

# LE RISQUE SISMIQUE RÉSIDENTIEL DANS LE GRAND MONTRÉAL

## Évaluation des dommages et des conséquences

Rapport final

A l'intention  
Ministère de la Sécurité publique

par

**Luc Chouinard**

**Philippe Rosset**

*Université McGill*

**Marie-José Nollet**

*École de Technologie Supérieure*

Version 1: 14 septembre 2020

version 2 : 15 septembre - Lecture L. Chouinard

version 3 : 19 septembre - Lecture L. Chouinard

Version 4 : 21 septembre – Lecture M.-J. Nollet

Version 5: 26 novembre - Amélioration du modèle de calcul

## SOMMAIRE

1. Introduction .....	8
2. Contexte sismique et aléa sismique.....	9
2.1. Contexte sismique local .....	9
2.2. Estimation des mouvements du sol .....	10
3. Cartographie des conditions de sol.....	12
3.1. Collecte de données pour l'élaboration du microzonage.....	13
3.2. Les profils de $V_s$ (Vitesse de cisaillement des ondes S).....	13
3.3. La fréquence prédominante de résonance des sols $f_0$ .....	14
3.4. Le modèle géologique multicouches en trois dimensions.....	15
3.5. La carte géologique des dépôts de surface .....	15
3.6. Interpolation des données disponibles.....	16
4. Données sur la population .....	18
5. Inventaire des bâtiments par types d'occupation et de construction, par surface et valeurs foncières .....	21
5.1. Distribution par types d'occupation.....	23
5.2. Distribution par type de construction .....	25
5.3. Estimation de la surface du bâti par type d'occupation .....	28
5.4. Estimation de la valeur foncière du bâti par type d'occupation.....	30
5.5. Estimation de la valeur monétaire du contenu du bâti .....	34
6. Définition des scénarios sismiques .....	37
7. Estimation du risque sismique à l'aide d'HazCan .....	41
7.1. Dommages aux bâtiments .....	41
7.2. Dommages aux personnes .....	42
7.3. Demande en logements d'urgence .....	43
7.4. Débris .....	43
8. Résultats .....	44
8.1. Mouvements du sol .....	44
8.2. Dommages aux bâtiments .....	45
8.3. Montant des dommages aux bâtiments .....	49
8.4. Atteintes aux personnes.....	52
8.5. Personnes déplacées et besoins en espace d'accueil .....	53
8.6. Quantité de déblais .....	54
9. Discussion .....	56
9.1. Relations d'atténuation des ondes sismiques.....	56
9.2. Niveaux de code parasismique.....	58
9.3. Carte des conditions de sol.....	59
10. Recommandations .....	61
11. Publications acceptées durant le mandat.....	62
12. Références .....	63
13. Annexe 1. Analyse des logements multiples dans la base de données MAMOT 2017. ....	65

14. Annexe 2. Désagrégation de l'aléa sismique pour Montréal .....	66
15. Annexe 3. Description des dommages structuraux par type de construction et degré.....	67
16. Annexe 4. Description des dommages non-structuraux par type de construction et degré. ..	68

#### NOTE

Ce projet a été effectué dans le Cadre pour la prévention de sinistres 2013-2020 du gouvernement du Québec [CPS 17-18-07].

#### REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les divers intervenants ayant contribué à la réalisation des travaux : Pascal Marceau (Ministère de la Sécurité publique du Québec), Louise Bradette (Centre de sécurité civile de la ville de Montréal), Florence Sousha, Graham Saunders, Asthon Sun (Université McGill), Frédéric Thibodeau, Mathieu Paquet-Lavoie, Antoine Gendron, Mohamed Kraiem, Azarm Farzam (École de Technologie Supérieure). Le projet a bénéficié des commentaires de René Tinawi, professeur émérite à l'École polytechnique de Montréal.

## LISTE DES FIGURES

Figure 1. Procédure de calcul utilisée par Hazus. ....	9
Figure 2. Localisation des séismes dans le SE du Canada pour la période 2000-2009. ....	10
Figure 3. Localisation des données utiles pour le microzonage en classe de sols. ....	14
Figure 4. Relation entre la fréquence prédominante du site obtenue par la méthode HVSR et l'estimation de $V_{s30}$ . ....	14
Figure 5. Épaisseur de la couche des argiles de la Mer de Champlain. ....	15
Figure 6. Carte géologique simplifiée. ....	16
Figure 7. Zonage sismique en termes de classes de sol (CNB-2015). ....	18
Figure 8. Périmètre de la zone d'étude. ....	20
Figure 9. Population de la CMM par Aire de Dissémination en 2016. ....	21
Figure 10. Distribution par type d'occupation du bâti résidentiel par aire de dissémination. ....	24
Figure 11. Distribution par type d'occupation du bâti résidentiel par aire de dissémination. ....	24
Figure 12. Répartition de la surface totale du bâti (en 1000pi <sup>2</sup> ) par type d'occupation. ....	29
Figure 13. Surface totale du bâti (en 1000pi <sup>2</sup> ) par aire de dissémination. ....	30
Figure 14. Valeur foncière par types d'occupation du bâti résidentiel. ....	31
Figure 15. Distribution de la valeur foncière par aire de dissémination et par types d'occupation du bâti résidentiel. ....	33
Figure 16. Répartition de la valeur foncière totale par type d'occupation du bâti résidentiel. ....	33
Figure 17. Valeur foncière du bâti résidentiel par aire de dissémination. ....	34
Figure 18. Ratio valeur du contenu versus valeur foncière du bâti résidentiel par RTA de la CMM pour 2018. ....	35
Figure 19. Ratio entre la valeur du contenu et la valeur foncière du bâti résidentiel par RTA de la CMM pour 2018. ....	35
Figure 20. Distribution de la valeur totale du bâti résidentiel par AD de la CMM pour 2018. ....	36
Figure 21. Valeur totale du bâti résidentiel par AD de la CMM pour 2018 (en millions de Can\$). ....	37
Figure 22. Carte sismotectonique. ....	38
Figure 23. Contribution des séismes à l'aléa sismique calculé pour Montréal pour une période retour de 2475 ans. ....	38
Figure 24. Scénarios sismiques pour Montréal. ....	39
Figure 25. Carte de l'aléa sismique probabiliste en termes de PGA. ....	40
Figure 26. Estimation des dommages avec courbes de capacité et d'endommagement. ....	42
Figure 27. Cartes de PGA pour le scénario SC5 (en g). ....	45
Figure 28. Répartition des dommages pour le scénario SC5 (par degrés de dommages et tous types de construction). ....	48
Figure 29. Répartition des dommages de degré modéré pour le scénario SC5 (nombre de bâtiments, tous types de construction confondus). ....	49
Figure 30. Distribution des coûts des dommages structuraux et non-structuraux pour le scénario SC5 (tous types de construction confondus). ....	51
Figure 31. Distribution des coûts des dommages aux bâtiments pour le scénario SP (tous types de construction confondus). ....	51
Figure 32. Répartition des personnes blessées dans le cas du scénario centre SC5 à 2h du matin. ....	53
Figure 33. Répartition des personnes ayant besoin d'un logement temporaire pour le scénario centre SC5 par AD. ....	54
Figure 34. Répartition des débris (tous matériaux confondus) pour le scénario SC5 (en millier de tonnes). ....	55

Figure 35. Comparaison des valeurs de PGA calculées et mesurées lors du séisme du Saguenay (1988, M5.9).....	57
Figure 36. Comparaison des valeurs de MMI calculées et estimés lors du séisme du Cornwall (1945, M5.4).....	58

## LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1. Séismes majeurs historiques et récents. ....	10
Tableau 2. Séismes récents ressentis à Montréal et distributions en termes de MMI. ....	11
Tableau 3. Valeurs d'aléa sismique à adopter pour Montréal selon le CNB-2015.....	12
Tableau 4. Classification des sols selon le CN-2015 et facteur correctif du PGA.....	12
Tableau 5. Profils de vitesse $V_s$ pour les quatre types principaux de dépôts de la région de Montréal. ....	17
Tableau 6. Incertitudes des valeurs de $V_{s30}$ dérivées des mesures de bruit sismique et du modèle géologique 3D. ....	17
Tableau 7. Liste des MRC de la zone d'étude. ....	19
Tableau 8. Classification par types de construction selon Hazus et CNRC-1992. ....	22
Tableau 9. Classification par types d'occupation selon Hazus.....	22
Tableau 10. Distribution des bâtiments résidentiels par types d'occupation selon la nomenclature HazCan. ....	23
Tableau 11. Typologie de construction des bâtiments résidentiels selon le type d'occupation et la période de construction. ....	25
Tableau 12. Distribution des bâtiments résidentiels par types de construction et d'occupation. ...	26
Tableau 13. Distribution des bâtiments résidentiels par types de matériaux et d'occupation. ....	26
Tableau 14. Niveau de conception parasismique des bâtiments résidentiels par types de construction. ....	27
Tableau 15. Niveau de conception parasismique des bâtiments résidentiels par types de construction et d'occupation.....	28
Tableau 16. Surface médiane des bâtiments (en $m^2$ et $pi^2$ ) selon le type d'occupation.....	29
Tableau 17. Valeur foncière médiane des bâtiments (en Can\$) par types d'occupation et par unité de surface.....	30
Tableau 18. Valeur foncière totale des bâtiments (en Can\$) par type d'occupation calculée selon trois approches.....	32
Tableau 19. Valeur monétaire (en kCan\$) par type d'occupation. ....	36
Tableau 20. Liste des scénarios sismique choisis pour l'analyse de risque. ....	39
Tableau 21. Mouvements forts calculés au centre de Montréal par scénarios.....	44
Tableau 22. Dommages aux bâtiments par type d'occupation (en nombre et pourcentage). ....	46
Tableau 23. Dommages par types de construction (en % du total).....	47
Tableau 24. Montants des dommages par types de construction (en millions de Can\$). ....	50
Tableau 25. Dommages aux personnes par période de la journée. ....	52
Tableau 26. Quantité de déblais générés (en millier de tonnes).....	54
Tableau 27. Niveau de conception parasismique (en ) par types d'occupation pour les bâtiments W1. ....	59
Tableau 28. Influence des résultats pour le scénario SC5 de plusieurs paramètres utilisés par HazCan. ....	60
Tableau 1. Décompte des multiplex parmi les logements ayant des coordonnées géographiques identiques .....	65
Tableau 2. Distribution des doublons par type d'occupation Hazus .....	65

## RÉSUMÉ EXECUTIF

Le présent rapport détaille les différentes étapes pour parvenir à une évaluation des dommages au bâti résidentiel ainsi qu'à ces occupants dans l'hypothèse d'un séisme majeur dans la région de Montréal. La version canadienne HazCan de l'outil Hazus (FEMA) est utilisée pour cette analyse. L'étude porte sur la région de la Communauté Métropolitaine de Montréal (CMM) et complète l'analyse effectuée en 2017 sur l'île de Montréal. Elle comporte 19 municipalités régionales de comté incluant 66 municipalités recouvrant une superficie d'environ 3740 km<sup>2</sup>.

Dans un premier temps les informations démographiques du dernier recensement de 2016 à l'échelle des aires de dissémination (un total de 2915 aires) ont été collectées et mises en forme. La population de la zone d'étude est d'environ 1.92 million soit 1/4 de la population du Québec.

La base de données du rôle foncier pour 2018 a permis un décompte du bâti par types d'occupation (maisons unifamiliales et différents types de multiplex) à la même échelle. L'analyse porte sur plus de 523 000 bâtiments. Les maisons unifamiliales représentent plus de 86% du total, les duplex et les triplex comptant pour un peu moins de 6 et 4%, respectivement. Les 4% restant sont répartis entre les différents multiplex de plus de 4 logements et les maisons mobiles.

La répartition par types de construction montre que 96% des bâtiments sont à ossatures légères de bois (W1), 1.3% en maçonnerie et 2.7% en béton. Pour chacun des types, une distribution par niveaux de conception parasismique est déduite de la période construction.

Les surfaces moyenne et totale ainsi que la valeur foncière du bâti par types d'occupation sont déduites des données du rôle foncier. Les données de CatIQ ont été utilisées pour estimer finement la valeur du contenu à l'échelle des régions de tri d'acheminement. Le bâti représente un total d'environ 73 millions de m<sup>2</sup>, 72% de cette surface étant attribuée aux maisons unifamiliales, 6% au duplex, 6% au triplex et 16% sont répartis plus ou moins également entre les autres multiplex et les maisons mobiles. Le portefeuille immobilier résidentiel est de l'ordre de 190.2 milliards de Can\$ alors que le contenu est d'environ 60 milliards. Les maisons unifamiliales comptent pour 80% de ce portefeuille.

Une compilation des données géophysiques et géologiques ainsi qu'une nouvelle approche d'interpolation a permis de construire un premier zonage sismique en termes de classes de sol (déduites des valeurs estimées de  $V_{s30}$ ) sur tout le territoire de la CMM. Cette information est ensuite utilisée pour prendre en compte l'influence des conditions de site sur les mouvements du sol.

Six scénarios déterministes et un scénario purement probabiliste sont proposés. Ils combinent les données sismiques et les analyses probabilistes les plus récentes de l'aléa sismique (entre autres une mise à jour de la désagrégation de l'aléa sismique par Séisme Canada). Les scénarios sont les suivants:

- Un scénario intermédiaire regroupant 4 scénarios **SC1 à SC4** localisés dans des zones où la sismicité ambiante est supérieure à la normale. Leur magnitude est fixée à 7.0, valeur qui correspond à la plus forte contribution à l'aléa sismique pour une distance au centre de Montréal entre 50 et 60 km.

- Un scénario extrême (**SC6**) localisé au NE de la région d'étude de magnitude M 6.7, valeur correspondant à la plus forte contribution à l'aléa sismique pour une distance au centre de Montréal de 30km.

- Un scénario centre (**SC5**) correspondant à un séisme au centre de Montréal de magnitude M 5.8, valeur estimée du séisme historique de 1732.

Un scénario probabiliste (**SP**) calculé pour le centre de Montréal pour une période de retour de 2 475 ans (probabilité annuelle de dépassement de 0.000404) reprenant les valeurs de mouvements du sol préconisées par le CNB-2015.

Une relation d'atténuation composite (CEUS08), proposée pour toute la côte Est de l'Amérique du Nord dans Hazus, est utilisée pour calculer les différents paramètres du mouvement du sol qui sont ensuite ajustés aux conditions de site fournies par la carte de microzonage en termes de classes de sol.

Suivant le scénario sélectionné, les calculs indiquent que :

- 0.1% à 4.8% des bâtiments pourraient subir des dommages importants et très importants. Les ossatures légères en bois représentant 35 à 65% des bâtiments endommagés.
- 25% à 40% des bâtiments pourraient subir des dommages légers à modérés. Les ossatures légères en bois représentant 85 à 95% des bâtiments endommagés.
- Le coût des dommages représente de 0.02 à 0.07% de la valeur totale du bâti résidentiel si l'on inclut la valeur du contenu. Elle est inférieure, de 0.01 à 0.05%, en ne considérant que les dommages structuraux et non-structuraux.
- Le nombre de blessés est faible et souvent non significatif à l'échelle de la CMM. Toutefois, selon le scénario considéré, certaines zones de la CMM pourraient avoir un nombre de blessés plus élevé.
- Le besoin en hébergement d'urgence concerne entre 2 000 et 15 000 personnes.
- La quantité de débris à gérer varie de 0.2 à 2.1 millions de tonnes, l'acier et le béton représentant en moyenne 73% des débris.

Des tests sur l'influence de plusieurs paramètres de la chaîne de calcul Hazus sur les résultats ont aussi été réalisés.

Une étude spécifique des courbes de capacité utilisées par Hazus pour les bâtiments à ossatures légères en bois a permis de valider leur variation en fonction de l'évolution du mode constructif. Ces variations influencent très faiblement les résultats des calculs.

Le microzonage sismique proposé influence très faiblement les résultats des scénarios SC6 et SC5 car leur localisation et la localisation des sols les plus sensibles ne sont pas en concordance à cette échelle d'analyse.

Le choix de la relation d'atténuation influence largement la distribution des valeurs de mouvements du sol sur la CMM et donc toute la chaîne de calculs. En l'état des connaissances et du niveau de validation très faible dans le choix de la relation d'atténuation, les résultats de cette analyse doivent être considérés comme prospectif. Le calcul avec le scénario probabiliste d'aléa sismique SP proposé par Séisme Canada donne des résultats similaires à ceux obtenus avec les scénarios déterministes intermédiaires (SC1 à SC4). Ils sont à considérer comme des scénarios standards. Les deux autres scénarios SC5 et SC6 représentent des cas maximum crédibles. Il convient de choisir les uns ou les autres en fonction des objectifs visés.

# 1. Introduction

Les études de la Commission Géologique du Canada (CGC), ainsi que du milieu de la recherche, indiquent que la région de Montréal est une région susceptible de subir des dommages aux bâtiments d'importance suite à un séisme de magnitude d'environ 6 sur l'échelle de Richter. Plusieurs études et travaux dans cette région ont déjà été réalisés pour mieux connaître ce risque (e.g. Rosset et al., 2019a ; Yu et al., 2016 ; BAC, 2013 ; Rosset et Chouinard, 2013).

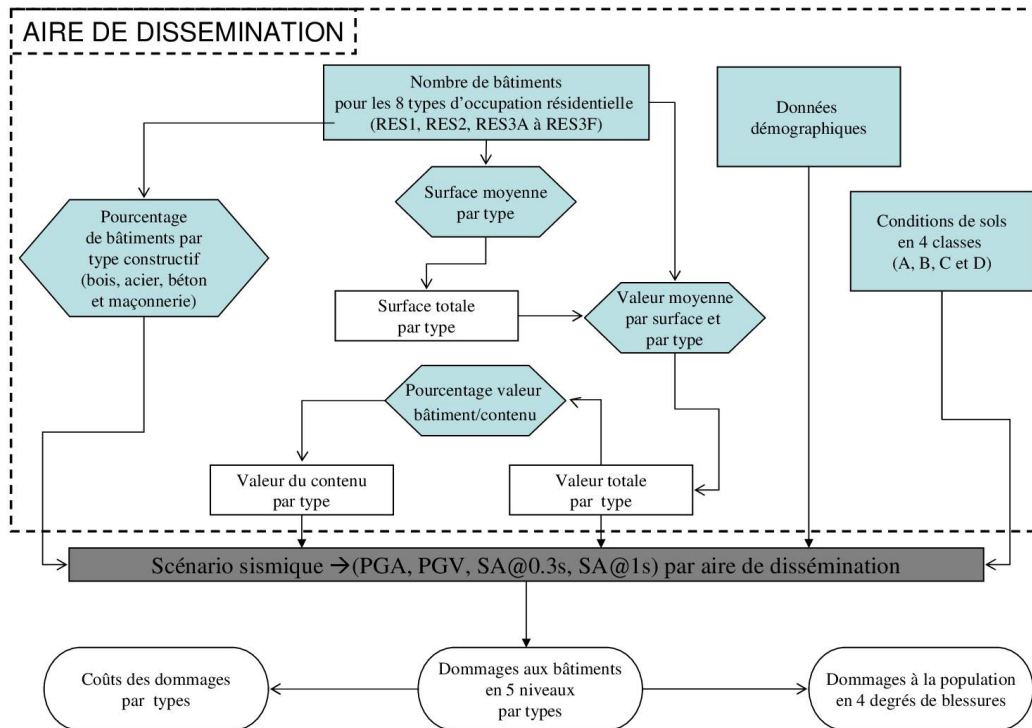
La première phase du projet d'analyse du risque sismique résidentiel commandité par le Ministère de la Sécurité publique (MSP) a porté sur l'île de Montréal (Rosset et al., 2019b ; Chouinard et al., 2017). Suivant les scénarios sismiques envisagés, les résultats ont montré que :

- Les dommages pouvaient toucher 25 à 60% du bâti résidentiel, 2 à 12% des bâtiments étant fortement endommagés.
- Le coût total des dommages pouvait représenter 2 à 12% de la valeur totale du bâti résidentiel (environ 87 milliards de \$Can) et que 80% de ce coût serait lié à des dommages non structuraux.
- La quantité de déblais générés pouvait varier de 0.2 à 6 millions de tonnes, constituée à 60% de bois et brique.
- Le nombre de personnes grièvement blessées pouvait ne pas être nul.
- Le nombre de personnes nécessitant des soins hospitaliers pouvait varier de plusieurs centaines à plusieurs milliers.
- Le nombre de personnes ayant besoin d'un hébergement temporaire pourrait varier de 4 000 à 50 000.

Suite à cette première étude, le MSP a demandé d'étendre l'analyse pour le bâti résidentiel à toutes les municipalités de la Communauté métropolitaine de Montréal (CMM). Le présent rapport fait la synthèse des résultats de cette analyse complémentaire qui s'est étalée durant la période de mai 2018 à septembre 2020.

Pour rappel, une telle analyse nécessite d'avoir des données sur l'aléa sismique (accélérations de pointe et contenu fréquentiel), sur la nature des sols (les sols meubles pouvant modifier les mouvements du sol), sur les bâtiments concernés (nombre et répartition géographique) et leurs caractéristiques (matériaux de construction, système structural, etc.) ainsi que sur le nombre de personnes occupant ces bâtiments durant la journée et la nuit. Pour cette étude, la version canadienne d'Hazus, HazCan est utilisée (Ulmi et al., 2014). Hazus est un outil développé par la FEMA et est largement utilisé aux USA pour l'analyse fine des risques liés aux différents aléas naturels (FEMA, 2003).

Les informations récoltées et décrites dans les chapitres suivants constituent la base de données du logiciel HazCan. Les données de population sont utilisées pour estimer le nombre de victimes alors que les données concernant le bâti permettent d'estimer les dommages ainsi que les conséquences et les coûts liés à ces dommages. Le diagramme de la Figure 1 montre les étapes suivies pour fournir les informations requises par HazCan et aboutir aux différents résultats pour un scénario sismique donné. Ce mandat porte sur les bâtiments résidentiels à l'échelle des aires de dissémination (AD) telles que définies par Statistique Canada.



**Figure 1. Procédure de calcul utilisée par Hazus.**

(cases bleues) Données à fournir à Hazus (cases blanches) Données calculées par Hazus.

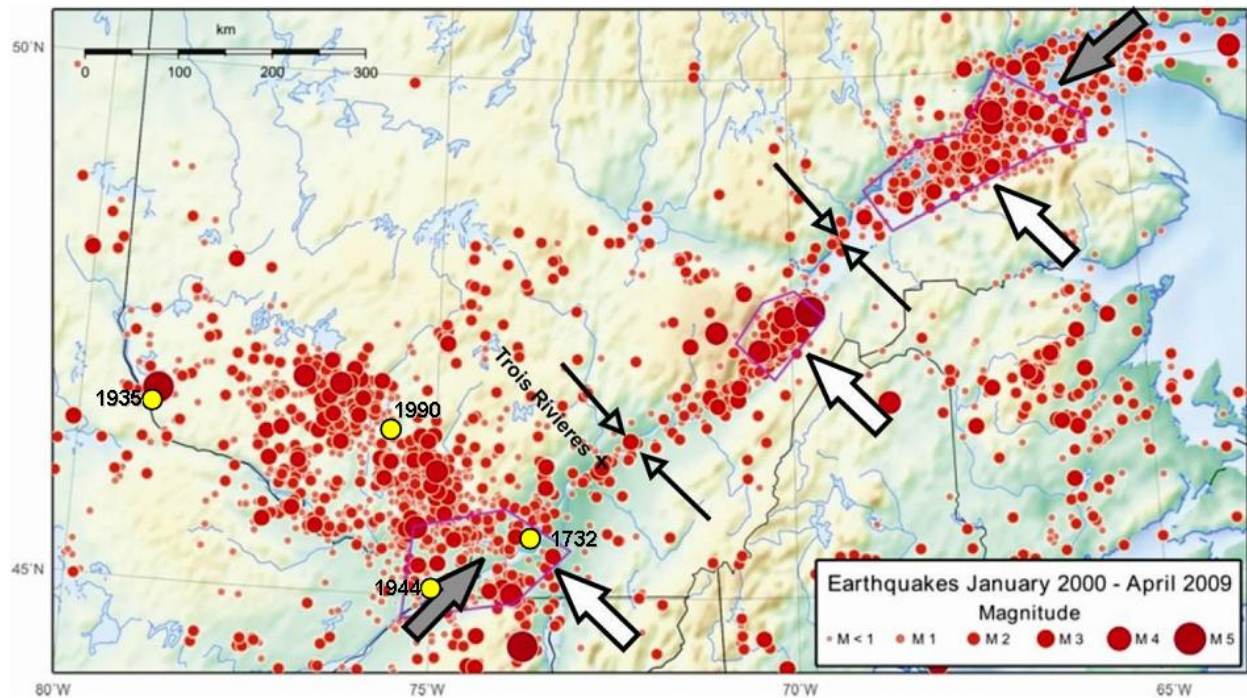
## 2. Contexte sismique et aléa sismique

### 2.1. Contexte sismique local

La localisation des séismes récents et historiques sur la carte de la Figure 2 montre deux bandes principales d'activité qui sont associées à deux régimes tectoniques régionaux en phase de rééquilibrage (Adams et Basham, 1991) :

- Une première bande, orientée NE-SO, suit le fleuve Saint-Laurent et la rivière des Outaouais. Trois séismes majeurs se sont produits dans cette zone ; en 1732 proche de Montréal (Magnitude  $M=5.8$ ), en 1944 à Cornwall ( $M=5.8$ ) et en 1988 proche de Chicoutimi ( $M=6.0$ ). Cette sismicité est liée aux failles normales du Cambrien (540-480 Ma B.P.<sup>1</sup>) générées lors de la formation du rift dans la province de Grenville.
- Une seconde bande, orientée NO-SE, s'étire des collines Montérégiennes au réservoir Baskatong (200km au NO de Montréal). C'est le lieu d'un séisme en 1935 proche de Témiscamingue ( $M=6.2$ ) et d'un séisme de magnitude 5 qui a eu lieu près de Mont-Laurier en 1990. Bien que la relation entre la localisation des séismes et les failles n'est pas très claire, Adams et Basham (1991) suggèrent que cette activité est liée à la fracturation engendrée par la montée du magma lors du passage de la croûte terrestre sur une zone de point chaud au mésozoïque (250-70 Ma B.P.).

<sup>1</sup> Millions d'années avant le présent



**Figure 2. Localisation des séismes dans le SE du Canada pour la période 2000-2009.** Des événements de faible magnitude délimitent le rift avorté du Saint-Laurent (flèches noires) qui est à l'origine des séismes dans les trois zones indiquées par les flèches blanches. Les flèches grises délimitent la marge passive ancienne (modifiée d'après Adams, 2011). Les ronds jaunes localisent les séismes mentionnés dans le texte et le Tableau 1.

## 2.2. Estimation des mouvements du sol

L'historique des événements sismiques ayant causé des dommages autour de Montréal est pauvre comme l'indique le Tableau 1. La valeur maximale observée en termes d'intensité sur l'échelle de Mercalli Modifiée (MMI) est fournie par le séisme du 16 septembre 1732 proche de Montréal et est estimée à IX. Bien que la localisation de ce séisme est incertaine, il fixe une première estimation de la magnitude maximale à l'épicentre qu'il faudrait prendre en compte pour un séisme très proche de Montréal ; de l'ordre de 6. En termes d'accélération maximale du sol (ou PGA) et en l'absence de station de mesure, une intensité V équivaut à une valeur de PGA de l'ordre de 0.05g ( $g=9.81 \text{ m/s}^2$ ), VI à 0.15g et IX à 0.4g. Les analyses probabilistes de séisme Canada nous indiquent que, en moyenne pour cette région, un séisme de magnitude 6 et plus peut se produire tous les 100 ans, 4 de magnitude entre 5 et 6 et 40 de magnitude entre 4 et 5.

Date	Latitude N	Longitude O	Magnitude $M_w$	Distance épicentre p/r à Montréal (km)	Intensité MMI à Montréal
1732/09/16	45.5	73.6	5.8*	0 ?	IX
1935/11/01	46.8	79.1	6.1*	450	IV
1944/09/05	45	74.9	5.8*	120	V-VI
1988/11/25	48.1	71.2	5.9	350	V

**Tableau 1. Séismes majeurs historiques et récents.**

\* la valeur de magnitude est estimée sur la base de l'intensité maximale décrite.

**Échelle d'intensité MMI :**

(IV) À l'intérieur, la plupart des gens ressentent un mouvement. Les objets suspendus bougent, mais aussi les fenêtres, plats, assiettes, loquets de porte.

(V) La plupart des gens ressentent le mouvement. Les personnes sommeillant sont réveillées. Les portes claquent, la vaisselle se casse, les tableaux bougent, les petits objets se déplacent, les arbres oscillent, les liquides peuvent déborder de récipients ouverts.

(VI) Tout le monde sent le tremblement de terre. Les gens ont la marche troublée, les objets et tableaux tombent, le plâtre des murs peut se fendre, les arbres et les buissons sont secoués. Des dommages légers peuvent se produire dans des bâtiments mal construits, mais aucun dommage structural.

(IX) Tous les immeubles subissent de gros dommages. Les maisons sans fondations se déplacent. Quelques conduits souterrains se brisent. La terre se fissure (selon Séismes Canada, 2013).

Ces vingt dernières années, plusieurs séismes de magnitude modérée ont été ressentis à Montréal (Tableau 2). Les données collectées par le système Did You Feel It (DYFI)<sup>2</sup> canadien permettent d'étudier la distribution géographique en termes de MMI de ces séismes. Une analyse statistique du ressenti à Montréal montre une variabilité d'un à trois ordres de grandeur en termes d'intensité pour des localisations proches (Rosset et al., 2020). Les enregistrements accélérométriques disponibles sur les quatre stations installées à Montréal depuis 2009 indiquent des valeurs de PGA inférieures à 0.01g.

Date du séisme	Magnitude	Lat.	Long.	Distance à la source (km)	Nombre de rapports	% de rapports en termes de MMI				
						I-II	III	IV	V	VI
1988/11/25	M5.9	48.12	-71.18	327-356	535	31%	41%	26%	3%	
2002/04/20	M5.0	44.53	-73.73	101-133	319		9%	87%	4%	
2010/06/23	M5.0	45.90	-75.50	130-160	267	42%	40%	13%	2%	
2012/10/10	MN4.5	45.69	-73.20	26-76	7509	21%	37%	34%	7%	1%
2012/11/06	M3.9	45.62	-75.03	118-188	764	44%	49%	6%		
2013/05/17	M4.5	45.73	-76.34	184-242	123	81%	18%	2%		
2020/03/06	MN3.3	45.62	-73.51	21-50	1103	47%	31%	19%	2%	

**Tableau 2. Séismes récents ressentis à Montréal et distributions en termes de MMI.**

La variabilité du ressenti en termes de MMI est fonction de la distance au séisme et aux éventuelles amplifications liées aux sols meubles (Données : Séismes Canada).

Le Code National du bâtiment considère les mouvements du sol calculés pour une période de retour de 2 475 ans, soit une probabilité de dépassement de 2% en 50 ans (CNB-2015). Pour la région de Montréal, Séismes Canada<sup>3</sup>, responsable des calculs de mouvements du sol, indique pour cette période de retour une valeur moyenne de PGA horizontale de 0.38g ( $g=9.81 \text{ m/s}^2$ ). Les valeurs de vitesse maximale du sol (PGV) et d'accélération spectrale  $S_a(T)$  pour 6 périodes spectrales T sont aussi disponibles pour construire un spectre de référence utile au dimensionnement des structures (Tableau 3).

<sup>2</sup> Did You Feel It, Ressources Naturelles Canada : <https://earthquakescanada.nrcan.gc.ca/dyfi-lavr/index-fr.php>

<sup>3</sup> [www.seismescanada.nrcan.gc.ca](http://www.seismescanada.nrcan.gc.ca)

Probabilité de dépassement (Prob. annuelle)	Valeurs médianes d'aléa sismique (en g)							
	Sa(0.2)	Sa(0.5)	Sa(1.0)	Sa(2.0)	Sa(5.0)	Sa(10.0)	PGA	PGV
2% en 50 ans (0.000404 par an)	0.597	0.312	0.149	0.068	0.018	0.0062	0.379	0.257

**Tableau 3. Valeurs d'aléa sismique à adopter pour Montréal selon le CNB-2015.**

Les valeurs médianes (50th percentile) sont exprimées en unité de g ( $9.81\text{m/s}^2$ ) et calculées pour un sol ferme de classe C ( $V_{s30}$  moyen entre 360 et 450m/s).  $Sa(T)$  est l'accélération spectrale pour la période  $T$  (en s),  $PGA$  est l'accélération maximale du sol et  $PGV$  est la vitesse maximale du sol (en m/s). (Source : Séismes Canada, Coordonnées du site : 45.52 °N 73.64°O).

### 3. Cartographie des conditions de sol

La définition des conditions locales de sol est primordiale afin de prendre en compte les phénomènes de modifications des ondes sismiques que peuvent engendrer les sols meubles. Les dépôts argileux, sableux et les tourbes sont des sols qui peuvent typiquement engendrer une augmentation de l'amplitude des ondes sismiques et de la durée des mouvements du sol.

Ces phénomènes ont été observés sur l'île de Montréal à plusieurs reprises, et plus particulièrement lors du séisme du Saguenay en 1988 ( $M_w=5.9$ ) qui a eu lieu à plus de 350km de Montréal. L'hôtel de ville de Montréal-Est a subi de telles amplifications qui sont à l'origine de dommages au bâtiment (fissures et chute d'une partie du revêtement en maçonnerie) déjà fragile de par sa construction et son état. L'île de Montréal a fait l'objet de plusieurs études visant à caractériser les conditions de sol au-dessus du roc (e.g. Rosset et al., 2015, Rosset et Chouinard, 2009).

Les sols sont classés en cinq classes de A à E plus une classe spéciale F. Cette classification se base entre autres sur la valeur moyenne de vitesse des ondes sismiques de type S sur les 30 premiers mètres d'épaisseur au-dessous du site, dénommée  $V_{s30}$ . Le Tableau 4 montre les gammes de valeur de  $V_{s30}$  pour chaque classe de sol. L'influence des sols est ensuite prise en compte en appliquant un facteur de correction aux différents paramètres de mouvement du sol calculés dans Hazus. Ce facteur de correction est variable selon la classe de sol et l'amplitude du mouvement du sol (CNB-2015) tel qu'illustré dans le Tableau 4 pour le PGA. Des facteurs de corrections sont aussi appliqués pour les valeurs de PGV,  $Sa(0.3s)$  et  $Sa(1s)$ .

	Valeurs de $V_{s30}$ selon la classe de sol (CNB-2015)				
	A	B	C	D	E
$V_{s30}$ (m/s)	> 1500	760-1500	360-760	180-360	< 180

PGA (g)	Facteur multiplicatif du PGA selon la classe de sol et le niveau de PGA				
	A	B	C	D	E
0.1	0.70	0.80	1.00	1.30	2.10
0.2	0.70	0.80	1.00	1.20	1.40
0.3	0.80	0.90	1.00	1.10	1.10
0.4	0.80	1.00	1.00	1.10	0.90
0.5	0.80	1.00	1.00	1.00	0.90

**Tableau 4. Classification des sols selon le CN-2015 et facteur correctif du PGA**

### 3.1. Collecte de données pour l'élaboration du microzonage.

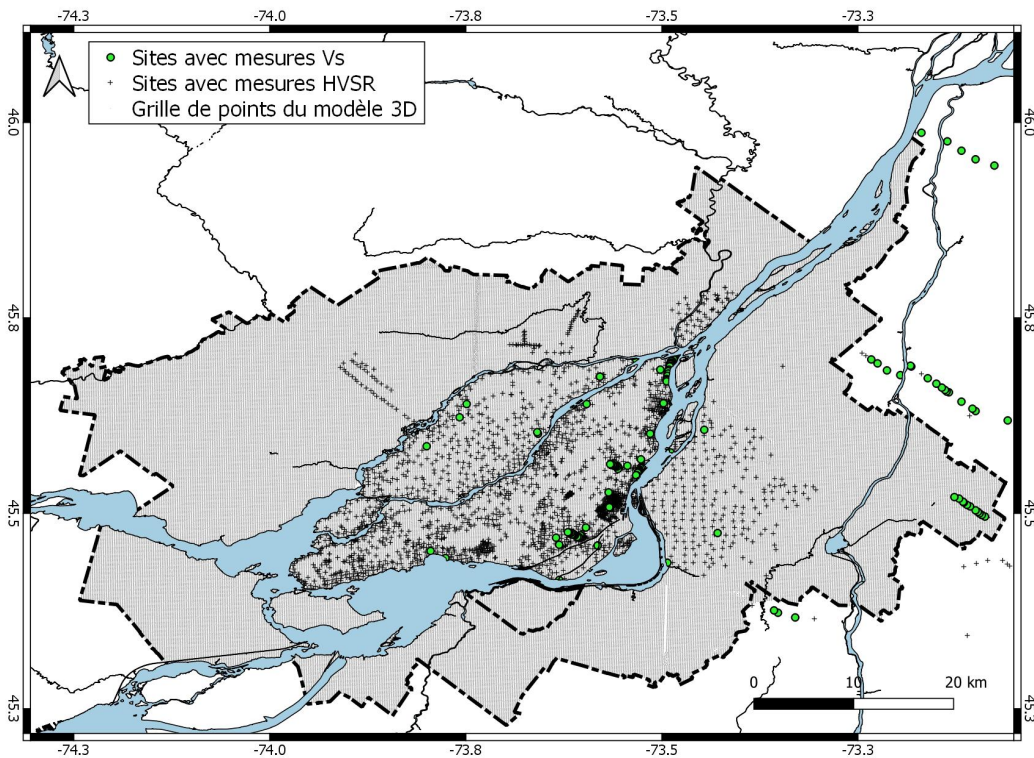
De nombreux contacts ont été pris afin de compléter les données existantes sur la géologie de surface et les informations en profondeur de la zone couvrant la CMM. Nous disposons de plusieurs sources d'information pour décrire les conditions de sites sur toute la zone du projet :

- Le microzonage proposé dans le cadre d'une analyse du risque sismique de la ville de Laval (Rosset et Chouinard, 2013).
- Le microzonage préliminaire proposé dans le cadre d'une analyse des conditions de site de la ville de Longueuil (Rosset et Chouinard, rapport interne, 2010).
- Un travail de recherche sur les conditions de site de la ville de Repentigny (Rosset et Chouinard, rapport interne, 2010).
- Un travail de recherche sur les conditions de site de la vallée du Richelieu et de la région de Chateauguay (Rosset, 2015) sur la base des données de Benoit et al. (2013) et Tremblay et al. (2010), respectivement.
- Un modèle géologique en 3 dimensions de la région de Mirabel fourni par Ross et al. (2005). Un modèle géologique simplifié en 3 dimensions couvrant le corridor du fleuve Saint-Laurent entre Québec et Ottawa fourni par Martin Ross (Département des sciences de la Terre et de l'environnement, Université de Waterloo) en 2018.
- La carte des formations superficielles qui couvre la ville de Laval et la partie nord de Sainte-Thérèse à Mascouche (Bolduc et Ross, 2001).
- La carte de l'épaisseur des dépôts meubles de la vallée du Saint-Laurent (Ressources Naturelles Canada, 2004).

Toutes ces informations aident à produire une cartographie en termes de  $V_{s30}$  (vitesse moyenne des ondes S sur les trente premiers mètres de sol) et en classes de site (selon la nomenclature du CNB-2015) qui est utilisée ensuite dans HazCan pour prendre en compte les effets de site liés au sol dans chacune des aires de dissémination de la région d'étude. Les données disponibles pour estimer la valeur de  $V_{s30}$  sont divisées en trois sous-catégories selon la provenance des informations de base comme illustré dans la Figure 3.

### 3.2. Les profils de $V_s$ (Vitesse de cisaillement des ondes S)

Les profils de  $V_s$  sont déterminés à l'aide de diverses méthodes sismiques actives. Ces profils permettent de calculer directement les valeurs de  $V_{s30}$  avec une incertitude faible. Des valeurs sont disponibles pour 880 sites dont 27 à l'intérieur de la CMM, localisés par des ronds rouges sur la carte de la Figure 3 (données McGill et Ressources naturelles Canada).



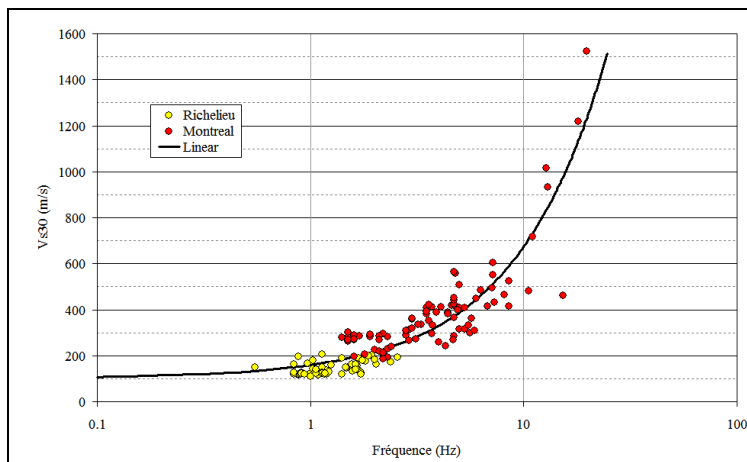
**Figure 3. Localisation des données utiles pour le microzonage en classe de sols.**

Cette carte indique la position des sites de mesures de  $V_s$  (ronds verts), de  $f_0$  (symbole +) et les points de la grille régulière du modèle 3D fourni par Ross (points gris).

### 3.3. La fréquence prédominante de résonance des sols $f_0$

La fréquence prédominante de résonance des sols  $f_0$  est obtenue en analysant les enregistrements de bruit sismique par la méthode HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio). Les mesures conduites dans différentes régions de la CMM nous ont permis de formuler une relation entre cette fréquence  $f_0$  et  $V_{s30}$  (pour plus de détails, se référer à Chouinard et Rosset, 2011). 159 sites pour lesquels les deux paramètres sont directement disponibles permettent de valider l'équation linéaire [eq. 1] présentée en trait noir sur la Figure 4 pour des épaisseurs de sols meubles allant jusqu'à 50m. Son coefficient de détermination, noté  $R^2$ , est de 0.89 et elle s'exprime sous la forme de :

$$V_{s30} = 101.8 + 57.2 \times f_0 \quad [\text{eq. 1}]$$



**Figure 4. Relation entre la fréquence prédominante du site obtenue par la méthode HVSR et l'estimation de  $V_{s30}$ .**

Chaque rond correspond à un site de mesure pour lequel nous avons à la fois la valeur de  $f_0$  et la valeur de  $V_{s30}$  pour les régions de Montréal et Richelieu. La courbe en noire représente la relation qui passe le plus près de tous les points du graphe (équation 1).

Un total de 2 543 sites avec une valeur de  $f_0$  incluant l'île de Montréal, dont 1 882 sites à l'extérieur de l'île, sont indiqués par des "+" sur la carte de la Figure 3.

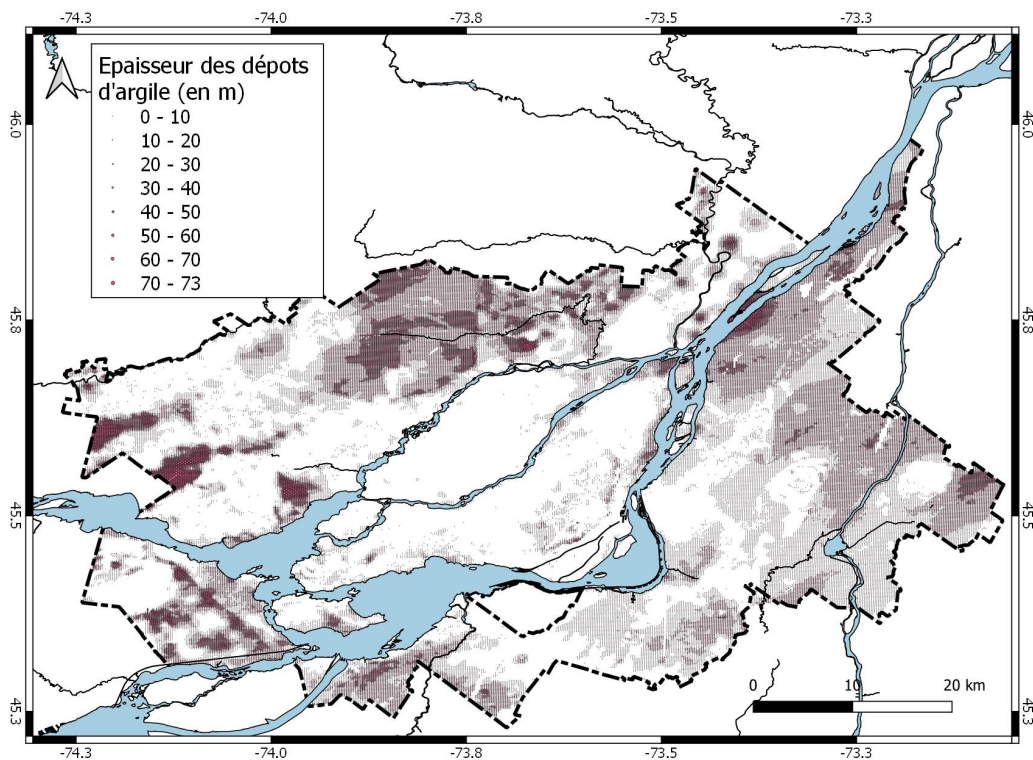
### 3.4. Le modèle géologique multicouches en trois dimensions

Le modèle 3D multicouches fourni par Martin Ross (Département des sciences de la Terre et de l'environnement, Université de Waterloo) couvre tout le territoire de la CMM et comporte 133 504 points répartis régulièrement sur une grille carrée de 180m environ incluant l'île de Montréal. Ce modèle comporte trois couches pour lesquelles l'épaisseur est disponible (les sables d'origine fluviolacustres, les argiles marines et les tills glaciaires) ainsi que l'altitude du roc. La carte de la Figure 5 montre l'estimation de l'épaisseur des argiles de la Mer de Champlain en se basant sur les données de ce modèle.

Ces informations permettent de calculer la valeur de  $V_{s30}$  en tous les points du modèle 3D en utilisant la formule suivante :

$$V_{s30} = 30 / [H_{\text{sable}}/V_{s_{\text{sable}}} + H_{\text{argile}}/V_{s_{\text{argile}}} + H_{\text{till}}/V_{s_{\text{till}}} + (30 - H_{\text{sable}} + H_{\text{argile}} + H_{\text{till}})/V_{s_{\text{roc}}}] \quad [\text{eq. 2}]$$

H est l'épaisseur et  $V_s$  la vitesse moyenne des ondes S de chaque couche. Les indices indiquent le type de dépôts de chaque couche considérée.

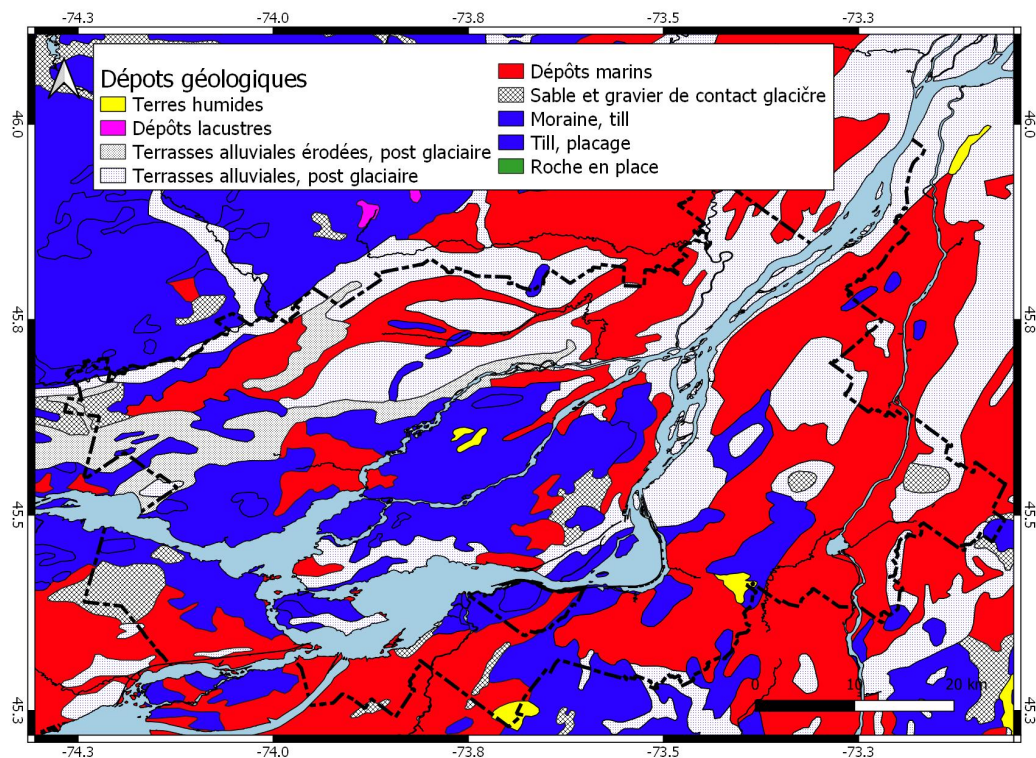


**Figure 5. Épaisseur de la couche des argiles de la Mer de Champlain.**

*Cette carte est une interprétation des données du modèle géologique 3D de Ross et al. (2015).*

### 3.5. La carte géologique des dépôts de surface

La carte géologique des dépôts de surface de la Figure 6 à l'échelle 1/1 000 000 (Ressources Naturelles Canada) permet de délimiter plus finement les zones de tills (en bleu) et le roc (en vert) qui ont des valeurs de  $V_{s30}$  supérieures à 360m/s.



**Figure 6. Carte géologique simplifiée.**

*Cette carte délimite les principaux dépôts visibles en surface à l'échelle 1/1'000'000 (Ressources Naturelles Canada).*

### 3.6. Interpolation des données disponibles

Une nouvelle approche d'interpolation est proposée pour ce projet, intégrant plusieurs sources de données et prenant en compte l'incertitude de chaque source ;  $V_{s30}$  étant le paramètre à interpoler. L'incertitude sur l'estimation de  $V_{s30}$  croît selon la source de données dans l'ordre suivant :

- données de profils  $V_s$  ;
- données de mesures de bruit sismique  $f_0$  ;
- modèle 3D ;
- cartographie des dépôts de surface.

La valeur de  $V_{s30}$  est directement calculée avec les profils de vitesse. Alors qu'elle est estimée en utilisant l'équation [1] à partir de la valeur  $f_0$  pour les sites HVSR. L'utilisation du modèle 3D nécessite une analyse complémentaire afin de déterminer les profils de vitesse  $V_s$  les mieux adaptés aux sables et argiles ainsi que les valeurs de  $V_s$  à prendre pour les tills et le roc.

Deux sets de relations sont utilisés, celui développé pour Montréal (Rosset et al., 2015) et celui développé à l'échelle du bassin du Saint-Laurent concomitamment au modèle 3D par Nastev et al. (2016) comme indiqué dans le Tableau 5.

Types de dépôt	Sables fluvio-lacustres		Argiles de Champlain		Tills glaciaires		Roc	
	Vs (m/s)	$\sigma$ (m/s)	Vs (m/s)	$\sigma$ (m/s)	Vs (m/s)	$\sigma$ (m/s)	Vs (m/s)	$\sigma$ (m/s)
Rosset et al. (2015)	$144.8 + 36.8 Z^{0.57}$	54	$121.2 + 40.8 Z^{0.43}$	43	565	261	2300	500
Nastev et al. (2016)	$119 + 8.1 Z^{0.50}$	47	$119 + 8.1 Z^{0.50}$	47	385	152	1500	500

**Tableau 5. Profils de vitesse Vs pour les quatre types principaux de dépôts de la région de Montréal.**

Les profils de vitesse Vs sont indiqués pour les sables et argile en fonction de la profondeur Z. Pour les tills et le roc, seule la vitesse moyenne Vs est fournie.  $\sigma$  est l'écart-type.

Les relations et valeurs indiquées dans le Tableau 5 permettent d'estimer la vitesse moyenne dans chaque couche du modèle 3D et ainsi de calculer une valeur moyenne de  $V_{s30}$  à l'aide de l'équation [2]. La valeur de Vs de la couche de sable est calculée en prenant la moitié de son épaisseur  $H_{sable}$  pour la profondeur Z. Pour la couche d'argile sous-jacente, la profondeur correspond à l'épaisseur des sables plus la moitié de l'épaisseur de la couche d'argile ( $H_{sable} + 0.5 H_{argile}$ ). Pour les tills et le roc, Vs a une valeur fixe. L'équation [2] s'écrit alors :

$$V_{s30} = 30 / \left[ \frac{0.5 * H_{sable} / V_{s_{sable}} + (H_{sable} + 0.5 * H_{argile}) / V_{s_{argile}} + H_{till} / V_{s_{till}} + (30 - H_{sable} + H_{argile} + H_{till}) / V_{s_{roc}}}{H_{till}} \right] \quad [\text{eq. 3}]$$

Le Tableau 6 indique les valeurs de *Root Mean Square* (RMS) calculées entre les valeurs de  $V_{s30}$  calculées à l'aide des profils sismiques (les plus précis) et celles dérivées des valeurs de  $f_0$  ou du modèle 3D. Seuls les sites avec des données Vs à moins de 250m d'un point de la grille du modèle 3D ou d'un site avec  $f_0$  sont pris en compte, soit 108 sites. Pour cette comparaison, les valeurs moyennes et l'écart-type inférieur du Tableau 5 sont utilisés.

Valeurs et relations utilisées	RMS (en ms/s)
<b>Valeur moyenne <math>f_0</math> (Rosset et al., 2015)</b>	<b>247</b>
Valeurs moyennes Rosset et al. (2015)	508
Valeurs moyennes Nastev et al. (2016)	313
Valeurs "- sigma" sables et argiles Rosset et al. (2015)	468
Valeurs "- sigma" sables et argiles Nastev et al. (2016)	297
Valeurs "- sigma" sables, argiles et tills Rosset et al. (2015)	411
Valeurs "- sigma" sables, argiles et tills Nastev et al. (2016)	293
Valeurs "- sigma" toutes les couches Rosset et al. (2015)	343
Valeurs "- sigma" toutes les couches Nastev et al. (2016)	248

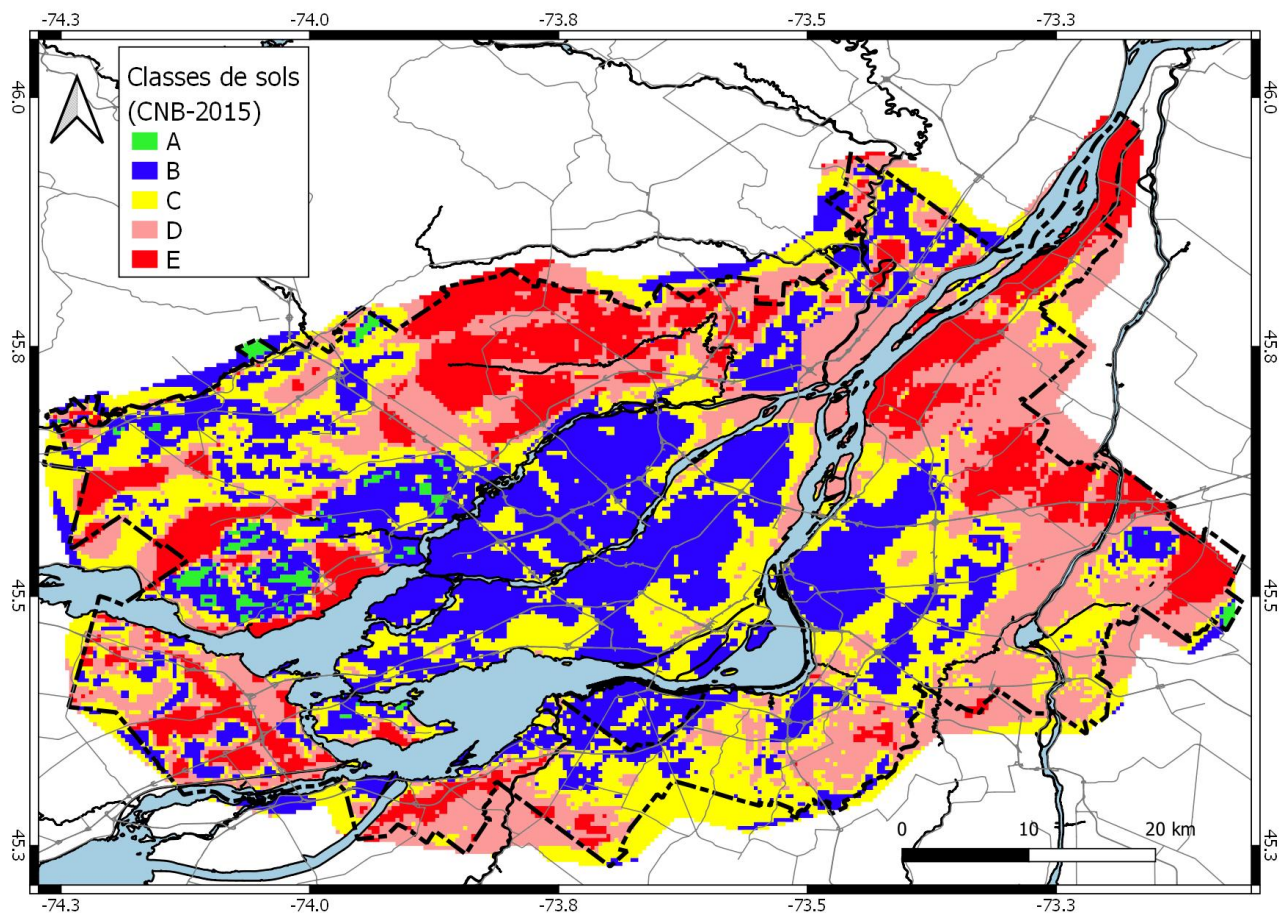
**Tableau 6. Incertitudes des valeurs de  $V_{s30}$  dérivées des mesures de bruit sismique et du modèle géologique 3D.**

Le RMS compare les valeurs de  $V_{s30}$  déduites des mesures sismiques de Vs et celles dérivées soit de la fréquence de résonance  $f_0$  ou du modèle géologique 3D. Pour ce dernier, les relations de Rosset et al. (2016) et Nastev et al. (2016) sont utilisées pour déterminer la valeur Vs des différentes couches du modèle. Les valeurs moyennes et l'écart type minimum sont comparés.

Les résultats d'analyse du Tableau 6 nous permettent de conclure que :

- 1- La relation utilisant  $f_0$  fournit la meilleure estimation de  $V_{S30}$ .
- 2- Les valeurs de  $V_s$  fournies par Nastev et al. (2016) sont mieux adaptées au modèle 3D (i.e. RMS plus faible) que les valeurs proposées par Rosset et al. (2015).
- 3- Les valeurs minimales de  $V_s$ , en prenant en compte la borne inférieure de l'écart-type, appliquées à chacune des couches fournissent le plus faible résultat.

En conclusion, nous adoptons les modèles de vitesse proposés par Nastev et al. (2016) pour le calcul de  $V_{S30}$  à l'aide du modèle géologique 3D. L'équation qui permet de calculer la vitesse dans les sables et les argiles en fonction de leur profondeur  $Z$  est  $V_s = 119 + 8.1 Z^{0.50}$  en prenant la valeur minimale et en soustrayant l'écart-type de 47 m/s. Pour les tills et le roc, les valeurs moyennes sont conservées, car les écarts-types sont trop importants. Le processus d'interpolation de valeurs de  $V_{S30}$  déduites des différentes sources de données utilisées fera l'objet d'un article dans une revue à comité de lecture. La carte de la Figure 7 montre le zonage final en termes de classes de sol qui est utilisé pour prendre en compte la nature du site dans le calcul des mouvements du sol.



**Figure 7. Zonage sismique en termes de classes de sol (CNB-2015).**  
*Ce zonage est utilisé pour prendre en compte les effets de site.*

#### 4. Données sur la population

La CMM compte 82 municipalités, dont 16 sont situées sur l'île de Montréal, regroupées dans 19 municipalités régionales de comté (MRC) tel que montré sur la carte de la Figure 8. La liste du

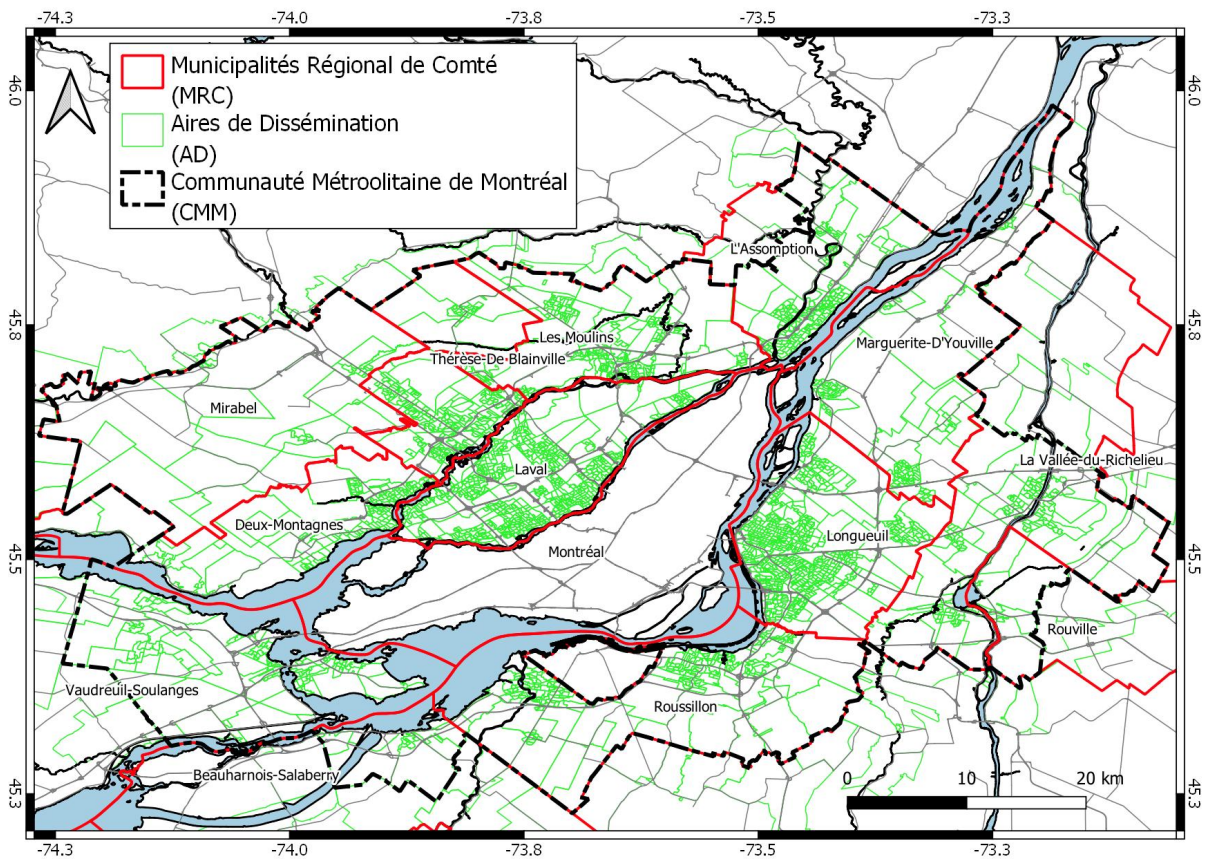
Tableau 7 regroupe les MRC qui font l'objet de cette étude. L'agglomération de Montréal ayant été couverte par le premier mandat tel que mentionné précédemment.

Cette étude est effectuée à l'échelle des aires de dissémination (AD) telles que définies par Statistique Canada. La zone d'étude d'une surface d'environ 3 740 km<sup>2</sup> comprend 2 915 AD identifiées par un numéro spécifique (ADIDU).

MRC	Nombre de AD	Identifiant des aires de dissémination AD
Argenteuil	1	24076760094
Beauharnois-Salaberry	22	2407070003-0004 2407070067 à 0079 et 0087 à 0092
Deux-Montagnes	162	24072720001 à 0275
La Rivière-du-Nord	4	24075750210-0211-0226-0230
La vallée de Richelieu	158	2405757
Lajemmerais*	126	2405959
L'Assomption	185	2406060
Laval *	637	2406565
Les Jardins-de-Napierville	2	24068680051-0053
Les Maskoutains	1	24054540135
Les Moulins *	231	2406464
Longueuil *	692	2405858
Mirabel *	47	2407474
Montcalm	4	24063630069-0109-0112-0114
Roussillon *	252	2406767
Rouville	14	24055550075 à 0088
Thérèse-De Blainville*	238	2407373
Vaudreuil-Soulanges	139	2407171
Total	2 915	

Note: \* totalité des aires de dissémination pour ces municipalités ; AD= aire de dissémination

**Tableau 7. Liste des MRC de la zone d'étude.**



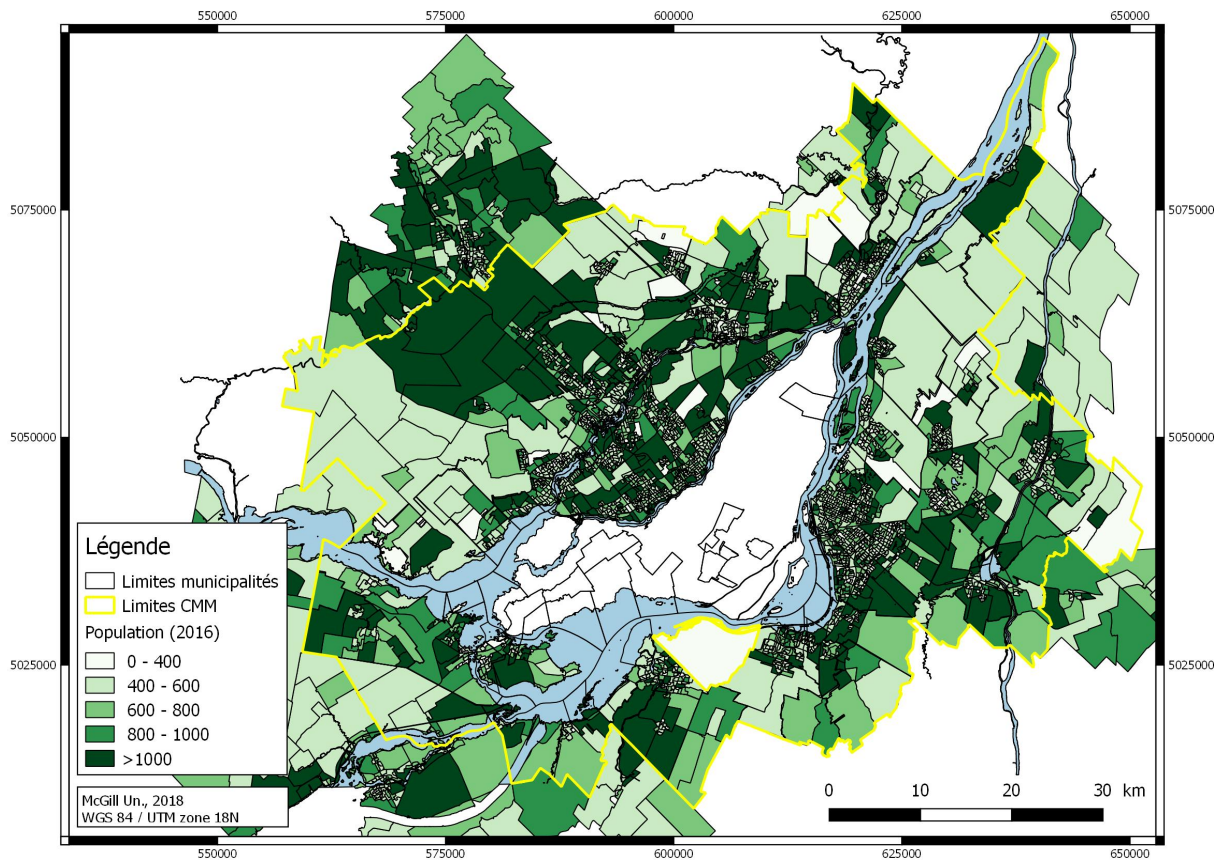
**Figure 8. Périmètre de la zone d'étude.**

*Le trait pointillé noir délimite la communauté métropolitaine de Montréal, les traits rouges indiquent les municipalités hors île de Montréal et les traits verts les aires de dissémination telles que définies par Statistique Canada.*

L'évaluation du risque sismique implique de connaître la distribution de la population dans la zone d'étude. Les données utilisées proviennent du recensement de 2016 (Statistique Canada) et sont compilées par Aire de Dissémination (AD) qui comporte en moyenne 700 personnes et 200 bâtiments (voir le découpage en vert de la Figure 8). Ces informations permettent de compléter la base de données démographiques de HazCan par AD en ce qui concerne :

- Population totale
- Population par sexe
- Nombre de ménages
- Population par sexe et par tranches d'âge (< 16ans ; 16-65 ans ; > 65ans)
- Population par origine (blanc, noir, autochtone, asiatique, hispanique, pacifique et autres)
- Nombre de ménages par tranche de revenus (<10k; 10-20k; 20-30k; 30-40k; 40-50k; 50-60k; 60-80k; 80-100k; >100k)
- Nombre de travailleurs secteur commercial
- Nombre de travailleurs secteur industriel
- Nombre d'élèves pré-secondaires
- Nombre d'élèves post-secondaires

La carte de la Figure 9 montre la répartition de la population de nuit par QAD.



**Figure 9. Population de la CMM par Aire de Dissémination en 2016.**

*La limite de la CMM est indiquée par un trait jaune. Les municipalités de l'île de Montréal ne sont pas montrées (source Statistique Canada).*

## 5. Inventaire des bâtiments par types d'occupation et de construction, par surface et valeurs foncières

La source principale d'information sur les bâtiments est le rôle d'évaluation de Montréal de 2018 qui fournit des informations relatives à chaque bâtiment. Le rôle d'évaluation permet de partiellement caractériser le bâti résidentiel selon la classification proposée par Hazus. Cette classification comprend deux volets, un qui concerne le type de construction ou classe de bâtiment (Tableau 8) et un autre l'usage du bâtiment ou classe d'utilisation (Tableau 9).

	Classes Hazus			Classe du CNRC-1992	
		Nom	Description	Nom	Description
Structure de bois		W1	Charpente de bois (<5000pi <sup>2</sup> )	OLB	Ossature légère en bois
		W2	Charpente de bois (>5000pi <sup>2</sup> )	PPB	Poteaux et poutres en bois
Ossature en acier	S1L	S1	Résistant au moment	OAM	Résistant au moment
	S1M				
	S1H				
	S2L	S2	Contreventée en acier	OCA	Contreventée en acier
	S2M				
	S2H				
		S3	Légère en acier	OLA	Ossature légère en acier
	S4L	S4	Avec murs de cisaillement en béton	AMB	Avec murs de cisaillement en béton
	S4M				
	S4H				
S5L	S5	Avec murs de remplissage en maçonnerie	AMR	Avec murs de remplissage en maçonnerie	
S5M					
S5H					
Béton	C1L	C1	Ossature en béton résistant aux moments	OBM	Ossature en béton résistant aux moments
	C1M				
	C1H				
	C2L	C2	Murs de béton travaillant en cisaillement	MBC	Murs de béton travaillant en cisaillement
	C2M				
	C2H				
	C3L	C3	Ossature avec murs de remplissage en maçonnerie	BMR	Ossature avec murs de remplissage en maçonnerie
	C3M				
	C3H				
	PC1	Murs en béton préfabriqués	MBP	Murs en béton préfabriqués	
PC2L	PC2	Ossature en béton préfabriquée	OBP	Ossature en béton préfabriquée	
PC2M					
PC2H					
Maçonnerie	RM1L	RM1	Murs porteurs en maçonnerie armée avec diaphragmes flexibles	MAL	Murs porteurs en maçonnerie armée, toits et planchers en platelages de bois ou de métal
	RM1M				
	RM2L	RM2	Murs porteurs en maçonnerie armée avec diaphragmes rigides	MAB	Murs porteurs en maçonnerie armée avec diaphragmes en béton
	RM2M				
	RM2H				
	URML	URM	Maçonnerie non armée	MNA	Bâtiments à murs porteurs en maçonnerie non armée
URMM					

**Tableau 8. Classification par types de construction selon Hazus et CNRC-1992.**

Codification	Classe d'occupation Hazus
RES1	Résidence unifamiliale
RES3	Résidence multifamiliale
	RES3A : Duplex
	RES3B : 3-4 logements
	RES3C : 5-9 logements
	RES3D : 10-19 logements
	RES3E : 20-49 logements
	RES3F : 50 logements et plus

**Tableau 9. Classification par types d'occupation selon Hazus.**

Les données par aire de dissémination sont triées à partir des informations du fichier du rôle foncier pour l'année 2018. Ces données concernent 2 913 aires de dissémination formant la

communauté urbaine de Montréal à l'exclusion de l'île de Montréal traitée durant le précédent projet (Chouinard et al., 2017).

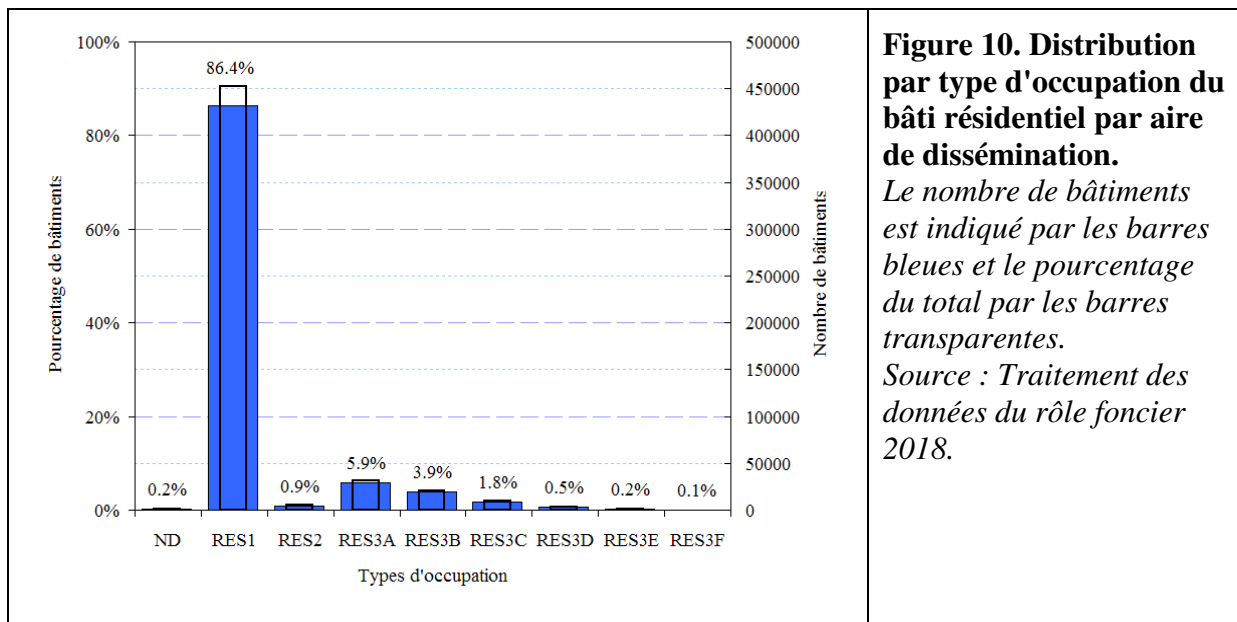
## 5.1. Distribution par types d'occupation

Les données de rôle foncier comportent 606 791 logements individuels, une partie d'entre eux formant des multiplex. Un traitement spécifique des données a permis de regrouper certains logements ayant les mêmes coordonnées géographiques en multiplex (pour plus de détails, se référer à l'Annexe 1). Ce qui représente au final un total de 523 159 bâtiments. Le nombre de bâtiments ne pouvant pas être caractérisés par les seules informations du rôle est minime (0.16% du total) et est inférieur à 0.1% en moyenne par aire de dissémination. Le décompte des bâtiments par types d'occupation selon la nomenclature d'Hazus est proposé dans le Tableau 10.

Type d'occupation	Nombre de logements	Libellé Rôle foncier	Nombre de bâtiments	% par type
Non défini			850	0.16
RES1	1	Unifamiliale	451 901	86.38
RES2		Maison mobile	4 879	0.93
RES3A	2	Duplex	30 969	5.92
RES3B	3 ou 4	Triplex	20 338	3.89
RES3C	5 à 9	Multiplex, 4 à 11 logements hors-sol	9 615	1.84
RES3D	10 à 19	Multiplex, 12 log. et plus, 3 étages et moins sans commerce	2 874	0.55
RES3E	20 à 49	Multiplex, 12 log. et plus, 4 étages et plus sans commerce	1 254	0.24
RES3F	> 49	Ensemble immobilier	479	0.09
Total			523 159	100

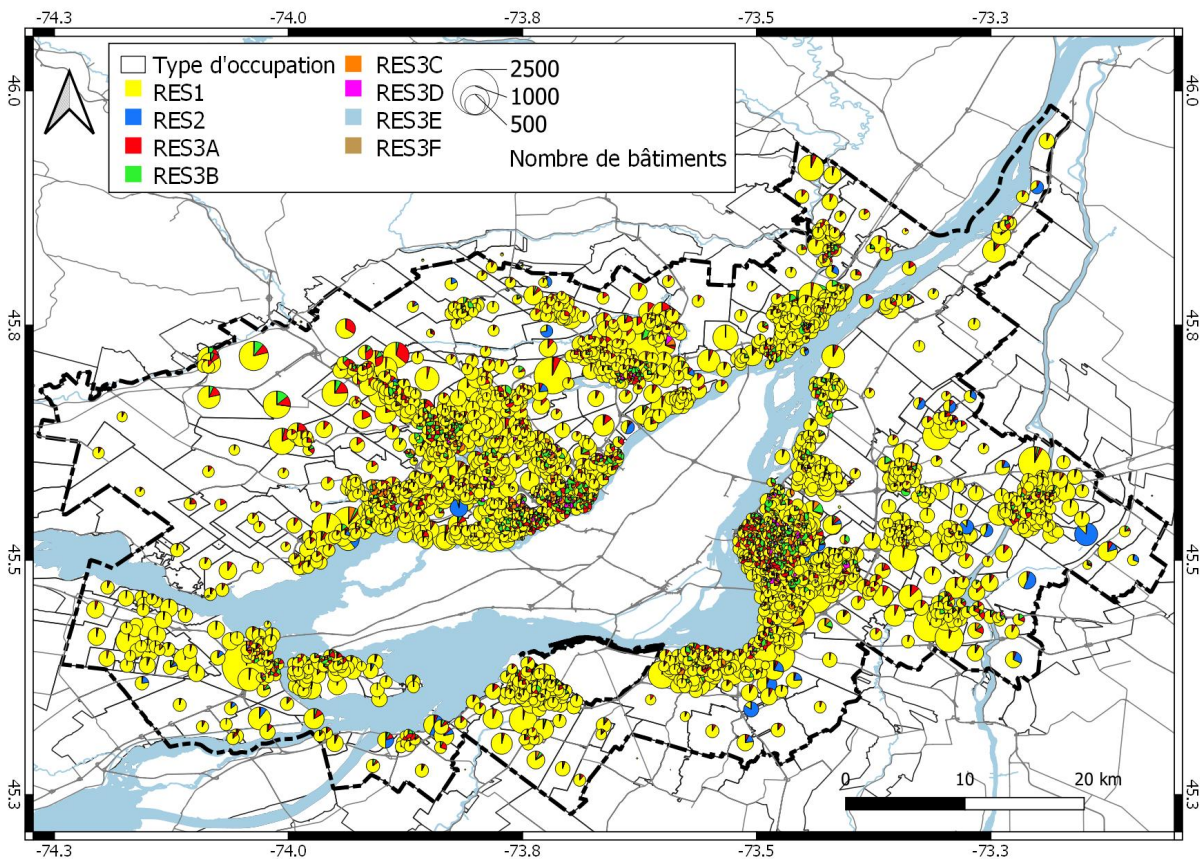
**Tableau 10. Distribution des bâtiments résidentiels par types d'occupation selon la nomenclature HazCan.**

Le graphe de la Figure 10 montre cette répartition par types d'occupation. Les maisons unifamiliales représentent 86.4% du total des bâtiments répertoriés.



**Figure 10. Distribution par type d'occupation du bâti résidentiel par aire de dissémination.**  
 Le nombre de bâtiments est indiqué par les barres bleues et le pourcentage du total par les barres transparentes.  
 Source : Traitement des données du rôle foncier 2018.

La carte de la Figure 11 montre cette distribution pour chaque aire de dissémination. Les maisons unifamiliales (en jaune) représentent plus de 86% du total des bâtiments résidentiels.



**Figure 11. Distribution par type d'occupation du bâti résidentiel par aire de dissémination.**  
 La surface des diagrammes est proportionnelle au nombre de bâtiments. Source : Traitement des données du rôle foncier 2018.

## 5.2. Distribution par type de construction

Les données de rôle foncier ne fournissent pas d'information sur le type et les matériaux de construction des logements. Les résultats des travaux effectués pour l'île de Montréal dans le précédent projet (Chouinard et al., 2017) sont utilisés pour déduire du type d'occupation et de la période de construction le type de construction (Tableau 11).

L'inventaire des bâtiments réalisé sur l'île de Montréal a permis de différencier le développement des parcs immobiliers des anciennes banlieues de Montréal de celui du centre l'île. Ainsi, les municipalités en périphérie de l'île ont connu un développement de leur parc immobilier similaire à celui des anciennes banlieues de l'île, telles que Pointe-aux-Trembles, Anjou, Dollars-des-Ormeaux, Kirkland, etc. Il convient alors d'utiliser les mêmes relations entre les périodes de construction, le type d'occupation et le type de construction pour définir l'inventaire des bâtiments de cette étude.

Les municipalités en périphérie de l'île sont généralement composées d'un vieux centre-ville ou « ancien village » avec quelques maisons en bois et quelques maisons en maçonnerie non armée. Autour de ces villages se développaient des zones agricoles transformées aujourd'hui en zone résidentielle, commerciale ou industrielle.

La maçonnerie non armée (URM) regroupe toutes les constructions de plus de 5 logements construites avant 1945 et toutes celles construites avant 1875. Les ossatures légères en bois (W1) incluent tous les bâtiments de moins de 5 logements construits après 1875. Les ossatures en béton résistant au moment (C1) incluent les constructions de plus de 5 logements construites entre 1945 et 1995. Enfin, les ossatures en béton travaillant en cisaillement (C2) incluent les constructions de plus de 5 logements construites après 1995. Le nombre d'étages permet de distinguer les constructions *Low* (1 et 2 étages), *Middle* (3 à 7 étages) et *High-rise* (plus de 7 étages). Un peu moins de 7 000 bâtiments n'ont pas d'information sur l'année de construction.

Type d'occupation	Nbre de logements	Période de construction				Sans date
		Avant 1875	1875-1945	1945-1995	1995-..	
RES1	1	URM <sub>L/M</sub>	W1 (madrier)	W1	W1	W1
RES2	Maison mobile			MH	MH	MH
RES3A	2	URM <sub>L/M</sub>	W1 (madrier)	W1	W1	W1
RES3B	3 ou 4	URM <sub>L/M</sub>	W1 (madrier)	W1	W1	W1
RES3C	5 à 9	URM <sub>L/M</sub>	URM <sub>L/M</sub>	C1 <sub>L/M/H</sub>	C2 <sub>L/M/H</sub>	C1 <sub>L/M/H</sub>
RES3D	10 à 19	URM <sub>L/M</sub>	URM <sub>L/M</sub>	C1 <sub>L/M/H</sub>	C2 <sub>L/M/H</sub>	C1 <sub>L/M/H</sub>
RES3E	20 à 49		URM <sub>L/M</sub>	C1 <sub>L/M/H</sub>	C2 <sub>L/M/H</sub>	C1 <sub>L/M/H</sub>
RES3F	> 49		URM <sub>L/M</sub>	C1 <sub>L/M/H</sub>	C2 <sub>L/M/H</sub>	C1 <sub>L/M/H</sub>

Note : URM= maçonnerie non armée; W1=ossatures en bois; C1= ossatures en béton résistant au moment; C2=ossatures en béton travaillant en cisaillement; URM<sub>L</sub>=1-2 étages; URM<sub>M</sub>=3+ étages; C1/C2<sub>L</sub>=1-3 étages; C1/C2<sub>M</sub>=4-7 étages; C1/C2<sub>H</sub>=8+ étages

**Tableau 11. Typologie de construction des bâtiments résidentiels selon le type d'occupation et la période de construction.**

Les critères du Tableau 11 (période de construction, type d'occupation et nombre d'étages) permettent un décompte en termes de type de construction (Tableau 12). On note que les constructions en bois (W1) sont à 90% des maisons unifamiliales et que les constructions en béton (C1 et C2) sont très majoritairement des multiplex. Les constructions en maçonnerie de 1 ou 2 étages (URML) sont à 77% des maisons unifamiliales et des multiplex de 5 à 9 logements pour 68% (URMM). Les duplex et triplex sont soit des constructions à ossature de bois soit en maçonnerie.

Types d'occupation	Pourcentage par types de construction et type d'occupation									
	W1	URMM	URML	MH	C2M	C2L	C2H	C1M	C1L	C1H
RES1	89.8	-	77.2	-	-	-	-	-	-	-
RES2	-	-	-	100.0	-	-	-	-	-	-
RES3A	6.1	-	12.3	-	-	-	-	-	-	-
RES3B	4.0	-	3.2	-	-	-	-	-	-	-
RES3C	-	68.0	7.0	-	6.5	63.7	-	12.9	69.9	-
RES3D	-	20.0	0.3	-	-	23.0	-	13.7	19.6	-
RES3E	-	8.0	0.1	-	23.9	9.3	-	25.0	8.5	-
RES3F	-	4.0	-	-	69.6	4.1	100.0	48.4	1.9	100.0
Nombre de constructions	501 355	25	1 999	4879	46	3 860	9	124	9 986	26
% du total	96.0		0.4	0.9		0.7			1.9	

**Tableau 12. Distribution des bâtiments résidentiels par types de construction et d'occupation.**

HazCan utilise dans un premier temps un regroupement par matériaux de construction et par type d'occupation afin de calculer le nombre de bâtiments par type de construction. Cette matrice exprimée en pourcentage par type d'occupation est proposée dans le Tableau 13. Les valeurs dans la matrice inférieures à 2 sont arrondies à l'entier supérieur et les valeurs supérieures à 2 sont arrondies à l'entier inférieur. Ceci afin d'avoir des valeurs entières pour tous les types de matériaux identifiés et un total de 100% par type d'occupation.

Types d'occupation	Matériaux de construction par type d'occupation (en %)				
	Bois	Acier	Béton	Maçonnerie	Maison mobile
RES1	99	-	-	1	-
RES2	-	-	-	-	100
RES3A	99	-	-	1	-
RES3B	99	-	-	1	-
RES3C	-	-	98	2	-
RES3D	-	-	99	1	-
RES3E	-	-	99	1	-
RES3F	-	-	99	1	-

**Tableau 13. Distribution des bâtiments résidentiels par types de matériaux et d'occupation.**

Les courbes de fragilité définies pour chacun des types de constructions considèrent le niveau de conception parasismique des bâtiments établi en fonction de l'année de construction. Dans le cas du Québec, trois niveaux de conception parasismique s'appliquent pour les bâtiments résidentiels :

- *Pre code* pour les constructions datant d'avant 1970 ;
- *Low code* (ou niveau de conception faible) pour les constructions entre 1970 et 1990 ;
- *Moderate code* (ou niveau de conception modéré) pour les constructions d'après 1990.

Pour le Québec, l'année 1970 est une année charnière dans l'introduction d'exigences parasismiques selon les principes de conception par capacité et d'exploitation de la ductilité des structures et est considérée comme le début de la conception parasismique. Alors que l'année 1990 marque l'introduction de nouvelles exigences parasismiques dans plusieurs normes de conception. Le plus haut niveau de conception parasismique considéré pour les bâtiments résidentiels construits après 1990 est modéré.

Le Tableau 14 indique le pourcentage de bâtiments dans ces trois niveaux de conception parasismique pour chaque type de construction.

Niveau de conception parasismique	Période de construction	Niveau de conception par types de construction (en %)									
		W1	URMM	URML	MH	C2M	C2L	C2H	C1M	C1L	C1H
<i>Pre-code</i>	<b>Avant 1970</b>	26	100	100	11	-	-	-	17	27	9
<i>Low code</i>	<b>1970 - 1990</b>	37	-	-	69	-	-	-	78	63	83
<i>Moderate code</i>	<b>Après 1990</b>	37	-	-	19	100	100	100	5	10	9
<b>Nombre de constructions</b>		496 981	25	1 995	4 651	46	3 860	9	106	8 871	23

**Tableau 14. Niveau de conception parasismique des bâtiments résidentiels par types de construction.**

Pour chaque type d'occupation, la matrice du Tableau 12 est complétée par le pourcentage de constructions par niveau de conception parasismique et par types de construction comme indiquée dans le Tableau 15. Cette matrice permet de déduire le nombre de bâtiments par type de construction du nombre de bâtiments par type d'occupation pour chaque aire de dissémination.

Types d'occupation	Niveau de conception parasismique (en %) par types de construction									
	W1	URMM	URML	MH	C2M	C2L	C2H	C1M	C1L	C1H
RES1	PC: 24 LC: 41 MC: 35		PC:100							
RES2				PC: 11 LC: 71 MC: 18						
RES3A	PC: 42 LC: 21 MC: 37		PC:100							
RES3B	PC: 42 LC: 28 MC: 30		PC:100							
Types d'occupation	Niveau de conception parasismique (en %) par types de construction									
W1	URMM	URML	MH	C2M	C2L	C2H	C1M	C1L	C1H	
RES3C		PC: 11	PC: 89							PC: 23 LC: 44 MC: 5
RES3D		PC: 50	PC: 50							PC: 9 LC: 52 MC: 6
RES3E		PC: 67	PC: 33		MC:1	MC: 32		PC: 9 LC: 50	PC: 1 LC: 2	MC: 5
RES3F		PC:100			MC: 8	MC: 39	MC: 2	LC: 11	PC: 2 LC: 28	LC: 5 MC: 4 MC: 1

Note: PC=Pre-code; LC= Low-code; MC= Moderate-code

**Tableau 15. Niveau de conception parasismique des bâtiments résidentiels par types de construction et d'occupation**

### 5.3. Estimation de la surface du bâti par type d'occupation

Le rôle foncier fournit une information sur l'aire d'étages qui est "la surface brute correspondant à la somme des aires de chacun des étages entiers du bâtiment principal et, le cas échéant, de celles de l'attique, du garage intégré et de la verrière intégrée". Pour chaque type d'occupation, la surface médiane du bâti est calculée ainsi que l'écart-type autour de la moyenne. Les valeurs médianes en m<sup>2</sup> du Tableau 16 sont converties en pieds carrés (1m<sup>2</sup>= 10.7639pi<sup>2</sup>) pour les besoins d'HazCan. Il est à noter que l'écart-type augmente avec le nombre de logements du bâtiment. Les valeurs estimées pour cette étude sont dans la gamme de valeurs fournies par Hazus, à l'exception des bâtiments RES3E pour lesquels la surface médiane estimée dans cette étude est deux fois moins que celle proposée dans Hazus.

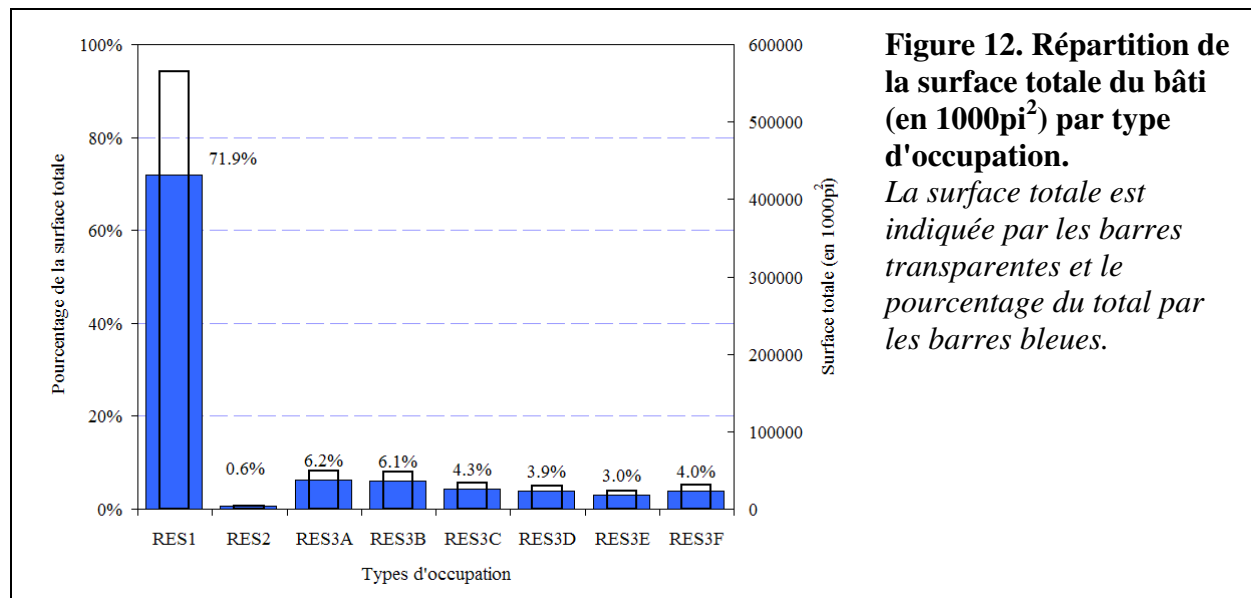
Surface médiane par types d'occupation résidentielle				
	RES1	RES2	RES3A	RES3B
Nombre de bâtiments	451 901	4 879	30 969	20 338
(en m <sup>2</sup> )	116	84	146	220
(en pi <sup>2</sup> )	1 249	904	1 572	2 368

Surface médiane par types d'occupation résidentielle				
	RES3C	RES3D	RES3E	RES3F
Nombre de bâtiments	9 615	2 874	1 254	479
(en m <sup>2</sup> )	328	982	1 738	6 061
(en pi <sup>2</sup> )	3 531	10 570	18 708	65 240

**Tableau 16. Surface médiane des bâtiments (en m<sup>2</sup> et pi<sup>2</sup>) selon le type d'occupation.**

La surface totale du bâti résidentiel est estimée à 784.7 millions de pi<sup>2</sup> (soit 72.9 millions de m<sup>2</sup>). Les maisons unifamiliales représentent 72% du total, les duplex et triplex 6 et les multiplex RES3C à RES3F se répartissant les 15% restant plus ou moins à parts égales. Le graphe de la Figure 12 montre cette distribution.



**Figure 12. Répartition de la surface totale du bâti (en 1000pi<sup>2</sup>) par type d'occupation.**

*La surface totale est indiquée par les barres transparentes et le pourcentage du total par les barres bleues.*

La carte de la Figure 13 montre la distribution de la surface totale du bâti par aire de dissémination. Cette distribution est conforme à la densité de population des différentes municipalités de la CMM.

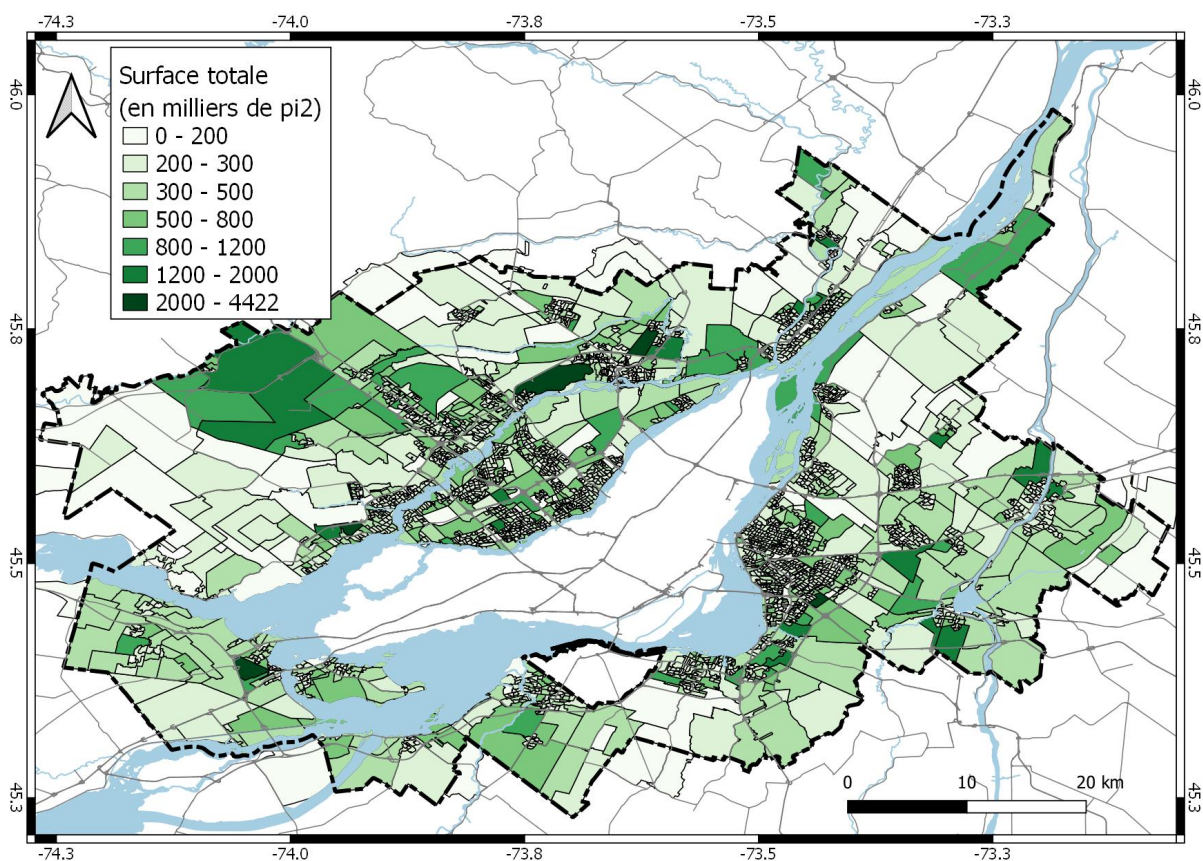


Figure 13. Surface totale du bâti (en 1000pi<sup>2</sup>) par aire de dissémination.

#### 5.4. Estimation de la valeur foncière du bâti par type d'occupation

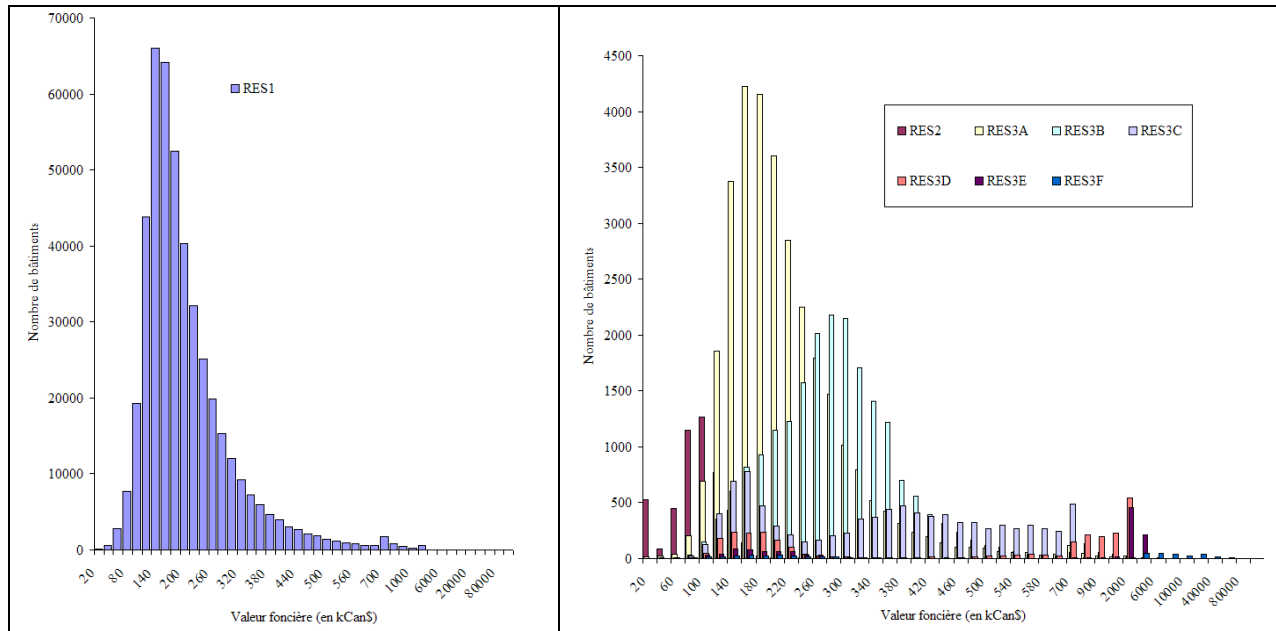
Le rôle foncier fournit la valeur foncière attribuée aux bâtiments compris dans l'unité d'évaluation. "Ces bâtiments sont composés du bâtiment principal, de leurs dépendances, de leurs accessoires, de leurs équipements et des améliorations érigées ou incorporées au terrain".

Tous les bâtiments de la base de données ont une valeur estimée par le rôle à l'exception d'une maison unifamiliale (RES1), 8 maisons mobiles (RES2), un triplex (RES3B) et 37 logements non définis (Figure 14). Cette évaluation est utilisée pour calculer la valeur foncière médiane des bâtiments par types d'occupation et pour estimer la valeur par unité de surface (Tableau 17).

	Valeur foncière médiane par types d'occupation résidentielle							
	RES1	RES2	RES3A	RES3B	RES3C	RES3D	RES3E	RES3F
en Can\$	168300	83200	185000	270000	355100	899350	1681000	6712350
en Can\$ par m <sup>2</sup>	1451	990	1267	1227	1083	916	967	1107
en Can\$ par pi <sup>2</sup>	135	92	118	114	101	85	90	103
HazCan (Can\$/pi <sup>2</sup> )	95		80	87	154	138	135	132
Nbre de bâtiments	451901	4879	30969	20338	9615	2874	1254	479

Tableau 17. Valeur foncière médiane des bâtiments (en Can\$) par types d'occupation et par unité de surface.

L'analyse des données fournies par le rôle montre que l'écart-type autour de la moyenne de la valeur foncière pour un type d'occupation donné est important (Figure 5). La valeur médiane calculée pour chaque type d'occupation permet de lisser cette incertitude.



**Figure 14. Valeur foncière par types d'occupation du bâti résidentiel.**

*Les données de valeurs foncières proviennent du rôle foncier 2018.*

Afin d'analyser l'influence des valeurs extrêmes sur la valeur foncière par types d'occupation et par unité de surface, une comparaison de la valeur foncière totale calculée à partir de trois sources distinctes est réalisée. Ces sources sont :

- La valeur fournie directement par le rôle foncier.
- La surface foncière totale multipliée par la valeur foncière médiane du Tableau 17.
- Le nombre de bâtiments multiplié la valeur foncière médiane par bâtiment du Tableau 17.

Les résultats de cette comparaison sont indiqués dans le Tableau 18. Il est à noter que l'écart entre la valeur foncière totale calculée du rôle foncier diffère de :

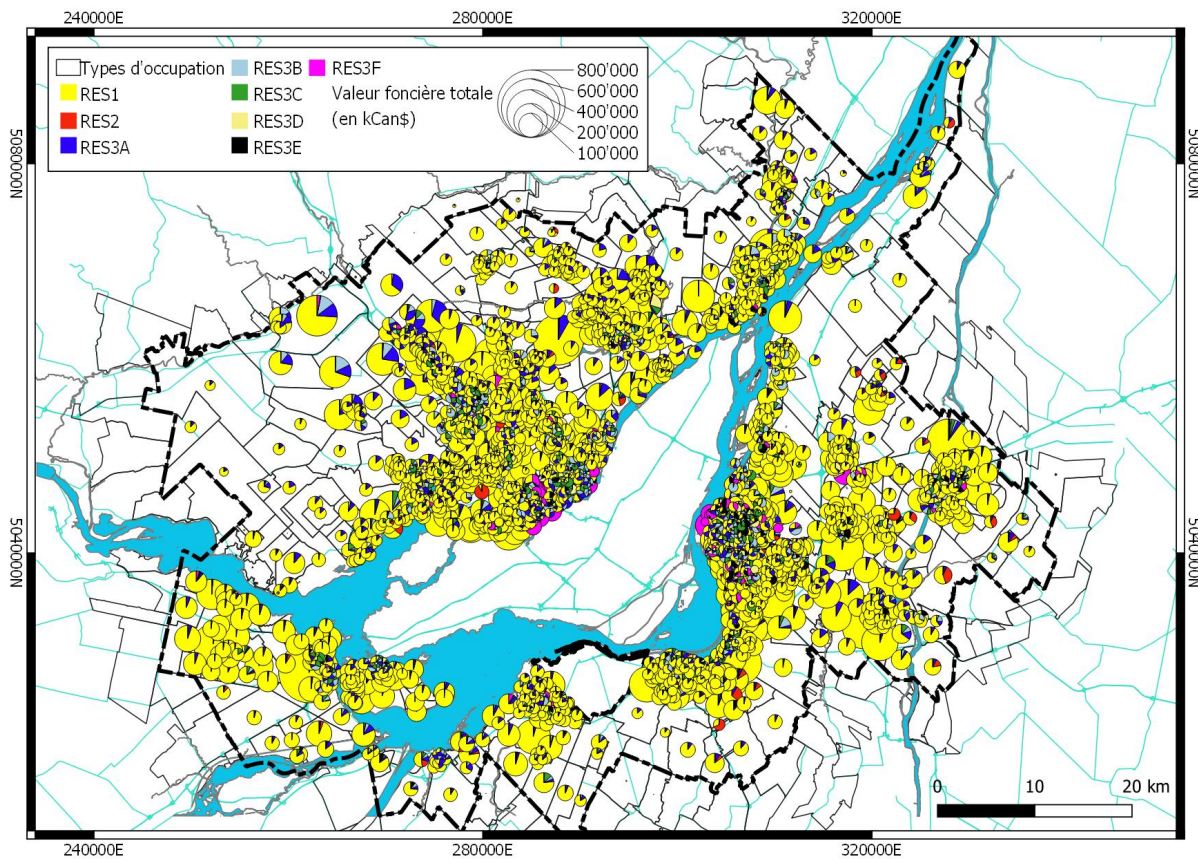
- moins de 1% par rapport à celle calculée sur la base de la surface totale des étages, et de,
- 10% par rapport à celle calculée en utilisant le nombre de bâtiments et les valeurs des tables 4 et 5.

Au vu de la faible différence, la valeur du rôle foncier est utilisée directement pour documenter les valeurs totales du foncier par aire de dissémination et par type d'occupation.

Type d'occupation	Valeur foncière totale par types d'occupation (en Can\$) estimée à partir :		
	du rôle foncier	de la surface totale	du nombre de bâtiments
Non défini	11,630,700		
RES1	87,931,324,000	90,723,862,350	76,054,938,300
RES2	427,112,800	413,611,407	405,184,000
RES3A	6,401,827,100	6,194,384,286	5'729'265'000
RES3B	5,593,792,100	5,370,138,507	5,490,990,000
RES3C	3,400,861,600	3,144,685,440	3,414,286,500
RES3D	1,651,014,000	1,319,523,098	2,584,731,900
RES3E	1,420,346,800	1,110,428,921	2,107,974,000
RES3F	2,351,004,900	1,343,492,727	3,215,215,650
TOTAL	109,188,914,000	109,620,126,737	99,002,585,350
Ecart par rapport à la valeur du rôle		+0.4	-9.3

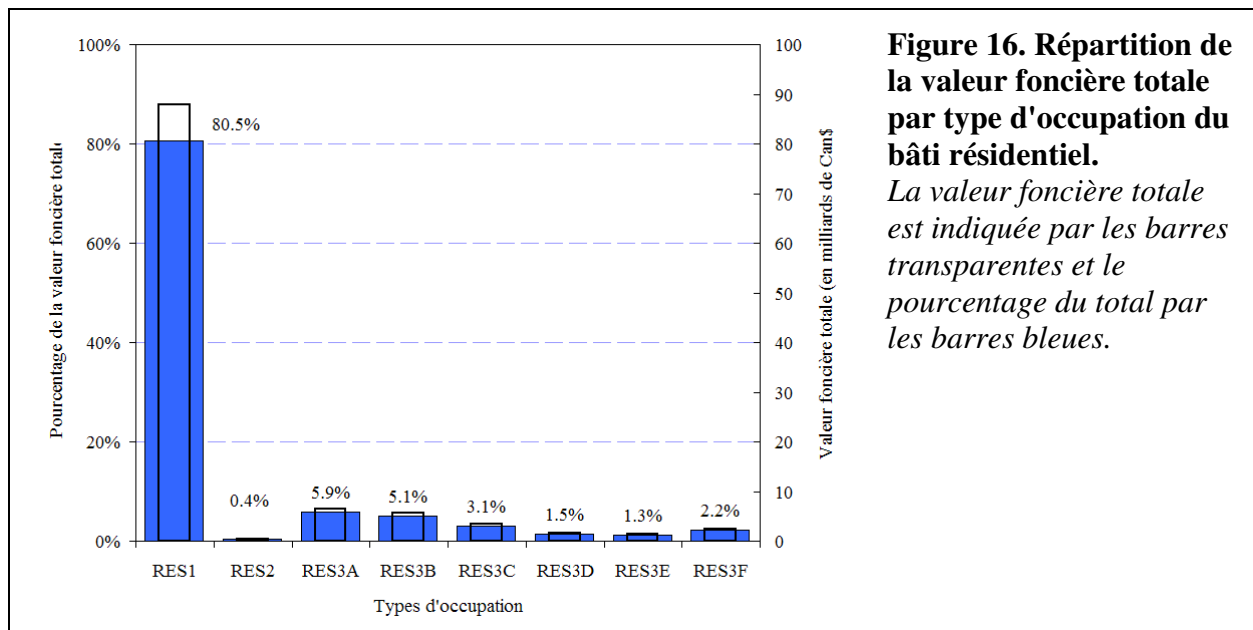
**Tableau 18. Valeur foncière totale des bâtiments (en Can\$) par type d'occupation calculée selon trois approches.**

La carte de la Figure 15 montre la répartition par types d'occupation pour chaque aire de dissémination. On note que les maisons unifamiliales (en jaune) contribuent majoritairement à la valeur foncière totale (80.5%) suivi par les duplex et triplex. La répartition par types d'occupation est présentée dans le graphe de la Figure 16.



**Figure 15. Distribution de la valeur foncière par aire de dissémination et par types d'occupation du bâti résidentiel.**

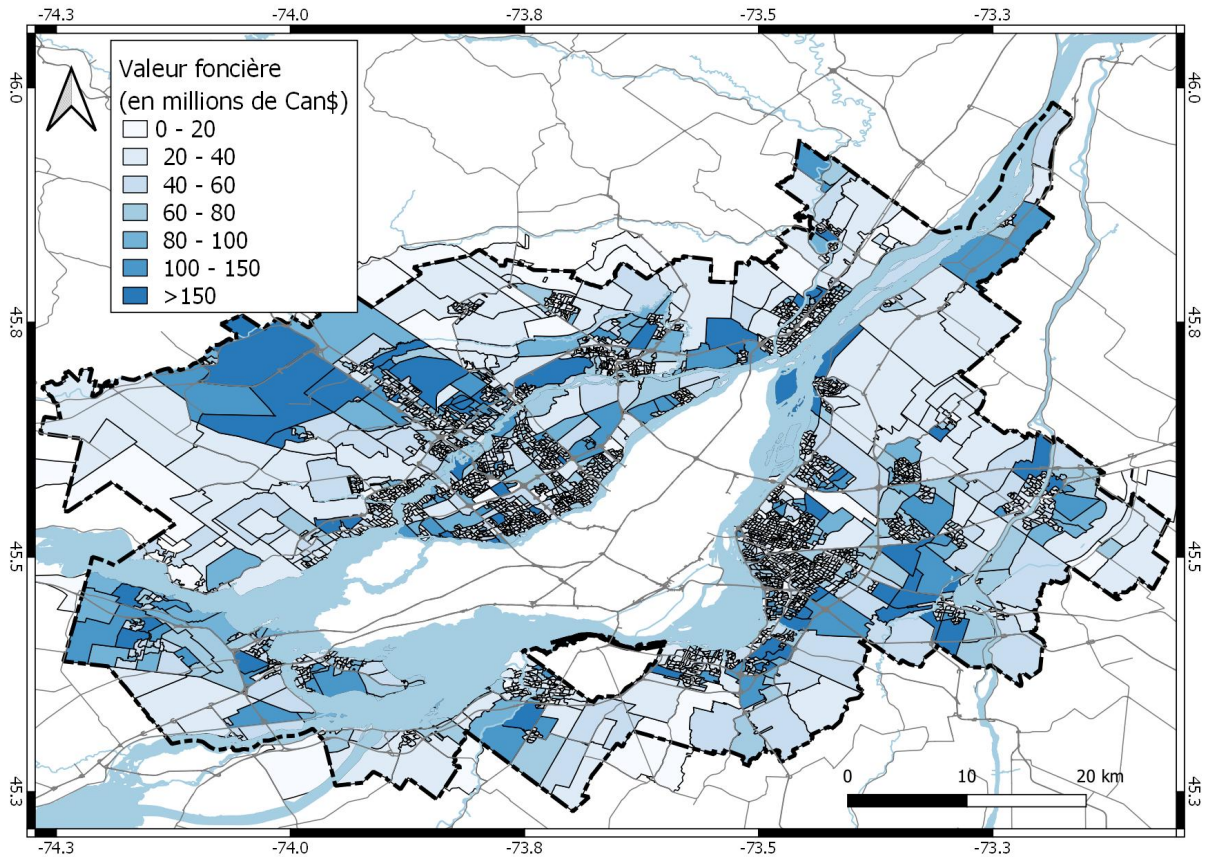
*Les données de valeurs foncières proviennent du rôle foncier 2018. La surface des ronds est proportionnelle à la valeur foncière totale des bâtiments (en kCan\$).*



**Figure 16. Répartition de la valeur foncière totale par type d'occupation du bâti résidentiel.**

*La valeur foncière totale est indiquée par les barres transparentes et le pourcentage du total par les barres bleues.*

La valeur foncière totale du bâti résidentiel de la CMM (hors Montréal) est estimée de l'ordre de 109.1 milliards de Can\$. La carte de la Figure 17 montre la distribution par aire de dissémination de cette valeur foncière sur le territoire de la CMM.



**Figure 17. Valeur foncière du bâti résidentiel par aire de dissémination.**

*Les données de valeurs foncières proviennent du rôle foncier 2018. La valeur par aire de dissémination est en millions de Can\$.*

## 5.5. Estimation de la valeur monétaire du contenu du bâti

HazCan considère que la valeur du contenu des bâtiments est en moyenne 50% de sa valeur foncière. Ce projet a bénéficié de l'appui de Paul Kovacs, directeur de l'ICLR, Toronto (Institute for Catastrophic Loss Reduction) qui a fourni les informations pertinentes pour le Québec disponibles dans la base de données CatIQ. Elles concernent le ratio de la valeur du contenu des bâtiments résidentiels par rapport à leur valeur foncière pour les années de 2016 à 2019, par limites de régions de tri d'acheminement (RTA).

Les données pour les RTA incluses dans les limites de la CMM fournissent un ratio moyen pour 2018 (année des données de rôle foncier) de 54%  $\pm$  7%. On peut noter la variabilité des valeurs de ce ratio pour les différentes RTA de la CMM dans le graphe de la Figure 18.

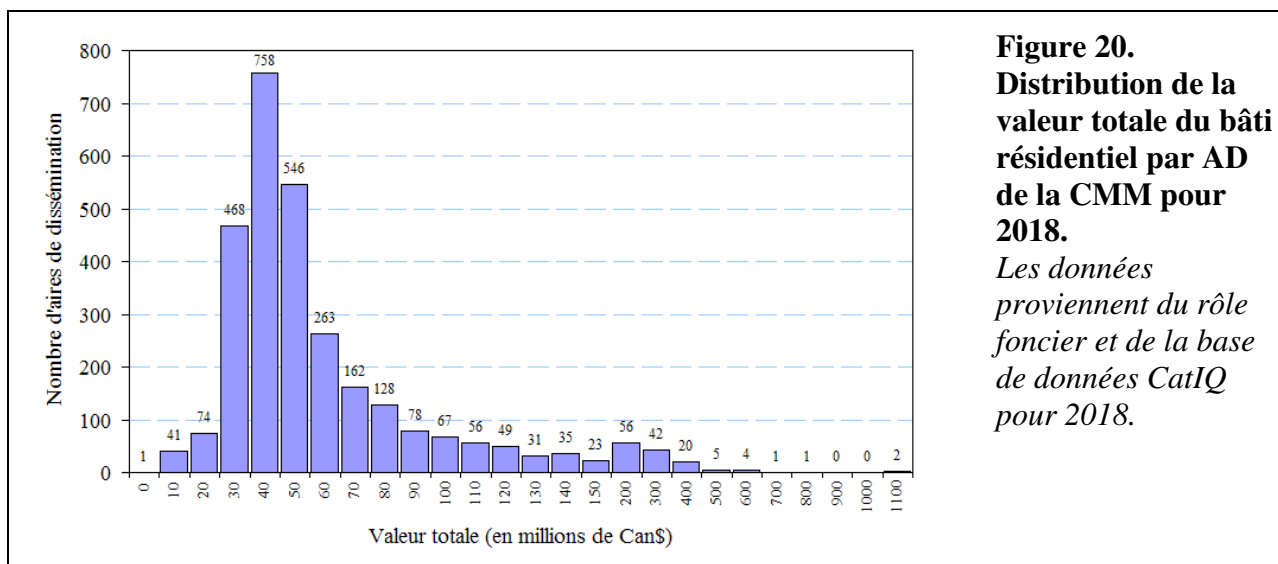


80% de ce total, les duplex et triplex comptant pour 5.8% et 5%, respectivement. Le Tableau 19 donne les détails de ces décomptes par types d'occupation. L'évaluation monétaire du bâti résidentiel se base sur les informations du rôle foncier de 2018 pour ce qui est de la valeur foncière du bâti et des données d'assurances issue de la base de données CatIQ pour ce qui est la valeur du contenu du bâti pour 2018. À ce stade de l'étude, il est difficile de définir l'incertitude de ces deux estimations.

	Estimation monétaire (en kCan\$) par types d'occupation résidentielle							
	RES1	RES2	RES3A	RES3B	RES3C	RES3D	RES3E	RES3F
Bâtiment	87,931,324	427,113	6,401,827	5,593,792	3,400,862	1,651,014	1,420,347	2,351,005
Contenu	48,851,419	240,592	3,457,065	2,920,206	1,778,269	870,345	741,586	1,166,024
Total	136,782,743	667,705	9,858,892	8,513,998	5,179,130	2,521,359	2,161,932	3,517,029
En %	80.8	0.4	5.8	5.0	3.1	1.5	1.3	2.1

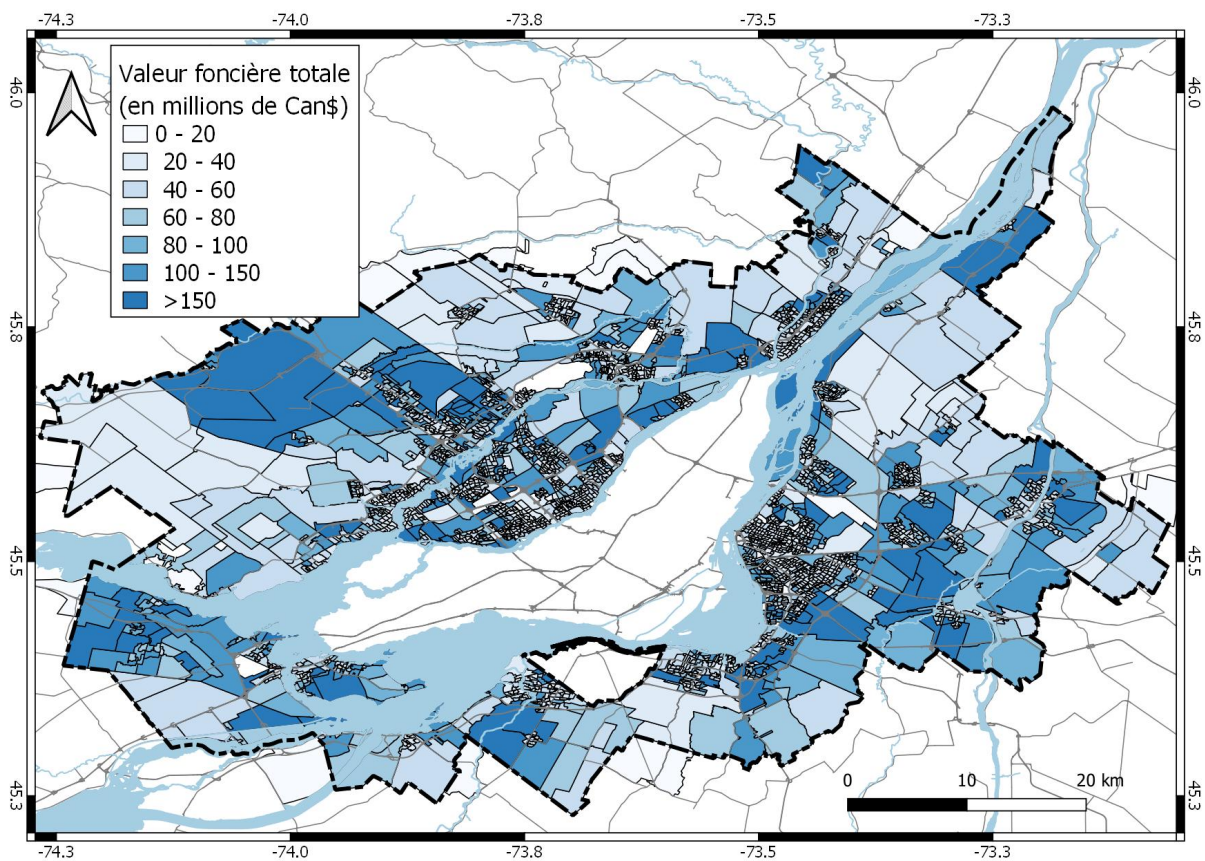
**Tableau 19. Valeur monétaire (en kCan\$) par type d'occupation.**

Le graphe de la Figure 20 montre la distribution de la valeur totale du bâti par aires de dissémination. La moyenne pour les 2 912 aires de dissémination est de l'ordre de 57 millions de \$Can avec un écart-type du même ordre de grandeur. Le premier quartile est à 31 millions et le troisième quartile à 60 millions.



**Figure 20.**  
**Distribution de la valeur totale du bâti résidentiel par AD de la CMM pour 2018.**  
*Les données proviennent du rôle foncier et de la base de données CatIQ pour 2018.*

La carte de la Figure 21 montre la distribution de la valeur totale du bâti par aire de dissémination (valeur 2018).



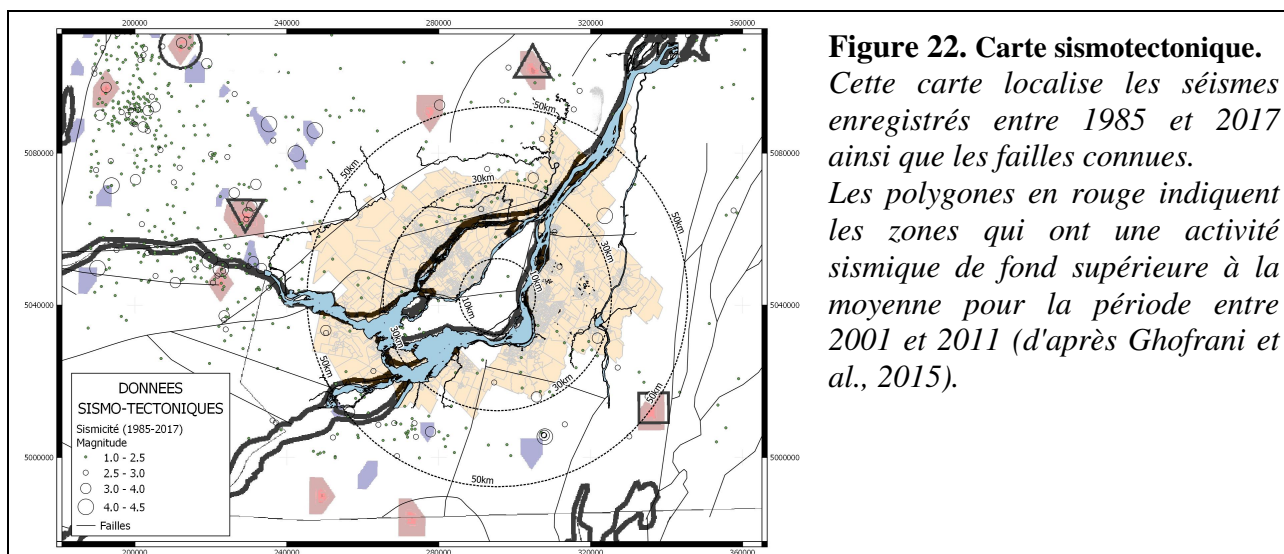
**Figure 21. Valeur totale du bâti résidentiel par AD de la CMM pour 2018 (en millions de Can\$).**

*Les données proviennent du rôle foncier et de la base de données CatIQ pour 2018.*

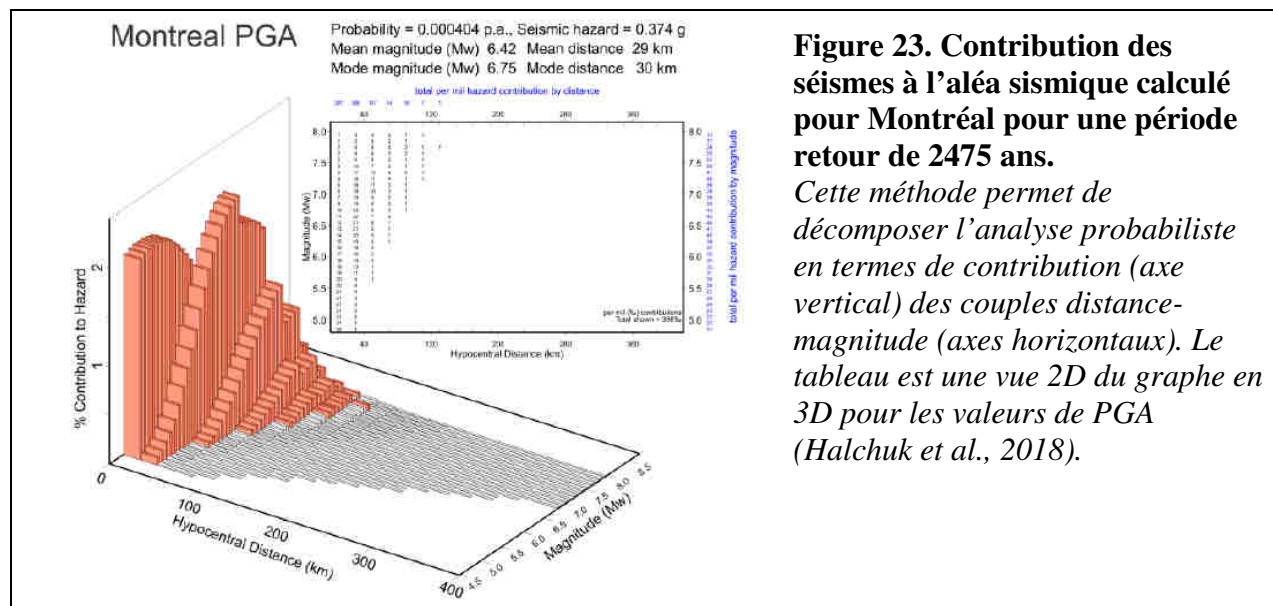
## 6. Définition des scénarios sismiques

Plusieurs scénarios sismiques sont proposés afin de prendre en compte les incertitudes liées à l'estimation de l'aléa de la zone d'étude. Pour cela, les approches déterministe et probabiliste sont combinées afin de définir plusieurs scénarios sismiques qui prennent en compte à la fois la connaissance que l'on a de la sismicité autour de Montréal, mais aussi l'incertitude inhérente au manque de données expérimentales. L'approche adoptée dans le précédent projet est reprise en intégrant les dernières recommandations et données de Séismes Canada pour le CNB-2015.

L'approche déterministe consiste à prendre en compte le contexte tectonique (les failles) et la sismicité locale afin de déterminer les événements maximums probables. Une étude pilote (Ghofrani et al., 2015) a permis d'identifier plusieurs zones proches de Montréal qui ont une activité sismique de fond (sur la période 2001-2011) supérieure à la moyenne (en rouge sur la Figure 22), et qui ont donc une probabilité plus forte de générer des séismes dans le futur.



À partir des informations de cette carte, les quatre zones en rouge les plus proches de Montréal sont sélectionnées et leur magnitude est déterminée en considérant les données de la dernière version de la désagrégation proposée par Halchuk et al. (2018) pour Montréal (Figure 23 et annexe 2). Le graphe de la Figure 23 indique, pour Montréal, la contribution à l'aléa sismique total pour une magnitude et une distance donnée ; et ce pour la période de retour de 2 475 ans préconisée dans le CNB-2015 (voir le détail en annexe 2).



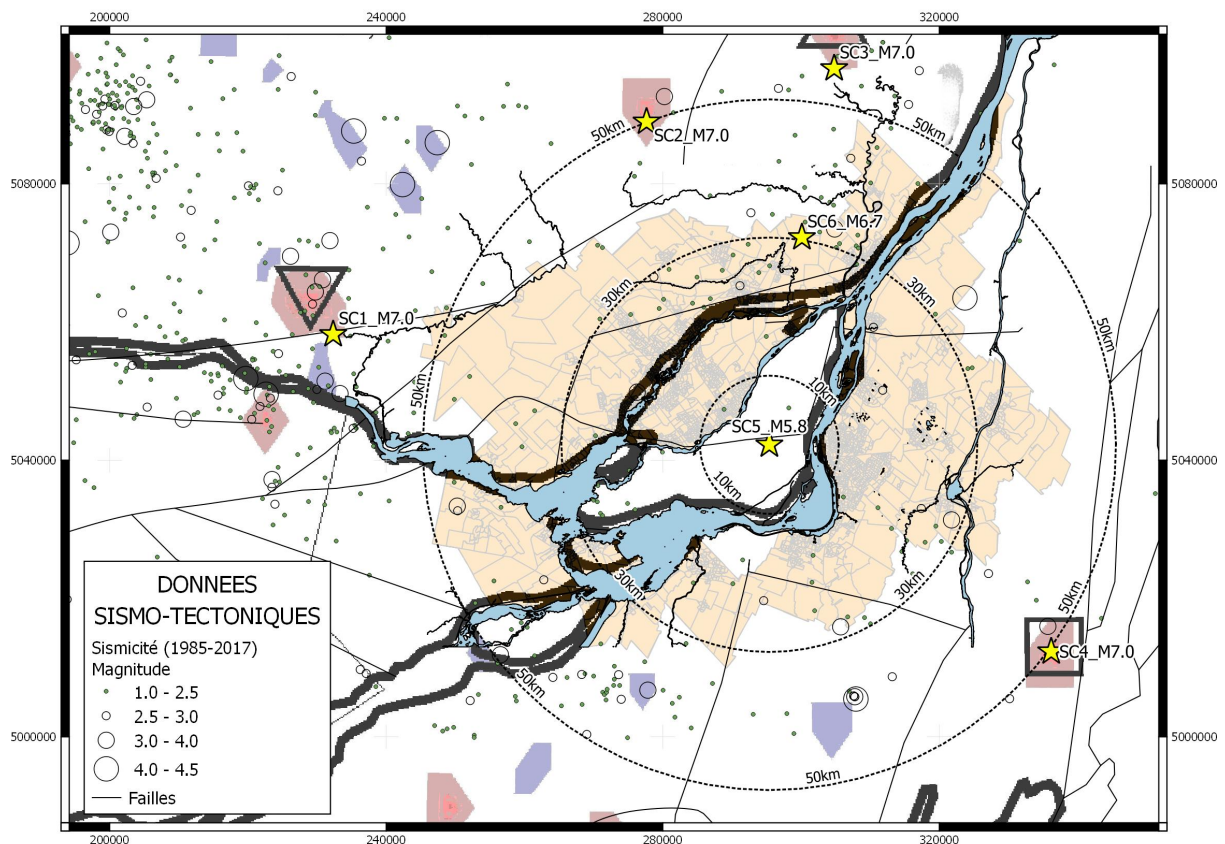
Six scénarios sont considérés. Quatre scénarios (SC1 à SC4) sont localisés dans les quatre zones sélectionnées au plus proche de Montréal. Ils se trouvent à des distances entre 50 à 65km du centre de Montréal. À ces distances, le maximum de contribution à l'aléa sismique correspond à une magnitude de 7 (1% de la contribution totale).

Un scénario plus proche est à 30km au nord de Montréal (SC6) dans une zone avec une activité sismique de fond sur la rive gauche du Saint-Laurent. La magnitude est fixée à 6.7 qui correspond à la valeur modale de l'aléa sismique et à une contribution de 2.2%.

Enfin, un dernier scénario (**SC5**) de magnitude 5.8, magnitude estimée du séisme de 1732, est localisé au centre de Montréal afin de fournir un scénario maximum crédible. La carte de la Figure 24 localise les épicentres des six scénarios et le Tableau 20 leurs paramètres.

Nom	Mw	X (°W)	Y (°N)	Profondeur (km)	Distance au centre de Montréal (km)	Contribution à l'aléa total pour les PGA (en %)
SC1_M7.0	7.0	-74.43	45.66	10	65	0.3
SC2_M7.0	7.0	-73.85	45.94	10	50	1.0
SC3_M7.0	7.0	-73.50	46.01	10	55	1.0
SC4_M7.0	7.0	-73.10	45.25	10	50	1.0
SC5_M5.8	5.8	-73.62	45.52	10	0	1.9
SC6_M6.7	6.7	-73.56	45.79	10	30	2.2

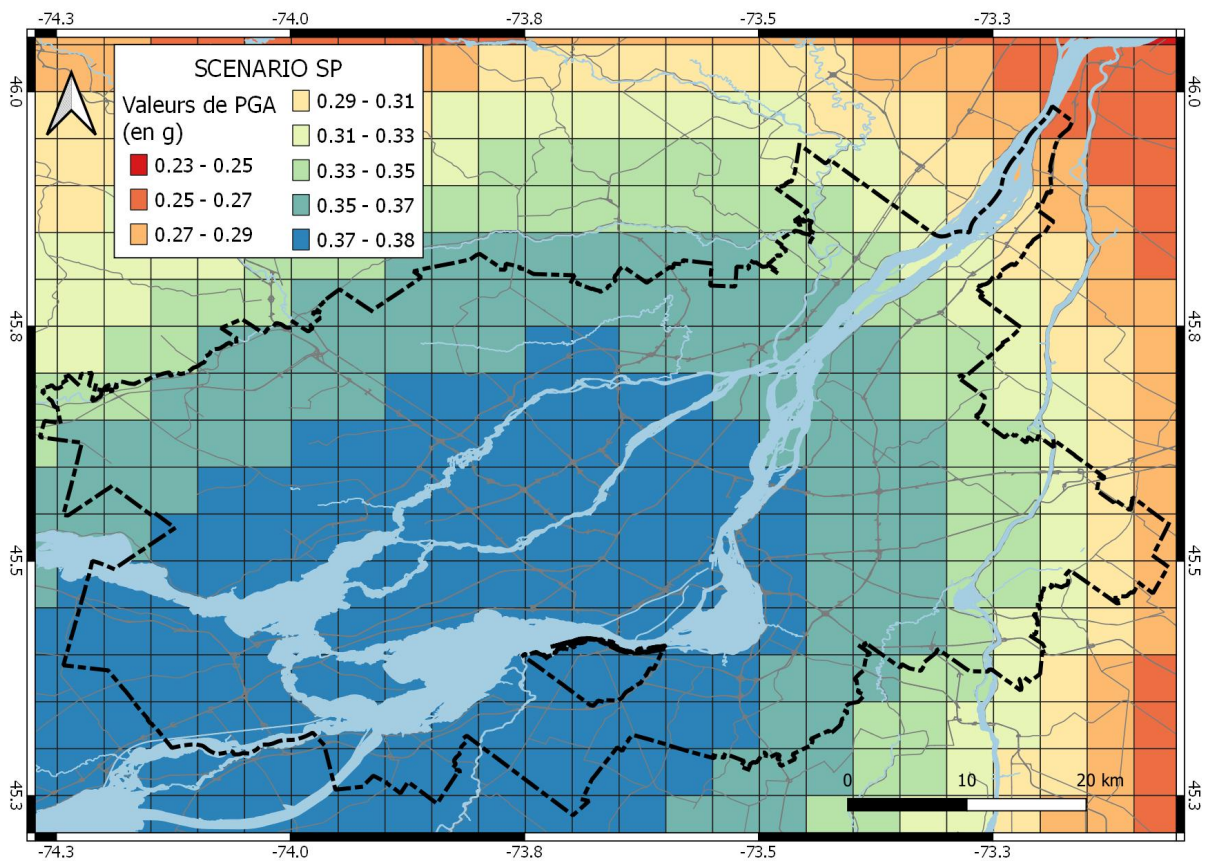
**Tableau 20. Liste des scénarios sismique choisis pour l'analyse de risque.**



**Figure 24. Scénarios sismiques pour Montréal.**

Cette carte regroupe par magnitude les séismes récents pour la période 1985-2017. Le fond de carte localise en rouge les zones qui ont une activité sismique de fond supérieure à la moyenne en analysant les variations autour de la moyenne de l'activité sismique entre 2001 et 2011(d'après Ghofrani et al., 2015). Les étoiles indiquent les scénarios proposés et leur libellé dans le tableau 10. Sources des données sismiques : Séisme Canada

L'approche probabiliste consiste à évaluer, en tenant compte de la fréquence des séismes, la probabilité qu'une secousse sismique donnée (caractérisée par une intensité ou un paramètre du mouvement du sol comme l'accélération ou la vitesse) se produise au moins une fois en un site donné et pendant un intervalle de temps fixé. Cette approche utilise le catalogue de séismes le plus complet possible et prend en compte la distribution temporelle et spatiale de ces séismes au sein des différentes unités sismotectoniques. Séismes Canada a publié la cinquième génération du modèle d'aléa sismique du Canada (Halchuk et al., 2015) qui fournit les valeurs de PGA, PGV, et d'accélération spectrales sur une grille régulière de points distants de 10km et ce, pour différentes périodes de retour. La carte de la Figure 25 montre cette grille dans la région de Montréal pour les valeurs de PGA et une période de retour de 2 475 ans (probabilité annuelle de dépassement de 0.000404). Ce jeu de données est utilisé pour calculer un septième scénario (SP).



**Figure 25. Carte de l'aléa sismique probabiliste en termes de PGA.**

*Cette carte fournit les valeurs de PGA (en g) du scénario SP pour une période de retour de 2 475 ans sur une grille régulière de points distants de 10km (d'après Halchuk et al., 2015).*

## 7. Estimation du risque sismique à l'aide d'HazCan

Sur la base des données disponibles et des scénarios proposés, les analyses permettent d'estimer :

- Les dommages aux bâtiments et les pertes économiques engendrées par ces dommages.
- Les pertes humaines causées par ces dommages ainsi que le besoin en accueil d'urgence.

### 7.1. Dommages aux bâtiments

Les dommages aux bâtiments sont calculés à partir de la sollicitation sismique et la capacité de chaque type de bâtiment de résister à ces sollicitations. L'approche utilisée dans Hazus se base sur la méthode du spectre de capacité et repose sur deux types de courbes : les courbes de capacité et les courbes d'endommagement. Les schémas de la Figure 13 expliquent la méthode générale d'estimation des dommages.

La première catégorie de courbes indique le comportement d'une construction face à n'importe quelle sollicitation de type sismique. Le déplacement susceptible de se produire dans le bâtiment, représenté par la translation au niveau du toit de la construction, est fonction de la sollicitation sismique. Ce déplacement, considéré comme le facteur majeur conditionnant l'endommagement structurel, est donné par l'abscisse du point de croisement entre la courbe définissant les séismes et la courbe de capacité, appelé "point de performance". Un algorithme de calcul permet de déterminer le point de performance pour chaque scénario sismique considéré.

La deuxième catégorie de courbes, celles d'endommagement, sont des fonctions calculant la probabilité d'atteindre ou de dépasser un certain niveau de dommage, pour une valeur donnée du déplacement correspondant au point de performance. Ces courbes ont été mises au point à partir d'extrapolations des données liées aux dommages observés sur les différents types de construction, soit lors de tests en laboratoire, soit lors d'inspection après des séismes importants comme ceux de Loma Prieta (1989) et de Northridge (1994).

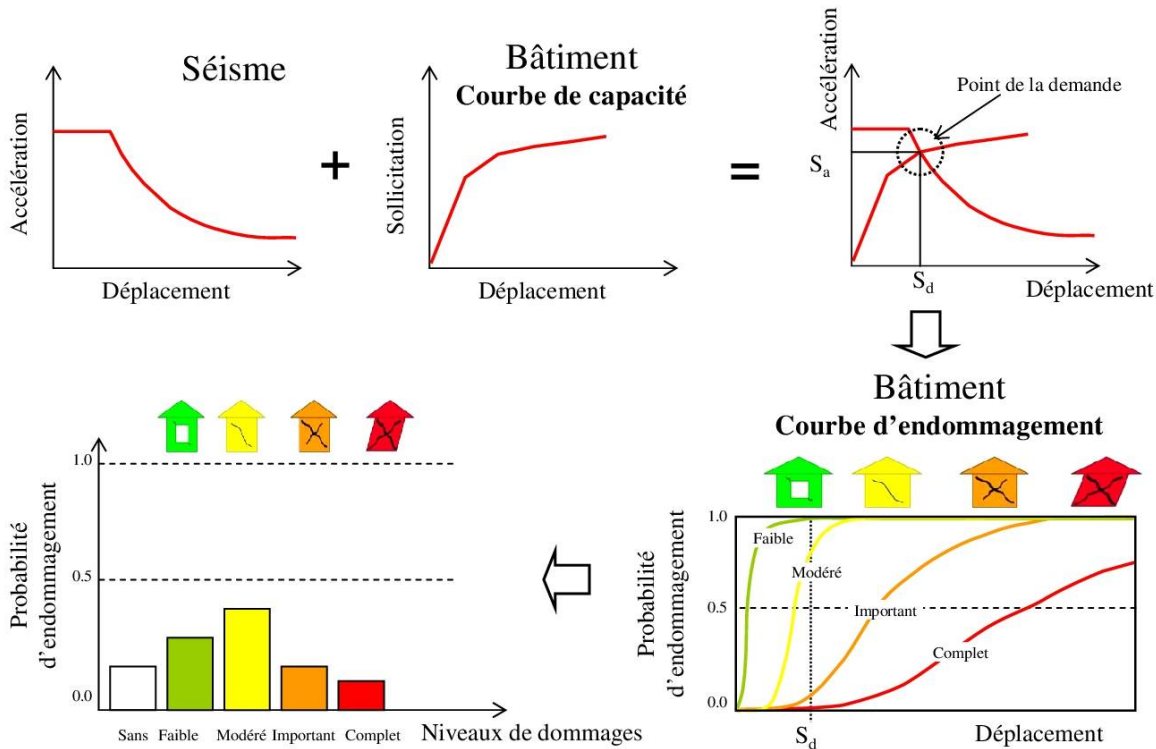
Des courbes d'endommagement similaires sont proposées pour les dommages non-structuraux. Elles distinguent les composants sensibles au déplacement inter-étage (mur non-porteur, mur extérieur, finitions et plaquages, etc.) et ceux sensibles à l'accélération (équipements mécaniques et électriques).

Les dommages sont divisés en cinq niveaux :

- Aucun endommagement (None)
- Faible (Slight)
- Modéré (Moderate)
- Important (extensive)
- Complet (Complete)

En fonction du type de construction, la description des dommages structuraux et non-structuraux peut varier. Les courbes d'endommagement par défaut d'Hazus sont utilisées. Les dommages aux cheminées et parements de maçonnerie sont pris en compte implicitement. Les courbes d'endommagement aux éléments non-structuraux distinguent les composants sensibles aux déplacements entre étages (mur non-porteur, mur extérieur, finitions et plaquages, etc.) et ceux sensibles à l'accélération (équipements mécaniques, électriques, etc.). Il n'y a pas de résultat d'endommagement spécifique pour chacun des éléments. Les proportions des éléments considérées dans Hazus ne sont pas spécifiées.

Le pourcentage pour chaque degré de dommages est donné par type de construction et par type d'occupation. Un comptage est aussi possible par niveau de réglementation parasismique, dans ce cas *pre-code* (avant 1970), *low-code* (1970-1990) et *moderate-code* (après 1990).



**Figure 26. Estimation des dommages avec courbes de capacité et d'endommagement.**

La courbe de capacité indique la réponse en déplacement de chaque type de structure pour une sollicitation donnée. Les courbes d'endommagement permettent de quantifier l'endommagement pour un niveau donné de sollicitation sismique et cinq niveaux de dommages (modifiée d'après Hazus, 2003).

## 7.2. Dommages aux personnes

Les dommages aux victimes sont exprimés selon 4 degrés de blessures :

- Degré 1 : Blessures qui nécessitent des soins de base sans hospitalisation.
- Degré 2 : Blessures qui nécessitent des soins hospitaliers, mais qui ne mettent pas en danger la vie de la personne.
- Degré 3 : Blessures qui nécessitent des soins hospitaliers immédiats avec pronostic vital engagé.
- Degré 4 : Blessures mortelles.

Pour chaque degré d'endommagement et type de construction, un pourcentage de la population est attribué à chaque degré de blessure. Pour le degré d'endommagement complet, on attribue des pourcentages différents pour les bâtiments effondrés et ceux qui ne le sont pas. Un taux d'effondrement pour chaque type de construction est fourni.

Afin de prendre en compte les variations d'occupation des bâtiments durant une journée. Hazus propose des pourcentages d'occupation des bâtiments variables à 14:00, 17:00 et 02:00. Les valeurs proposées par défaut sont utilisées.

### 7.3. Demande en logements d'urgence

Les besoins en logement d'accueil sont estimés en prenant en compte le nombre de personnes à reloger de manière temporaire ou permanente.

Le modèle proposé par Hazus prend en compte les dommages aux bâtiments et considère qu'une fraction de la population à reloger aura besoin d'un centre d'accueil d'urgence en se basant sur le revenu, l'origine ethnique et l'âge des populations concernées. Les valeurs proposées par défaut sont utilisées.

### 7.4. Débris

La quantité de débris liés aux dommages structuraux et non-structuraux est estimée. Elle est divisée en deux types ; un type qui regroupe les matériaux en bois et brique et l'autre les matériaux en béton et acier.

Hazus propose une méthode quantitative qui se base sur les paramètres suivants :

- Densité des éléments structuraux et non-structuraux (tonnes par  $1000\text{pi}^2$  ou surface d'un étage) pour chaque type de bâtiments.
- Probabilités de dommages aux éléments structuraux et non-structuraux par région de recensement.
- Surface de chaque bâtiment par région de recensement.
- Quantité de débris générée pour les différents degrés de dommage.

Les valeurs de calcul proposées par défaut sont utilisées.

## 8. Résultats

Les résultats sont présentés pour les différents scénarios déterministes et pour l'aléa probabiliste prescrit dans le CNB.2015 (voir chapitre 6). Pour rappel, ils comprennent :

- Un **scénario intermédiaire** regroupant les 4 scénarios **SC1 à SC4** de magnitude 7.0. Les valeurs moyenne, maximum et minimum de ces 4 scénarios permettent de rendre compte de la variabilité des dommages sur l'île de Montréal liée à la localisation de la source sismique.
- Un **scénario extrême (SC6)** qui utilise la magnitude M 6.7 correspondant à la décomposition de l'aléa sismique pour une distance moyenne du centre de Montréal de 30km.
- Un **scénario centre (SC5)** correspondant à un séisme au centre de Montréal de magnitude M 5.8.
- Un **scénario probabiliste (SP)** calculé pour le centre de Montréal pour une période de retour de 2 475 ans (probabilité annuelle de dépassement de 0.000404) reprenant les valeurs de mouvements du sol préconisés dans le CNB-2015.

### 8.1. Mouvements du sol

Pour chaque scénario, les valeurs de PGA, de PGV, de Sa(0.3s) et Sa(1.0s) sont calculées pour une grille régulière de points en utilisant la relation d'atténuation composite CEUS (2008). Ces valeurs sont ensuite modifiées pour les effets de site en considérant la distribution par classes de sol proposée sur la carte de la Figure 7.

Le Tableau 21 compare les valeurs de mouvement du sol calculées au centre de Montréal (source du scénario **SC5**) pour chacun des scénarios à celles préconisées par le code CNB-2015 pour Montréal pour un sol de type C.

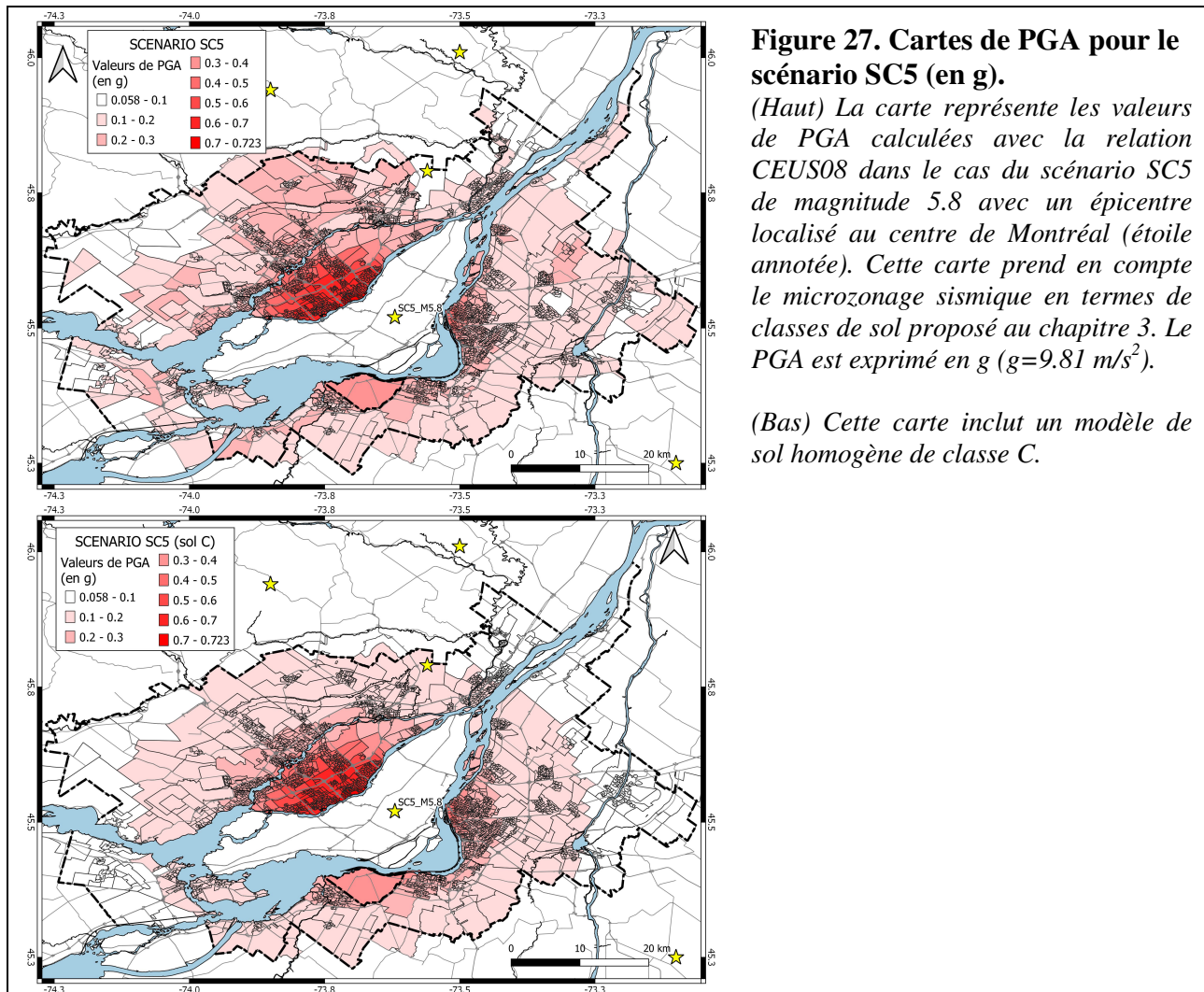
Scénarios	Distance à la source (km)	Valeur calculée au centre de Montréal en utilisant CEUS (2008) et un sol de type C			
		PGA (g)	PGV (inch/s)	SA_0.3s (g)	SA_1s (g)
SC1	64	0.09	4.3	0.19	0.12
SC2	50	0.13	5.6	0.25	0.15
SC3	56	0.11	5.0	0.22	0.13
SC4	51	0.13	5.4	0.24	0.14
Moyenne SC1 à SC4	--	0.12	5.1	0.23	0.14
SC5	0	0.77	14.2	0.89	0.38
SC6	30	0.14	4.9	0.25	0.13
SP	--	0.38	11.02	0.45	0.15

**Tableau 21. Mouvements forts calculés au centre de Montréal par scénarios.**

*Les valeurs de PGA, PGV et SA fournies sont celles calculées au centre de Montréal (point SC5) pour les trois groupes de scénarios et pour le code CNB2015 pour un sol de type C.  $g=9.81m/s^2$ .*

Les cartes de la Figure 27 illustrent les calculs de mouvements du sol dans le cas du scénario centre **SC5** en termes de PGA avec la relation composite CEUS08 en utilisant le microzonage proposé dans la Figure 7 (carte de gauche) et en considérant un modèle de sol homogène de type

C ( $V_{s30}=450\text{m/s}$ ) sur tout le territoire (carte de droite). On note la distribution différente des niveaux de PGA entre les deux cartes. Le calcul avec le microzonage prenant mieux en compte l'influence des sols sur les mouvements du sol.



## 8.2. Dommages aux bâtiments

Les dommages aux bâtiments sont estimés pour chacun des trois sets de scénarios selon les 4 degrés (faible, moyen, important et complet) décrits dans les annexes 3 et 4. Une multitude de représentations des résultats soit sous forme de tableaux soit sous forme de cartes peut être obtenue. Seuls deux types de tableaux et de cartes sont inclus dans le rapport.

Le Tableau 22 présente les résultats par types d'occupation résidentielle (unifamiliale et multifamiliale) en indiquant le nombre et le pourcentage de bâtiments subissant un certain degré de dommages. Pour le scénario moyen, la moyenne ainsi que les valeurs minimum et maximum des 4 scénarios **SC1** à **SC4** sont indiquées afin de faciliter la restitution des résultats.

Le Tableau 23 présente les résultats par grands types de construction (bois, acier, béton, maçonnerie) et indique le pourcentage des bâtiments subissant un certain degré de dommages.

	Types de bâtiment		Nombre de bâtiments par degrés de dommages (% par degré de dommages)					Nombre total de bâtiments
			Sans	Faible	Modéré	Important	Complet	
(a) SCÉNARIOS INTERMÉDIAIRES (SCI à SC4)	Résidentiel individuel	Min.	328 822	67 094	18 972	2079	279	452 189
		Max.	363 764	88 134	30 497	4056	681	
		<b>Moy.</b>	<b>346 283 (76.6)</b>	<b>77 535 (17.1)</b>	<b>24 768 (5.5)</b>	<b>3104 (0.7)</b>	<b>499 (0.1)</b>	
	Autre résidentiel	Min.	47 606	10 383	4714	971	225	70 421
		Max.	54 127	13 336	7083	1786	609	
		<b>Moy.</b>	<b>50 783 (72.1)</b>	<b>11 780 (16.7)</b>	<b>5951 (8.5)</b>	<b>1463 (2.1)</b>	<b>443 (0.6)</b>	
(b) SCÉNARIO EXTRÊME SC6	Résidentiel individuel		280 724 (62.1)	98 780 (21.8)	53 137 (11.8)	14 340 (3.2)	5207 (1.2)	452 189
	Autre résidentiel		40 911 (58.1)	14 535 (20.6)	9594 (13.6)	3363 (4.8)	2018 (2.9)	70 421
(c) SCÉNARIO CENTRE SC5	Résidentiel individuel		332 613 (73.6)	86 066 (19.0)	29 177 (6.5)	3778 (0.8)	554 (0.1)	452 189
	Autre résidentiel		46 586 (66.2)	14 356 (20.4)	7680 (10.9)	1524 (2.2)	275 (0.4)	70 421
(d) SCÉNARIO PROBABILISTE SP	Résidentiel individuel		376 728 (83.3)	66 643 (14.7)	8526 (1.9)	272 (0.1)	19	452 189
	Autre résidentiel		52 713 (74.9)	13 340 (18.9)	3996 (5.7)	357 (0.5)	16	70 421

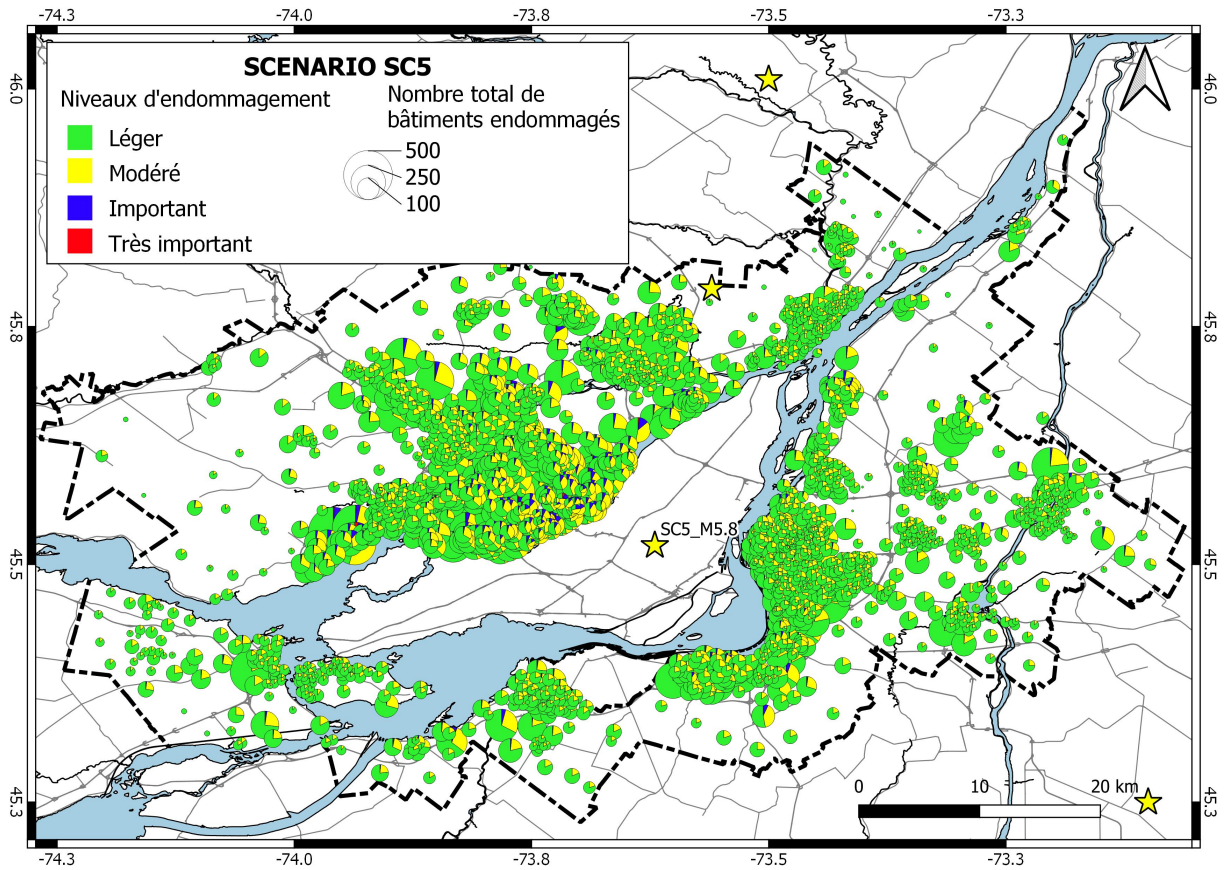
**Tableau 22. Dommages aux bâtiments par type d'occupation (en nombre et pourcentage).**  
(a) scénarios intermédiaires (b) scénario extrême (c) scénario centre et (d) scénario probabiliste. Les nombres entre parenthèses correspondent au pourcentage du total des bâtiments. Les degrés de dommages sont décrits en annexe 2.

	Types de construction		Nombre de bâtiments par degré de dommages (en %)					Nombre total de bâtiments
			Sans	Faible	Modéré	Important	Complet	
(a) SCÉNARIOS INTERMÉDIAIRES (SC1, SC2, SC3, SC4)	Bois	Min.	72.8	14.8	4.1	0.4	0.0	498 468
		Max.	80.6	19.5	6.7	0.8	0.1	
		<b>Moy.</b>	<b>76.8</b>	<b>17.1</b>	<b>5.4</b>	<b>0.6</b>	<b>0.1</b>	
	Béton	Min.	60.3	12.1	10.9	2.9	0.9	13 987
		Max.	73.2	14.9	16.3	5.9	2.5	
		<b>Moy.</b>	<b>65.9</b>	<b>13.7</b>	<b>13.9</b>	<b>4.6</b>	<b>1.9</b>	
	Maçonnerie	Min.	46.7	19.0	15.5	6.2	2.2	5 275
		Max.	57.1	19.8	18.7	9.4	5.3	
		<b>Moy.</b>	<b>51.9</b>	<b>19.4</b>	<b>17.1</b>	<b>7.8</b>	<b>3.7</b>	
	Maisons mobiles	Min.	<b>38.5</b>	<b>17.6</b>	<b>16.2</b>	<b>5.9</b>	<b>1.2</b>	4 883
		Max.	59.1	21.3	25.6	11.9	3.2	
		<b>Moy.</b>	<b>50.1</b>	<b>19.2</b>	<b>19.9</b>	<b>8.5</b>	<b>2.4</b>	
Tous types	Min.	72.0	14.8	4.5	0.6	0.1	522 613	
	Max.	80.0	19.4	7.2	1.1	0.2		
	<b>Moy.</b>	<b>76.0</b>	<b>17.1</b>	<b>5.9</b>	<b>0.9</b>	<b>0.2</b>		
(b) SCÉNARIO EXTRÊME SC6	Bois		62.3	21.9	11.7	3.1	1.0	498 468
	Béton		49.2	15.4	18.5	8.9	8.0	13 987
	Maçonnerie		37.8	17.8	18.2	11.3	14.9	5 275
	Maisons mobiles		41.7	19.5	21.9	11.3	5.7	4 883
	Tous types		61.5	21.7	12.0	3.4	1.4	522 613
(c) SCÉNARIO CENTRE SC5	Bois		73.3	19.3	6.5	0.8	0.1	498 468
	Béton		60.7	16.8	17.2	4.3	1.0	13 987
	Maçonnerie		48.1	20.5	19.0	8.8	3.6	5 275
	Maisons mobiles		58.1	19.4	17.2	4.8	0.5	4 883
	Tous types		72.6	19.2	7.1	1.0	0.2	522 613
(d) SCÉNARIO PROBABILISTE SP	Bois		82.9	15.2	1.9	0.0	0.0	498 468
	Béton		69.4	16.2	12.6	1.7	0.1	13 987
	Maçonnerie		54.9	25.2	15.5	3.8	0.4	5 275
	Maisons mobiles		76.7	14.5	7.9	0.9	0.0	4 883
	Tous types		82.2	15.3	2.4	0.1	0.0	522 613

**Tableau 23. Dommages par types de construction (en % du total).**

(a) scénarios intermédiaires (b) scénario extrême (c) scénario centre et (d) scénario probabiliste. Les degrés de dommages sont décrits en annexe 2.

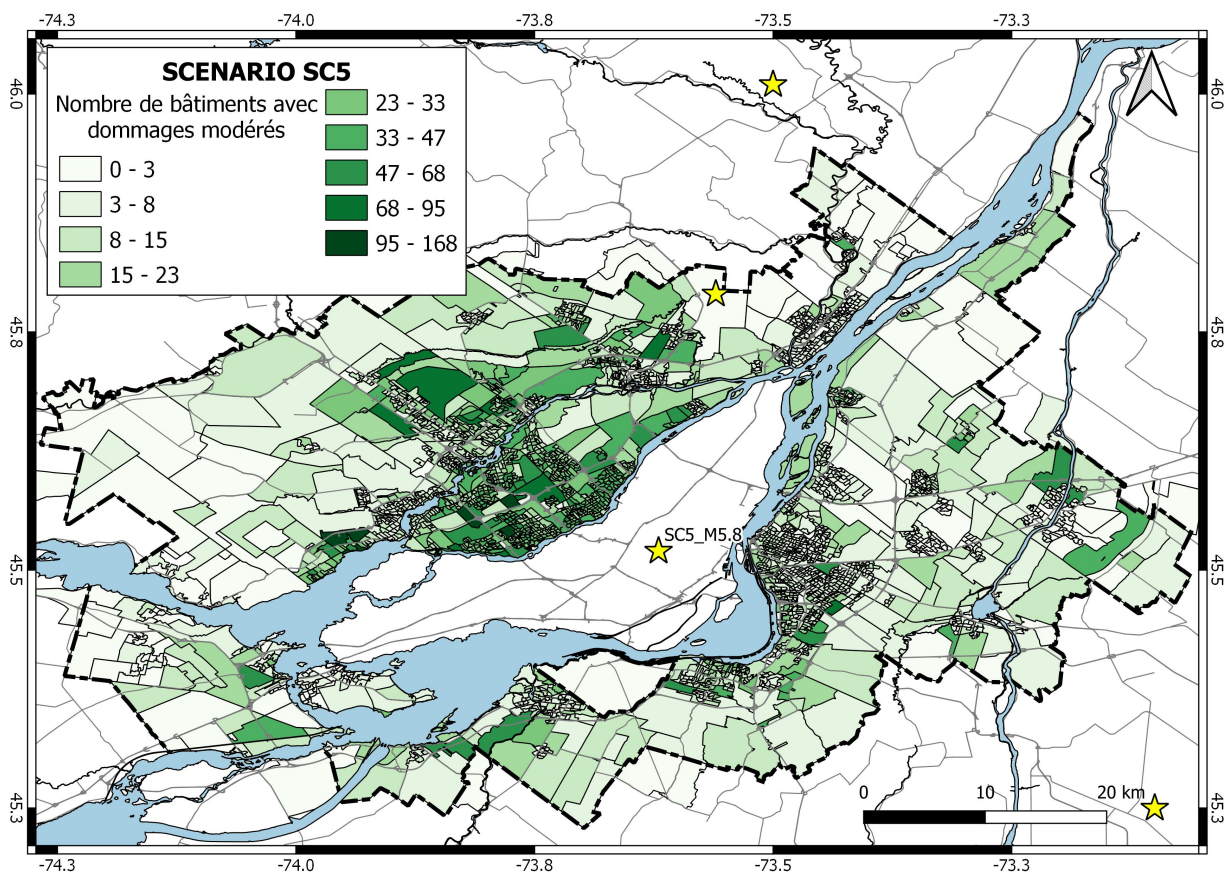
La carte de la Figure 28 montre la répartition des dommages en termes de nombre de bâtiments par degrés de dommages tous types de construction confondus pour chaque AD dans le cas du scénario SC5.



**Figure 28. Répartition des dommages pour le scénario SC5 (par degrés de dommages et tous types de construction).**

*La surface des ronds est proportionnelle au nombre total de bâtiments de chaque AD.*

À titre d'exemple, la carte de la Figure 29 montre le nombre de bâtiments subissant des dommages modérés par AD pour le même scénario SC5.



**Figure 29. Répartition des dommages de degré modéré pour le scénario SC5 (nombre de bâtiments, tous types de construction confondus).**

### 8.3. Montant des dommages aux bâtiments

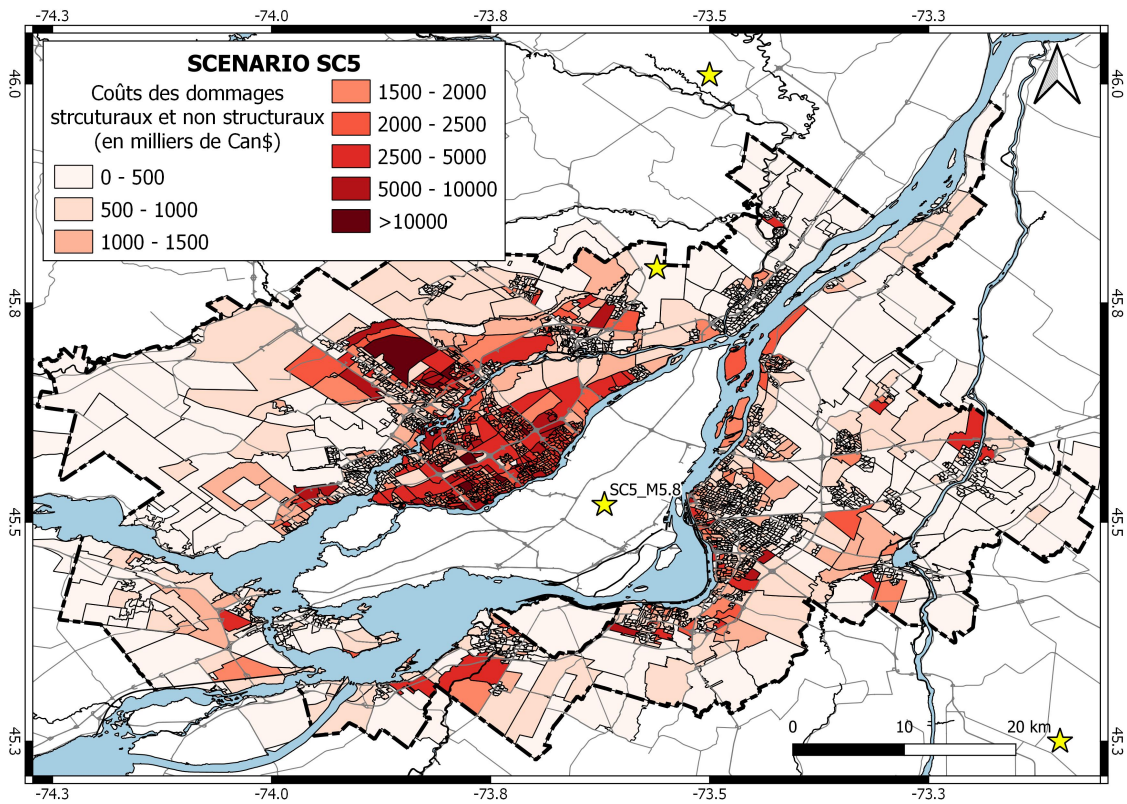
Une estimation du montant des dommages aux bâtiments (structuraux et non-structuraux) ainsi qu'à son contenu est proposée pour chacun des scénarios. Les résultats sont fournis par type de construction (bois, acier, béton, maçonnerie) dans le Tableau 24. D'autres représentations des résultats sont aussi possibles.

À titre d'exemple, la carte de la Figure 30 montre la distribution du coût total des dommages aux bâtiments (structuraux et non-structuraux) par AD pour le scénario centre **SC5** et la carte de la Figure 31 pour le scénario probabiliste **SP** pour tous types de construction confondus.

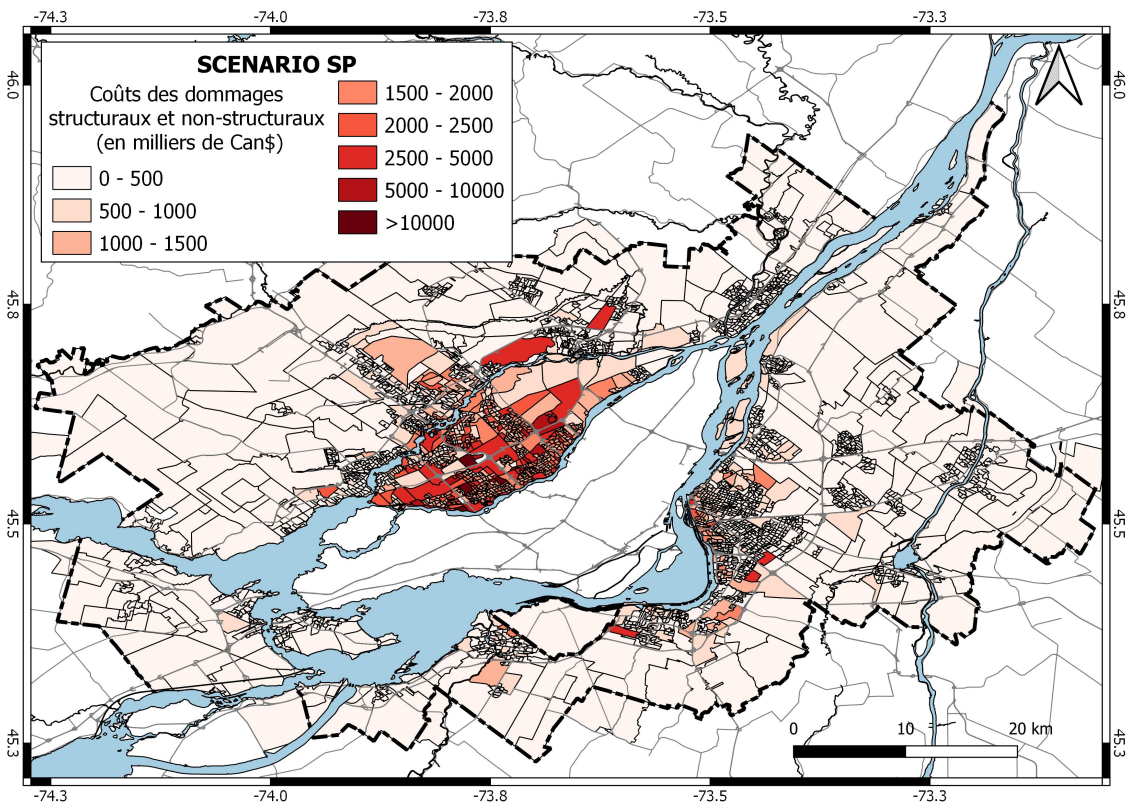
	Types de construction		Montant des dommages par types (millions de Can\$)				Valeur foncière totale du parc résidentiel
			(a) Structuraux	(b) Non-structuraux	(a+b) Total	Contenu	
(a) SCÉNARIOS INTERMÉDIAIRES (SC1, SC2, SC3, SC4)	Bois	Min.	213	1053	1266	371	99 640
		Max.	340	1707	2046	630	
		<b>Moy.</b>	<b>278</b>	<b>1386</b>	<b>1664</b>	<b>506</b>	
	Béton	Min.	35	150	185	29	8 760
		Max.	72	312	383	62	
		<b>Moy.</b>	<b>56</b>	<b>243</b>	<b>300</b>	<b>48</b>	
	Maçonnerie	Min.	17	38	55	9	373
		Max.	28	70	99	18	
		<b>Moy.</b>	<b>23</b>	<b>54</b>	<b>77</b>	<b>14</b>	
	Maisons mobiles	Min.	5	14	19	2	427
		Max.	8	22	30	4	
		<b>Moy.</b>	<b>7</b>	<b>19</b>	<b>26</b>	<b>3</b>	
Tous types	Min.	270	1254	1524	411	109 200	
	Max.	447	2110	2557	713		
	<b>Moy.</b>	<b>364</b>	<b>1702</b>	<b>2065</b>	<b>571</b>		
(b) SCÉNARIO EXTRÊME SC6	Bois		870	4094	4965	1493	99 640
	Béton		141	693	834	154	8 760
	Maçonnerie		52	150	201	39	373
	Maisons mobiles		11	32	43	6	427
	Tous types		1074	4969	6043	1691	109 200
(c) SCÉNARIO CENTRE SC5	Bois		330	1999	2329	876	99 640
	Béton		67	365	432	98	8 760
	Maçonnerie		24	62	87	18	373
	Maisons mobiles		5	15	20	3	427
	Tous types		427	2442	2868	994	109 200
(c) SCÉNARIO PROBABILISTE SP	Bois		111	1164	1275	694	99 640
	Béton		32	225	257	73	8 760
	Maçonnerie		11	24	35	10	373
	Maisons mobiles		2	6	8	2	427
	Tous types		156	1420	1575	779	109 200

**Tableau 24. Montants des dommages par types de construction (en millions de Can\$).**

(a) scénarios intermédiaires (b) scénario extrême (c) scénario centre et (d) scénario probabiliste.



**Figure 30. Distribution des coûts des dommages structuraux et non-structuraux pour le scénario SC5 (tous types de construction confondus).**



**Figure 31. Distribution des coûts des dommages aux bâtiments pour le scénario SP (tous types de construction confondus).**

## 8.4. Atteintes aux personnes

Une estimation des atteintes aux personnes est proposée pour 2 périodes de la journée ; à 2 heures du matin lorsqu'une majorité de la population est à la maison et à 14 heures lorsqu'une part de la population est hors de la maison.

Les résultats sont fournis pour ces 2 périodes selon les 4 degrés de blessures :

- Degré 1 : Blessures qui nécessitent des soins de base sans hospitalisation.
- Degré 2 : Blessures qui nécessitent des soins hospitaliers sans que la vie de la personne soit en danger.
- Degré 3 : Blessures qui nécessitent des soins hospitaliers immédiats avec pronostic vital engagé.
- Degré 4 : Blessures mortelles

Le Tableau 25 fournit les résultats des calculs pour les différents scénarios. Les valeurs indiquées correspondent à la somme des valeurs statistiques de chaque AD et l'on doit considérer l'ordre de grandeur de ces résultats et non la valeur moyenne exacte.

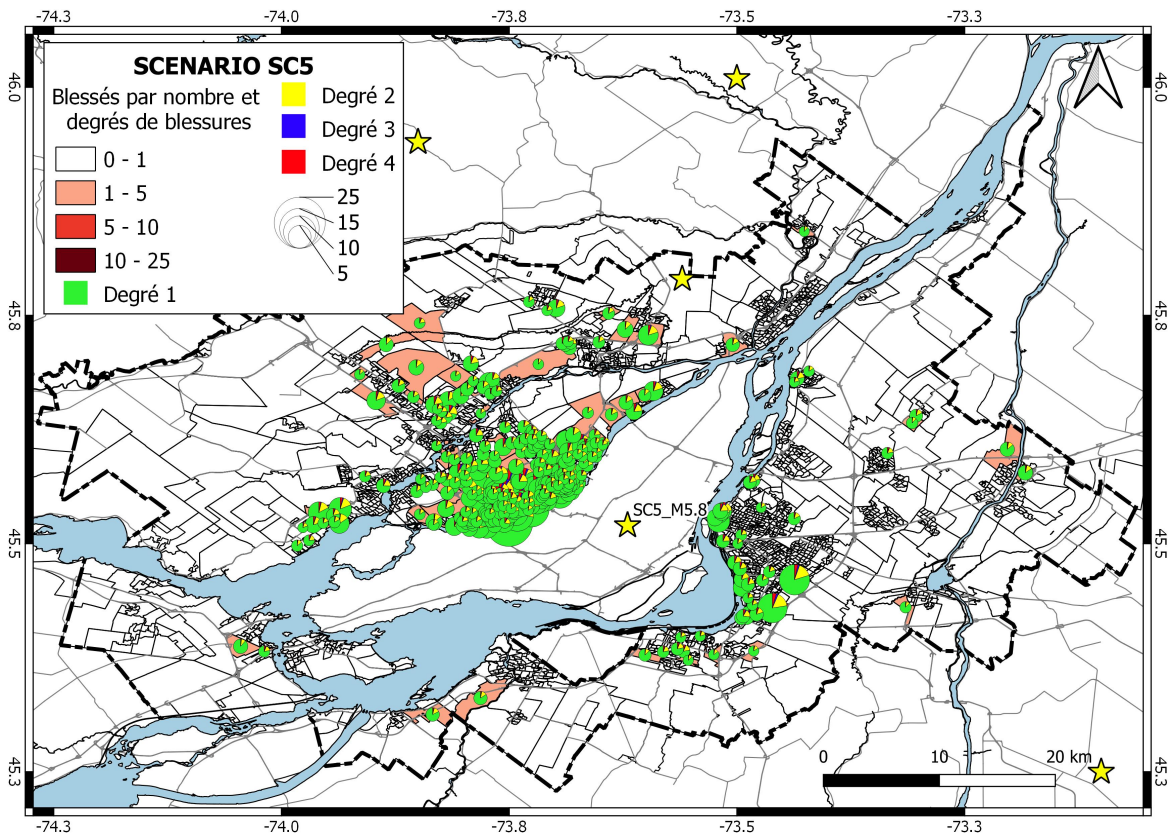
	Période de la journée	Valeurs pour SC1 à SC4	Nombre de personnes par degré de blessure			
			1	2	3	4
(a) SCÉNARIOS INTERMÉDIAIRES (SC1, SC2, SC3, SC4)	02:00	Min.	798	134	15	29
		Max.	1824	375	50	99
		<b>Moy.</b>	<b>1424</b>	<b>285</b>	<b>37</b>	<b>72</b>
	14:00	Min.	154	26	3	5
		Max.	369	76	10	19
		<b>Moy.</b>	<b>282</b>	<b>57</b>	<b>7</b>	<b>14</b>
(b) SCÉNARIO EXTRÊME SC6	02:00	4569	1124	150	290	
	14:00	916	225	31	57	
(c) SCÉNARIO CENTRE SC5	02:00	1336	229	24	48	
	14:00	252	44	4	9	
(d) SCÉNARIO PROBABILISTE SP	02:00	430	39	2	4	
	14:00	87	8	0	1	

**Tableau 25. Dommages aux personnes par période de la journée.**

(a) scénarios intermédiaires (b) scénario extrême (c) scénario centre et (d) scénario probabiliste.

Pour tous les scénarios et tous degrés de blessures confondus, le nombre total de personnes atteintes par AD est faible et peu ou pas représentatif d'une zone géographique spécifique, excepté pour les scénarios **SC5** et **SC6** qui ont leur épicerie proche de certaines régions de la CMM. Pour le scénario **SC5**, le nombre de personnes atteintes tous degrés de blessures confondus par AD n'est pas significatif. Pour le scénario **SC6**, 75 des AD ont une valeur de

blessés inférieure à 3 et seules les AD proche de l'épicentre ont des valeurs supérieures avec un maximum de 230, tous degrés de blessures confondus, et un nombre de personnes mortellement atteintes maximum est de 15. La carte de la Figure 32 montre la répartition par AD des personnes atteintes par degrés de blessures.



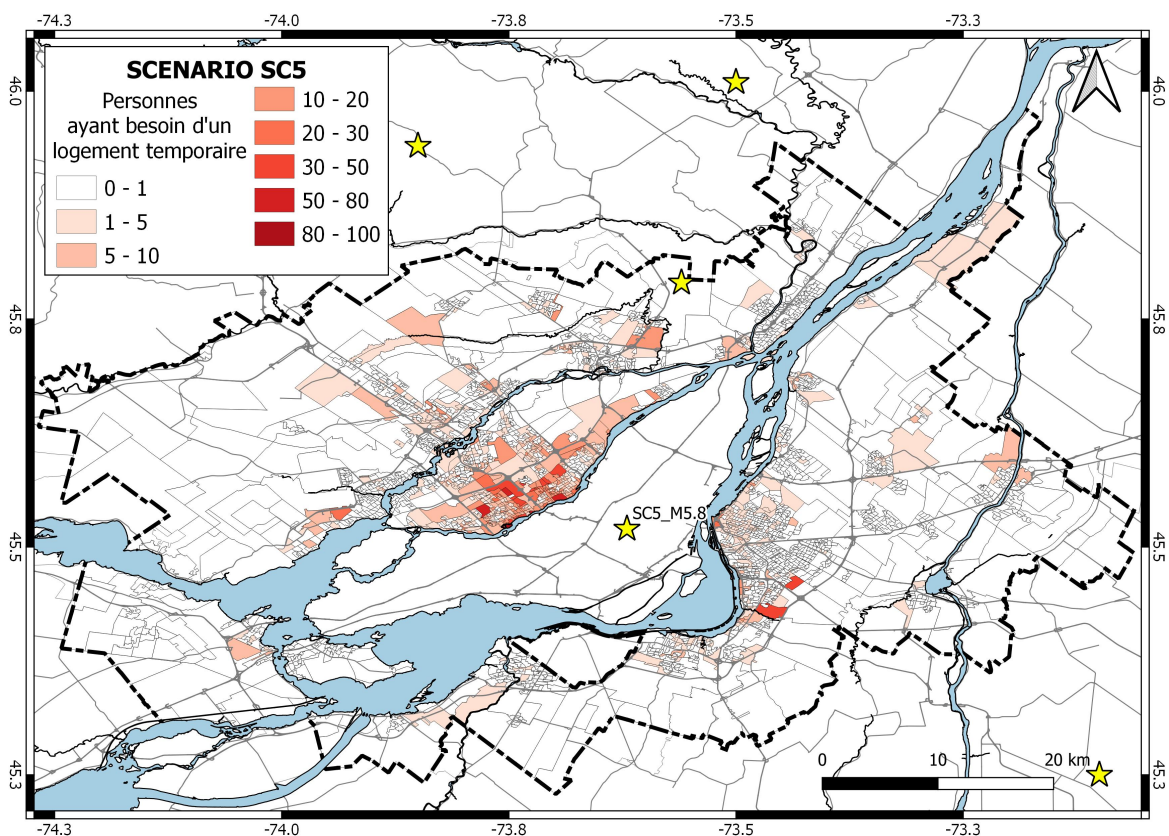
**Figure 32. Répartition des personnes blessées dans le cas du scénario centre SC5 à 2h du matin.**

*Les graphes circulaires sont indiqués pour les AD avec plus de 1 personne atteinte de blessures de degré 2.*

## 8.5. Personnes déplacées et besoins en espace d'accueil

Une évaluation préliminaire des besoins en hébergement est proposée à partir de l'estimation des personnes déplacées. Pour les scénarios intermédiaires, la valeur moyenne est de l'ordre de 11 000 personnes déplacées, dont 4500 personnes qui auraient besoin d'un hébergement temporaire. Pour le scénario **SC5**, autour de 12 000 personnes seraient déplacées dont 5 000 qui auraient besoin d'un hébergement temporaire. Pour le scénarios **SC6**, autour de 35 000 personnes seraient déplacées dont 16 000 qui auraient besoin d'un hébergement temporaire. Pour le scénario **SP**, les valeurs sont de l'ordre du millier.

La carte de la Figure 33 montre la distribution géographique des personnes ayant besoin d'un logement temporaire pour le scénario centre **SC5**. Les valeurs pour les scénarios moyens et intermédiaires sont trop faibles pour caractériser une zone géographique particulière.



**Figure 33. Répartition des personnes ayant besoin d'un logement temporaire pour le scénario centre SC5 par AD.**

## 8.6. Quantité de déblais

Une première estimation de la quantité de déblais générée par les dommages aux bâtiments est proposée. Cette estimation prend en compte la masse volumique des éléments structuraux et non-structuraux de chaque type de bâtiments, la surface totale des bâtiments et la distribution des degrés de dommages par AD. Deux types de déblais sont distingués, ceux constitués de bois et brique et ceux d'acier et de béton qui nécessitent des moyens d'évacuation plus importants.

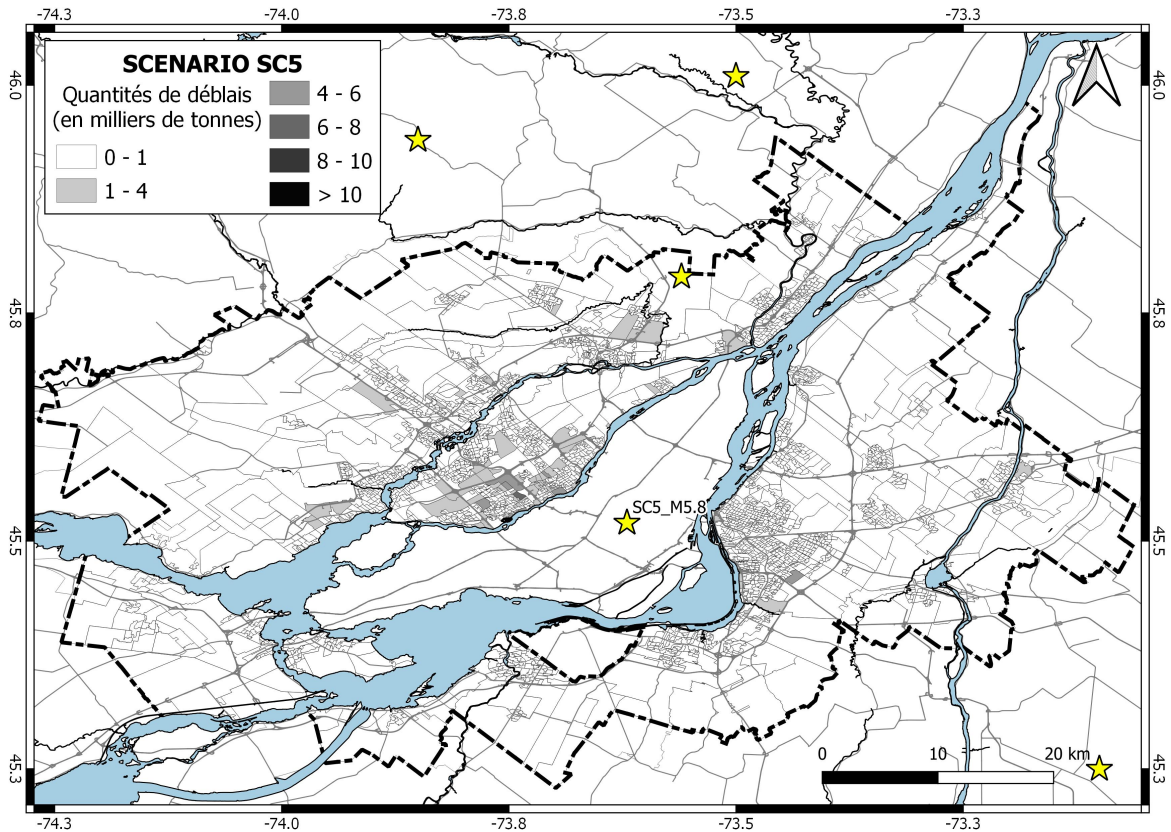
Le Tableau 26 donne les valeurs de tonnages totales et par types de déblais pour les différents scénarios étudiés.

Scénarios		Quantité de déblais par types ( en kTonnes)		
		Bois et brique	Acier et béton	Tous matériaux
(a) SCÉNARIOS INTERMÉDIAIRES (SC1, SC2, SC3, SC4)	Min.	152	282	434
	Max.	257	609	866
	<b>Moy.</b>	<b>207</b>	<b>474</b>	<b>682</b>
(b) SCÉNARIO EXTRÊME (SC6)		640	1519	2158
(c) SCÉNARIO CENTRE (SC5)		239	474	713
(d) SCÉNARIO PROBABILISTE (SP)		87	153	241

**Tableau 26. Quantité de déblais générés (en millier de tonnes).**

(a) scénarios intermédiaires (b) scénario extrême (c) scénario centre et (d) scénario probabiliste.

La quantité de déblais bois&brique et acier&béton estimée pour le scénario centre **SC5** est de 362 000 et 1 128 000 tonnes respectivement, soit un total d'environ 1.5 million de tonnes. La carte de la Figure 34 montre la distribution des débris, tous matériaux confondus, par AD pour ce scénario. Il est à noter que cette quantité de débris correspond à peu à près à 60 000 rotations de camions (25 tonnes par camion).



**Figure 34. Répartition des débris (tous matériaux confondus) pour le scénario SC5 (en millier de tonnes).**

## 9. Discussion

Ce chapitre analyse l'influence de certains paramètres sur les résultats finaux en se basant sur les travaux de plusieurs étudiants à la maîtrise.

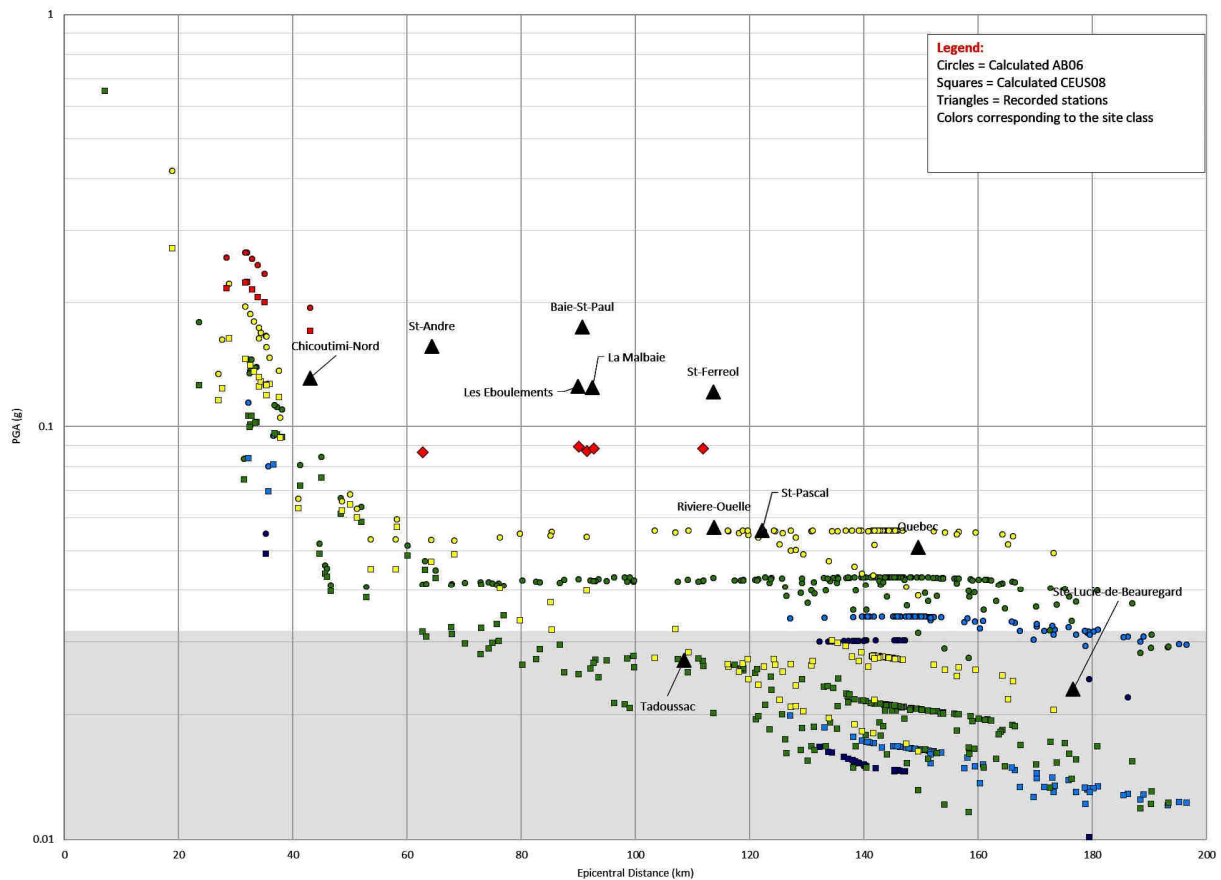
### 9.1. Relations d'atténuation des ondes sismiques

Les relations d'atténuation des ondes sismiques sont utilisées pour estimer les paramètres des mouvements du sol en fonction de la magnitude de la source sismique et de sa distance au site étudié. Ces relations sont élaborées à partir des données collectées par les stations d'enregistrements sismiques installées un peu partout à la surface du globe. Leur validité est d'autant plus grande que le nombre de séismes enregistré est grand et que la distribution de ces séismes en termes de magnitude et de distance source-station est étendue.

Dans la région de Montréal et plus généralement dans l'Est du Canada, les données d'enregistrements sismiques sont peu nombreuses et le nombre de séismes de magnitude supérieure à 4.5 est très faible. Deux caractéristiques qui ne permettent pas de produire une relation fiable spécifique à la région. Il existe cependant des relations développées pour de plus grandes régions qui se basent sur des données dans des contextes tectoniques similaires sans toutefois pouvoir tester pleinement leur validité au contexte québécois. L'incertitude est donc d'autant plus grande que l'on cherche à estimer les mouvements du sol à faible distance de la source pour des séismes de magnitudes élevées, deux configurations qui sont les plus propices à générer des dommages.

Pour cette étude, les informations compilées concernent les deux seuls événements documentés proches de Montréal et qui ont causés des dommages. Ce sont les séismes de Cornwall (1944, M5.4) et du Saguenay (1988, M=5.9). Une étudiante à la maîtrise a comparé les valeurs de mouvements du sol mesurés ou rapportés et celles calculées à l'aide de certaines relations disponibles dans HazCan (Sun, 2019).

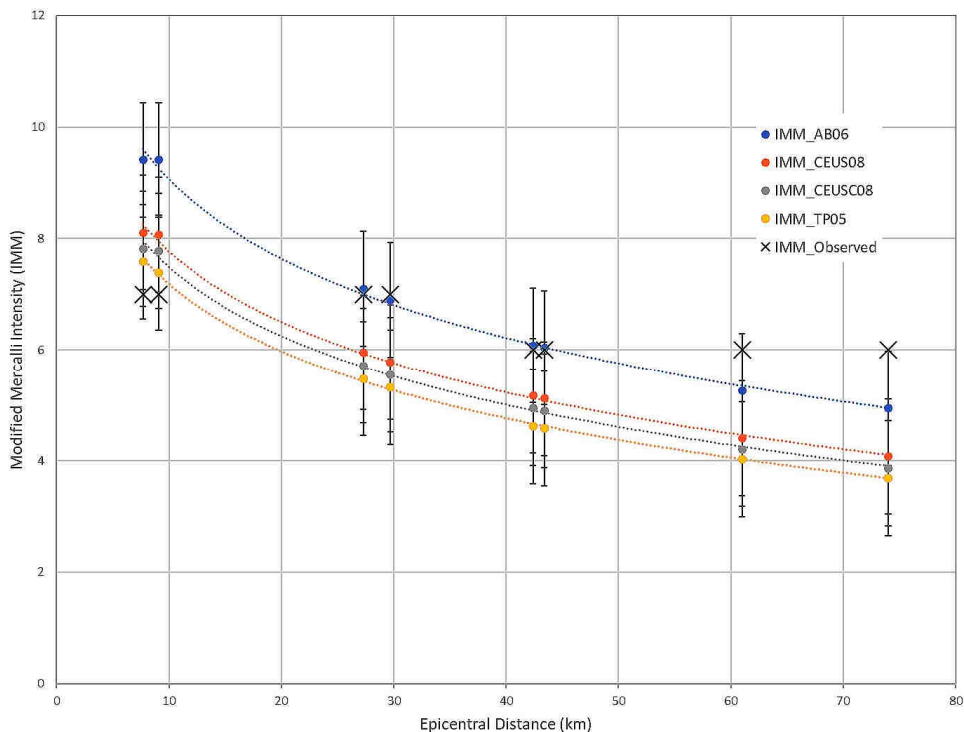
Le séisme du Saguenay a permis de comparer les valeurs de PGA mesurées par les différentes stations sismiques proches de l'épicentre et les valeurs calculées par les deux relations d'atténuation sélectionnées pour cette étude (CEUS08 et AB06). Le graphe de la Figure 35 montre que les deux relations ont des comportements similaires pour des distances inférieures à 70km, distances qui concernent cette étude. Par contre, aucune des deux relations n'est capable de reproduire les accélérations mesurées par les stations sismiques à moins de 100km de l'épicentre. Plusieurs chercheurs ont expliqué les valeurs de PGA mesurées relativement fortes par rapport aux calculs à partir de lois d'atténuation en invoquant une discontinuité géologique parallèle au Saint-Laurent ainsi que des phénomènes de directivité liés à l'orientation de la faille (Boore et Atkinson, 1992; Somerville et al., 1990).



**Figure 35. Comparaison des valeurs de PGA calculées et mesurées lors du séisme du Saguenay (1988, M5.9).**

*Les triangles correspondent aux valeurs de PGA mesurées par les stations sismiques. Les ronds sont les valeurs calculées pour chaque région de recensement en utilisant la relation AB06. Les carrés les valeurs calculées en utilisant la relation hybride CEUS08. Les couleurs indiquent la classe de sol moyenne estimée pour chaque région de recensement. Rouge:D; Jaune:C; Violet:B et Bleu:A (D'après Sun, 2019).*

La comparaison des mouvements du sol pour le séisme de Cornwall (1944, M5.4) est encore plus difficile, car il n'existe pas d'enregistrement sismique proche de la région et les observations des dommages restent peu nombreuses. Le graphe de la Figure 36 utilise les huit zones de recensement (indiqués par une croix) pour lesquelles des descriptions de dommages sont disponibles. Ces descriptions sont traduites en termes d'intensité et moyennées sur chaque zone. Les valeurs de PGA sont calculées avec les différentes relations d'atténuation (entre autres CEUS08 et AB06) pour la distance entre l'épicentre et le centre de chaque zone. Les valeurs calculées sont ensuite converties en termes d'intensité MMI. Le graphe nous indique que les relations AB06 et CEUS08 sont les plus proches des observations pour des distances jusqu'à 50km, mais qu'en moyenne, la relation CEUS08 est la plus proche des observations à ces distances.



**Figure 36. Comparaison des valeurs de MMI calculées et estimées lors du séisme du Cornwall (1945, M5.4).**

*Les croix indiquent les valeurs déduites des observations de dommages. Les ronds de couleurs sont les valeurs estimées à partir de quatre relations d'atténuation en termes de PGA converties en MMI (D'après Sun, 2019).*

Ces deux analyses ne sont pas suffisamment satisfaisantes pour tirer des conclusions quant à la validité de la relation utilisée (i.e. CEUS08). Elles montrent que les mouvements du sol pourraient être surestimés à faible distance de la source (et donc induire plus de dommages) et sous-estimés à des distances plus grandes (et donc induire moins de dommages sans pour autant connaître l'influence générale. Afin de rendre compte de l'influence du choix de la relation d'atténuation sur les résultats, une comparaison est proposée entre la relation CEUS08, utilisée pour cette étude et la relation AB06 discutée ci-dessus dans le cas du scénario SC5 dont l'épicentre est au centre de Montréal. La colonne AB06 du Tableau 28 indique l'influence du changement de relation d'atténuation sur les résultats du calcul. On note que les facteurs multiplicatifs sont élevés pour certains paramètres de calcul. Comme indiqué précédemment, la relation AB06 surestime les mouvements du sol à faible distance de l'épicentre et ceci a des conséquences sur le nombre de bâtiments subissant des degrés de dommages élevés.

## 9.2. Niveaux de code parasismique

Un étudiant à la maîtrise a recensé plusieurs études à travers le monde et en Amérique du nord portant sur l'analyse de la capacité des bâtiments à ossature légère en bois (W1) et leur réponse aux sollicitations sismiques, ainsi que des mesures de vibrations ambiantes réalisées sur ce type de bâtiments à Montréal. Des courbes de capacité ont été tirées de ces études et des données de vibrations ambiantes afin de les comparer avec les valeurs de capacité proposées par la méthode Hazus, et cela pour les différents niveaux de code parasismique (Thibodeau, 2020).

Dans l'analyse du risque sismique présentée aux sections précédentes, les niveaux de conception suivants sont appliqués pour les bâtiments W1: avant 1970 – *Pre code*; entre 1970 et 1990 – *Low code* et après 1990 – *Moderate code*.

L'analyse de Thibodeau (2020) conclut que les courbes de capacité des bâtiments à ossature légère sont plus près des courbes *Moderate code* de Hazus pour les bâtiments W1 construits après 1970. Pour les bâtiments construits avant 1970, il recommande d'utiliser la courbe pour les niveaux *Low code* et *Pre code* aux vues de la grande variabilité dans la construction entre 1940 et 1970 sans toutefois pouvoir indiquer la manière de les caractériser.

Afin d'étudier l'influence sur les résultats de cette nouvelle répartition par niveaux de conception, le scénario centre **SC5** est recalculé en classant les bâtiments W1 construits avant 1970 en *Pre code* et après 1970 en *Moderate code*. Le Tableau 27 indique les changements dans la distribution des bâtiments W1 avec cette nouvelle classification (*alternative*) par rapport à celle utilisée pour cette étude (*actuelle*). On note que la différence des résultats avec les deux distributions est faible, la distribution alternative réduisant de manière négligeable certains des paramètres.

Types d'occupation	Actuelle	Alternative
	<1970 <i>Pre-code</i> 1970-1990 <i>Low code</i> ≥1990 <i>Moderate code</i>	<1970 <i>Pre Code</i> ≥1970 <i>Moderate code</i>
<b>RES1</b>	PC: 24 LC: 41 MC: 35	PC: 24 LC: MC: 76
<b>RES3A</b>	PC: 42 LC: 21 MC: 37	PC: 42 LC: MC: 58
<b>RES3B</b>	PC: 42 LC: 28 MC: 30	PC: 42 LC: MC: 58

**Tableau 27. Niveau de conception parasismique (en %) par types d'occupation pour les bâtiments W1.**

*Les valeurs de base sont celles utilisées pour cette étude. La colonne de droite (alternative) indique la distribution en utilisant la classification en fonction de l'année de construction indiquée.*

### 9.3. Carte des conditions de sol

L'élaboration de la carte de microzonage en termes de classes de sol a nécessité de faire des hypothèses pour déterminer les valeurs de  $V_{s30}$  à partir de différentes sources d'information. Une discussion détaillée sur l'incertitude liée à ces hypothèses sera incluse dans la publication à venir. L'emphase est mise ici à évaluer son influence dans le cas du scénario SC5 en comparant les résultats avec le microzonage avec ceux obtenus en utilisant un modèle de sol homogène de classe C ( $V_{s30}=450\text{m/s}$ ) sur tout le territoire. On note dans le Tableau 28 que pour ce scénario, l'utilisation du microzonage induit une augmentation de 10 à 50% selon les paramètres calculées. Cette augmentation va différer d'un scénario à un autre.

Scénario <b>SC5</b> Paramètres comparés	Facteur de multiplication par rapport à l'analyse de base en utilisant :		
	AB06	W1 <1970 <i>Pre code</i> ≥1970 <i>Moderate code</i>	Modèle de sol homogène de classe C (pas de microzonage)
Nombre de bâtiments avec :			
Dommages faibles	1.3	1.0	0.9
Dommages modérés	2.6	0.9	0.8
Dommages importants	5.2	0.8	0.7
Dommages complets	14.1	1.0	0.5
Coût des dommages	4	0.9	0.7
Blessés légers (degrés 1 et 2)	7.7	1.0	0.6
Blessés graves (degrés 3 et 4)	9.3	1.0	0.5
Débris	5.5	1.0	0.6
Nombre de personnes déplacées	5.5	1.0	0.6

**Tableau 28. Influence des résultats pour le scénario SC5 de plusieurs paramètres utilisés par HazCan.**

*Les valeurs indiquées dans les colonnes correspondent au rapport entre le résultat avec le nouveau paramètre et celui de base.*

## 10. Recommandations

Le rapport présente les résultats de l'analyse de risques sismiques résidentiels pour la CMM hors île de Montréal. Ce travail a permis de compiler les plus récentes données démographiques ainsi que d'inventorier les typologies principales des bâtiments résidentiels. Ces informations ont été adaptées à l'outil HazCan, version canadienne d'Hazus (FEMA, 2003). Cette analyse de risque est maintenant à coupler avec l'étude précédente pour l'île de Montréal afin d'avoir un set de données cohérentes sur la totalité de la CMM.

La base de données développée à l'échelle des aires de dissémination inclut:

- La population de jour et de nuit ainsi que toute une série de paramètres démographiques.
- Le nombre de bâtiments par types d'occupation et types de construction, la surface totale, la valeur foncière du bâti et de son contenu

Ces informations vont permettre de poursuivre des analyses qui concernent la gestion et la planification des secours, mais aussi d'étudier les conséquences des effets induits par un séisme majeur.

Dans cette analyse l'influence des flux journaliers de population de la grande couronne vers le centre de Montréal a été prise en compte en se basant sur une enquête "déplacement Domicile-Travail" de 2011. Il conviendrait de mettre à jour ces informations en utilisant des données plus récentes.

Le calcul avec le scénario probabiliste d'aléa sismique SP proposé par Séisme Canada donne des résultats similaires à ceux obtenus avec les scénarios déterministes intermédiaires (**SC1** à **SC4**). Ils sont à considérer comme des scénarios standards. Les deux autres scénarios **SC5** et **SC6** représentent des cas crédibles. Il convient de choisir les uns ou les autres en fonction des objectifs visés. Il est à noter que le scénario **SC6** est le plus pénalisant car sa localisation est proche d'une zone avec des sols de types D et E dans la partie NE du territoire qui vont amplifier les ondes sismiques et plusieurs zones urbanisées. Ce territoire devrait faire l'objet d'une étude plus approfondie des sols.

La carte de microzonage proposée pour la CMM (Figure 7) se base en partie sur les données d'un modèle 3D fourni par Ross et al. (2015) qui n'ont pu être validées par des mesures de terrain. Dans les zones urbanisées identifiées en classes D et E de la carte, on préconise des mesures de terrain complémentaires afin de confirmer ces classes en appliquant l'approche que l'équipe de McGill a développée pour élaborer le microzonage de Montréal, Laval, Longueuil et Repentigny.

La restitution des résultats devrait être le produit d'une réflexion collective entre le client et le prestataire afin que ces résultats soient bien compris et puissent être exploités de la meilleure manière possible. Les formats de restitution peuvent être des tableaux (format Excel ou autres) et des cartes (format papier ou SIG). Une série de tableaux (format .xls) et de fichiers vecteurs ont été fournis à la fin du projet précédent. Il convient de faire le point sur la pertinence de leurs formats et des informations fournies avant la restitution du rapport final.

Une prochaine étape pour une évaluation compréhensive du risque sismique de la CMM, et éventuellement sur l'ensemble du Québec, est l'application de la méthodologie pour l'estimation des dommages moyens annuels développée par la FEMA en utilisant l'outil Hazus<sup>4</sup>.

## 11. Publications acceptées durant le mandat

- Rosset, Ph., Bent, A. and Chouinard, L. (2020). Correlating DYFI Data With Seismic Microzonation in the Region of Montreal. *Earth Science Research* (ESR), 9:2, 85-92.
- \* Rosset, Ph., Kert, M., Youance, S., Nollet, M.-J., Chouinard L. (2019). Could Montreal residential buildings suffer important losses in case of major earthquakes? Proceedings of the 12th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Quebec, Canada, June17-20. 7 pages.
- \* Rosset, Ph., Kert, M., Youance, S., Nollet, M.-J., Chouinard L. (2019). The use of HazCan to assess the earthquake risk of residential buildings in Montreal, Canada. Proceedings of the Conference of the Canadian Society of Civil Engineering, Laval, Canada, June12-15. 4 pages.
- \* Gendron, A., Nollet, M.-J., Ravary-Berger, H., Chouinard L. (2019). Structural characterization of residential buildings in Montreal with mixed structural systems for seismic risk studies. Proceedings of the 12th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Quebec, Canada, June17-20. 7 pages.
- \* Kraiem, M., Gendron, A., Nollet, M.-J. and Luc Chouinard (2019). Characterization of the lateral capacity of unreinforced masonry residential buildings in Montreal for seismic risk study. Proceedings of the Conference of the Canadian Society of Civil Engineering, Laval, Canada, June12-15. 10 pages.
- Thibodeau, F. (2020). Étude comparative sur la capacité des bâtiments à ossature légère en bois à Montréal. Rapport de maîtrise, Ecole de Technologie Supérieure, Université du Québec, 141 pages.
- Sun, A. (2019). Calibration of Seismic Risk Analyses through Reanalysis of Historical Earthquakes - An Application of Hazus-MH2.1 Canada. Mémoire de maîtrise, Université McGill, 104 pages.

Note: Les articles marqués par une \* ont fait l'objet d'une présentation orale durant la conférence mentionnée.

---

<sup>4</sup> FEMA: Hazus; Estimated Annualized Earthquake Losses for the United States (2017). [https://www.fema.gov/media-library-data/1497362829336-7831a863fd9c5490379b28409d541efe/FEMAP-366\\_2017.pdf](https://www.fema.gov/media-library-data/1497362829336-7831a863fd9c5490379b28409d541efe/FEMAP-366_2017.pdf)

## 12. Références

- Adams J (2011) Seismic hazard maps for the national building code of Canada. In: Proceeding of the CSCE 2011 general conference, Ottawa.
- Adams, J., and Basham, P.W. (1991). The seismicity and seismotectonics of eastern Canada, In *Neotectonic of North America*, Vol. 1. Edited by D.B. Slemmons, E.R. Engdhal, M.D. Zoback, and D.D. Blackwell. Geological Society of America, Boulder Colorado Decade Map.
- Atkinson, G. M., et Boore, D. M. (2006). Earthquake Ground-Motion Prediction Equations for Eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(6), 2181-2205.
- BAC - Bureau d'Assurance du Canada (2013). Étude d'impact et des coûts d'assurance et coûts économiques d'un séisme majeur en Colombie-Britannique et dans la région du Québec et de l'Ontario. AIR Worldwide. <http://assets.abc.ca/Documents/Brochures/FR/EQ-brochure-FR.pdf>.
- Benoît, N., Lavoie, D., Walsh, G., Rivard, C., et Huot-Vézina, G. (2013). Bedrock geology, Richelieu–Lake Champlain and Yamaska watersheds, Quebec, New York and Vermont, Géologie du socle rocheux, bassins Richelieu–Lac Champlain et Yamaska, Québec, New York et Vermont; Geological Survey of Canada; Open file 7283, scale 1:250 000.
- Bolduc, A.M. et Ross, M. (2001). Géologie des formations superficielles, Lachute-Oka, Québec. Geological Survey of Canada, Open File 3520, 2001.
- Boore, D. M., et Atkinson, G. M. (1992). Source spectra for the 1988 Saguenay, Quebec, earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82(2), 683-719.
- Chouinard L.E. and Rosset Ph. (2013). Scénarios sismiques pour la ville de Laval. Université McGill, 3 rapports et une synthèse.
- Chouinard, L. and Rosset, Ph. (2012) On the Use of Single Station Ambient Noise Techniques for Microzonation Purposes: the Case of Montreal; in *Shear Wave Velocity Measurement Guidelines for Canadian Seismic Site Characterization in Soil and Rock*, (ed.) J.A. Hunter and H.L. Crow; Geological Survey of Canada, Open File 7078, p. 85-93.
- Chouinard, L., Rosset, Ph., Youace, S. et Nollet, M.-J. (2017). Analyse du risque sismique résidentiel à Montréal; Évaluation des dommages et conséquences. Rapport université McGill et ETS, 40 pages.
- CNB (2015). Code National du Bâtiment. [http://www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/publications/centre\\_codes/2015\\_code\\_national\\_batiment.html](http://www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/publications/centre_codes/2015_code_national_batiment.html)
- FEMA (2003). Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model Hazus®MH MR4 Technical Manual. Washington, D.C.: National Institute of Building Sciences.
- Ghofrani H., Atkinson G. M., Chouinard L., Rosset Ph. and Tiampo K. F. (2015). Scenario Shakemaps for Montreal. *Can. J. Civ. Eng.* 42: 463–476.
- Halchuk, S.C., Adams, J.E., and Allen, T.I. (2015). Fifth Generation Seismic Hazard Model for Canada: Grid values of mean hazard to be used with the 2015 National Building Code of Canada; Geological Survey of Canada, Open File 7893, 1 .zip file. doi:10.4095/29737
- Halchuk, S.C., Adams, J.E., Kolaj, M. and Allen, T.I., (2018). Deaggregation of NBCC 2015 Seismic Hazard for Selected Canadian Cities. Extended abstract for the 12th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Quebec, Canada, June17-20. 9 pages.
- Nastev, M., Parent, N., Benoit, M., Ross, and D. Howlett. (2016). Regional Vs30 Model for the St. Lawrence Lowlands, Eastern Canada. *Georisk* 10 (3): 0–13.
- Ross, M., Parent, M., & Lefebvre, R. (2005). 3D geologic framework models for regional hydrogeological and land-use management: a case study from Quaternary basin of southwestern Quebec, Canada. *Hydrogeology Journal*, 13, 690-707.
- Rosset ph. (2015). Vs30 Mapping of the Richelieu valley - Preliminary Report, University McGill, 5 pages.

Rosset Ph. and Chouinard L. (2010a). Microzonage de la ville de Longueuil, phase I. Rapport interne, Université McGill, 6 pages.

Rosset Ph. and Chouinard L. (2010b). Microzonage de la ville de Repentigny, analyses préliminaires. Rapport interne, Université McGill, 5 pages.

Rosset, Ph. and L.E. Chouinard (2009). Characterization of site effects in Montreal, Canada, *Natural Hazards*, 48, 295-308.

Rosset, Ph., Bour-Belvaux, M., and Chouinard, L. (2015). Estimation and Comparison of Vs30; Microzonation Maps for Montreal Using Multiple Sources of Information. *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 13, 8, 2225-2239.

Rosset, Ph., Kert, M., Youance, S., Nollet, M-J., Chouinard L. (2019a). Could Montreal residential buildings suffer important losses in case of major earthquakes?. Extended abstract for the 12th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Quebec, Canada, June17-20. 7 pages.

Rosset, Ph., Kert, M., Youance, S., Nollet, M-J., Chouinard L. (2019b). The use of HazCan to assess the earthquake risk of residential buildings in Montreal, Canada. Extended abstract for the Conference of the Canadian Society of Civil Engineering, Laval, Canada, June12-15. 4 pages.

Somerville, P. G., McLaren, J. P., Saikia, C. K., & Helmberger, D. (1990). The 25 November 1988 Saguenay, Quebec, earthquake: Source parameters and the attenuation of strong ground motion. *80(5)*, 1118-1143.

Statistique Canada (2016). <http://www.statcan.gc.ca/fra/debut>

Sun, A. (2019). Calibration of Seismic Risk Analyses through Reanalysis of Historical Earthquakes - An Application of Hazus-MH2.1 Canada. Mémoire de maîtrise, Université McGill, 104 pages.

Thibodeau, F. (2020). Étude comparative sur la capacité des bâtiments à ossature légère en bois à Montréal. Rapport de maîtrise, Ecole de Technologie Supérieure, Université du Québec, 141 pages.

Tremblay, T., Nastev, M., and Lamothe, M. (2010). Grid-based hydrostratigraphic 3D modelling of the Quaternary sequence in the Chateauguay River watershed, Québec. *Canadian Water Resources Journal*, 35(4): 377-398.

Ulmi, M., Wagner, C.L., Wojtarowicz, M., Bancroft, J.L., Hastings, N.L., Chow, W., Rivard, J.R., Prieto, J., Journeay, J.M., Struik L.C., and Nastev, M. (2014). Hazus-MH 2.1 Canada User and Technical Manual: Earthquake Module; Geological Survey of Canada, Open File 7474, 245 pages.

Yu, K., Rosset, Ph. and Chouinard, L.E. (2016). Seismic Vulnerability Assessment for Montreal. *Georisk*, vol. 10-2, 164-178.

### 13. Annexe 1. Analyse des logements multiples dans la base de données MAMOT 2017.

Il a été constaté que certains multiplex étaient divisés en plusieurs logements individuels dans la base de données. Afin de traiter correctement ces informations, on a compté le nombre de logements localisés sur un même site de coordonnées géographiques. Le Tableau 1 montre que les logements ayant des coordonnées géographiques identiques représentent en fait 6 à 7 fois moins de multiplex. Pour faciliter l'analyse, la base de données a été divisée en deux secteurs, un au nord du Saint-Laurent (Nord) et un au Sud (Sud).

**Tableau 1. Décompte des multiplex parmi les logements ayant des coordonnées géographiques identiques**

Secteur	Nombre de logements	Nombre de multiplex
Nord	47346	7502
Sud	51781	7724

Le code d'utilisation prédominant de l'unité (RL0105A) fourni dans la base de données est ensuite utilisé pour filtrer uniquement les logements résidentiels (codes 1000, 1211, 1212, 1702, 1990 et 9510). Le nombre de doublons pour un même site est ensuite utilisé pour définir le type d'occupation Hazus du multiplex comme indiqué dans le Tableau 2. Il est à noter que certaines maisons mobiles (RES2) sont comptabilisées à la fois comme maison mobile et comme bâtiment résidentiel. Dans ce cas, la ligne correspondante au bâtiment résidentiel est éliminée.

**Tableau 2. Distribution des doublons par type d'occupation Hazus**

Nombre de doublons	Code d'utilisation RL0105A	Type d'occupation Hazus
1		RES2
	1211/1212/1702	RES2
2	1000/1990/9510	RES3A
3 ou 4	1000/1990/9510	RES3B
5 à 9	1000/1990/9510	RES3C
10 à 19	1000/1990/9510	RES3D
20 à 49	1000/1990/9510	RES3E
> 49	1000/1990/9510	RES3F

Le résultat de l'analyse des multiplex est ensuite intégré à la base de données totale.

# 14. Annexe 2. Désagrégation de l'aléa sismique pour Montréal

Graphe pour l'accélération maximale de pointe (PGA) et une période de retour de 2 475 ans. Sol de classe C.

## Seismic Hazard Deaggregation

calculated by the Canadian Hazards Information Service

INFORMATION: [EarthquakesCanada.nrcan.gc.ca](http://EarthquakesCanada.nrcan.gc.ca)

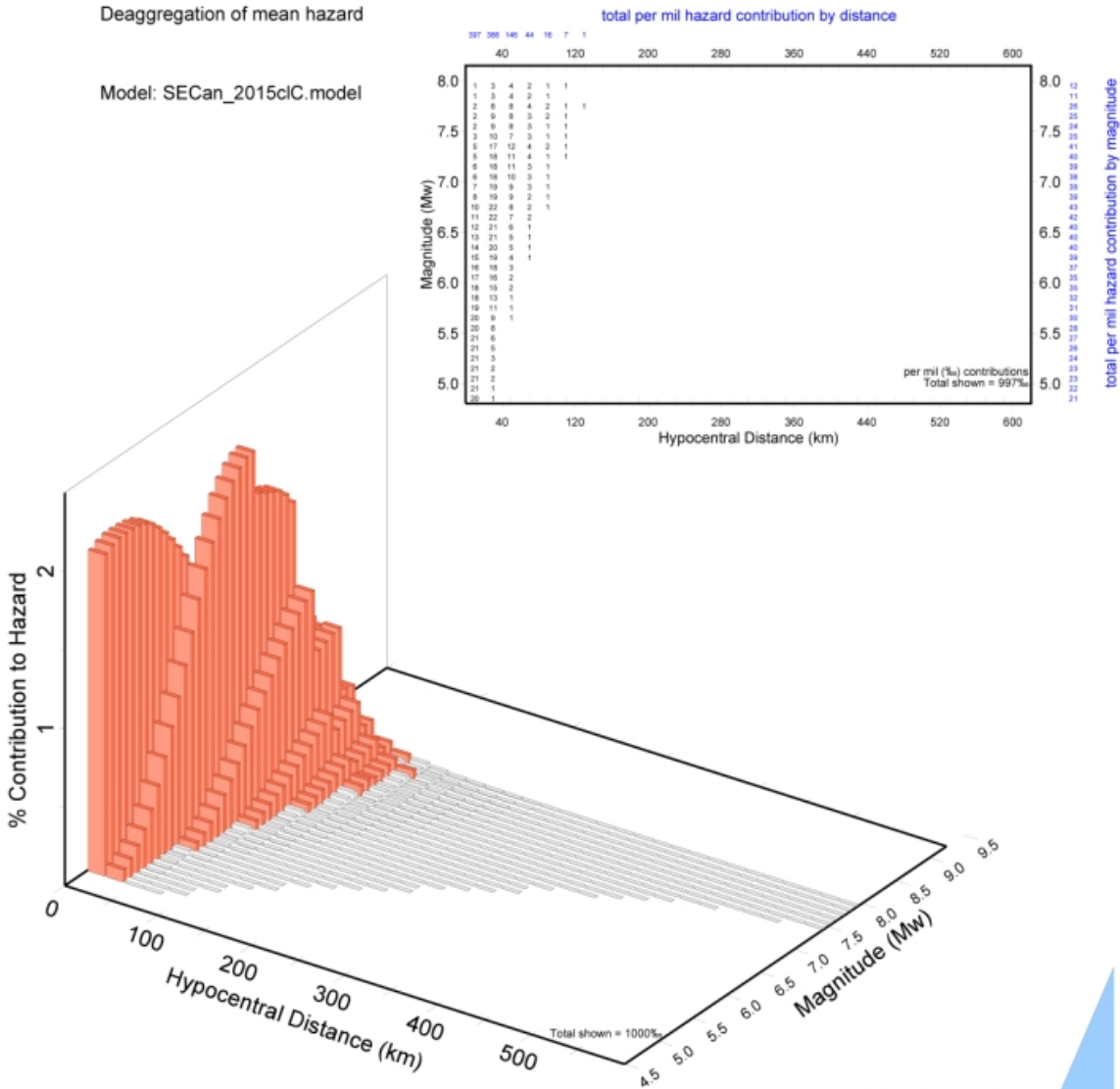
Eastern Canada (613) 995-5548 Western Canada (250) 363-6500



Requested by: Natural Resources Canada, N/A  
 For site Montreal, QC at 45.510 N 73.550 W  
 For ground motion parameter peak ground acceleration (PGA)  
 at a probability of 0.000404 per annum, seismic hazard = 0.373 g  
 Soil Class C, 2015 Geological Survey of Canada 5th Generation model as prepared for NBCC2015  
 Mean magnitude (Mw) 6.42 Mean distance 29 km  
 Mode magnitude (Mw) 6.750 Mode distance 30 km  
 Deaggregation of mean hazard

2017/05/26

Model: SECan\_2015clC.model



## 15. Annexe 3. Description des dommages structuraux par type de construction et degré

*La description en anglais est extraite du manuel technique Hazus*

Degré	Bois (W1)	Béton (C1L et C2L)
Faible	Small plaster or gypsum-board cracks at corners of door and window openings and wall-ceiling intersections; small cracks in masonry chimneys and masonry veneer.	Flexural or shear type hairline cracks in some beams and columns near joints or within joints.
Modéré	Large plaster or gypsum-board cracks at corners of door and window openings; small diagonal cracks across shear wall panels exhibited by small cracks in stucco and gypsum wall panels; large cracks in brick chimneys; toppling of tall masonry chimneys.	Most beams and columns exhibit hairline cracks. In ductile frames some of the frame elements have reached yield capacity indicated by larger flexural cracks and some concrete spalling. Nonductile frames may exhibit larger shear cracks and spalling.
Important	Large diagonal cracks across shear wall panels or large cracks at plywood joints; permanent lateral movement of floors and roof; toppling of most brick chimneys; cracks in foundations; splitting of wood sill plates and/or slippage of structure over foundations; partial collapse of "room-over-garage" or other "softstory" configurations; small foundations cracks.	Some of the frame elements have reached their ultimate capacity indicated in ductile frames by large flexural cracks, spalled concrete and buckled main reinforcement; nonductile frame elements may have suffered shear failures or bond failures at reinforcement splices, or broken ties or buckled main reinforcement in columns which may result in partial collapse.
Complet	Structure may have large permanent lateral displacement, may collapse, or be in imminent danger of collapse due to cripple wall failure or the failure of the lateral load resisting system; some structures may slip and fall off the foundations; large foundation cracks. Approximately 3 of the total area of W1 buildings with Complete damage is expected to be collapsed.	Structure is collapsed or in imminent danger of collapse due to brittle failure of nonductile frame elements or loss of frame stability. Approximately 13(low-rise), 10(mid-rise) or 5(high-rise) of the total area of C1 buildings with Complete damage is expected to be collapsed.
Maçonnerie (RM1L, RM2L et URML)		
Faible	Diagonal, stair-step hairline cracks on masonry wall surfaces; larger cracks around door and window openings in walls with large proportion of openings; movements of lintels; cracks at the base of parapets.	
Modéré	Most wall surfaces exhibit diagonal cracks; some of the walls exhibit larger diagonal cracks; masonry walls may have visible separation from diaphragms; significant cracking of parapets; some masonry may fall from walls or parapets.	
Important	In buildings with relatively large area of wall openings most walls have suffered extensive cracking. Some parapets and gable end walls have fallen. Beams or trusses may have moved relative to their supports.	
Complet	Structure has collapsed or is in imminent danger of collapse due to in-plane or out-of-plane failure of the walls. Approximately 15 of the total area of URM buildings with Complete damage is expected to be collapsed.	

## 16. Annexe 4. Description des dommages non-structuraux par type de construction et degré.

*La description en anglais est extraite du manuel technique Hazus.*

Degré	Mur de séparation	Ornement
Faible	A few cracks are observed at intersections of walls and ceilings and at corners of door openings.	A few ceiling tiles have moved or fallen down.
Modéré	Larger and more extensive cracks requiring repair and repainting; some partitions may require replacement of gypsum board or other finishes.	Falling of tiles is more extensive; in addition the ceiling support framing (T-bars) has disconnected and/or buckled at few locations; lenses have fallen off of some light fixtures and a few fixtures have fallen; localized repairs are necessary.
Important	Most of the partitions are cracked and a significant portion may require replacement of finishes; some door frames in the partitions are also damaged and require re-setting.	The ceiling system exhibits extensive buckling, disconnected t-bars and falling ceiling tiles; ceiling partially collapses at few locations and some light fixtures fall; repair typically involves removal of most or all ceiling tiles.
Complet	Most partition finish materials and framing may have to be removed and replaced; damaged studs repaired, and walls be refinished. Most door frames may also have to be repaired and replaced.	The ceiling system is buckled throughout and/or fallen and requires complete replacement; many light fixtures fall.
	Parement extérieur	Equipements
Faible	Slight movement of the panels, requiring realignment.	The most vulnerable equipment (e.g. unanchored or on spring isolators) moves and damages attached piping or ducts.
Modéré	The movements are more extensive; connections of panels to structural frame are damaged requiring further inspection and repairs; some window frames may need realignment	Movements are larger and damage is more extensive; piping leaks at few locations; elevator machinery and rails may require realignment
Important	Most of the panels are cracked or otherwise damaged and misaligned, and most panel connections to the structural frame are damaged requiring thorough review and repairs; few panels fall or are in imminent danger of falling; some window panes are broken and some pieces of glass have fallen.	Equipment on spring isolators topples and falls; other unanchored equipment slides or falls breaking connections to piping and ducts; leaks develop at many locations; anchored equipment indicate stretched bolts or strain at anchorages.
Complet	Most panels are severely damaged, most connections are broken or severely damaged, some panels have fallen and most are in imminent danger of falling; extensive glass breakage and falling.	Equipment is damaged by sliding, overturning or failure of their supports and is not operable; piping is leaking at many locations; some pipe and duct supports have failed causing pipes and ducts to fall or hang down; elevator rails are buckled or have broken supports and/or counterweights have derailed.