 63 | 66 | 69 |
| 7 | 90 | 95 | 99 | 104 |
| 8 | 250 | 263 | 275 | 288 |
| 9 | 125 | 131 | 138 | 144 |
| 10 | 500 | 525 | 550 | 575 |

APPENDICE A

CONTRIBUTIONS ORIGINALES

Deux articles de revue, dont un publié, ont été rédigés :

Farzam, A, Nollet, M-J et Khaled, A. 2018b. « Susceptibility Modelling of Seismic Induced Effects (landslides and rock falls) integrated to rapid scoring procedures for bridges using GIS tools for the Lowlands of the Saint-Lawrence Valley ». *Geomatics, Natural Hazards and Risk* vol. 9, n° 1, p. 589-607.

Farzam, A, Nollet, M-J et Khaled, A. 2018b. « Integration of Site Conditions Information Using Geographic Information System for the Seismic Evaluation of Bridges ». *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards (in process)*.

De plus, le projet a fait l'objet de deux présentations au congrès de l'ACFAS, la première se focalisait sur les effets induits (printemps 2015) tandis que la seconde sur l'amplification (printemps 2016), et de deux articles publiés et présentés au Congrès annuel de la SCGC. Le premier présenté à London (ON) en 2016 traite de l'effet d'amplification et de son intégration dans les méthodes d'évaluation à l'aide de plateforme SIG (Farzam et al., 2016). Le second présenté à Fredericton (NB) en 2018 et porte sur l'intégration des effets induits dans la méthode d'évaluation de la vulnérabilité sismique des ouvrages d'art (Farzam et al., 2018a).

Articles de conférence :

Farzam, A, Nollet, M-J et Khaled, A. 2016. « Integration of site conditions information using geographic information system for the seismic evaluation of bridges ». In *Resilient Infrastructure*. (London Ont). Canadian Society for Civil Engineering: CSCE / SCGC.

Farzam, A, Nollet, M-J et Khaled, A. 2018a. « Integration of seismically induced site effects to the evaluation of the seismic vulnerability of bridges through a GIS platform ». In *Building Tomorrow's Society*. (Fredericton (NB)). Canada: Canadian Society for Civil Engineering: CSCE / SCGC.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aashto, A. 2004. « Policy on geometric design of highways and streets ». *American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, US*, p. 941.
- Abo El Ezz, A, Nollet, M-J et Nastev, M. 2015. « Assessment of earthquake-induced damage in Quebec city, Canada ». *International journal of disaster risk reduction*, vol. 12, p. 16-24.
- Adams, J. 2011. « Seismic hazard maps for the National Building Code of Canada ». In *CSCE 2011 General Conference, Ottawa, Ontario, June*. p. 14-17.
- Adams, J, et Atkinson, G. 2003. « Development of seismic hazard maps for the proposed 2005 edition of the National Building Code of Canada ». *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 30, n° 2, p. 255-271.
- Adams, J, et Basham, P. 1989. « The seismicity and seismotectonics of Canada east of the Cordillera ». *Geoscience Canada*, vol. 16, n° 1.
- Adams, J, Rogers, G, Halchuk, S, McCormack, D et Cassidy, J. 2002. « The case for an advanced national earthquake monitoring system for Canada's cities at risk ». In. Vol. 42. Boston, United States.
- Agam, M, Hashim, M, Murad, M et Zabidi, H. 2016. « Slope Sensitivity Analysis using Spencer's Method in Comparison with General Limit Equilibrium Method ». *Procedia Chemistry*, vol. 19, p. 651-658.
- Ahmat, DH. 2011. « Basses-Terres du Saint-Laurent et leur potentiel en hydrocarbure ». Québec, Canada, Université Laval. Google Scholar.
- Akin, MK, Kramer, SL et Topal, T. 2011. « Empirical correlations of shear wave velocity (V_s) and penetration resistance (SPT-N) for different soils in an earthquake-prone area (Erbaa-Turkey) ». *Engineering Geology*, vol. 119, n° 1-2, p. 1-17.
- Akinci, A, Malagnini, L et Sabetta, F. 2010. « Characteristics of the strong ground motions from the 6 April 2009 L'Aquila earthquake, Italy ». *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 30, n° 5, p. 320-335.
- Allen, TI, Adams, J et Halchuk, S. 2015. « The seismic hazard model for Canada: Past, present and future ». In *Proceedings of the Tenth Pacific Conference on Earthquake Engineering*. p. 1-8.

- Altez, AGDLP (200). 2005. *Seismic Microzonation and Vulnerability of Highway Bridges in Montreal*. McGill University, Montreal, Canada.
- Andrawes, B, Shin, M et Wierschem, N. 2009. « Active confinement of reinforced concrete bridge columns using shape memory alloys ». *Journal of Bridge Engineering*, vol. 15, n° 1, p. 81-89.
- Ansal, A, et Ptilakis, K. 2004. « Recent Advances in Earthquake Geotechnical Engineering and Microzonation ». In, sous la dir. de Media., Springer Science & Business. p. 354. Dordrecht, Boston, London: Atila Ansal.
- Atkinson, GM, Bommer, JJ et Abrahamson, NA. 2014. « Alternative approaches to modeling epistemic uncertainty in ground motions in probabilistic seismic-hazard analysis ». *Seismological Research Letters*, vol. 85, n° 6, p. 1141-1144.
- Aylsworth, J, et Lawrence, D. 2003. « Earthquake-induced landsliding east of Ottawa: a contribution to the Ottawa Valley Landslide Project ». In *Geohazards 2003, 3rd Canadian Conference on Geotechnique and Natural Hazards/3ième Conférence canadienne sur la géotechnique et les risques naturels; Edmonton, Alberta; CA; June 9-10 juin 2003*. Canadian Geotechnical Society/Société canadienne de géotechnique (Canada).
- Baillifard, F, Jaboyedoff, M et Sartori, M. 2003. « Rockfall hazard mapping along a mountainous road in Switzerland using a GIS-based parameter rating approach ». *Natural Hazards and Earth System Science*, vol. 3, n° 5, p. 435-442.
- Baillifard, F, Jaboyedov, M, Rouiller, D, Robichaud, G, Locat, P, Locat, J, Couture, R et Hamel, G. 2004. « Towards a GIS-based rockfall hazard assessment along the Quebec City Promontory, Quebec, Canada ». *Landslides: evaluation and stabilization*. Balkema, Taylor & Francis Group, London, p. 207-214.
- Barton, N, Lien, R et Lunde, J. 1974. « Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support ». *Rock mechanics*, vol. 6, n° 4, p. 189-236.
- Basöz, NI, et Kiremidjian, AS. 1995. *Prioritization of bridges for seismic retrofitting*. Coll. « Technical Report The National Center for Earthquake Engineering Research », 95-0007. State University of New York at Buffalo, US.
- Bimschas, M. 2010. « Displacement based seismic assessment of existing bridges in regions of moderate seismicity ». Zurich, ETH Zurich, 415 p.
- Bird, JF, Bommer, JJ, Crowley, H et Pinho, R. 2006. « Modelling liquefaction-induced building damage in earthquake loss estimation ». *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 26, n° 1, p. 15-30.

- Boivin, DJ. 1992. « Analyse et cartographie des dommages du séisme survenu au Québec le 25 novembre 1988 ». *The Canadian Geographer/Le Géographe Canadien*, vol. 36, n° 2, p. 114-123.
- Bonnefoy-Claudet, S. 2004. « Nature du bruit de fond sismique: implications pour les études des effets de site ». Université Joseph-Fourier, Grenoble, 241 p. < <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00007397/> >.
- Bonnefoy-Claudet, S, Baize, S, Bonilla, LF, Berge-Thierry, C, Pasten, C, Campos, J, Volant, P et Verdugo, R. 2009. « Site effect evaluation in the basin of Santiago de Chile using ambient noise measurements ». *Geophysical Journal International*, vol. 176, n° 3, p. 925-937.
- Bonnefoy-Claudet, S, Cornou, C, Bard, PY, Cotton, F, Moczo, P, Kristek, J et Fäh, D. 2006a. « H/V ratio: a tool for site effects evaluation. Results from 1-D noise simulations ». *Geophysical Journal International*, vol. 167, p. 827-837.
- Bonnefoy-Claudet, S, Cotton, F et Bard, P-Y. 2006b. « The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies: A literature review ». *Earth-Science Reviews*, vol. 79, n° 3-4, p. 205-227.
- Boore, DM. 2004. « Estimating Vs (30)(or NEHRP site classes) from shallow velocity models (depths< 30 m) ». *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 94, n° 2, p. 591-597.
- Boulanger, RW, et Idriss, I. 2007. « Evaluation of cyclic softening in silts and clays ». *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 133, n° 6, p. 641-652.
- Braganza, S, Atkinson, GM, Ghofrani, H, Hassani, B, Chouinard, L, Rosset, P, Motazedian, D et Hunter, J. 2016. « Modeling site amplification in eastern Canada on a regional scale ». *Seismological Research Letters*, vol. 87, n° 4, p. 1008-1020.
- British standards, CE. 2004. *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance—Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings* (2004), 1. 232 p.
- Brocher, TM, Page, RA, Stauffer, PH et Hendley Ii, JW. 2014. *Progress toward a safer future since the 1989 Loma Prieta earthquake*. Report. Coll. « Fact Sheet ». Reston, VA: U. S. Geological Survey, 4 p. < <http://pubs.er.usgs.gov/publication/fs20143092> >.
- Caltrans. 1992. *Seismic Hazard Components in the Caltrans Prioritization Algorithm*. California Department of Transportation - Division of structures.
- CAN/CSA. 2006. *Code canadien sur le calcul des ponts routiers*. Mississauga (Ont.), Canada, 820 p.

CAN/CSA. 2014. *Code canadien sur le calcul des ponts routiers*. Mississauga (Ont.), Canada.

Capitale, CsdL. 2016. *Rapport annuel 2015-2016 du conseil d'établissement; École JEAN-XXIII*. < <http://cscapitale-ecole-jean-xxiii.ca/wp-content/uploads/2016/06/rapport-annuel.pdf> >.

Caron, O, Lamothe, M, Benoit, N et Nastev, M. 2014. *Modélisation géologique 3D des sédiments quaternaires du bassin versant de la rivière Chaudière, Québec*. Commission géologique du Canada, Dossier Public 7515, 26 p.
< http://publications.gc.ca/collections/collection_2016/rncan-nrcan/M183-2-7515-fra.pdf >.

Carson, M, et Lajoie, G. 1981. « Some constraints on the severity of landslide penetration in sensitive deposits ». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 35, n° 3, p. 301-316.

Cassidy, JF, Rogers, GC, Lamontagne, M, Halchuk, S et Adams, J. 2010. « Canada's earthquakes: 'The good, the bad, and the ugly' ». *Geoscience Canada*, vol. 37, n° 1, p. 1-16.

Castellaro, S, Mulargia, F et Piermaria, LR. 2008. « Vs30: Proxy for seismic Amplification? ». *Seismological Research Letters*, vol. 79, n° 4, p. 540-543.

Chakraborty, J, Tobin, GA et Montz, BE. 2005. « Population evacuation: assessing spatial variability in geophysical risk and social vulnerability to natural hazards ». *Natural Hazards Review*, vol. 6, n° 1, p. 23-33.

Chávez-García, FJ, et Bard, PY. 1994. « Site effects in Mexico City eight years after the September 1985 Michoacan earthquakes ». *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 13, n° 4, p. 229-247.

Chou, Y-J, Huang, N, Lee, C-H, Tsai, S-L, Chen, L-S et Chang, H-J. 2004. « Who is at risk of death in an earthquake? ». *American journal of epidemiology*, vol. 160, n° 7, p. 688-695.

Chouinard, L, et Rosset, P. 2011. *Carte électronique de microzonage de la ville de Montréal*.

Chouinard, L, et Rosset, P. 2012. *On the Use of Single Station Ambient Noise Techniques for Microzonation Purposes: the Case of Montreal*. Commission géologique du Canada, Dossier public 7078, p.85-93

Clark, TH. 1947. « Two recent landslides in Quebec ». *Transactions of the Royal Society of Canada*, vol. 41(3), p. 9-18.

Coburn, A, et Spence, RJS. 2002. *Earthquake protection (2002)*, 2nd ed;. UK: John Wiley & Sons: Chichester.

- Cova, TJ, et Johnson, JP. 2003. « A network flow model for lane-based evacuation routing ». *Transportation research part A: Policy and Practice*, vol. 37, n° 7, p. 579-604.
- Cruden, D. 1985. « Rock slope movements in the Canadian Cordillera ». *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 22, n° 4, p. 528-540.
- Cubrinovski, M, Robinson, K, Taylor, M, Hughes, M et Orense, R. 2012. « Lateral spreading and its impacts in urban areas in the 2010–2011 Christchurch earthquakes ». *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, vol. 55, n° 3, p. 255-269.
- Cutter, SL, Boruff, BJ et Shirley, WL. 2003. « Social vulnerability to environmental hazards ». *Social science quarterly*, vol. 84, n° 2, p. 242-261.
- Dai, FC, et Lee, CF. 2002. « Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong ». *Geomorphology*, vol. 42, n° 3, p. 213-228.
- Davi, D, Kahan, M, Légeron, F, Marchand, P, Portier, B, Resplendino, J, Schmitt, P, Thibault, C et Vivier, A. 2011. « SISMOA: Evaluation préliminaire du risque sismique sur les ouvrages d'art existants ». *Service d'étude sur les transports, les routes et leurs aménagements (S.E.T.R.A.)*, p. 29.
- Davidovici, V. 1985. *Génie parasismique*. Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR), Paris, France.
- Davidson, RA, et Shah, HC. 1997. *An urban earthquake disaster risk index*. Report No. 121. California, US: John A. Blume Earthquake Engineering Center Stanford University, 269 p.
- Demers, D, Leroueil, S et d'Astous, J. 1999. « Investigation of a landslide in Maskinongé, Québec ». *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 36, n° 6, p. 1001-1014.
- Desjardins, R. 1980. « Tremblements de terre et glissements de terrain: Corrélation entre des datations au 14C et des données historiques à Shawinigan, Québec ». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 34, n° 3, p. 359-362.
- Dionne, J-C. 1977. « La mer de Goldthwait au Québec ». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 31, n° 1-2, p. 61-80.
- Domínguez-Cuesta, MJ, et Bobrowsky, PT. 2013. « Proposed Landslide Susceptibility Map of Canada Based on GIS ». In *Landslide Science and Practice*. p. 375-382. Springer.
- Eden, W. 1956. *The Hawkesbury landslide*. Division of Building Research, National Research Council of Canada.

- Erdik, M, Sesetyan, K, Demircioglu, M, Hancilar, U, Zulfikar, C, Cakti, E, Kamer, Y, Yenidogan, C, Tuzun, C et Cagnan, Z. 2010. « Rapid earthquake hazard and loss assessment for Euro-Mediterranean region ». *Acta Geophysica*, vol. 58, n° 5, p. 855-892.
- Fäh, D, Kind, F et Giardini, D. 2001. « A theoretical investigation of average H/V ratios ». *Geophysical Journal International*, vol. 145, n° 2, p. 535-549.
- Fäh, D, Rüttener, E, Noack, T et Kruspan, P. 1997. « Microzonation of the city of Basel ». *Journal of Seismology*, vol. 1, n° 1, p. 87-102.
- Farr, TG, Rosen, PA, Caro, E, Crippen, R, Duren, R, Hensley, S, Kobrick, M, Paller, M, Rodriguez, E et Roth, L. 2007. « The shuttle radar topography mission ». *Reviews of geophysics*, vol. 45, n° 2.
- Farzam, A, Nollet, M-J et Khaled, A. 2015. « Évaluation de la susceptibilité aux effets de sites pour la région des Basses-Terres du Saint-Laurent à l'aide d'un système d'information géographique (SIG) ». In *Les risques naturels au québec (10ème Colloque ACFAS)*. (Rimouski (UQAR)), sous la dir. de ACFAS.
- Farzam, A, Nollet, M-J et Khaled, A. 2016. « Integration of site conditions information using geographic information system for the seismic evaluation of bridges ». In *Resilient Infrastructure*. (London Ont). Canadian Society for Civil Engineering: CSCE / SCGC.
- Farzam, A, Nollet, M-J et Khaled, A. 2018a. « Integration of seismically induced site effects to the evaluation of the seismic vulnerability of bridges through a GIS platform ». In *Building Tomorrow's Society*. (Fredericton (NB)). Canada: Canadian Society for Civil Engineering: CSCE / SCGC.
- Farzam, A, Nollet, M-J et Khaled, A. 2018b. « Susceptibility Modelling of Seismic Induced Effects (landslides and rock falls) integrated to rapid scoring procedures for bridges using GIS tools for the Lowlands of the Saint-Lawrence Valley ». *Geomatics, Natural Hazards and Risk* vol. 9, n° 1, p. 589-607.
- Feizizadeh, B, et Kienberger, S. 2017. « Spatially explicit sensitivity and uncertainty analysis for multicriteria-based vulnerability assessment ». *Journal of Environmental Planning and Management*, vol. 60, n° 11, p. 2013-2035.
- Feizizadeh, B, Roodposhti, MS, Blaschke, T et Aryal, J. 2017. « Comparing GIS-based support vector machine kernel functions for landslide susceptibility mapping ». *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 10, n° 5, p. 122.
- Feizizadeh, B, Roodposhti, MS, Jankowski, P et Blaschke, T. 2014. « A GIS-based extended fuzzy multi-criteria evaluation for landslide susceptibility mapping ». *Computers & geosciences*, vol. 73, p. 208-221.

- FEMA. 2012. *Hazus–MH: Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model*. Technical manual, Federal Emergency Management Agency, National Institute of Building Science Washington, D.C. , USA., 2012.
- Fensome, R, Williams, G, Achab, A, Clague, J, Corrigan, D, Monger, J et Nowlan, G (401). 2014. *Quatre milliards d'années d'histoire : Le patrimoine géologique du Canada*. Canada: Fédération canadienne des sciences de la terre.
- Filion, L. 1987. « Holocene development of parabolic dunes in the central St. Lawrence Lowland, Québec ». *Quaternary Research*, vol. 28, n° 2, p. 196-209.
- Filion, L, Quinty, F et Bégin, C. 1991. « A chronology of landslide activity in the valley of Rivière du Gouffre, Charlevoix, Quebec ». *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 28, n° 2, p. 250-256.
- Finn, WDL, et Wightman, A. 2003. « Ground motion amplification factors for the proposed 2005 edition of the National Building Code of Canada ». *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 30, n° 2, p. 272-278.
- Fourniadis, I, Liu, J et Mason, P. 2007. « Landslide hazard assessment in the Three Gorges area, China, using ASTER imagery: Wushan–Badong ». *Geomorphology*, vol. 84, n° 1, p. 126-144.
- Fransham, P, et Gadd, N. 1977. « Geological and geomorphological controls of landslides in Ottawa Valley, Ontario ». *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 14, n° 4, p. 531-539.
- Galy, B. 2013. « Méthodes de conception et étude du comportement sismique des fondations superficielles sur sol naturel et traité, considérant l'interaction sol-structure ». Montréal, Québec, Canada, École de technologie supérieure, 412 p.
- Galy, B, Khaled, A et Nollet, M-J. 2013. « Assessment of seismic vulnerability of typical Quebec city bridges considering the site-specific amplification effects ». *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 40, n° 1, p. 1-10.
- Garber, NJ, et Hoel, LA (1230). 2009. *Traffic and highway engineering*. US: Cengage Learning.
- Gheshlaghi, HA, et Feizizadeh, B. 2017. « An integrated approach of analytical network process and fuzzy based spatial decision making systems applied to landslide risk mapping ». *Journal of African Earth Sciences*, vol. 133, p. 15-24.
- Ghofrani, H, et Atkinson, GM. 2014. « Site condition evaluation using horizontal-to-vertical response spectral ratios of earthquakes in the NGA-West 2 and Japanese databases ». *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 67, p. 30-43.

- Godbout, P-M. 2013. « Géologie du quaternaire et hydrostratigraphie des dépôts meubles du bassin versant de la rivière Bécancour et des zones avoisinantes, Québec ». Montréal, Canada, UQAM, 201 p.
- Google. 2017. « Google Maps: Drive 7.9 km, 12 - 22 min 2468 Rue Létourneau, Ville de Québec, QC G1P 3R4 to 1937 Boulevard Henri-Bourassa, Ville de Québec, QC G1J ». < <https://www.google.ca/maps/dir/46.8214113,-71.3054026/46.8367827,-71.2272138/@46.8350176,-71.283919,14z/data=!3m1!4b1!4m6!4m5!2m3!6e0!7e2!8j1507048800!3e0> >.
- Gouin, P. 2001. « Tremblements de terre historiques au Québec (de 1534 à mars 1925), identifiés et interprétés à partir des textes originaux contemporains -- Historical earthquakes felt in Quebec : from 1534 to March 1925, as revealed by the local contemporary literature ». *Montreal: Guerin Ed.*, , p. 1491p.
- Gouvernement du Canada. 2018a. « Transport networks in Canada - CanVec – Transport Features ». < http://ftp.maps.canada.ca/pub/nrcan_rncan/vector/canvec/shp/Transport/ >.
- Gouvernement du Canada, RNC. 2004a. « Géologie urbaine et environnementale de la vallée du Saint-Laurent - Épaisseur des dépôts meubles ». <http://ftp.geogratis.gc.ca/pub/nrcan_rncan/vector/geology/urb-geo-St.Lawrence/thickness.shp.zip >.
- Gouvernement du Canada, RNC. 2004b. « Géologie urbaine et environnementale du Canada - Géologie structurale ». <http://ftp.geogratis.gc.ca/pub/nrcan_rncan/vector/geology/urb-geo-St.Lawrence/structural_geology.shp.zip >.
- Gouvernement du Canada, RNC. 2010. « Compte rendu de séisme (2010-06-23) ». <http://www.seismescanada.rncan.gc.ca/pprs-pprp/pubs/GeoFacts/GEOINFO_ValdesBois2010.pdf >.
- Gouvernement du Canada, RNC. 2011. « Les zones sismiques dans l'Est du Canada ». < http://www.seismescanada.rncan.gc.ca/pprs-pprp/pubs/GF-GI/GEODOC_seismes-SE-Canada_f.pdf >.
- Gouvernement du Canada, RNC. 2015. « GSC2015PGA ». <<http://www.seismescanada.rncan.gc.ca/hazard-alea/zoning-zonage/images/GSC2015PGApdf.pdf> >.
- Gouvernement du Canada, RNC. 2016. « The 1925 Magnitude 6.2 Charlevoix-Kamouraska earthquake ». < <http://www.seismescanada.rncan.gc.ca/historic-historique/events/19250301-en.php> >.

- Gouvernement du Canada, RNC. 2017. « Transport networks in Canada - CanVec – Transport Features ». < <http://geogratis.gc.ca/api/en/nrcan-rncan/ess-sst/4c9def46-716d-42c1-a29f-ca8291655588.html> >.
- Gouvernement du Canada, RnC. 2018b. « Recherche de séismes dans la base de données (Bulletin en ligne), ». < <http://www.earthquakescanada.nrcan.gc.ca/stndon/NEDB-BNDS/bull-fr.php> >.
- Government of Canada. 2018a. « Transport networks in Canada - CanVec – Transport Features ». < http://ftp.maps.canada.ca/pub/nrcan_rncan/vector/canvec/shp/Transport/ >.
- Government of Canada, NRC. 2018b. « Earthquakes Canada, GSC, Earthquake Search (Online Bulletin), ». < <http://earthquakescanada.nrcan.gc.ca/stndon/NEDB-BNDS/bull-eng.php> >.
- Griezic, A. 1999. « Seismic evaluation and retrofit of concrete bridge columns and joints ». Montreal, Canada, McGill University.
- Grondin, G, et Demers, D. 1996. « The Saint-Liguori flakeslide: Characterisation and remedial works ». In *7th International Symposium on Landslides, Trondheim, Norway*. Vol. 1721, p. 743-748.
- Gul, M, et Catbas, FN. 2008. « Ambient vibration data analysis for structural identification and global condition assessment ». *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 134, n° 8, p. 650-662.
- Halchuk, SC, Adams, JE et Allen, TI. 2015. *Fifth generation seismic hazard model for Canada: grid values of mean hazard to be used with the 2015 National Building Code of Canada*. Commission géologique du Canada, Dossier public 7893, 26 p. < <https://doi.org/10.4095/297378> >.
- Havenith, H-B, Fäh, D, Alvarez-Rubio, S et Roten, D. 2009. « Response spectra for the deep sediment-filled Rhône Valley in the Swiss Alps ». *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 29, n° 1, p. 17-38.
- Hida, H. 2009. « Évaluation de la vulnérabilité sismique des ponts et viaducs ». Montréal, Canada, École de technologie supérieur, 175 p.
- Hisada, Y, Shibayama, A et Ghayamghamian, MR. 2005. « Building damage and seismic intensity in Bam City from the 2003 Iran, Bam, Earthquake ». *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, vol. 79, n° 3/4, p. 81-93.
- Hunter, J, Crow, H, Arsenault, J, Atukorala, U, Best, M, Campos, D, Candy, C, Chouinard, L, Claprod, M et Dutrisac, H. 2012. « Shear wave velocity measurement guidelines for

Canadian seismic site characterization in soil and rock ». *Geological Survey of Canada, Open File*, vol. 7078, p. 227.

Hunter, J, Crow, H, Brooks, G, Pyne, M, Motazedian, D, Lamontagne, M, Pugin, A, Pullan, S, Cartwright, T et Douma, M. 2010. « Seismic site classification and site period mapping in the Ottawa area using geophysical methods ». *Geological Survey of Canada, Open File*, vol. 6273, n° 1.

Idriss, I, et Boulanger, R. 2014. *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures*. Coll. « Centre for Geotechnical Modelling », UCD/CGM-14/01 Davis, California Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, 134 p.

Imai, T, et Tonouchi, K. 1982. « Correlation of N value with S-wave velocity and shear modulus ». In *Proceedings of The Second European Symposium on Penetration Testing*. (1982/05//), p. 67-72. Amsterdam.

Institut de la statistique, Q. 2016. « MRC, Population totale, 1996-2017 ». <http://www.stat.gouv.qc.ca/docs-hmi/statistiques/population-demographie/structure/index.html> >.

IRC-CNRC. 2005. *Guide de l'utilisateur, CNBC 2005 : commentaires sur le calcul des structures (partie 4 de la division B)*, 1e éd.. Coll. « Guide de l'utilisateur, Code national du bâtiment 2005 ». Ottawa: Commission Canadienne des codes du bâtiment et de prévention des incendies, Conseil national de recherches du Canada.

IRC-CNRC. 2010. *Code national du bâtiment du Canada*. Ottawa: Institut en recherches et construction - Conseil national de recherches du Canada.

IRC-CNRC. 2015a. *Code national du bâtiment du Canada*. Ottawa: Institut en recherches et construction - Conseil national de recherches du Canada.

IRC-CNRC. 2015b. *Guide de l'utilisateur, CNBC 2015 : commentaires sur le calcul des structures (partie 4 de la division B)*, 1e éd.. Coll. « Guide de l'utilisateur, Code national du bâtiment 2015 ». Ottawa: Commission Canadienne des codes du bâtiment et de prévention des incendies, Conseil national de recherches du Canada.

Jaboyedoff, M, Oppikofer, T, Minoia, R, Locat, J et Turmel, D. 2008. « Terrestrial LIDAR investigation of the 2004 rockslide along Petit Champlain Street, Québec City (Québec, Canada) ». In *4th Canadian conference on geohazards: from causes to management*. Presse de l'Université Laval. p. 295-301.

Karimzadeh, S, Feizizadeh, B et Matsuoka, M. 2017. « From a GIS-based hybrid site condition map to an earthquake damage assessment in Iran: Methods and trends ». *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 22, p. 23-36.

- Karray, M, et Ghobrial, F. 2013. *Analyse dynamique des pentes argileuses et des remblais construits sur des dépôts d'argile*. Sherbrooke: section géotechnique, département de génie civil, université de Sherbrooke, 153 p.
- Karrow, P. 1959. *Surficial Geology, Grondines, Champlain, Portneuf, Lotbiniere and Nicolet Counties, Quebec* [[Geographical map]]. Preliminary Series, no 41-1959. Geological Survey of Canada.
- Karrow, P. 1972. « Earthflows in the Grondines and Trois Rivières Areas, Québec ». *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 9, n° 5, p. 561-573.
- Kayen, R, Moss, R, Thompson, E, Seed, R, Cetin, K, Kiureghian, AD, Tanaka, Y et Tokimatsu, K. 2013. « Shear-wave velocity–based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential ». *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 139, n° 3, p. 407-419.
- Keefer, DK. 2002. « Investigating landslides caused by earthquakes—a historical review ». *Surveys in Geophysics*, vol. 23, n° 6, p. 473-510.
- Kim, SH. 1993. *A GIS-based regional risk analysis approach for bridges against natural hazards*. State university of New York at Buffalo, 396 p.
- Kircher, CA, Whitman, RV et Holmes, WT. 2006. « HAZUS Earthquake Loss Estimation Methods ». *Natural Hazards Review*, vol. 7, n° 2, p. 45-59.
- Kiremidjian, A, Moore, J, Fan, YY, Yazlali, O, Basoz, N et Williams, M. 2007. « Seismic risk assessment of transportation network systems ». *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 11, n° 3, p. 371-382.
- Knudsen, K, Bott, J, Woods, M et McGuire, T. 2009. « Development of a liquefaction hazard screening tool for Caltrans bridge sites ». In *Lifeline Earthquake Engineering in a Multihazard Environment*. (Oakland, California, US), sous la dir. de Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Conference (TCLEE), p. 573-584. ASCE.
- Koch, GS, et Link, RF. 2002. *Statistical analysis of geological data*. Mineola, New York, US: Dover publications, INC, 438 p.
- Lachet, C, et Bard, PY. 1994. « Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique ». *Journal of Physics of the Earth*, vol. 42, p. 377-377.
- Lajoie, P. 1974. « Les coulées d'argile des basses-terrasses de l'Outaouais, du Saint-Laurent et du Saguenay ». *La Revue de Géographie de Montreal*, vol. 86, n° 4, p. 419-428.

- Lamontagne, M. 2002. « An overview of some significant eastern Canadian earthquakes and their impacts on the geological environment, buildings and the public ». *Natural Hazards*, vol. 26, n° 1, p. 55-68.
- Lamontagne, M. 2008. « Les dommages dus aux tremblements de terre dans la région de Québec entre 1608 et 2007 ». *Commission géologique du Canada, Ottawa, Ontario, Dossier Public 5547*.
- Land Information Ontario. 2011. *OHN - Waterbody* [Geographical map]. File identifier: 3ebaf6b2-6dd6-4ebb-a6bb-4fc778426709. Ontario: Ontario Ministry of Natural Resources and Forestry - Provincial Mapping Unit <<https://www.javacoeapp.lrc.gov.on.ca/geonetwork/srv/en/metadata.show?uuid=3ebaf6b2-6dd6-4ebb-a6bb-4fc778426709&currTab=simple>>. Consulté le 2016-06-06.
- Land Information Ontario. 2015. *ARA Line Segment* [Geographical map]. File identifier: 233efbf6-81b5-4ab6-949f-dc78b1d7c9cc. Ontario: Ontario Ministry of Natural Resources and Forestry - Provincial Mapping Unit <<https://www.javacoeapp.lrc.gov.on.ca/geonetwork/srv/en/main.home?uuid=233efbf6-81b5-4ab6-949f-dc78b1d7c9cc>>. Consulté le 2016-06-06.
- Lateltin, O, Duvernay, B, Fäh, D, Giardini, D, Haemming, C, Lacave, C, Tissières, P et Widmer, F. 2004. *Principe pour l'établissement et l'utilisation d'études de microzonage en Suisse: Directives De l'OFEG*. Suisse, 68 p.
- Lavoie, D. 2008. « Appalachian foreland basin of Canada ». *Sedimentary basins of the world*, vol. 5, p. 65-103.
- Leboeuf, D, et Nollet, M-J. 2006. « Microzonage et vulnérabilité sismique de la ville de Québec 2005-2006 ». *rapport final soumis à la ville de Québec, 17 juillet 2006*, p. 108.
- Leboeuf, D, Perret, D, Nollet, M-J, Lamarche, L, Nastev, M et Parent, M. 2013. *Microzonage sismique des Villes de Québec-Ancienne-Lorette et Réserve indienne de Wendake (Catégories d'emplacement)*. Commission géologique du Canada, Dossier Public 6875, Échelle 1:50,000, 1 feuille, doi : 10.4095/292640.
- Lefebvre, G. 1986. « Slope instability and valley formation in Canadian soft clay deposits ». *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 23, n° 3, p. 261-270.
- Lefebvre, G, Leboeuf, D, Hornyh, P et Tanguay, L. 1992. « Slope failures associated with the 1988 Saguenay earthquake, Quebec, Canada ». *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 29, n° 1, p. 117-130.
- Lemaire, A. 2013. « Étude de sensibilité des paramètres pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique des ponts en vue de la calibration de la méthode d'évaluation du Québec ». Montréal, École de technologie supérieure, 194 p. Consulté le 2016.

- Leroueil, S, et Locat, J. 1998. « Geotechnical Characterization, Risk Assessment and Mitigation ». In *XI Danube-European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. (Porec, Croatia), p. 95-106. Balkema, Lisac and Szavits-Nossan.
- Leroueil, S, Tavenas, F et Bihan, J-P. 1983. « Propriétés caractéristiques des argiles de l'est du Canada ». *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 20, n° 4, p. 681-705.
- Lineback Gritzner, M, Marcus, WA, Aspinall, R et Custer, SG. 2001. « Assessing landslide potential using GIS, soil wetness modeling and topographic attributes, Payette River, Idaho ». *Geomorphology*, vol. 37, n° 1, p. 149-165.
- Liu, Z. 2001. « Seismic prioritization of highway bridges in Canada ». Montréal, McGill University, 195 p.
- Locat, J. 2008. « Localisation et magnitude du séisme du 5 février 1663 (Québec) revues à l'aide des mouvements de terrain ». In *the 4th Canadian Conference on Geohazards: From Causes to Management*. (Québec). Presse de l'Université Laval.
- Locat, J, Lefebvre, G et Ballivy, G. 1984. « Mineralogy, chemistry, and physical properties interrelationships of some sensitive clays from Eastern Canada ». *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 21, n° 3, p. 530-540.
- Long, NT. 2008. « Landslide susceptibility mapping of the mountainous area in a Luoi District, Thua thien hue province, Vietnam ». 181 p. Google Scholar.
- Mayfield, RT, Kramer, SL et Huang, Y-M. 2009. « Simplified Approximation Procedure for Performance-Based Evaluation of Liquefaction Potential ». *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 136, n° 1, p. 140-150.
- MDDELCC. 2014. « Système d'information hydrogéologique (SIH) ». < <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/souterraines/sih/index.htm> >.
- Michaud, V. 2004. « Microzonage sismique préliminaire de la ville de Québec : cartographie des effets de site et développement d'une méthodologie utilisant les SIG ». Québec, Canada, Université Laval, 176 p.
- Mitchell, D, Bruneau, M, Saatcioglu, M, Williams, M, Anderson, D et Sexsmith, R. 1995. « Performance of bridges in the 1994 Northridge earthquake ». *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 22, n° 2, p. 415-427.
- 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 ». *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 39, n° 12.

- Mitchell, D, Sexsmith, R et Tinawi, R. 1994. « Seismic retrofitting techniques for bridges-a state-of-the-art report ». *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 21, n° 5, p. 823-835.
- Mitchell, D, et Tinawi, R. 1992. « Structural damage due to the April 22, 1991, Costa Rican earthquake ». *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 19, n° 4, p. 586-605.
- Mitchell, D, Tinawi, R et Law, T. 1990. « Damage caused by the November 25, 1988, Saguenay earthquake ». *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 17, n° 3, p. 338-365.
- Mitchell, D, Tinawi, R et Sexsmith, RG. 1991. « Performance of bridges in the 1989 Loma Prieta earthquake-lessons for Canadian designers ». *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 18, n° 4, p. 711-734.
- Mitchell, DT, René; Law, Tim. 1990. « Damage caused by the November 25, 1988, Saguenay earthquake ». *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 17, n° 3, p. 338-365.
- Morin, L-G. 1947. « La coulée d'argile de Saint-Louis, comté de Richelieu ». *Le naturaliste Canadien*, vol. 74(5-6), p. 125-143.
- Motazedian, D, Hunter, JA, Pugin, A et Crow, H. 2011. « Development of a Vs30 (NEHRP) map for the city of Ottawa, Ontario, Canada ». *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 48, n° 3, p. 458-472.
- MTMDET. 2017a. « DÉBIT DE CIRCULATION - TRANSPORTS QUÉBEC ». <<https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/debits-de-circulation-transport-quebec>>.
- MTMDET. 2017b. *Rapport annuel de gestion 2016-2017*. Bibliothèque et Archives nationales du Québec: Gouvernement du Québec: Ministère des transports, de la mobilité durable et de l'électrification des transports, 154 p. <<https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/organisation/rapport-annuel/Documents/rag-2016-2017.pdf>>.
- MTQ. 1996. *Manuel de l'utilisateur. Système de gestion des structures*. Bibliothèque et Archives nationales du Québec: Gouvernement du Québec: Ministère des transports du Québec.
- MTQ. 2012. « Zones de contraintes relatives aux glissements de terrain: Feuillet cartographique ». <<http://www.mrc2m.qc.ca/fr/documentation/documentation/#ENV>>.
- MTQ. 2013a. « Annexe F-3 Zones exposées aux glissements de terrain_Feuillets 1 à 6 ». <<http://www.mrcmaskoutains.qc.ca/territoire-cours-eau/amenagement-territoire>>.

- MTQ. 2013b. « Règlement 353-2013 Annexe "B" ». < http://www.mrcjoliette.qc.ca/upload/File/cartes_annexes.pdf >.
- MTQ. 2016. *Rapport annuel de gestion 2015-2016*. Bibliothèque et Archives nationales du Québec: Gouvernement du Québec: Ministère des transports du Québec, 198 p. < https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/acces-information-renseignements-personnels/documents-reglement-diffusion/Documents/rapport-annuel/MTQ_RAG_2015-2016.pdf >.
- Nakamura, Y. 1989. « A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface ». *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, vol. 30, n° 1, p. 24-33.
- Nakamura, Y. 2000. « Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications ». In *12th World Conference on Earthquake Engineering*. (Auckland, New Zealand), sous la dir. de Engineering, New Zealand Society for Earthquake. Google Scholar.
- Nastev, M, Parent, M, Benoit, N, Ross, M et Howlett, D. 2016a. « Regional VS30 model for the St. Lawrence Lowlands, Eastern Canada ». *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, p. 1-13.
- Nastev, M, Parent, M, Ross, M, Howlett, D et Benoit, N. 2016b. « Geospatial modelling of shear-wave velocity and fundamental site period of Quaternary marine and glacial sediments in the Ottawa and St. Lawrence Valleys, Canada ». *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 85, p. 103-116.
- Nollet, M-J. 2004. *Évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments existants : état des connaissances* (2004). Montréal, Canada: École de technologie supérieure, 81 p.
- Nollet, M-J, LeBoeuf, D et Khaled, A. 2008. *Vulnérabilité sismique des infrastructures essentielles de la ville de Québec*. Coll. « Rapport final soumis à la ville de Québec, 31 juillet 2008 ». Québec, Canada, 115 p.
- NYSDOT. 2002. *Seismic Vulnerability Manual. Structure Design and Construction Division - Bridge Safety Assurance Unit*. New York State Departement: New York State Departement, 44 p.
- O'Rourke, MJ, et Liu, X. 1999. « Response of buried pipelines subject to earthquake effects ».
- Pantelidis, L. 2009. « Rock slope stability assessment through rock mass classification systems ». *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 46, n° 2, p. 315-325.

- Pararas-Carayannis, G, Theilen-Willige, B et Wenzel, H. 2011. « Local site conditions influencing earthquake intensities and secondary collateral impacts in the sea of marmara region-Application of Standardized Remote Sensing and GIS-Methods in Detecting Potentially Vulnerable Areas to Earthquakes, Tsunamis and Other Hazards ». *Science of Tsunami Hazards*, vol. 30.
- Parent, M, Caron, O, Dubé-Loubert, H et Rivard, J. 2018. « Géologie des formations superficielles des Basses-terres centrales du Saint-Laurent et des régions adjacentes (Ottawa à Québec)/Surficial Geology of the Central St ». *Lawrence Lowlands and adjacent regions (Ottawa-Quebec City)*. *Geological Survey of Canada, Open File (In Review)*.
- Parent, M, et Occhietti, S. 1988. « Late Wisconsinan deglaciation and Champlain sea invasion in the St. Lawrence valley, Québec ». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 42, n° 3, p. 215-246.
- Parent, M, et Occhietti, S. 1999. « Late Wisconsinan deglaciation and glacial lake development in the Appalachians of southeastern Québec ». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 53, n° 1, p. 117-135.
- Park, CB, Miller, RD, Xia, J et Ivanov, J. 2007. « Multichannel analysis of surface waves (MASW)—active and passive methods ». *The Leading Edge*, vol. 26, n° 1, p. 60-64.
- Paultre, P, Lefebvre, G, Devic, JP et Côté, G. 1993. « Statistical analyses of damages to buildings in the 1988 Saguenay earthquake ». *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 20, n° 6, p. 988-998.
- Porter, K. 2009. « Cracking an open safe: HAZUS vulnerability functions in terms of structure-independent spectral acceleration ». *Earthquake Spectra*, vol. 25, n° 2, p. 361-378.
- Pourghasemi, H, Pradhan, B, Gokceoglu, C et Moezzi, KD. 2013. « A comparative assessment of prediction capabilities of Dempster-Shafer and weights-of-evidence models in landslide susceptibility mapping using GIS ». *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 4, n° 2, p. 93-118.
- Priestley, MJN (686). 1996. *Seismic design and retrofit of bridges* (1996). New York, US: N.Y. : J. Wiley and Sons.
- Pugin, AJ-M, Pullan, SE et Hunter, JA. 2009. « Multicomponent high-resolution seismic reflection profiling ». *The Leading Edge*, vol. 28, n° 10, p. 1248-1261.
- Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles. 2000. *Couche hypsométrique à l'échelle de 1/20 000 – Warwick* [geographical map]. Identifiant usuel 21E13-0201.

- Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles. 2016. *Hydro* [Geographical map]. Hydrographie-polygones. Identifiant du fichier: e6279dca-0433-44ea-866f-394a1be585f4. < <https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/vmtl-hydrographie/ressource/e6279dca-0433-44ea-866f-394a1be585f4> >. Consulté le 2016-06-06.
- Quigley, RM. 1980. « Geology, mineralogy, and geochemistry of Canadian soft soils: a geotechnical perspective ». *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 17, n° 2, p. 261-285.
- Quinn, P. 2009. « Large landslides in sensitive clay in eastern Canada and the associated hazard and risk to linear infrastructure ». Kingston, Ontario, Canada, Queen's University, 437 p.
- Quinn, P, Hutchinson, D, Diederichs, M et Rowe, R. 2011. « Characteristics of large landslides in sensitive clay in relation to susceptibility, hazard, and risk ». *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 48, n° 8, p. 1212-1232.
- Quinn, P, Hutchinson, DJ, Diederichs, MS, Rowe, RK et Alvarez, J. 2008. « Susceptibility mapping of landslides in Champlain clay from a digital landslide inventory ». In *Proceedings of the 4th Canadian Conference on Geohazards, Québec City, QC*. p. 20-24.
- Quinn, P, et Zaleski, M. 2015. « Co-seismic large landslides in sensitive clay in eastern Canada, a search for an initiation threshold ». In *the 68th Canadian Geotechnical Conference*. (Quebec City). Quebec City, CA: Canadian Geotechnical Society
- Quinn, P, Zaleski, M, Mayfield, R, Karimian, H et Waddington, B. 2015. « Liquefaction susceptibility mapping derived from terrain mapping; experience on a linear project in British Columbia, Canada ». In *68th Canadian Geotechnical Conference*. (Quebec City). Quebec City, CA: Canadian Geotechnical Society.
- Ressources naturelles Canada, sC. 2016. « Recherche de séismes dans la base de données ». <http://www.seismescanada.rncan.gc.ca/stndon/NEDB-BNDS/bull-fr.php?time_start=1985%2F01%2F01+00%3A00%3A00&time_end=2016%2F11%2F28+19%3A00%3A00&depth_min=0&depth_max=100&mag_min=3&mag_max=9.9&shape_type=region&radius_center_lat=50&radius_center_lon=-95&radius_radius=1000®ion_north=50®ion_south=42®ion_east=-56®ion_west=-80&eq_type_L=1&display_list=1&list_sort=date&list_order=a&tpl_output=html&sbmited=1>.
- Robertson, P. 1990. « Soil classification using the cone penetration test ». *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 27, n° 1, p. 151-158.

- Rocher, M, Tremblay, A, Nadeau, L et Lavoie, D. 2000. « Analyse structurale et tectonique de la Plate-forme du Saint-Laurent (Québec, Canada): résultats préliminaires ». *Geological Survey of Canada, Current Research*, p. D12.
- Ross, M, Parent, M, Benjumea, B et Hunter, J. 2006. « The late Quaternary stratigraphic record northwest of Montréal: regional ice-sheet dynamics, ice-stream activity, and early deglacial events ». *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 43, n° 4, p. 461-485.
- Rosset, P, Bour-Belvaux, M et Chouinard, L. 2015. « Microzonation models for Montreal with respect to VS30 ». *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 13, n° 8, p. 2225-2239.
- Russell, H, Brooks, G et Cummings, D. 2011. « Deglacial history of the Champlain Sea basin and implications for urbanization ». *Geological Survey of Canada, Dossier public 6947*, p. 86.
- Savard, MM. 2013. *Inventaire canadien des ressources en eau souterraine : Caractérisation hydrogéologique régionale et intégrée du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec*. Commission géologique du Canada, Bulletin 587, 106 p.
- Scott, JS. 2003. « A review of the geology and geotechnical characteristics of Champlain sea clays of the Ottawa river valley with reference to slope failures ». Canada: Geological Survey of Canada, 35 p.
- Seed, HB, et Idriss, IM. 1971. « Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential ». *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, vol. 97, n° 9, p. 1249-1273.
- Service de la sécurité civile: Transports Québec. 2008. *Manuel de gestion des risques liés aux ouvrages d'art (Document interne)*. Québec, 44 p.
- SESAME. 2004. « Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations Measurements, Processing and Interpretation ». *SESAME European Research Project WP12-Deliverable D.*, vol. 23.
- Shinozuka, M, Zhou, Y, Kim, S-H, Murachi, Y, Banerjee, S, Cho, S et Chung, H. 2005. *Socio-economic effect of seismic retrofit implemented on bridges in the Los Angeles highway network*. Coll. « Final Report to the California Department of Transportation ». Irvine, California, US: Department of Civil and Environmental Engineering: University of California, 314 p.
- Sibson, R. 1981. « A brief description of natural neighbour interpolation (Chapter 2) ». In *Interpreting Multivariate Data*, sous la dir. de Wiley, John p. 21-36. Chichester.
- Small, EP. 1999. « Development of a methodology for the integration of seismic risk mitigation activities in project and network level bridge management systems ». New York, US, State University of New York at Buffalo, 368 p.

- Statistics Canada. 2016. *Fichier des limites: Lacs et rivières (polygones)* [Geographical map]. Identifiant: ghy_000c11a_e.
<http://www5.statcan.gc.ca/access_acces/alternative_alternatif.action?l=fra&dispext=zip&tfra=ghy_000c11a_e.zip&k=%20%20%20198365&loc=http://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2011/geo/bound-limit/files-fichiers/ghy_000c11a_e.zip>.
Consulté le 2016-06-06.
- Statistique Canada. 2017. « Population des régions métropolitaines de recensement ». <<http://www.statcan.gc.ca/tables-tableaux/sum-som/102/cst01/demo05a-fra.htm>>.
- Tamima, U. 2016. « Integrating Seismic Risk and Systemic Vulnerability in an Urban Area ». Montreal, Canada, McGill University.
- Tamima, U, et Chouinard, L. 2012. « Framework for earthquake evacuation planning: Case study for montreal, Canada ». *Leadership and Management in Engineering*, vol. 12, n° 4, p. 222-230.
- Tamima, U, et Chouinard, L. 2013. « An Integrated Approach to Earthquake Evacuation Modeling: Incorporating Risk Analysis and Stochastic Route Choice Effects ». In *3rd Specialty Conference on Disaster Prevention and Mitigation*. (Montreal, Quebec). Canadian Society for Civil Engineering: CSCE / SCGC.
- Tamima, U, et Chouinard, L. 2016. « Development of evacuation models for moderate seismic zones: A case study of Montreal ». *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 16, p. 167-179.
- Tang, H, Chen, G et Liu, J. 2007. « Probabilistic estimation of seismic liquefaction potential for large region site based on two-dimensional GIS technique ». *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, vol. 27, n° 3, p. 296-301.
- Theilen-Willige, B. 2010. « Detection of local site conditions influencing earthquake shaking and secondary effects in Southwest-Haiti using remote sensing and GIS-methods ». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 10, p. 1183-1196.
- Theilen-Willige, B, et Burnett, FB. 2011. « Detection of local site conditions influencing earthquake shock and secondary effects in the valparaiso area in central-chile using remote sensing and gis methods ». *Science of Tsunami Hazards*, vol. 30.
- Tinawi, R, Sarrazin, M et Filiatrault, A. 1993a. « Influence of soft clays on the response spectra for structures in eastern Canada ». *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 12, n° 8, p. 469-477.

- Tinawi, R, Tremblay, S et Filiatrault, A. 1993b. *Méthode rapide de classement séismique des ponts et viaducs du Québec*. Montréal, Canada: Coll.«Rapport». École Polytechnique de Montréal. Canada, 78 p.
- Trafficware. 2018. « SYNCHRO STUDIO ». < <http://www.trafficware.com/synchro.html> >.
- Tremblay, T. 2008. « Hydrostratigraphie et géologie du quaternaire dans le bassin-versant de la rivière Châteauguay, Québec ».
- « Tromino® ». 2011. < <http://www.tromino.eu/> >.
- Tuttle, M, Law, KT, Seeber, L et Jacob, K. 1990. « Liquefaction and ground failure induced by the 1988 Saguenay, Quebec, earthquake ». *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 27, n° 5, p. 580-589.
- Tuttle, M, et Seeber, L. 1991. *Earthquake-induced liquefaction in Ferland, Quebec*. INFO--0378. Ottawa, ON (Canada): Atomic Energy Control Board, 59 p.
- Tuttle, MP, et Atkinson, GM. 2010. « Localization of large earthquakes in the Charlevoix seismic zone, Quebec, Canada, during the past 10,000 years ». *Seismological Research Letters*, vol. 81, n° 1, p. 140-147.
- UNDRO. 1991. *Mitigating Natural Disasters Phenomena, Effects and Options* (1991). New York, 164 p.
- Updike, R, Egan, J, Moriwaki, Y, Idriss, I et Moses, T. 1988. « A model for earthquake-induced translatory landslides in Quaternary sediments ». *Geological Society of America Bulletin*, vol. 100, n° 5, p. 783-792.
- US, NEHRP, Council, BSS et Agency, USFEM. 2003. *NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures* (2003). Building Seismic Safety Council, 356 p.
- USGS. 2015. « Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global ». < <https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc> >.
- Van Westen, CJ, Castellanos, E et Kuriakose, SL. 2008. « Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: an overview ». *Engineering geology*, vol. 102, n° 3, p. 112-131.
- Wald, DJ, et Allen, TI. 2007. « Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification ». *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 97, n° 5, p. 1379-1395.

- Wang, M, Qiao, J et He, S. 2010. « GIS-based earthquake-triggered landslide hazard zoning using contributing weight model ». *Journal of Mountain Science*, vol. 7, n° 4, p. 339-352.
- Wilson, M, et MacKay, B. 1919. « Landslide adjacent to Rivière Blanche, St. Thuribe, Parish of St. Casimir, Portneuf County, PQ ». *Report on Mining Operations in the Province of Quebec during 1918*, vol. Quebec Bureau of Mining Annual Report 1918, p. 152-156.
- Wilson, RC, et Keefer, DK. 1985. « Predicting Areal Limits of Earthquake-Induced Landsliding, Evaluating Earthquake Hazards in the Los Angeles Region ». *US Geological Survey Professional Paper*, p. 317-493.
- Winkley, AMM. 2013. « Impacts of liquefaction and lateral spreading on bridge pile foundations from the February 22nd 2011 Christchurch earthquake ». Christchurch, New Zealand, University of Canterbury, 257 p.
- Xu, C, Xu, X, Dai, F et Saraf, AK. 2012. « Comparison of different models for susceptibility mapping of earthquake triggered landslides related with the 2008 Wenchuan earthquake in China ». *Computers & Geosciences*, vol. 46, p. 317-329.
- Xu, C, Xu, X, Yao, Q et Wang, Y. 2013. « GIS-based bivariate statistical modelling for earthquake-triggered landslides susceptibility mapping related to the 2008 Wenchuan earthquake, China ». *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, vol. 46, n° 2, p. 221-236.
- Youd, TL, et Perkins, DM. 1978. « Mapping liquefaction-induced ground failure potential ». *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, vol. 104, n° 4, p. 433-446.
- Zhang, L. 2010. « A simple method for evaluating liquefaction potential from shear wave velocity ». *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, vol. 4, n° 2, p. 178-195.
- Zhang, Q. 2007. « Statistical damage identification for bridges using ambient vibration data ». *Computers & structures*, vol. 85, n° 7, p. 476-485.
- Zonno, G, Garcia-Fernandez, M, Jiménez, M, Menoni, S, Meroni, F et Petrini, V. 2003. « The SERGISAI procedure for seismic risk assessment ». *Journal of seismology*, vol. 7, n° 2, p. 255-277.