

EVALUATION DU DOMMAGE MOYEN ANNUEL DU BÂTI
RESIDENTIEL POUR LA COMMUNAUTE METROPOLITAINE DE
MONTREAL

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 : 1 mars 2022

Version 2 : 27 avril 2022

NOTE

Ce projet a été réalisé grâce à une contribution financière de 268 350 \$ provenant du Cadre pour la prévention de sinistres du gouvernement du Québec [CPS 20-21-09].

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les étudiants ayant contribué à la réalisation des travaux ; Johanna Pollet et Adil Takahashi qui ont participé à un stage de 16 semaines dans le cadre du programme *Summer Undergraduate Research in Engineering* (SURE). Ce travail bénéficie du soutien de Xuejiao Long (Université McGill) qui prépare un mémoire de Master comparant les résultats de calcul de risque sismique avec les outils Hazus et OpenQuake. Le projet a bénéficié des commentaires de René Tinawi, professeur émérite à l'École polytechnique de Montréal.

TABLE DES MATIÈRES

1.	RÉSUMÉ EXÉCUTIF	6
2.	Introduction	10
3.	Contexte sismique et aléa sismique.....	11
	3.1. Contexte sismique local.....	11
	3.2. Estimation des mouvements du sol	12
4.	Cartographie des conditions de sol.....	14
	4.1. Collecte de données pour l'élaboration du microzonage.	15
	4.2. Microzonage sismique de la CMM en terme de classes de sol	16
5.	Données sur la population	17
6.	Inventaire des bâtiments.....	19
	6.1. Distribution par types d'occupation	21
	6.2. Distribution par types de construction.....	22
	6.3. Estimation de la valeur foncière du bâti par type d'occupation.....	27
	6.4. Estimation de la valeur monétaire du contenu du bâti.....	29
7.	Définition de l'aléa sismique.....	31
8.	Estimation du Dommage Moyen Annuel (DMA).....	34
	8.1. Dommages aux bâtiments.....	34
	8.2. Coût des dommages.....	35
	8.3. Calcul du Dommage moyen annuel (DMA).....	36
9.	Dommage Moyen Annuel (DMA), DRMA et autres indicateurs	38
	9.1. Dommage Moyen Annuel (DMA)	38
	9.2. Dommage Moyen Relatif Annuel (DMRA).....	40
	9.3. DMA par habitant et par bâtiment résidentiel	40
10.	Discussion	42
	10.1. Quelles sont les paramètres qui influencent les valeurs de DMA ?.....	42
	10.2. Études existantes dans d'autres régions	46
	10.3. Calcul du DMA avec l'outil OpenQuake.....	48
	10.4. Changement avec SHM6	49
11.	Recommandations	53
12.	Publications acceptées ou soumises durant le mandat	55
13.	Références	56
14.	Annexe A. Liste des aires de diffusion avec des fortes valeurs de DMA et DMRA	58
15.	Annexe B. Rapport Interne Takahashi A. (2021).....	61
16.	Annexe C. Rapport Interne Pollet J. (2021).....	61
17.	Annexe D. Explication des paramètres inclus dans les fichiers vectoriels « <i>RisqueAnnuel_CMM 2022 Data.xxx</i> »	62

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation des séismes dans le SE du Canada pour la période 2000-2019.	11
Figure 2. Rapports d'intensité issue de la base de données citoyenne DYFI.....	13
Figure 3. Localisation des nouvelles données utilisées pour mettre à jour le microzonage en classes de sol.....	16
Figure 4. Zonage sismique en termes de classes de sol (CNB-2015).	17
Figure 5. Périmètre de la zone d'étude.	18
Figure 6. Distribution par types d'occupation du bâti résidentiel à Montréal et hors Montréal.....	21
Figure 7. Distribution par types d'occupation du bâti résidentiel par aires de diffusion.....	22
Figure 8. Distribution de la valeur foncière par aires de diffusion et par types d'occupation du bâti résidentiel.	27
Figure 9. Répartition de la valeur foncière totale par types d'occupation du bâti résidentiel.	28
Figure 10. Valeur foncière du bâti résidentiel et nombre de bâtiments par aires de diffusion.	28
Figure 11. Ratio entre la valeur du contenu et la valeur foncière du bâti résidentiel par RTA de la CMM pour 2018.....	29
Figure 12. Distribution de la valeur totale du bâti résidentiel par AD de la CMM pour 2018.	30
Figure 13. Valeur totale du bâti résidentiel par AD de la CMM pour 2018 (en million de Can\$).31	
Figure 14. Carte de l'aléa sismique probabiliste en termes de PGA.	32
Figure 15. Aléa sismique pour Montréal pour différentes périodes de retour	32
Figure 16. Aléa sismique en termes de PGA incluant les effets de site pour une période de retour de 2 475 ans.	33
Figure 17. Estimation des dommages avec courbes de capacité et d'endommagement.....	35
Figure 18. Courbe probabiliste de pertes économiques	37
Figure 19. Distribution du dommage moyen annuel par aires de diffusion (en millier de Can\$)..39	
Figure 20. Distribution des DMA par aires de diffusion (en millier de Can\$).	39
Figure 21. Distribution du dommage moyen relatif annuel par aires de diffusion (en Can\$ par million).	40
Figure 22. Distribution du dommage moyen annuel par habitant et par aires de diffusion (en Can\$).	41
Figure 23. Distribution du dommage moyen annuel par bâtiment résidentiel et par aires de diffusion (en Can\$).	41
Figure 24. Relation entre la valeur de PGA (en g) pour les périodes de retour de 100, 1 000 et 2 475 ans et la valeur de DMA.	42
Figure 25. Relation entre la valeur de PGA (en g) pour les périodes de retour de 100, 1 000 et 2 475 ans et la valeur de DMRA.	43
Figure 26. Relation entre le nombre de bâtiments et les valeurs de DMA et DMRA.....	43
Figure 27. Relation entre le niveau de conception et les valeurs de DMA et DMRA pour tous les types de bâtiment.	44
Figure 28. Relation entre le niveau de code parasismique et les valeurs de DMA ou DMRA pour les ossatures bois (W1).	44
Figure 29. Relation entre la valeur de DMA et le nombre de structures en béton (C1 et C2) et en maçonnerie non renforcée (URML).	45
Figure 30. Relation entre la valeur totale du bâti et la valeur de DMA et DMRA.	45
Figure 31. DMA, DMRA et DMA par habitant à l'échelle des comtés aux USA.....	47
Figure 32. Comparaison des valeurs de pertes calculées avec Hazus et OpenQuake.	49
Figure 33. Les six modèles d'aléa sismique pour le Canada depuis 1953.....	50
Figure 34. Spectres uniformes d'aléa selon les modèles d'aléa sismique de 2005, 2010, 2015 et 2020.	50
Figure 35. Changement de l'aléa en termes de Sa(0.2s) entre 2020 et 2015 (en g).	51

Figure 36. Aléa sismique en fonction de V_{s30} pour Vancouver et Montréal pour $S_a(0.2s)$ et $S_a(1.0s)$	52
--	----

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1. Séismes majeurs historiques et récents autour de Montréal.....	12
Tableau 2. Valeurs d'aléa sismique à adopter pour Montréal selon le CNB-2015 pour différentes périodes de retour.	14
Tableau 3. Classification des sols selon le CNB-2015 et facteur correctif du PGA	15
Tableau 4. Liste des MRC et identifiant des aires de diffusion de la zone d'étude.....	19
Tableau 5. Classification par types d'occupation selon Hazus.	20
Tableau 6. Classification par types de construction selon Hazus et CNRC-1992.	20
Tableau 7. Distribution des bâtiments résidentiels par types d'occupation.....	21
Tableau 8. Typologie de construction des bâtiments résidentiels selon le type d'occupation et la période de construction.....	23
Tableau 9. Distribution des bâtiments résidentiels par types de construction et d'occupation.	24
Tableau 10. Distribution des bâtiments résidentiels par types de matériaux et d'occupation.	24
Tableau 11. Distribution des bâtiments résidentiels par niveaux de conception parasismique et par types de construction pour Montréal.	25
Tableau 12. Distribution des bâtiments résidentiels par niveaux de conception et par types de construction pour les municipalités hors-Montréal.	25
Tableau 13. Distribution en % des bâtiments résidentiels par niveaux de conception parasismique et par types d'occupation pour les municipalités de Montréal.	26
Tableau 14. Distribution en % des bâtiments résidentiels par niveaux de conception parasismique et par types d'occupation pour les municipalités hors de Montréal.	26
Tableau 15. Valeur monétaire pour la structure et le contenu du bâti par types d'occupation (en million de Can\$).	30
Tableau 16. Méthode de calcul du DMA adoptée par FEMA (2017).....	37
Tableau 17. Calcul du DMA pour la CMM.	38
Tableau 18. Analyse comparative pour le calcul du DMA entre Hazus et OpenQuake.	48

1. RÉSUMÉ EXÉCUTIF

Les grandes secousses sismiques peuvent provoquer des perturbations sociales et économiques sans précédent et il n'est pas toujours possible de se remettre complètement de leurs impacts. Durant la dernière décennie, dans le monde, les tremblements de terre ont coûté la vie à des dizaines de milliers de personnes et ont eu un impact économique de plusieurs centaines de milliards de dollars américains (~90 milliards pour le séisme de 2008 à Wenchuan en Chine de magnitude M 7.9, ~20 milliards pour celui de Maule au Chili en 2010 de M8.8, ~220 milliards pour le tremblement de terre de 2011 à Tohoku au Japon de M9.0, ~25 milliards pour celui de Christchurch en Nouvelle-Zélande de M6.3 en 2011 et ~22 milliards pour le séisme à Kumamoto au Japon de M7.0 en 2016).

Les séismes récents montrent une tendance à l'augmentation constante des dommages et des pertes liées principalement à trois facteurs: (1) une croissance significative des zones urbaines, (2) la vulnérabilité du parc immobilier le plus ancien, et (3) une interdépendance accrue de l'économie au commerce mondialisé. Au Canada, les données disponibles ne permettent pas pour le moment d'estimer l'évolution de ce risque sismique avec l'exposition croissante de la population et le développement urbain, même si l'aléa sismique est resté relativement stable. Pour comprendre l'aléa sismique, il faut étudier les caractéristiques des séismes et les endroits où ils se produisent, tandis que pour comprendre le risque, il faut évaluer les dommages potentiels causés par les secousses sismiques à l'environnement bâti et aux personnes, en particulier dans les zones à haut risque.

Les deux précédentes études (Chouinard et al., 2017 et 2020) ont permis de caractériser le risque sismique du bâti résidentiel de Montréal et des municipalités de la grande couronne autour de Montréal qui forment la Communauté Métropolitaine de Montréal (CMM) et ce pour une série de scénarios de séismes. Ces études ont nécessité de construire une base de données exhaustive de la population et du bâti en termes de types d'occupation et de construction à l'échelle des aires de diffusion du recensement canadien. L'utilisation de la version canadienne d'Hazus a permis d'estimer les dommages au bâti (structuraux, non-structuraux et du contenu), les quantités de débris générés ainsi que des conséquences physiques en termes de blessés et de besoins en hébergement d'urgence. Elles ont aussi bénéficié de la mise à jour régulière du microzonage sismique en termes de classes de site qui permet de prendre en compte les effets d'amplification ou de dé-amplification des sols sur les ondes sismiques. La présente étude fournit des informations mises à jour sur les conditions de site dans la CMM.

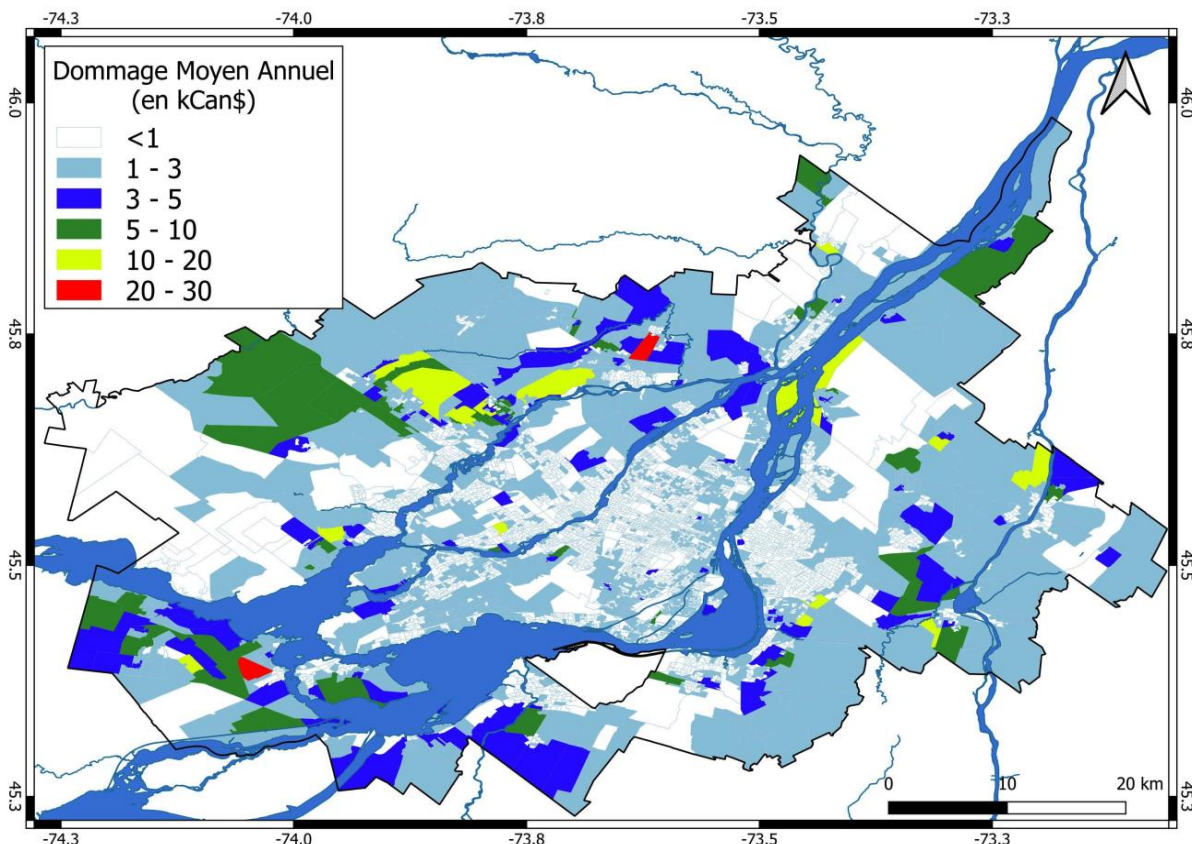
En 2018, la CMM comptait une population de l'ordre de 3.861 millions d'habitants repartis irrégulièrement sur les 6116 aires de diffusion. L'analyse et interprétation des données 2018 du rôle foncier concernant plus de 843 000 bâtiments résidentiels indiquent que, en moyenne, les constructions en bois (W1) sont à 81% des maisons unifamiliales et que les constructions en béton (C1 et C2) sont très majoritairement des multiplex. Les constructions en maçonnerie non armée de 1 ou 2 étages (URML) sont à 20% des maisons unifamiliales et pour 85% des multiplex de 3 étages et plus (URMM). Les duplex et triplex sont soit des constructions à ossature de bois soit en maçonnerie. Ces pourcentages varient significativement au sein de la CMM d'une aire de diffusion à une autre et entre les municipalités sur l'île de Montréal et hors de cette région. La valeur immobilière du bâti résidentiel est estimée à 196.5 milliards de Can\$ alors que son contenu est évalué autour de 99 milliards en utilisant le ratio valeur du bâtiment par

rapport au contenu fourni par les assurances privées à l'échelle des régions de tri d'acheminement. La valeur immobilière totale est donc estimée à 295.5 milliards de Can\$.

Pour cette nouvelle étude, à la demande du Ministère de la Sécurité Publique, nous adoptons deux indicateurs de risque interdépendants qui ont été utilisés de manière récurrente, en 2001, 2007 et 2016, aux USA par l'Agence fédérale de gestion des urgences (FEMA) dans le cadre du National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP) :

- Le Dommage Moyen Annuel (DMA), qui est la valeur estimée à long terme des pertes dues aux séismes pour le parc immobilier au cours d'une année donnée. Le DMA considère deux composantes du risque sismique: (1) la probabilité d'occurrence d'un séisme pour une région donnée (i.e. le niveau de mouvement du sol) et (2) les conséquences de ces mouvements du sol en termes de dommages physiques et pertes économiques. En considérant les dommages engendrés par toutes les périodes de retour des séismes, il exprime ce que coûte en moyenne par an l'ensemble des séismes possibles, et correspond donc à ce qui devrait être provisionné chaque année pour faire face aux dommages éventuels (en actualisant régulièrement les données).
- Le Dommage Moyen Relatif Annuel (DMRA), qui exprime le DMA estimé comme une fraction de la valeur de remplacement du parc immobilier.

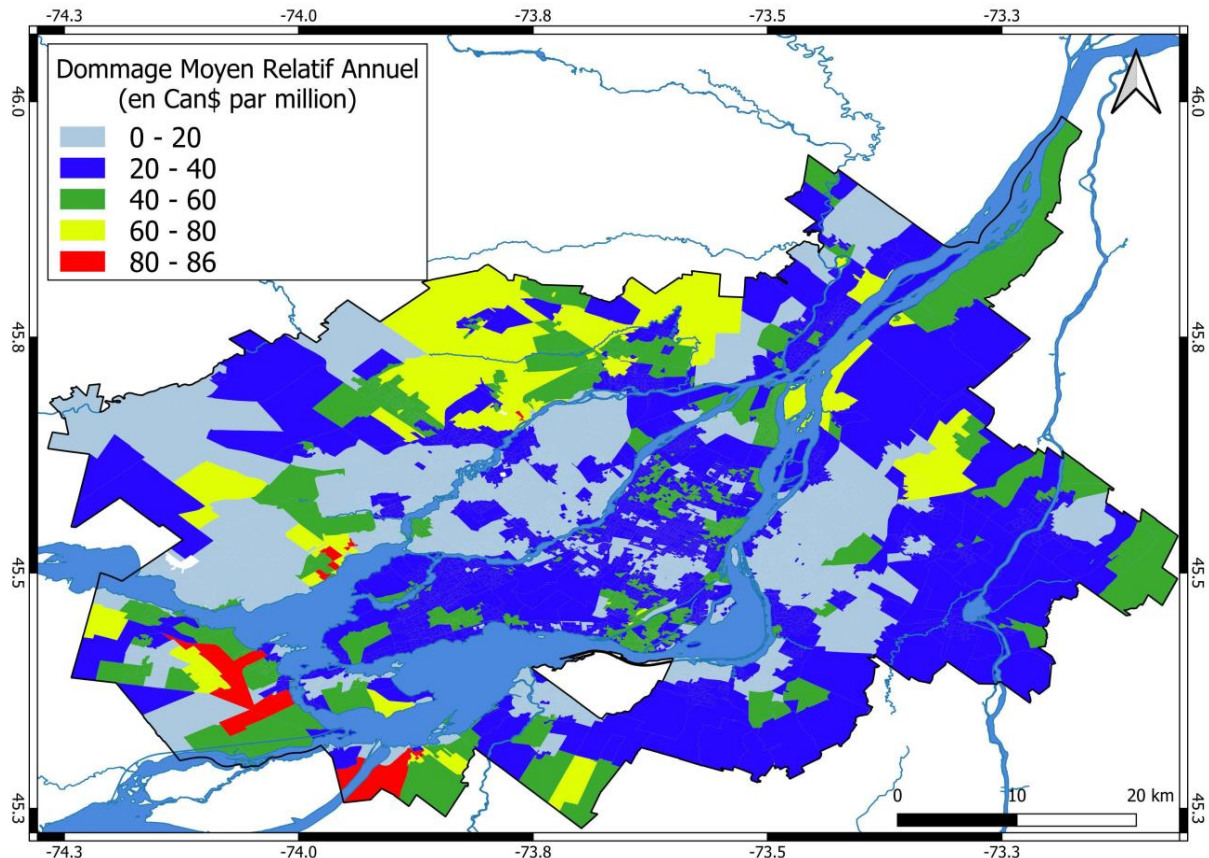
Pour cela, nous utilisons l'approche et les hypothèses proposées par la FEMA et calculons les pertes dans Hazus pour un aléa sismique de périodes de retour de 100, 250, 500, 750, 1 000, 1 500, 2 000 et 2 500 ans, tel que fourni par Séisme Canada et adopté dans le code national du bâtiment en vigueur de 2015. Nos calculs indiquent que le **DMA du bâti résidentiel de la Communauté Métropolitaine de Montréal est de l'ordre de 6.18 millions de Can\$**. Les aires de diffusion ayant les plus fortes valeurs de pertes se situent principalement dans la périphérie de la CMM comme le montre la carte ci-dessous.



Distribution du dommage moyen annuel (DMA) de la CMM par aires de diffusion (en millier de Can\$).

Cette distribution des valeurs de DMA au sein des aires de diffusion de la CMM est corrélée à la fois avec les niveaux d'accélération du sol attendu pour les différentes périodes de retour que nous considérons pour cette étude, la valeur de remplacement et la période de construction du bâti.

Le calcul du DMRA fournit une valeur de l'ordre de 31.5 Can\$ par million de valeur immobilière. La carte ci-dessous montre la distribution de la valeur de DMRA par aires de diffusion. On peut noter que la répartition des aires de diffusion avec les plus fortes valeurs de DMRA diffère de celle pour le DMA de la carte ci-dessus.



Distribution du dommage moyen relatif annuel (DMRA) de la CMM par aires de diffusion (en Can\$ par million).

Deux autres paramètres dérivés du DMA sont aussi utiles pour identifier les zones sensibles ; **le DMA par habitant qui est de l'ordre de 1.6 Can\$** et **le DMA par bâtiment qui est de l'ordre de 7.1 Can\$**. Des cartes montrant la répartition de ces valeurs par aire de diffusion sont disponibles dans ce rapport. L'ordre de grandeur des valeurs calculées dans cette étude est cohérent par rapport aux valeurs de la dernière étude de la FEMA en 2016 au niveau des comtés (*counties* en anglais) bien qu'il n'y ait pas de comtés avec le même niveau d'aléa et de valeur immobilière.

Cette analyse utilise les données d'aléa sismique actuellement en vigueur dans le code national du bâtiment qui doit évoluer avec le nouveau modèle d'aléa sismique 2020 qui n'est pas encore officiellement publié. Ce nouveau modèle introduit une augmentation de l'aléa sismique pour la région de la CMM qu'il faudra prendre en compte dans une prochaine analyse qui

pourrait s'étendre à d'autres municipalités importantes du Québec ou à la zone urbanisée de la vallée du Saint-Laurent.

La présente étude est un outil utile pour :

- Développer des plans de mitigation des effets liés aux séismes ;
- Préparer des inventaires et mener des inspections de sécurité sismique des structures qui sont identifiées comme vulnérables ;
- Accroître la sensibilisation et l'éducation aux tremblements de terre et encourager le développement de groupes de travail autour de cette thématique.

2. Introduction

Les études d'aléa sismique de Séismes Canada (Ressources naturelles Canada) indiquent que la région de Montréal est une région à sismicité modérée. Bien que située sur la partie stable de la plaque tectonique Nord-Américaine, des séismes ont lieu à l'intérieur de bandes distinctes que sont la vallée du Saint-Laurent (la zone du Charlevoix comprise), le bas Saint-Laurent et l'Est de l'Ontario. Plusieurs articles scientifiques ont été publiés qui quantifient le risque inhérent à cette sismicité sur la région de Montréal pour le résidentiel (e.g. Rosset et al., 2022a ; Rosset et al., 2019a et 2019b; Yu et al., 2016).

Les deux premières phases du projet d'analyse du risque sismique résidentiel commandité par le Ministère de la Sécurité publique (MSP) ont porté sur l'île de Montréal (Chouinard et al., 2017) et sur les municipalités à l'extérieur de Montréal (Chouinard et al., 2020). Pour cela, une approche déterministe était proposée pour l'évaluation des dommages sismiques en utilisant cinq ou six scénarios possibles pour la région de Montréal. Suivant le scénario sismique envisagé, les résultats pour la Communauté Métropolitaine de Montréal (CMM) ont montré que :

- Les dommages et les coûts de ces dommages diffèrent entre l'île de Montréal et les municipalités extérieures. Et ce, de par la différence de typologie de bâtiments entre le centre historique du Grand Montréal et sa périphérie plus récente.
- Les dommages (de léger à total) pouvaient toucher 21 à 42% du bâti résidentiel, 1 à 16.5% des bâtiments étant fortement endommagés.
- Le coût total des dommages structuraux et non-structuraux pouvait représenter 1.5 à 7.1% de la valeur totale du bâti résidentiel (environ 196.5 milliards de \$Can) et qu'environ 80% de ce coût serait lié à des dommages non structuraux.
- La quantité de déblais générés pouvait varier de 0.4 à 8 millions de tonnes, constituée à 60% de bois et brique.
- Le nombre de blessés est faible et souvent non significatif. Toutefois, selon le scénario considéré, 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 ces deux études se basant sur des scénarios déterministes de séisme, le MSP a souhaité une analyse du risque sismique pour le même bâti résidentiel en prenant en compte la contribution de l'aléa probabiliste pour différentes périodes de retour. C'est une approche différente qui se base sur (1) Le Dommage Moyen Annuel (DMA), qui est la valeur estimée à long terme des pertes dues aux séismes pour le parc immobilier au cours d'une année donnée et (2) Le Dommage Moyen Relatif Annuel (DMRA), qui exprime le DMA estimé comme une fraction de la valeur de remplacement du parc immobilier. Le présent rapport est la synthèse des résultats de cette analyse au niveau des aires de diffusion de la CMM qui s'est étalée durant la période de février 2021 à mars 2022.

Une telle analyse nécessite d'avoir des données sur l'aléa sismique (accélérations de pointe et spectrales) pour différentes périodes de retour (ou probabilité d'occurrence), 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.). Pour cette nouvelle étude comme pour les précédentes, 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. Ce mandat porte sur les bâtiments résidentiels à l'échelle des aires de diffusion (AD) telles que définies par Statistique Canada.

3. Contexte sismique et aléa sismique

3.1. Contexte sismique local

La localisation des séismes récents et historiques sur la carte de la Figure 1 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. Quatre séismes majeurs se sont produits dans cette zone ; en 1663 proche de Charlevoix (magnitude proche de 7), 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.¹) générées lors de la formation du rift dans la province de Grenville (noté *Iapetan rifted margin* - IRM).
- Une seconde bande, orientée NO-SE, s'étire des collines Montréalésiennes 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.).

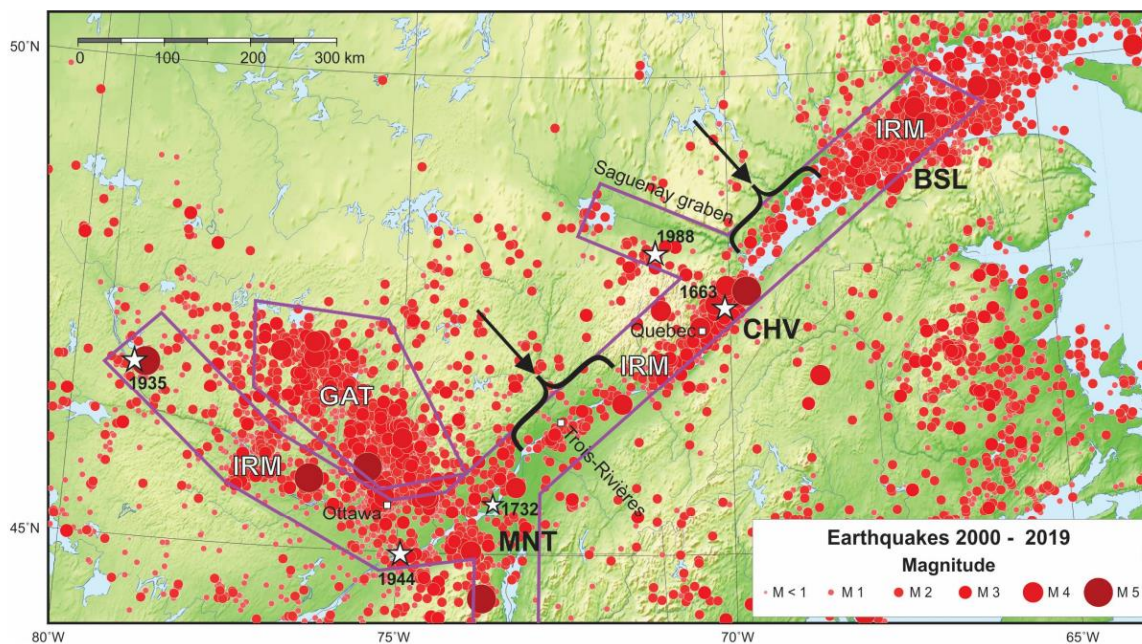


Figure 1. Localisation des séismes dans le SE du Canada pour la période 2000-2019.

Des événements de faible magnitude délimitent le rift avorté du Saint-Laurent (IRM pour *Iapetan Rift Margin*) qui est à l'origine des séismes marqués par les étoiles blanches (d'après Kolaj et al., 2020). Les flèches noires indiquent les zones de faible activité sismique au milieu des zones actives de Montréal (MNT), Charlevoix (CHV) et du Bas Saint-Laurent (BSL).

¹ Millions d'années avant le présent

3.2. 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 selon les rapports écrits de l'époque. 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 séismes de magnitude entre 5 et 6 et 40 séismes 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*	-	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 autour de Montréal.

* 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

(Source : Séismes Canada, 2013).

Ces vingt dernières années, plusieurs séismes de magnitude modérée ont été ressentis dans la vallée du Saint-Laurent et de l'Outaouais (Figure 2). Les données collectées par le système Did You Feel It (DYFI)² 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 qui sont à corrélérer avec les conditions locales de site (Rosset et al., 2020 ; 2022b).

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

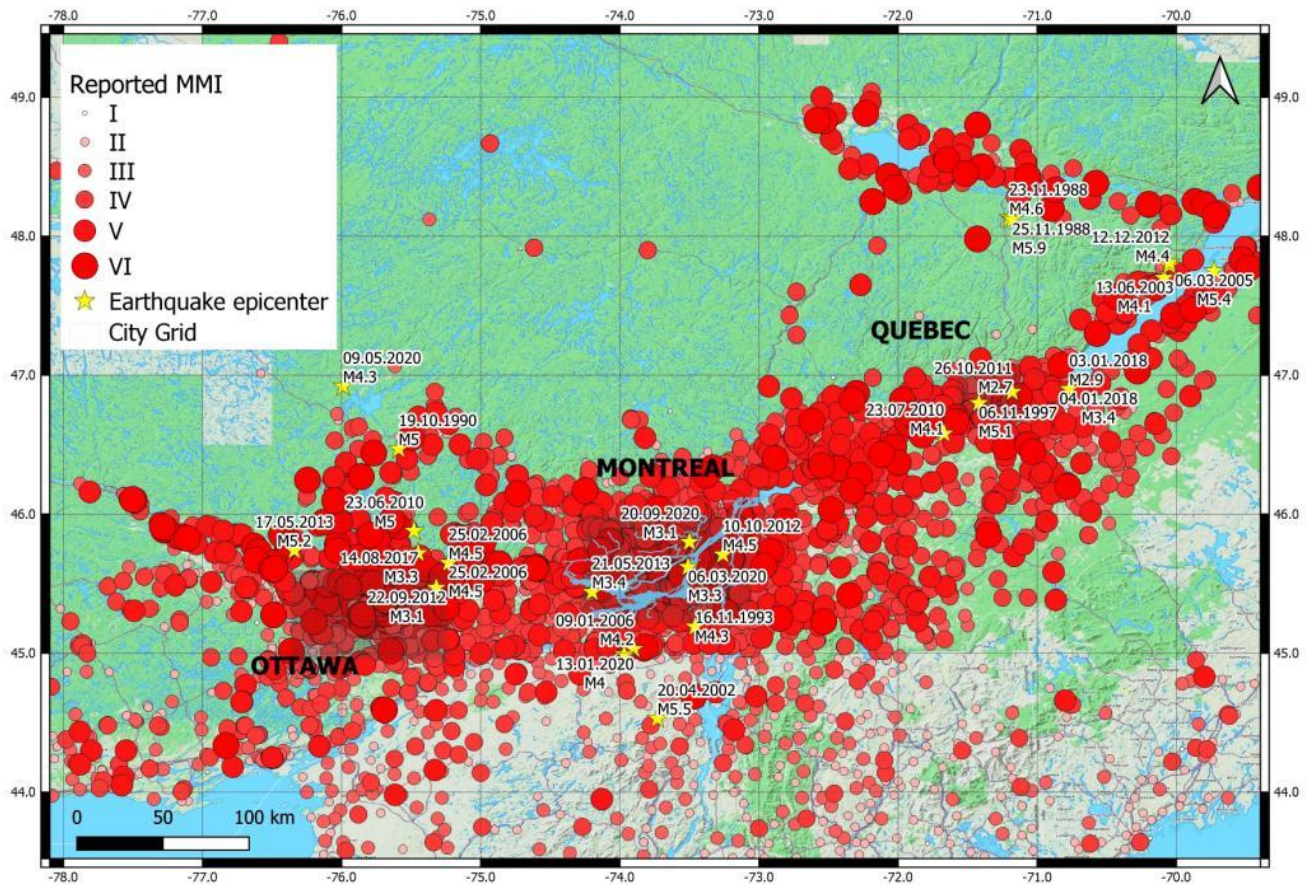


Figure 2. Rapports d'intensité issue de la base de données citoyenne DYFI.

Les épicentres des séismes à l'origine des rapports DYFI sont indiqués par des étoiles jaunes avec leur date et magnitude. Chaque rapport est marqué par un rond rouge de surface proportionnel à l'intensité décrite par les citoyens (modifié d'après Rosset et al., 2022b).

Le Code National du bâtiment (CNB) 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 Canada³, 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 six périodes spectrales T sont aussi disponibles pour construire un spectre de référence utile au dimensionnement des structures (Tableau 2).

Le séisme du Saguenay de 1988 et des études plus récentes ont montré que les ondes sismiques dans cette région du Canada sont faiblement atténuées avec la distance et que leur contenu hautes fréquences est important (voir par exemple Sommerville et al., 1990).

³ www.seismescanada.rncan.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
5% en 50 ans (0.001 par an)	0.342	0.176	0.084	0.039	0.0096	0.0036	0.220	0.141
10% en 50 ans (0.0021 par an)	0.208	0.108	0.053	0.024	0.0055	0.0021	0.133	0.084
40% en 50 ans (0.01 par an)	0.063	0.036	0.018	0.0072	0.0015	0.0007	0.038	0.025

Tableau 2. Valeurs d'aléa sismique à adopter pour Montréal selon le CNB-2015 pour différentes périodes de retour.

Les valeurs médianes (50th percentile) sont exprimées en unité de g (9.81m/s^2) et calculées pour un sol ferme de classe C (V_{s30} moyen entre 360 et 750m/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 pour le site de coordonnées: 45.52°N 73.64°O .

4. 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 des dommages (fissures et chute d'une partie du revêtement en maçonnerie) qui s'expliquent en partie par l'endommagement de sa structure, avant le séisme, à cause d'un tassement différentiel important d'environ 9cm (Tinawi et al., 1990). Une analyse du comportement des sols au droit de l'édifice a montré que la fréquence de résonance du site est de l'ordre de 2.5Hz (valeur proche de la fréquence propre de résonance du bâtiment) et que l'amplification des ondes à cette fréquence est de l'ordre de 5 (Chouinard and Rosset, 2012). Ces valeurs de fréquence et d'amplification sont liées au contraste de vitesse entre la couche supérieure d'argile de l'ordre de 17m (vitesse entre 120 et 160m/s) et le fond rocheux (vitesses supérieures à 1000m/s). Cette amplification locale des ondes sismiques et la résonance constructive entre le site et le bâtiment sont des facteurs supplémentaires pour expliquer l'endommagement général de la structure. Afin de caractériser les conditions de sol au-dessus du roc, l'île de Montréal et sa grande région ont fait l'objet de plusieurs études (ex. Rosset et al., 2015, Rosset et Chouinard, 2009).

Les sols sont classés en cinq classes (de A à E plus une classe spéciale F), D, E et F étant les sols les plus susceptibles de générer des effets de site. 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 3 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 3 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
Facteur multiplicatif du PGA selon la classe de sol et le niveau de PGA					
PGA (g)	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 3. Classification des sols selon le CNB-2015 et facteur correctif du PGA

4.1. Collecte de données pour l'élaboration du microzonage.

La collecte de données pour mettre à jour le microzonage de Montréal et son extension à toute la CMM se poursuit depuis plus de 20 ans. Le précédent rapport fournit un résumé exhaustif des données disponibles jusqu'en 2020 (chapitre 3 de Chouinard et al., 2020). Ce travail est complété par des données récemment mises à disposition sur de plateformes internet. Le Ministère des Transports Québec (MTQ) partage des données de réfraction sismique (RS) pour 1584 sites (Transport Québec, 2019). Chaque site est documenté par un profil indiquant l'épaisseur et la vitesse sismique des ondes P (V_p) mesurée pour chaque couche. Le MTQ fournit aussi les rapports de sondage numérisés pour 237 sites. Le Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) a mis en ligne les rapports de sondage numérisés pour près de 10 000 sites (donneesquebec.ca). Parmi ces sites, plus de 8 000 d'entre eux permettent de calculer une valeur de V_{s30} soit parce que le sondage dépasse les 30m ou atteint le roc.

Une nouvelle campagne de mesures de bruit sismique a permis de confirmer certaines zones au Nord et à l'Est de la CMM qui sont actuellement en classe D ou E (pour plus de détails, se référer au travail de Takahashi en Annexe B). La fréquence prédominante de résonance du sol f_0 est déterminée sur 111 sites et utilisée pour estimer la valeur de V_{s30} (Rosset et al., 2015).

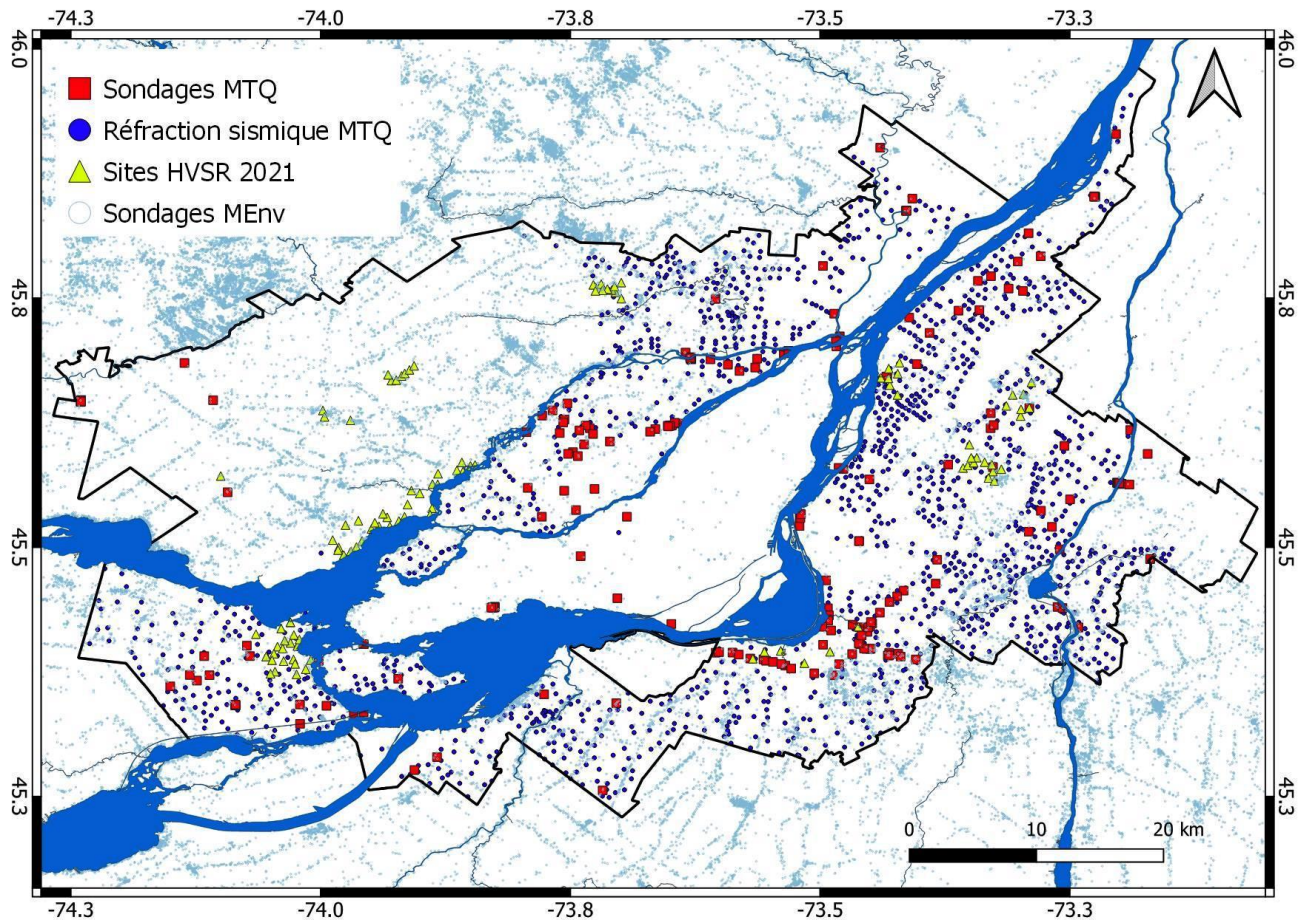


Figure 3. Localisation des nouvelles données utilisées pour mettre à jour le microzonage en classes de sol.

Cette carte indique la position des sites de mesures de réfraction sismique (ronds bleus), de mesures de bruit sismique (triangle jaune), des sondages fournis par le MTQ (carrés rouges) et ceux fourni par le MELCC (cercles gris).

Ces nouvelles données aident à mettre à jour notre 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.

4.2. Microzonage sismique de la CMM en terme de classes de sol

Une nouvelle approche d'interpolation est proposée qui intègre les différentes sources de données et prend en compte l'incertitude sur l'estimation de V_{s30} de chaque source. 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.
- Modèle géologique basé sur les données de sondage;
- Cartographie des dépôts de surface.

La valeur de V_{s30} est directement calculée avec les profils de vitesse V_s , alors qu'elle est estimée indirectement en utilisant l'équation développée par Rosset et al. (2015) à partir de la

valeur f_0 estimée par la méthode HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) à partir des mesures de bruit sismique. L'utilisation des données de sondages 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 en compte pour les tills et le roc. La carte des dépôts de surface permet de valider une partie des contours des différentes couches de dépôts. Ce travail est détaillé dans le rapport de Takahashi (2021) qui est en Annexe B.

La carte de la Figure 4 montre la nouvelle version du zonage en termes de classes de sol qui est utilisée pour prendre en compte la nature du site dans le calcul des mouvements du sol.

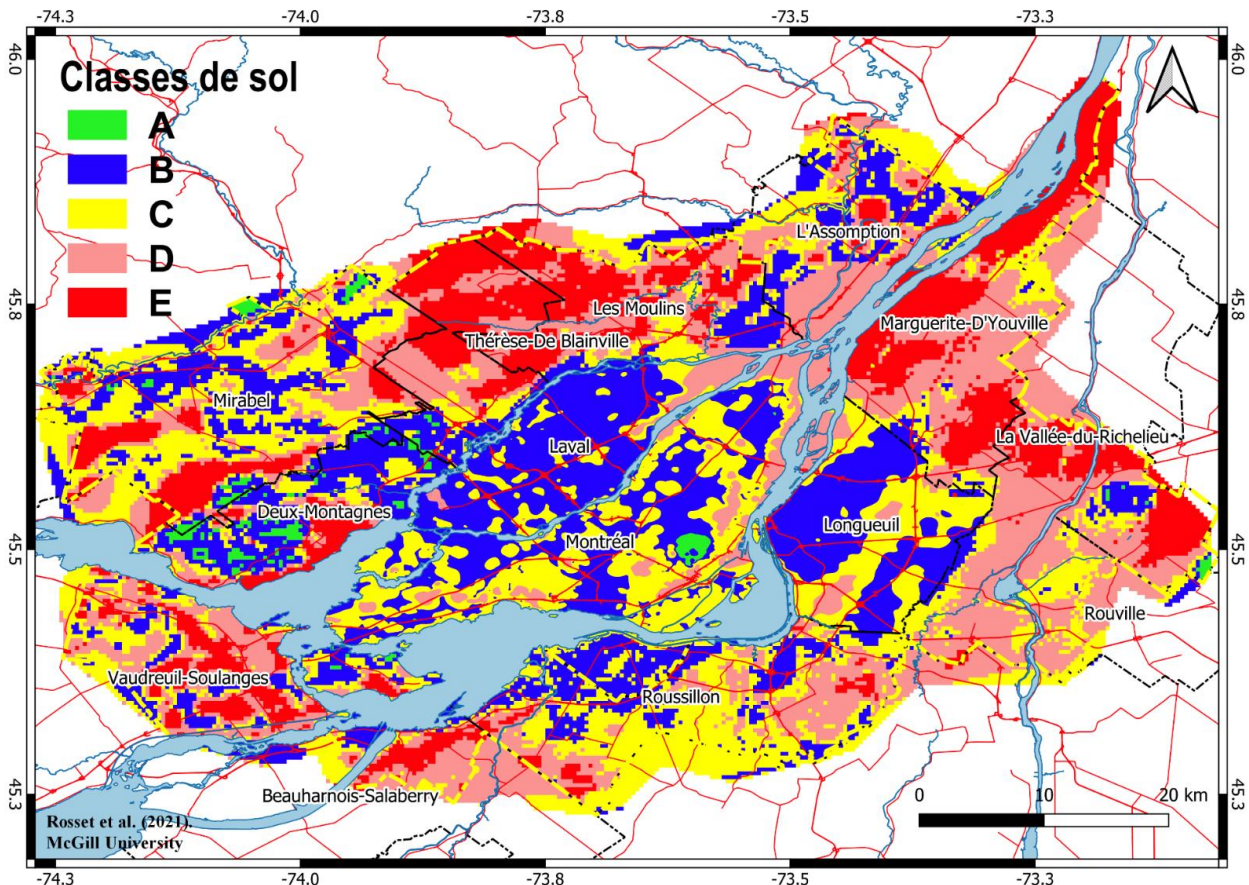


Figure 4. Zonage sismique en termes de classes de sol (CNB-2015).

Ce zonage est utilisé pour prendre en compte les effets de site dans les calculs de mouvements du sol.

5. 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 5. Le Tableau 4 liste les MRC incluses dans cette étude qui est effectuée à l'échelle des aires de diffusion (AD) telles que définies par Statistique Canada. La zone d'étude d'une surface d'environ 3 740 km² comprend 6 116 AD identifiées par un numéro spécifique (ADIDU).

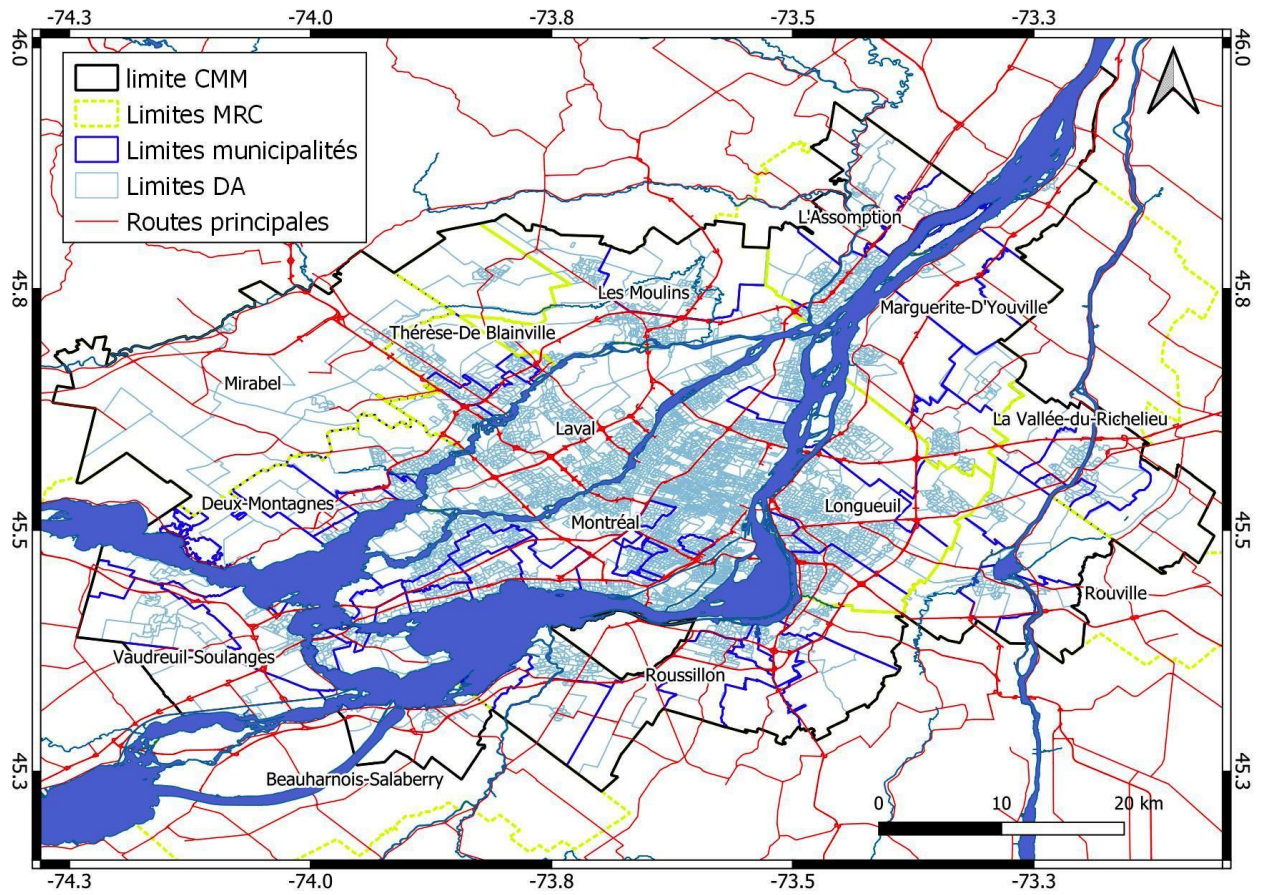


Figure 5. Périmètre de la zone d'étude.

Le trait gras noir délimite la communauté métropolitaine de Montréal (CMM), les traits bleus indiquent les municipalités et les traits bleu clair les aires de diffusion telles que définies par Statistique Canada.

MRC	Nombre de AD	Identifiant des aires de diffusion AD
Argenteuil	1	24076760094
Beauharnois-Salaberry	22	2407070003-0004 2407070067 à 0079 et 0087 à 0092
Deux-Montagnes	162	24072720001 à 0275 (sans 184, 186, 187, 190, 194, 197, 201, 203-205)
La Rivière-du-Nord	4	24075750210-0211-0226-0230
La vallée de Richelieu	158	2405757 (sans 215 à 225 et 235-236)
Lajemmerais*	126	2405959
L'Assomption	185	2406060 (sans 199 à 212)
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
Montréal *	3201	2406666
Roussillon *	252	2406767
Rouville	14	24055550075 à 0088
Thérèse-De Blainville*	238	2407373
Vaudreuil-Soulanges	139	2407171 (sans 137 à 143, 145, 175 à 207, 216 à 220)
Total	6116	

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

Tableau 4. Liste des MRC et identifiant des aires de diffusion de la zone d'étude.

6. Inventaire des bâtiments

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 l'usage du bâtiment ou classe d'occupation (Tableau 5) et un autre le type de construction ou classe de bâtiment (Tableau 6).

Les données par aire de diffusion sont triées à partir des informations du fichier du rôle foncier pour l'année 2018. Ces données concernent 6116 AD formant la communauté urbaine de Montréal (Chouinard et al., 2020 et 2017).

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 5. Classification par types d'occupation selon Hazus.

	Classes Hazus			Classe du CNRC-1992	
		Nom	Description	Nom	Description
Structure de bois		W1	Charpente de bois (<5000pi ²)	OLB	Ossature légère en bois
		W2	Charpente de bois (>5000pi ²)	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				
	S3L	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				
	URML	URM	Maçonnerie non armée	MNA	Bâtiments à murs porteurs en maçonnerie non armée
URMM					

Tableau 6. Classification par types de construction selon Hazus et CNRC-1992.

6.1. Distribution par types d'occupation

Les données de rôle foncier comportent plusieurs centaines de milliers de 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. Ce qui représente au final un total de 873 564 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 diffusion. Le décompte des bâtiments par types d'occupation selon la nomenclature d'Hazus est proposé dans le Tableau 7.

Type d'occupation	Nombre de logements	Libellé Rôle foncier	Nombre de bâtiments	% par type
Non défini			850	0.16
RES1	1	Unifamiliale	648617	86.38
RES2		Maison mobile	4882	0.93
RES3A	2	Duplex	114227	5.92
RES3B	3 ou 4	Triplex	57988	3.89
RES3C	5 à 9	Multiplex, 4 à 11 logements hors-sol	35593	1.84
RES3D	10 à 19	Multiplex, 12 log. et plus, 3 étages et moins sans commerce	7944	0.55
RES3E	20 à 49	Multiplex, 12 log. et plus, 4 étages et plus sans commerce	2808	0.24
RES3F	> 49	Ensemble immobilier	655	0.09
Total			873564	100

Tableau 7. Distribution des bâtiments résidentiels par types d'occupation.

Les graphes de la Figure 6 montrent cette répartition par types d'occupation pour les municipalités de Montréal et hors de Montréal. Les maisons unifamiliales représentent 56.1% et 86.4% du total des bâtiments répertoriés à Montréal et hors Montréal, respectivement.

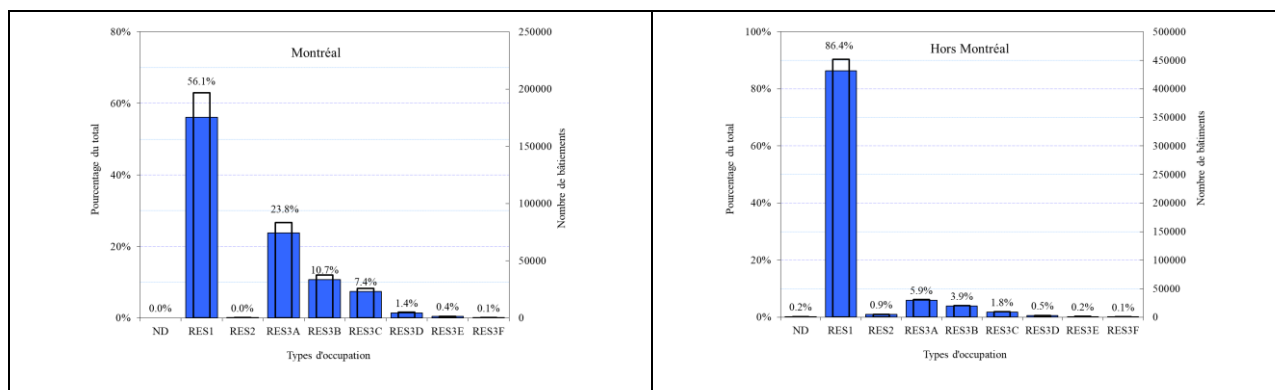


Figure 6. Distribution par types d'occupation du bâti résidentiel à Montréal et hors Montréal.

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 7 montre cette distribution pour chaque aire de diffusion. On note les différences de distribution par types d'utilisation entre le centre historique de Montréal et les municipalités de la grande couronne.

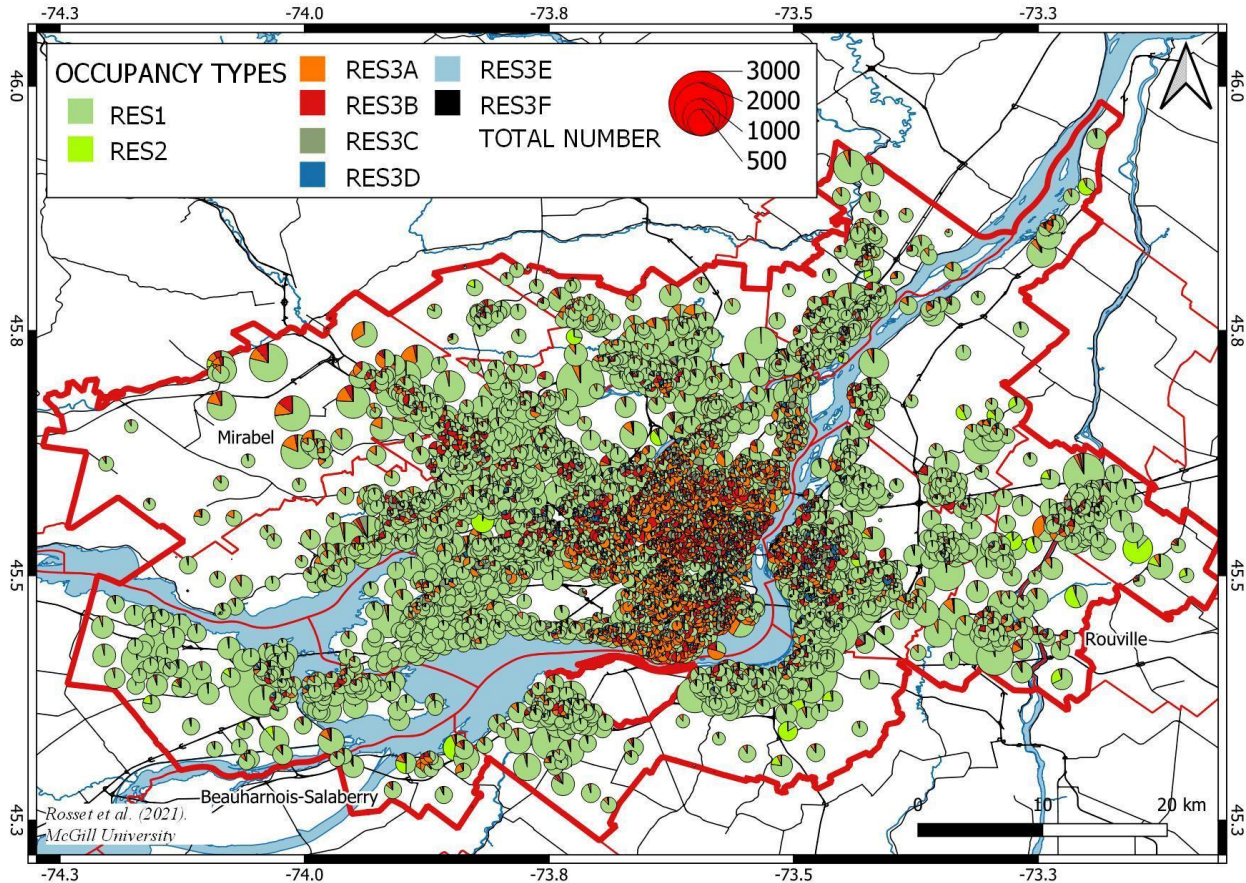


Figure 7. Distribution par types d'occupation du bâti résidentiel par aires de diffusion.

La surface des diagrammes est proportionnelle au nombre de bâtiments. Source : Traitement des données du rôle foncier 2018.

6.2. Distribution par types 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 la CMM lors des précédents projet (Chouinard et al., 2020 et 2017) sont utilisés pour déduire le type de construction du type d'occupation et de la période de construction (Tableau 8).

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

Tableau 8. Typologie de construction des bâtiments résidentiels selon le type d'occupation et la période de construction.

Note : URM= maçonnerie non armée; W1=ossatures en bois; C1= ossatures en béton résistant au moment; C2=ossatures en béton travaillant en cisaillement; URM_L=1-2 étages; URM_M=3+ étages; C1/C2_L=1-3 étages; C1/C2_M=4-7 étages; C1/C2_H=8+ étages

Les critères du Tableau 8 (période de construction, type d'occupation et nombre d'étages) permettent un décompte par types de construction (Tableau 9). On note que les constructions en bois (W1) sont à 81% des maisons unifamiliales et que les constructions en béton (C1 et C2) sont très majoritairement des multiplex. Les constructions en maçonnerie non armée de 1 ou 2 étages (URML) sont à 20% des maisons unifamiliales et pour 85% des multiplex de 3 étages et plus (URMM). Les duplex et triplex sont soit des constructions à ossature de bois soit en maçonnerie.

Types d'occupation	Pourcentage de bâtiments par type de construction et types d'occupation												
	W1	URM M	URM L	S1 L	MH	C3 L	C3 H	C2 M	C2 L	C2 H	C1 M	C1 L	C1 H
RES1	80.5	-	19.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RES2	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-
RES3A	10.7	-	34.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RES3B	4.9	-	26.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RES3C	2.9	5.4	17.7	99.6	-	-	-	11.8	65.4	-	3.5	72.6	-
RES3D	0.8	9.9	1.4	-	-	54.5	-	13.7	21.9	3.4	27.0	18.4	16.4
RES3E	0.2	84.4	0.3	0.4	-	45.5	100	64.1	9.0	93.1	59.8	7.5	78.9
RES3F	-	0.3	-	-	-	-	-	10.5	3.8	3.4	9.8	1.4	4.7
Total	796 179	226	51 762	3 652	5 794	8	2	169	4 338	136	955	9 241	254
% du total	91.2	<0.1	5.9	0.4	0.7	<0.1	<0.1	<0.1	0.5	<0.1	0.1	1.1	<0.1

Tableau 9. Distribution des bâtiments résidentiels par types de construction et d'occupation.

HazCan utilise dans un premier temps un regroupement par types d'occupation et par types de matériaux afin de calculer le nombre de bâtiments par type de construction. Cette matrice exprimée en pourcentage par types d'occupation est proposée dans le Tableau 10. Les valeurs 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 10. 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. Les Tableaux 11 et 12 indiquent le pourcentage de bâtiments dans ces trois niveaux de conception parasismique pour chaque type de construction pour les municipalités de Montréal et pour celles hors de Montréal, respectivement.

Niveau de conception parasismique	Période de construction	Niveau de conception par types de construction (en %)							
		W1	URM L, M	C1L	C1M	C1H	C2 L, M	C2H	S1 L, M
<i>Pre-code</i>	Before 1970	59	100	7	37	41	-	2	100
<i>Low code</i>	1970 - 1990	26	-	88	37	41	3	9	-
<i>Moderate code</i>	After 1990	15	-	5	26	18	97	89	-
Nombre de constructions		229 607	51 502	773	357	482	563	259	5 354

Tableau 11. Distribution des bâtiments résidentiels par niveaux de conception parasismique et par types de construction pour Montréal.

Code design	Year built	Niveau de conception par types de construction (en %)							
		W1	URM L, M	MH	C1 L	C1 M	C1 H	C2 L, M, H	S1 L, M
<i>Pre-code</i>	Before 1970	26	100	11	27	17	9	-	
<i>Low code</i>	1970 - 1990	37	-	69	63	78	83	-	
<i>Moderate code</i>	After 1990	37	-	19	10	5	9	100	
Nombre de constructions		496 981	2 020	4 651	8 871	106	23	4 015	

Tableau 12. Distribution des bâtiments résidentiels par niveaux de conception et par types de construction pour les municipalités hors-Montréal.

Pour chaque type d'occupation, la matrice des Tableaux 11 et 12 est complétée par le pourcentage de constructions par niveau de conception parasismique et par types de construction comme indiquée dans les Tableaux 13 et 14. Cette matrice permet de déduire le nombre de bâtiments par types de construction à partir du nombre de bâtiments par types d'occupation que l'on connaît pour chaque aire de diffusion.

Types d'occupation	Niveau de conception par types de construction (en %)										
	W1	URMM	URML	S1L	C3L	C2M	C2L	C2H	C1M	C1L	C1H
RES1	PC: 51 LC: 31 MC: 18		PC: 99 MC: 1								
RES3A	PC: 89 LC: 11		PC: 100								
RES3B	PC: 65 LC: 24 MC: 11		PC: 100								
RES3C	PC: 47 LC: 29 MC: 24		PC: 100	PC: 100			MC: 3	MC: 27		LC: 67 MC: 3	
RES3D	PC: 42 LC: 21 MC: 37	PC: 3	PC: 97		MC: 2	MC: 15	MC: 8	LC: 1 MC: 2	PC: 10 LC: 20 MC: 8	PC: 2 LC: 1 MC: 2	PC: 2 LC: 9 MC: 18
RES3E	PC: 46 LC: 19 MC: 35	PC: 63	PC: 35 LC: 1 MC: 1	PC: 90 MC: 10	MC: 1	LC: 1 MC: 16	MC: 1	LC: 2 MC: 20	PC: 9 LC: 7 MC: 6	PC: 1 MC: 1	PC: 17 LC: 15 MC: 3

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

Tableau 13. Distribution en % des bâtiments résidentiels par niveaux de conception parasismique et par types d'occupation pour les municipalités de Montréal.

Types d'occupation	Niveau de conception par types de construction (en %)									
	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							
RES3C		PC: 11	PC: 89			MC: 28			PC: 23 LC: 44 MC: 5	
RES3D		PC: 50	PC: 50			MC: 33			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 MC: 4	LC: 5 MC: 1

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

Tableau 14. Distribution en % des bâtiments résidentiels par niveaux de conception parasismique et par types d'occupation pour les municipalités hors de Montréal.

6.3. 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".

Pratiquement tous les bâtiments de la base de données ont une valeur estimée par le rôle et c'est cette évaluation qui est utilisée directement pour documenter les valeurs totales du foncier par aire de diffusion et par type d'occupation. Une analyse des données du précédent projet (chapitre 5 de Chouinard et al., 2020) a montré 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 la valeur médiane par surface.

La carte de la Figure 8 montre la répartition par types d'occupation pour chaque aire de diffusion. On note que les maisons unifamiliales (en vert) contribuent majoritairement à la valeur foncière totale (76.1%) suivies par les duplex et triplex. La répartition par types d'occupation est présentée dans le graphique de la Figure 9.

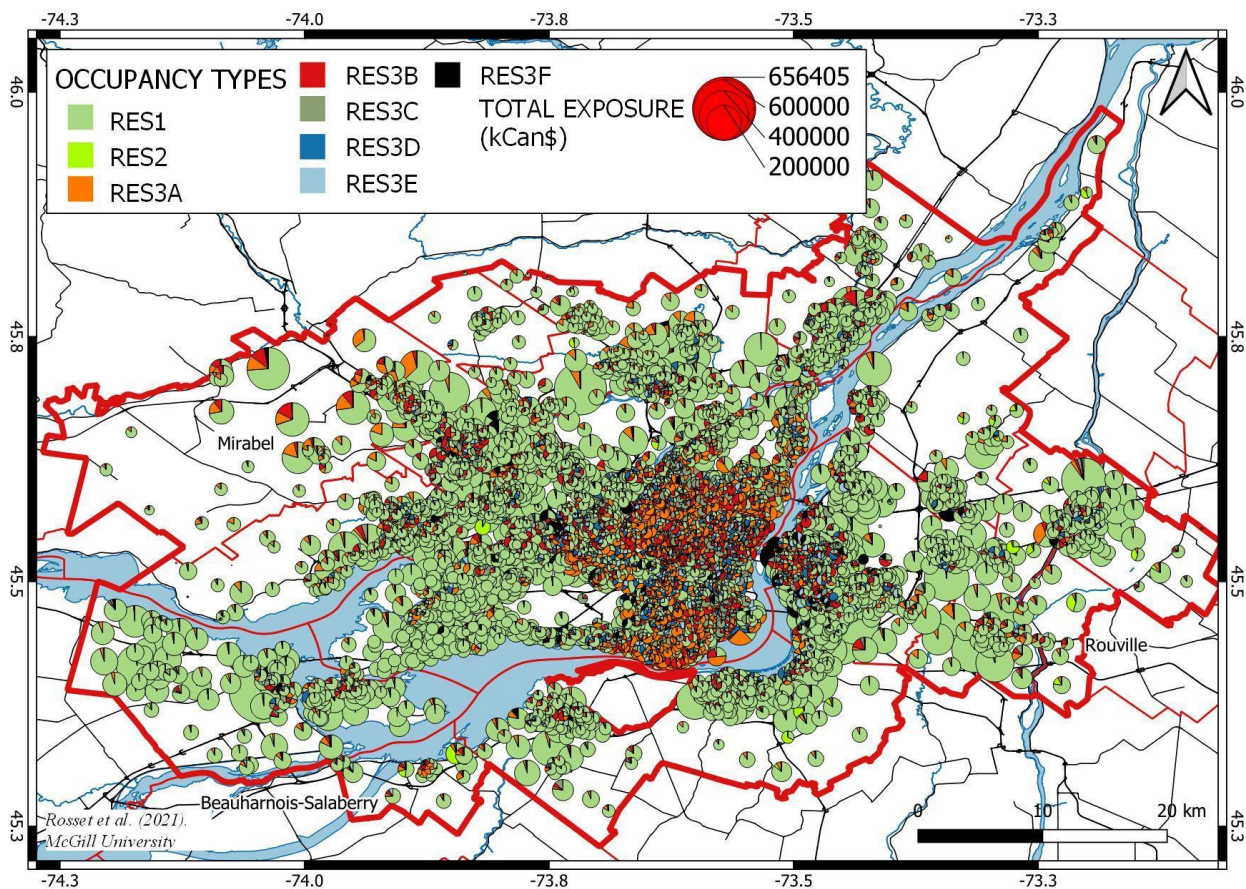


Figure 8. Distribution de la valeur foncière par aires de diffusion et par types d'occupation du bâti résidentiel.

Les données de valeurs foncières proviennent du rôle foncier 2018. La surface des ronds est proportionnelle à la valeur foncière totale des bâtiments d'une aire de diffusion (en millier de Can\$).

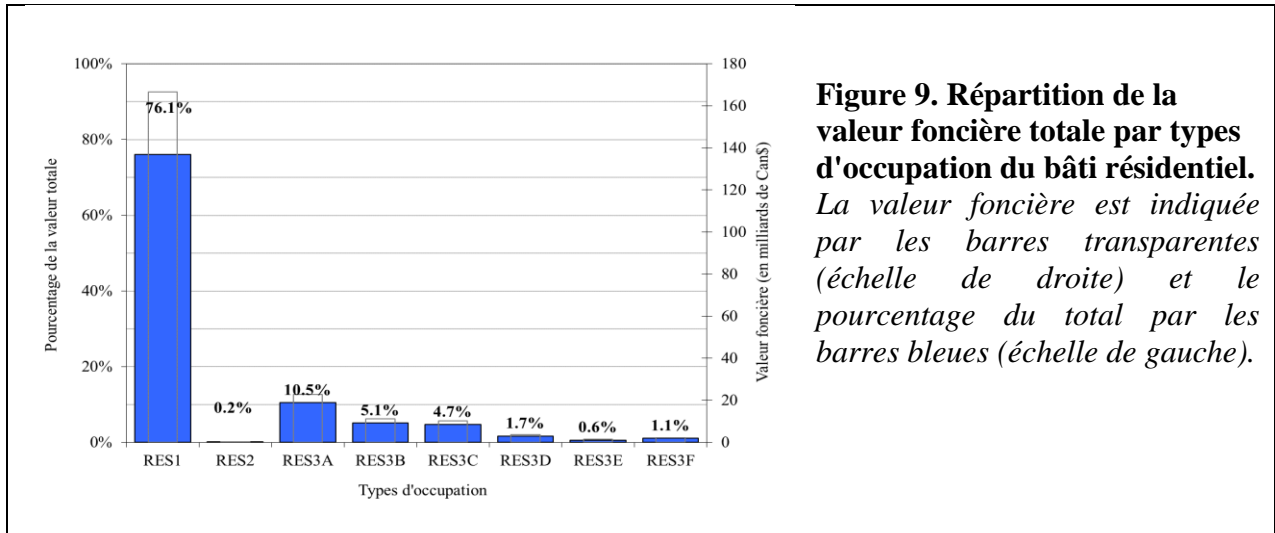


Figure 9. Répartition de la valeur foncière totale par types d'occupation du bâti résidentiel.
La valeur foncière est indiquée par les barres transparentes (échelle de droite) et le pourcentage du total par les barres bleues (échelle de gauche).

La valeur foncière totale du bâti résidentiel de la CMM est estimée de l'ordre de 196.5 milliards de Can\$. La carte de la Figure 10 montre la distribution par aires de diffusion de cette valeur foncière sur le territoire de la CMM.

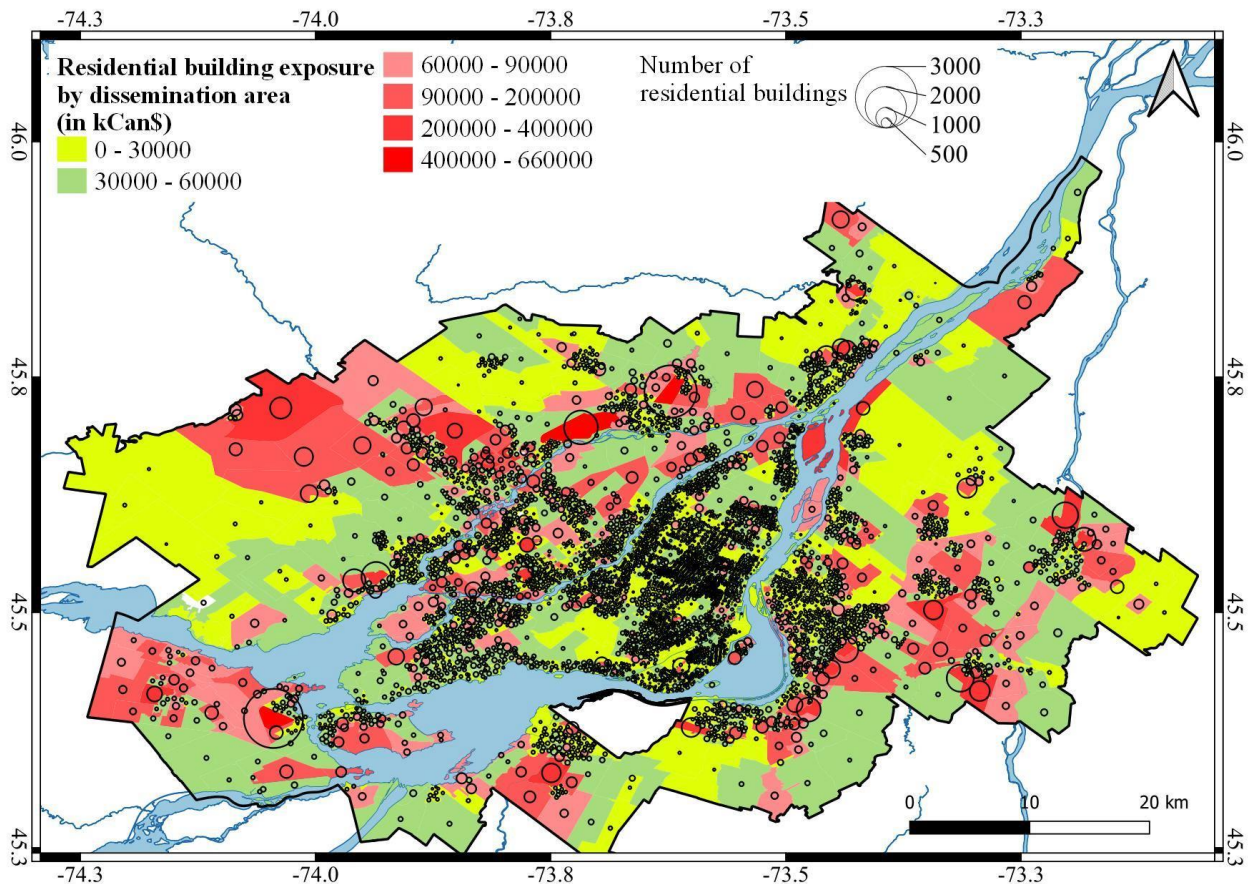


Figure 10. Valeur foncière du bâti résidentiel et nombre de bâtiments par aires de diffusion.
Les données de valeurs foncières proviennent du rôle foncier 2018. La valeur par aires de diffusion est en millier de Can\$. La surface des cercles est proportionnelle au nombre de bâtiments.

6.4. Estimation de la valeur monétaire du contenu du bâti

HazCan considère par défaut que la valeur du contenu des bâtiments est en moyenne 50% de sa valeur foncière. Le précédent projet a bénéficié de l'appui de l'ICLR (*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 $54\% \pm 7$. La valeur du contenu est obtenue en multipliant la valeur foncière du bâti par le ratio indiqué pour 2018 dans la RTA correspondant à l'aire de diffusion. La carte de la Figure 11 montre la distribution de ce ratio à l'intérieur de la CMM.

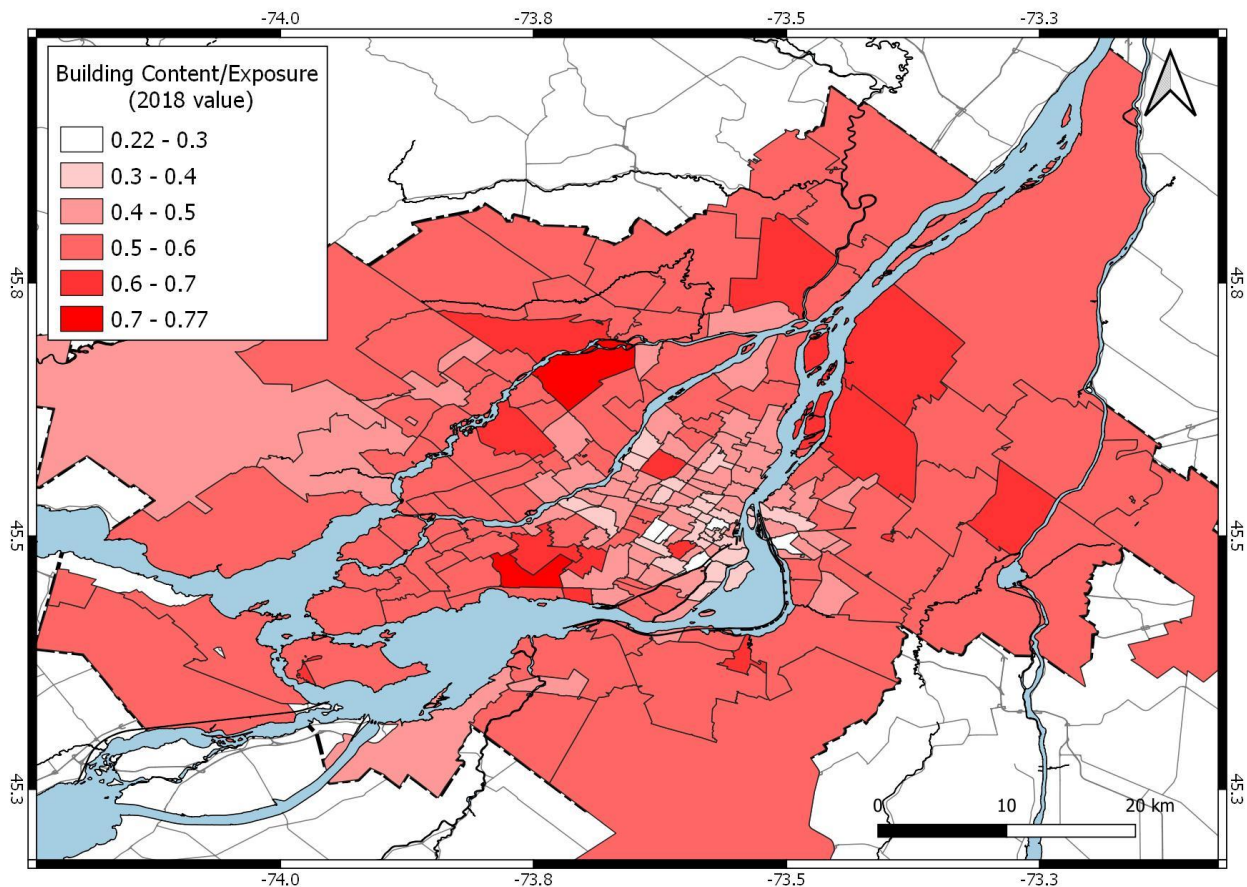


Figure 11. Ratio entre la valeur du contenu et la valeur foncière du bâti résidentiel par RTA de la CMM pour 2018.

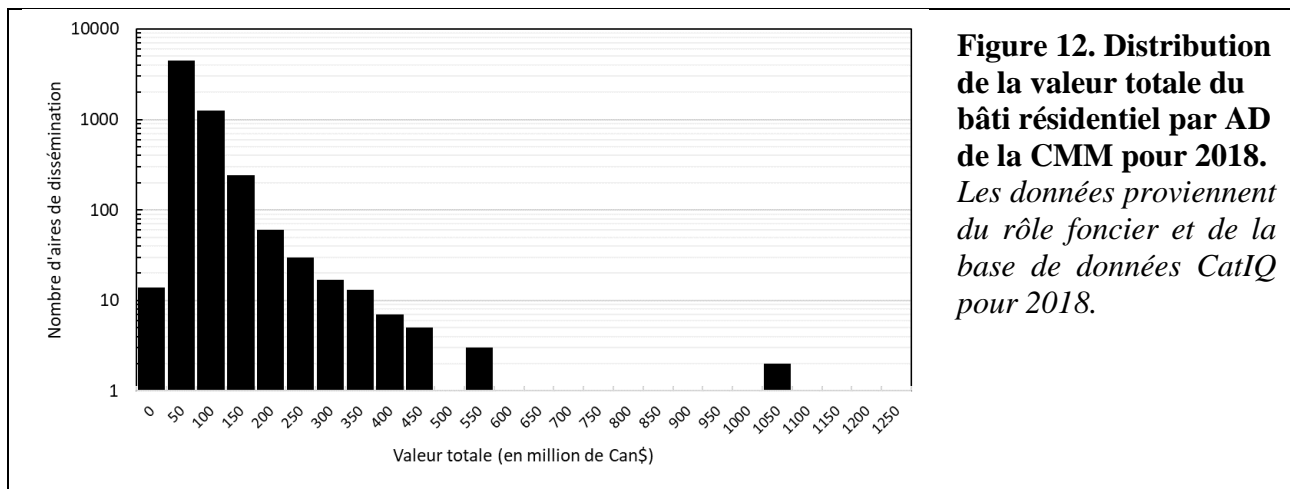
Les données proviennent de la base de données CatIQ pour 2018.

La valeur du contenu des bâtiments est estimée à **99 milliards de Can\$** pour une valeur totale du bâti de **196.5 milliards**, ce qui donne un portefeuille résidentiel total de **295.5 milliards**. Les maisons unifamiliales représentent plus de 65% de ce total, les duplex et triplex comptant pour 13.7 et 8.4%, respectivement. Le Tableau 15 donne les détails de ces décomptes par types d'occupation. À ce stade, il est difficile de définir l'incertitude de ces estimations.

	Valeur monétaire par types d'occupation (en million de Can\$)								
	RES1	RES2	RES3A	RES3B	RES3C	RES3D	RES3E	RES3F	Total
Bâtiment	125 941	427	27 765	17 207	12 386	5 112	4 216	3 449	196 504
Contenu	67 222	241	12 718	7 668	5 425	2 286	1 860	1 611	99 030
Total	193 163	668	40 483	24 875	17 811	7 398	6 076	5 060	295 534
En %	65.4	0.2	13.7	8.4	6.0	2.5	2.1	1.7	100.0

Tableau 15. Valeur monétaire pour la structure et le contenu du bâti par types d'occupation (en million de Can\$).

Le graphe de la Figure 12 montre la distribution de la valeur totale du bâti par aires de diffusion. La moyenne pour les 6 116 AD est de l'ordre de 48 millions de \$Can avec un écart-type du même ordre de grandeur. Le premier quartile est à 29 millions et le troisième quartile à 51 millions.



La carte de la Figure 13 montre la distribution de la valeur totale du bâti par aire de diffusion (valeur 2018).

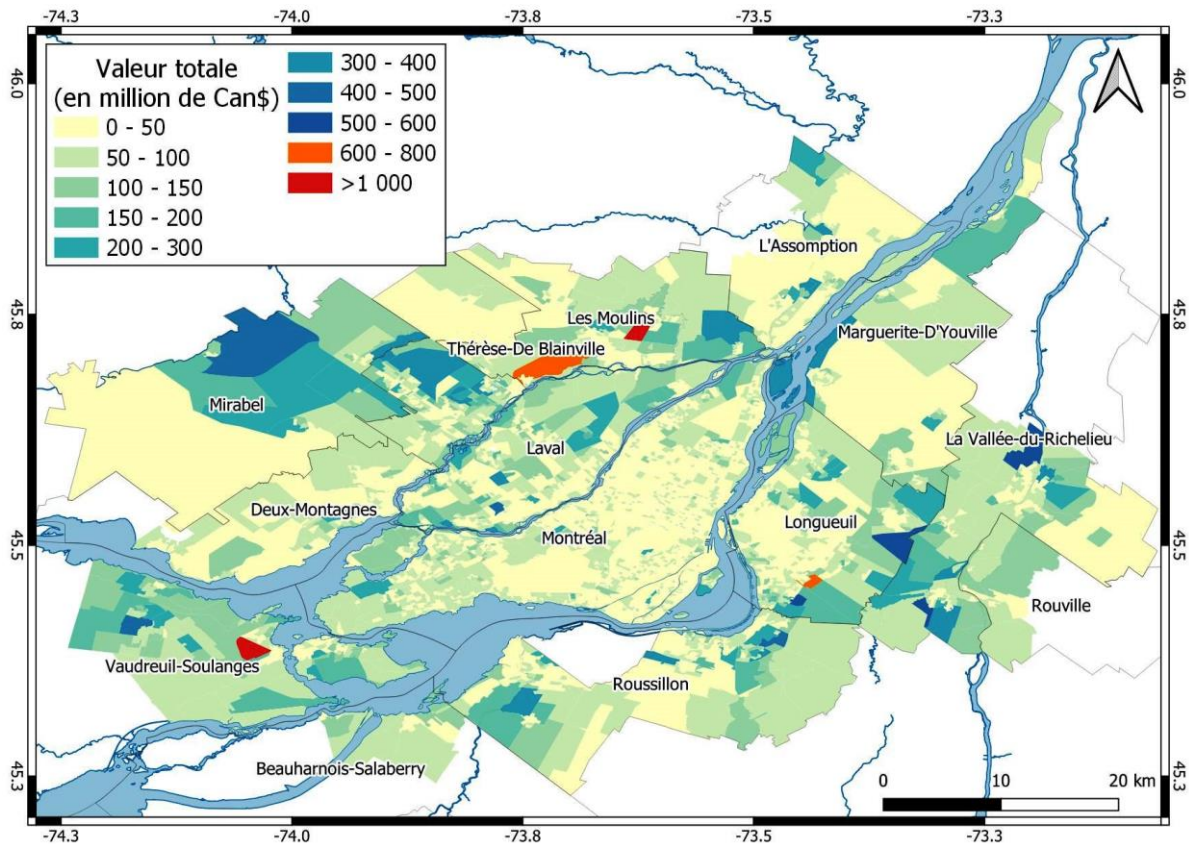


Figure 13. Valeur totale du bâti résidentiel par AD de la CMM pour 2018 (en million de Can\$).

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

7. Définition de l'aléa sismique

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 (SHM5) 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 (Halchuk et al., 2015).

Par exemple, la carte de la Figure 14 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).

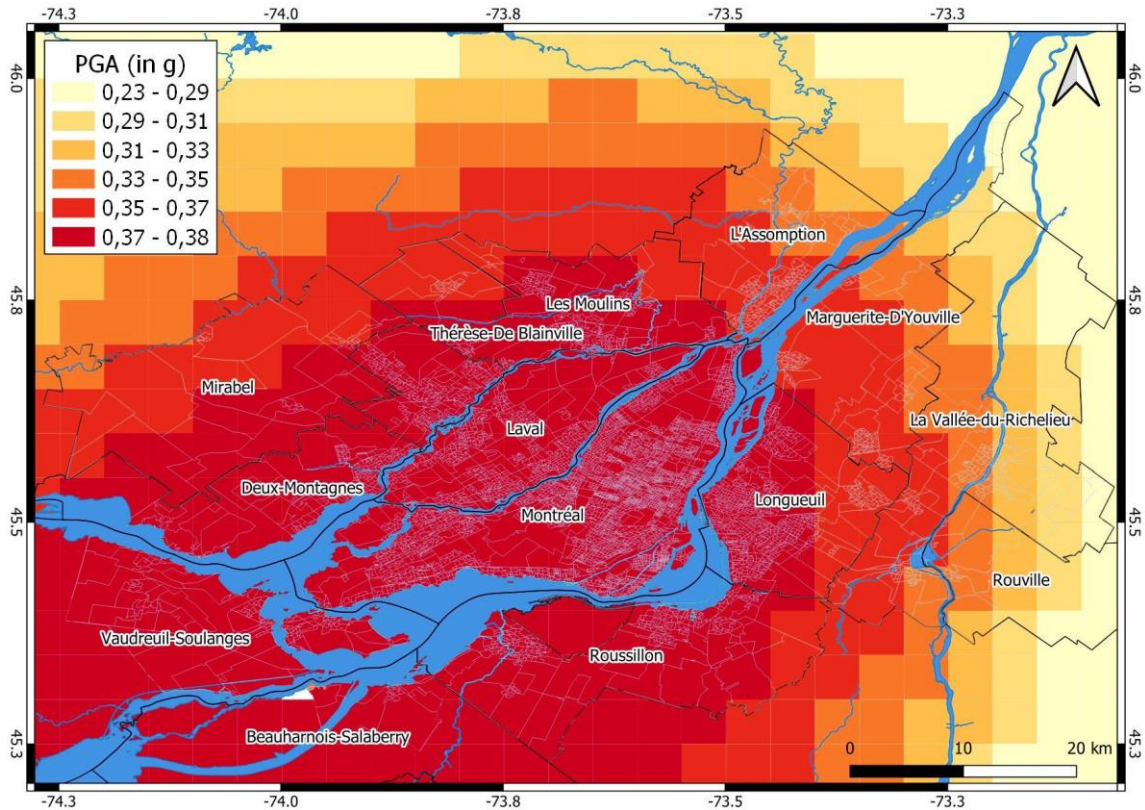


Figure 14. Carte de l'aléa sismique probabiliste en termes de PGA.

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

Pour cette étude, nous devons produire une série de cartes d'aléa sismique avec une résolution de 2 par 2km pour les périodes de retour de 100, 225, 475, 750, 1000, 1 500, 2 000 et 2 475ans à partir des données disponibles du SHM5. Les cartes disponibles (475, 1 000 et 2 475 ans) ont une résolution de 10km par 10km que nous devons interpoler pour obtenir une résolution de 2 par 2km. Pour celles qui ne sont pas directement disponibles, nous utilisons la méthode proposée par la CGC pour les extrapoler des cartes existantes. Cette procédure est répétée pour les paramètres de PGA, Sa(0.3s) et Sa(1.0s). Le graphe de la Figure 15 indique les valeurs calculées pour Montréal pour une série de probabilité annuelle de dépassement.

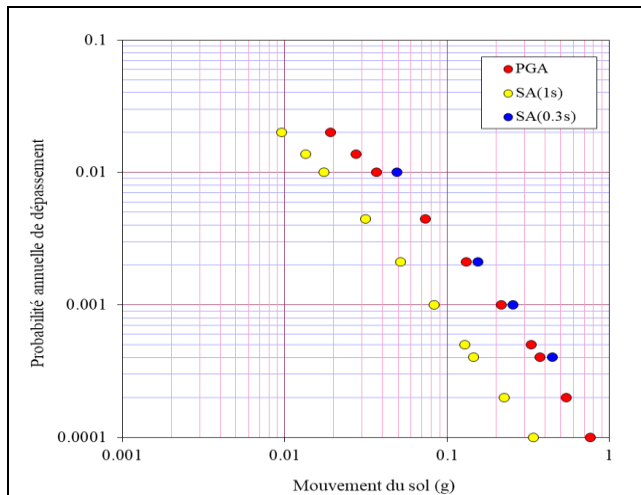


Figure 15. Aléa sismique pour Montréal pour différentes périodes de retour

Ce graphe fournit les valeurs de PGA et d'accélération spectrale pour les périodes 0.3 et 1s pour différentes probabilités annuelles de dépassement (données CNB2015).

Les conditions de sites (Figure 4) sont ensuite prises en compte dans chacune des cartes interpolées en considérant les facteurs d'amplification du tableau 3. La carte de la Figure 16 montre la distribution des valeurs de PGA moyennées pour chaque aire de diffusion pour la période de retour de 2 475 ans. On note que la distribution des PGAs n'est plus aussi homogène que celle de la carte de la Figure 14.

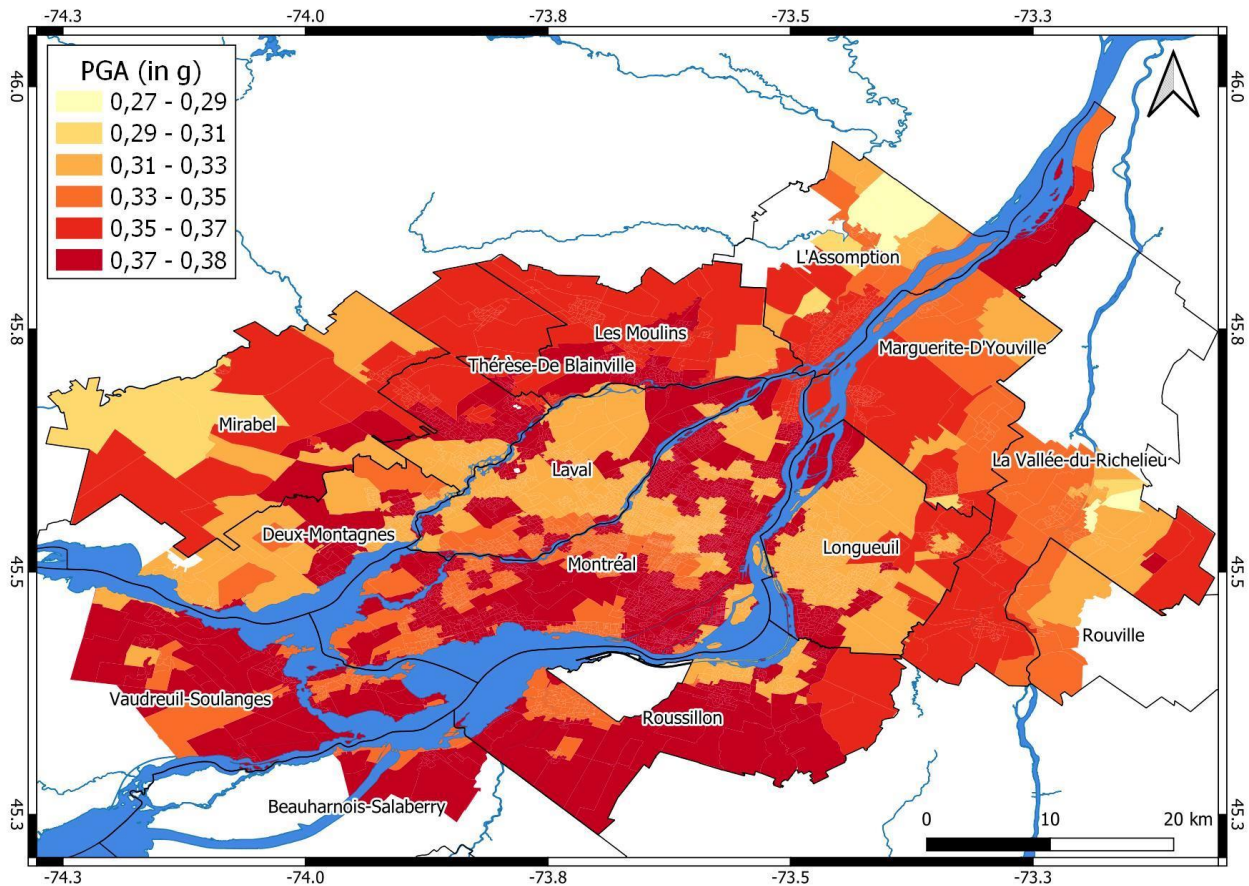


Figure 16. Aléa sismique en termes de PGA incluant les effets de site pour une période de retour de 2 475 ans.

Cette carte fournit les valeurs de PGA (en g) incluant les effets de site (amplification ou dé-amplification) pour une période de retour de 2 475 ans moyennées pour chaque aire de diffusion à partir de la carte interpolée avec une résolution de 2km.

8. Estimation du Dommage Moyen Annuel (DMA)

Le dommage moyen annuel (DMA) considère deux composantes du risque sismique: (1) la probabilité d'occurrence d'un séisme pour une région donnée (i.e. le niveau de mouvement du sol) et (2) les conséquences de ces mouvements du sol en termes de dommages physiques et pertes économiques.

Le DMA prend en compte les dommages engendrés par toutes les périodes de retour des séismes. Il permet d'intégrer les poids relatifs de chaque dommage de séisme en fonction de la période de retour et exprime ce que coûte en moyenne par an l'ensemble des séismes possibles, et correspond donc à ce qui devrait être provisionné (en actualisant régulièrement les données) chaque année pour faire face aux dommages éventuels.

L'estimation du DMA nécessite de calculer les dommages et coûts de remplacement ou de réparation par aires de diffusion en utilisant l'inventaire du bâti résidentiel effectué lors des précédents projet (Chouinard et al., 2017 et 2020) en considérant l'aléa sismique pour différentes périodes de retour dérivées des données de Séismes Canada. Le calcul de DMA consiste alors à intégrer les résultats de ces pertes calculées pour les différentes périodes de retour.

8.1. 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 17 expliquent la méthode générale d'estimation des dommages.

Les courbes de capacité indiquent 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.

Les courbes 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).

Les dommages sont divisés en cinq niveaux ; Aucun endommagement (*None*), faible (*Slight*), modéré (*Moderate*), important (*extensive*) et complet (*Complete*).

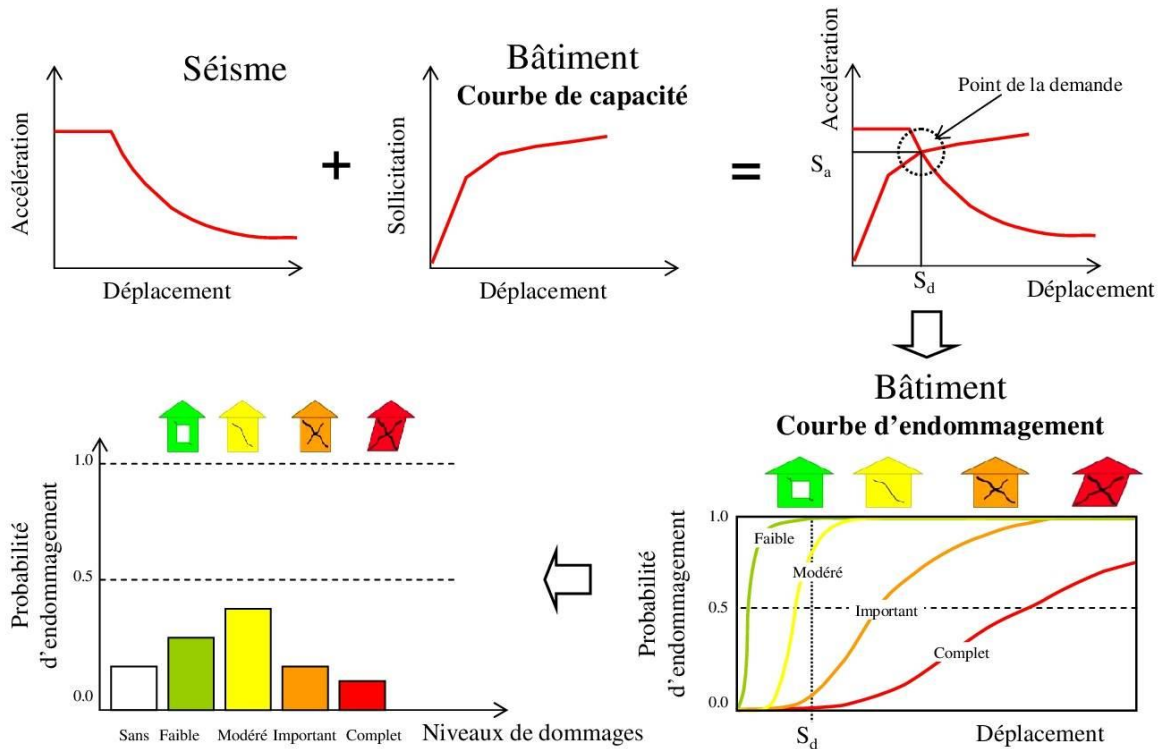


Figure 17. Estimation des dommages avec courbes de capacité et d'endommagement.

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).

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 car elles caractérisent relativement bien les types de construction que l'on rencontre au Québec. 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.

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

8.2. Coût des dommages

Le coût des dommages aux bâtiments est déduit des niveaux de dommages par types d'occupation et séparé entre les dommages structuraux, non structuraux et ceux du contenu du bâtiment.

Pour les dommages structuraux, le coût des dommages $CS_{ds,i}$ (cout de réparation) pour le niveau de dommage ds et pour le type d'occupation i est calculé par :

$$CS_{ds,i} = BRC_i * \sum_{i=1-8} PMBTSTR_{ds,i} * RCS_{ds,i}$$

BRC_i est le coût de remplacement du bâtiment pour le type d'occupation i tel que décrit dans le manuel Hazus par type d'occupation et par unité de surface.

$PMBTSTR_{ds,i}$ est la probabilité de subir un niveau de dommage ds tel que calculé par Hazus pour un type d'occupation i .

$RCS_{ds,i}$ est rapport du coût de réparation structural (en % du coût de remplacement du bâtiment) pour un type d'occupation i et un niveau de dommage ds (Table 11-2 du manuel technique d'Hazus). Le coût total des dommages structuraux CS_i pour un type d'occupation i est la somme des CS_{ds} pour les niveaux de dommage ds de léger à complet.

Un calcul similaire est effectué pour les dommages non structuraux qui sont divisés en dommages sensibles à l'accélération (dommages aux plafonds, aux équipements faisant partie intégrante de l'installation, tels que les équipements mécaniques et électriques, les tuyauteries et les ascenseurs) et en dommages sensibles aux déplacements inter-étages (cloisons, murs extérieurs, ornements et vitres). Il est à noter que la répartition des coûts entre les dommages structuraux et non-structuraux est d'un tiers, deux tiers dans Hazus, valeurs déduites des observations après séismes et des simulations.

Le contenu du bâtiment inclut le mobilier, l'équipement qui ne fait pas partie intégrante de la structure (ordinateurs et autres fournitures). Le contenu ne comprend pas les éléments non structuraux tels que l'éclairage, les plafonds, les équipements mécanique et électrique et autres installations. On suppose que la plupart des dommages au contenu, comme les armoires et autres équipement renversés, ou les équipements glissant des tables et des comptoirs, sont fonction de l'accélération du bâtiment. Par conséquent, les dommages non structuraux sensibles à l'accélération sont considérés comme un bon indicateur des dommages au contenu. En d'autres termes, s'il n'y a pas de dommages non structuraux sensibles à l'accélération, il est peu probable qu'il y ait des dommages au contenu. Tous ces calculs sont détaillés dans le manuel technique Hazus à la section 11.2.1.

8.3. Calcul du Dommage moyen annuel (DMA)

Le Dommage moyen annuel (DMA) prend en compte les dommages engendrés par toutes les périodes de retour de séismes. Il permet d'intégrer les poids relatifs de chaque dommage de séismes en fonction de la période de retour. Concrètement, il correspond à la surface située en dessous de la courbe de dommage exprimé en fonction des périodes de retour de séisme (Figure 18).

Le DMA est calculé avec la formule suivante :

$$DMA = \sum_{f=0 \text{ à } 1} D(f) df$$

$D(f)$ étant le dommage pour l'évènement de fréquence $f=1/T$

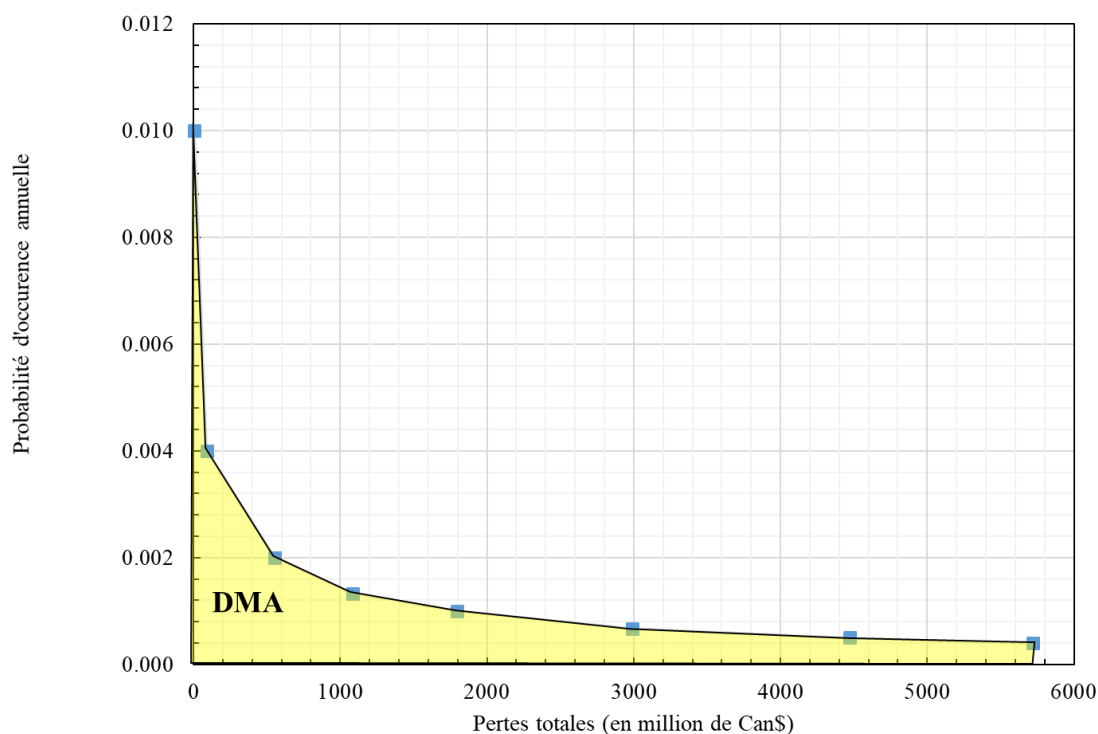


Figure 18. Courbe probabiliste de pertes économiques

La courbe en gris relie les calculs de pertes économiques pour différentes périodes de retour (carrés bleus). La surface jaune en dessous de cette courbe correspond au DMA.

Le calcul du DMA consiste à multiplier les pertes économiques par la probabilité annuelle d'occurrence correspondante et à sommer le résultat de ce calcul pour plusieurs périodes de retour **en suivant l'approche FEMA (2017)**. La procédure de calcul est détaillée dans le Tableau 16.

	Période de retour	Probabilité annuelle	Probabilité conditionnelle		Pertes annuelles	Pertes moyennes	Pertes annualisées
			Formule	Valeur			
	2500	0.00040	P2500	0.00040	L2500	L2500	P2500 x L2500
	2000	0.00050	P2000-P2500	0.00010	L2000	(L2500+L2000)/2	P2100-P2500 x (L2500+L2000)/2
	1500	0.00067	P1500-P2000	0.00017	L1500	(L1500+L2000)/2	P1500-P2000 x (L1500+L2000)/2
	1000	0.00100	P1000-P1500	0.00033	L1000	(L1000+L1500)/2	P1000-P1500 x (L1000+L1500)/2
	750	0.00133	P750-P1000	0.00033	L750	(L750+L1000)/2	P750-P1000 x (L750+L1000)/2
	500	0.00200	P500-P750	0.00067	L500	(L500+L750)/2	P500-P750 x (L500+L750)/2
	250	0.00400	P250-P500	0.00200	L250	(L250+L500)/2	P250-P500 x (L250+L500)/2
	100	0.01000	P100-P250	0.00600	L100	(L100+L250)/2	P100-P250 x (L100+L250)/2
Domage Moyen Annuel (DMA)^o							SOMME(...)

Tableau 16. Méthode de calcul du DMA adoptée par FEMA (2017).

Dans l'approche FEMA (2017), il est tout d'abord considéré que les pertes économiques associées aux mouvements du sol ayant des périodes de retour plus grandes que 2 500 ans ne sont pas plus grandes que celles pour 2 500 ans. Ensuite, les pertes économiques associées à des événements avec une période de retour inférieure à 100 ans sont suffisamment faibles pour être négligées. Nous adoptons les mêmes hypothèses pour cette étude.

Nous calculons aussi le **Dommege Relatif Moyen Annuel (DRMA) qui est la fraction de la DMA par rapport à la valeur total du bâti résidentiel dans notre cas**. Nous proposons aussi de calculer le DMA par habitant et par bâtiment.

9. Dommege Moyen Annuel (DMA), DRMA et autres indicateurs

Les résultats sont présentés pour les différents aires de diffusion et pour la CMM. L'annexe A fournit la liste des aires de diffusion qui ont des valeurs fortes pour chacun des indicateurs calculés ainsi que les données principales sur le bâti de ces entités. L'annexe D fournit l'explication des données de chaque colonne de la couche vectorielle associée à cette étude.

9.1. Dommege Moyen Annuel (DMA)

L'estimation du DMA est calculée à partir des valeurs de pertes annuelles pour les différentes périodes de retour considérées. Le tableau 17 fournit les valeurs pour chaque période de retour et **le DMA est de l'ordre de 6.18 millions de Can\$**. Le graphe de la Figure 18 fournit les valeurs annuelles de dommege pour chaque période de retour.

i	Période de retour	Probabilité		Pertes (en million de Can\$)		
		Annuelle	Conditionnelle	Annuelles	Moyennes	Annualisées
1	2500	0.00040	0.00040	5 720.91	5 720.91	2.288364
2	2000	0.00050	0.00010	4 471.57	5 096.24	0.509624
3	1500	0.00067	0.00017	2 989.01	3 730.29	0.634149
4	1000	0.00100	0.00033	1 795.67	2 392.34	0.789472
5	750	0.00133	0.00033	1 084.10	1 439.88	0.475162
6	500	0.00200	0.00067	555.52	819.81	0.549273
7	250	0.00400	0.00200	90.12	322.82	0.64564
8	100	0.01000	0.00600	6.23	48.175	0.28905
Dommege Moyen Annuel (en million de Can\$)°						6.1807

Tableau 17. Calcul du DMA pour la CMM.

Les calculs intermédiaires sont explicités dans le Tableau 16.

La carte de la Figure 19 montre la distribution des DMA par aires de diffusion.

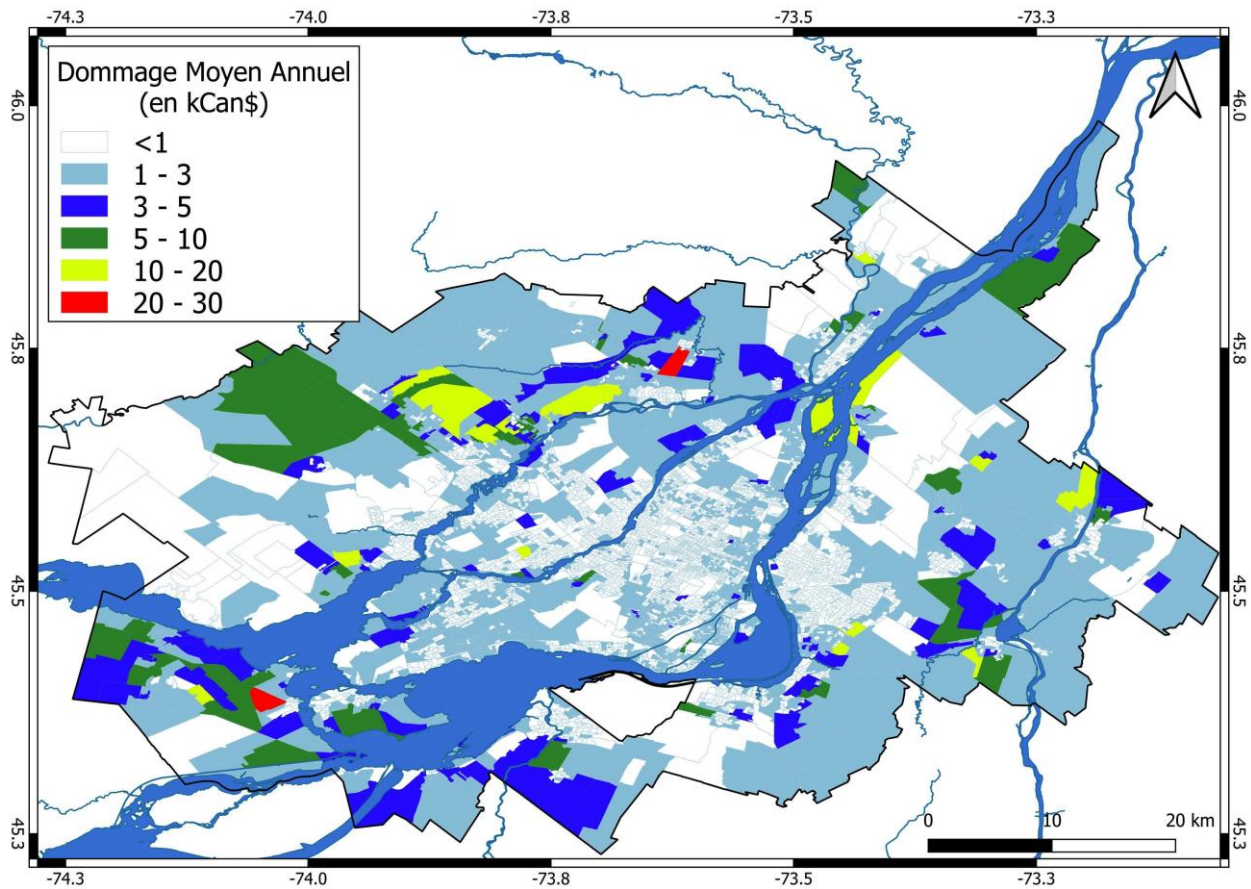


Figure 19. Distribution du dommage moyen annuel par aires de diffusion (en millier de Can\$).

Il est à noter que 93% des aires de diffusion ont une valeur de DMA inférieure à 2 000 Can\$ comme le montre le graphe de la Figure 20.

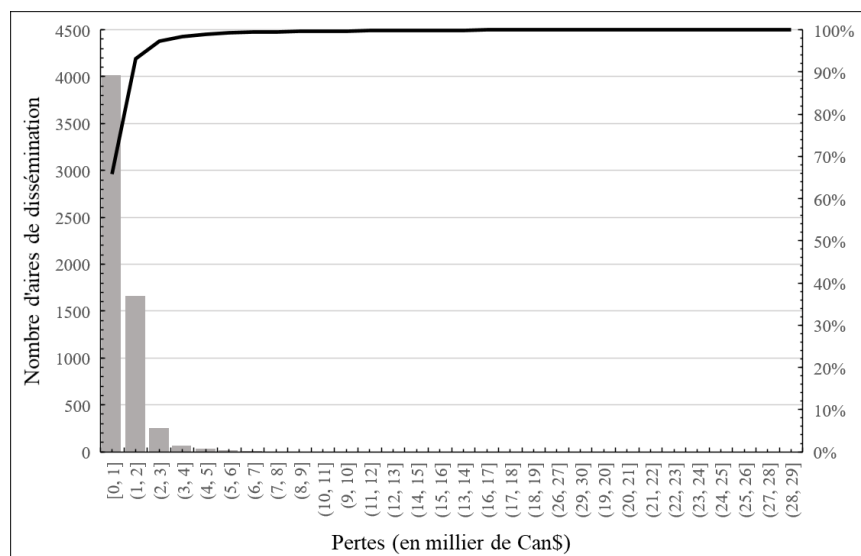


Figure 20. Distribution des DMA par aires de diffusion (en millier de Can\$).

9.2. Dommage Moyen Relatif Annuel (DMRA)

Le Dommage moyen relatif annuel (DMRA) permet de mettre en parallèle la valeur du DMA avec la valeur du bâti par aire de diffusion. La carte de la Figure 21 montre cette distribution par AD des valeurs de DMRA. **Le DMRA pour la CMM est de 31.45 Can\$ par million.**

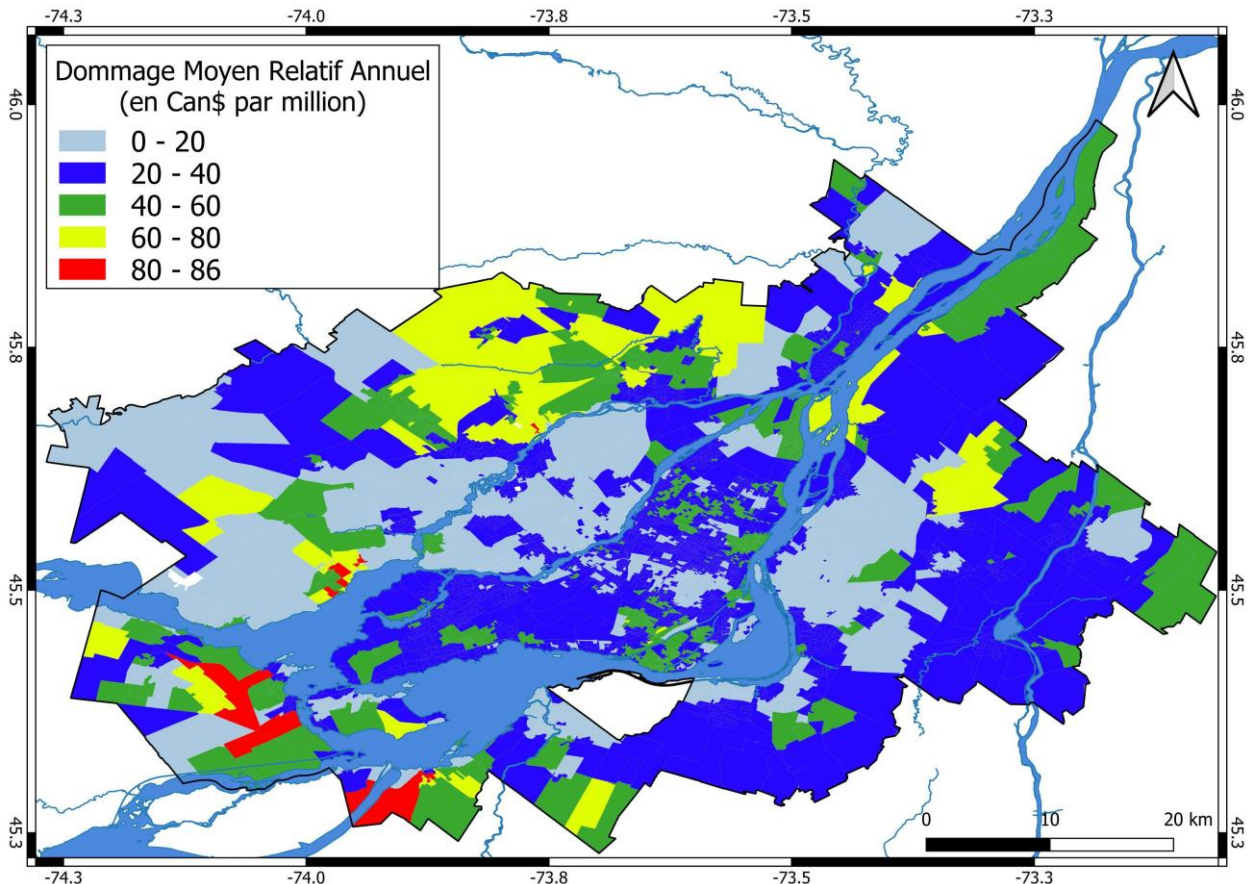


Figure 21. Distribution du dommage moyen relatif annuel par aires de diffusion (en Can\$ par million).

La valeur du DMRA correspond à la perte par million de Can\$ de la valeur du bâti dans chaque aire de diffusion.

9.3. DMA par habitant et par bâtiment résidentiel

La carte de la Figure 22 montre la distribution géographique des valeurs de DMA rapportés au nombre d'habitants par aires de diffusion. La carte de la Figure 23 montre quant à elle la distribution des valeurs de DMA rapportés au nombre de bâtiments résidentiels par AD. **La valeur de DMA par habitant est de l'ordre de 1.6 Can\$ et de 7.1 Can\$ par bâtiment.**

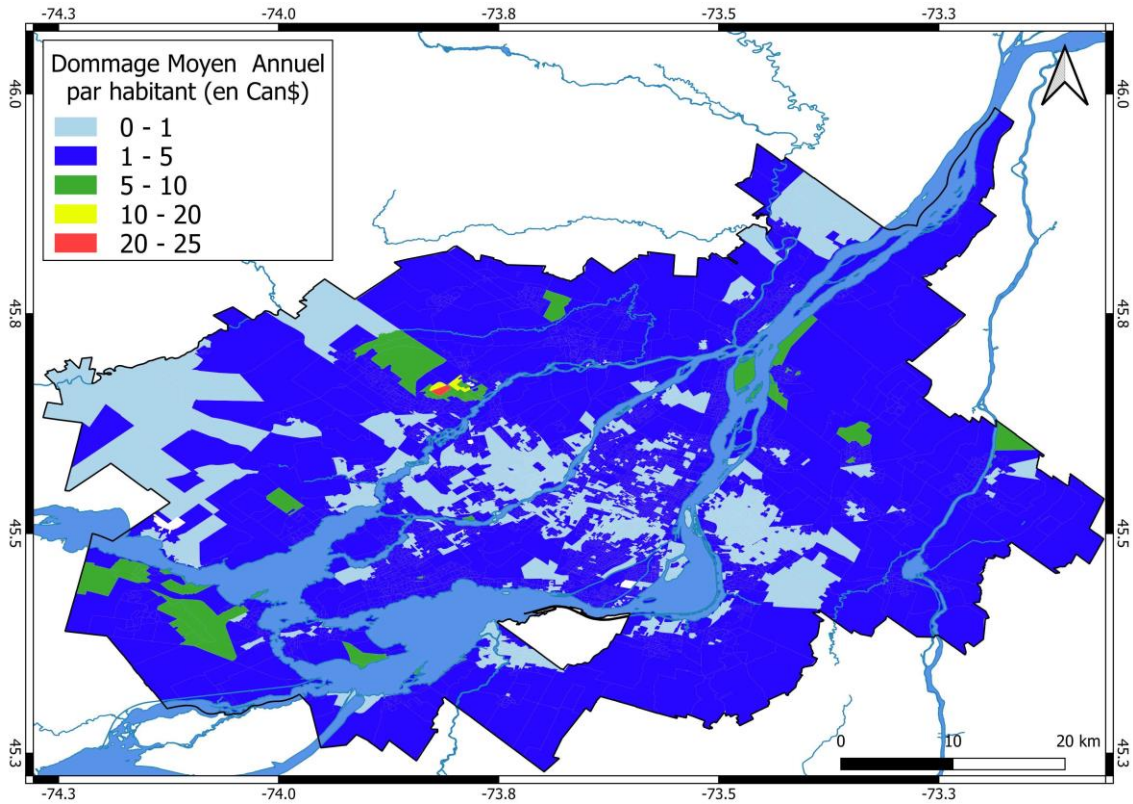


Figure 22. Distribution du dommage moyen annuel par habitant et par aires de diffusion (en Can\$).

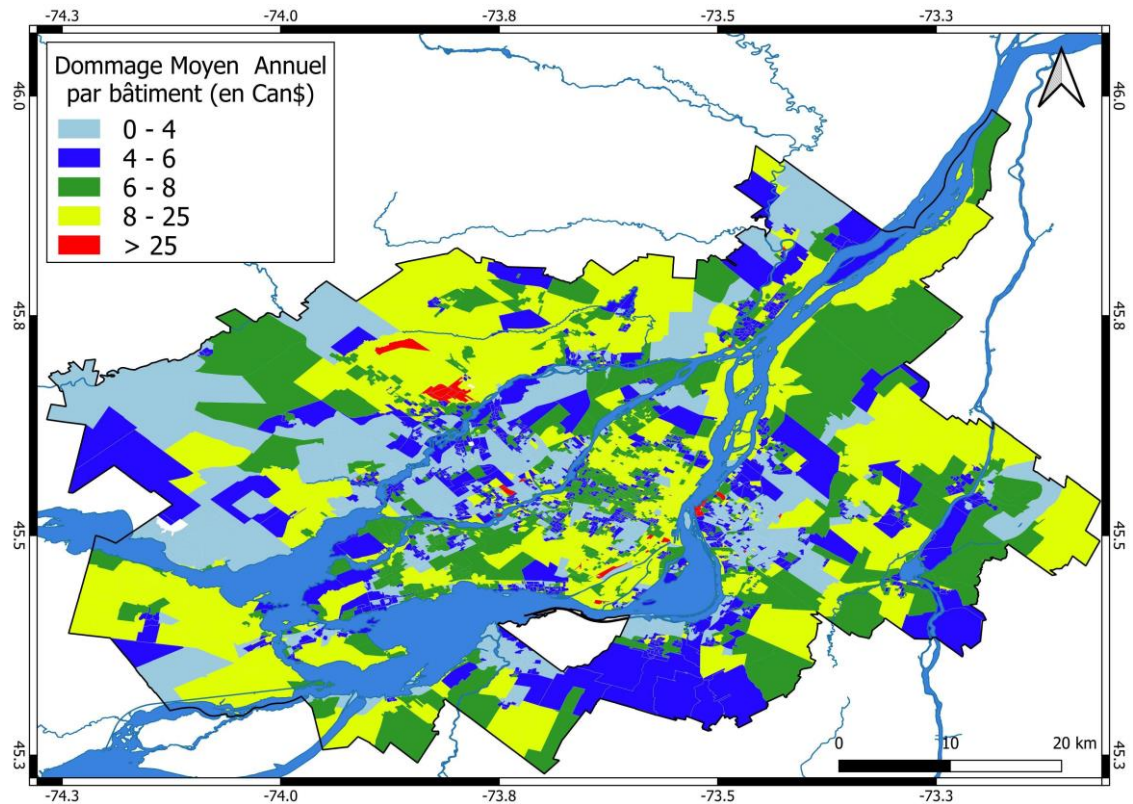


Figure 23. Distribution du dommage moyen annuel par bâtiment résidentiel et par aires de diffusion (en Can\$).

10. Discussion

Ce chapitre analyse les résultats de l'étude, tente une comparaison avec des études similaires dans d'autres pays et avec un autre outil d'analyse. Il interroge aussi l'influence du nouveau modèle d'aléa sismique (SHM6) proposé pour 2022 sur les résultats de cette étude.

10.1. Quelles sont les paramètres qui influencent les valeurs de DMA ?

Le graphe de la Figure 24 compare la valeur de DMA avec la valeur de PGA calculée au niveau de chaque aire de diffusion pour des périodes de retour de 100, 1 000 et 2 475 ans. Pour cela, nous regroupons sur un diagramme à boîte (*box plot* en anglais) la valeur moyenne (cercle), la médiane (trait horizontal), le 25 et 95 percentiles (limites en hauteur de la boîte) ainsi que les valeurs minimum et maximum calculées pour les valeurs de PGA des aires de diffusion ayant des valeurs de DMA regroupées par pas de 1 000 Can\$. A l'échelles des AD, on note sur ce graphe une augmentation de la valeur de PGA avec la valeur moyenne de DMA pour les périodes de retour de 100 et 1 000 ans. Cette tendance positive entre les valeurs de DMA et de PGA ne se retrouve pas pour la période de retour de 2 475 ans qui montre une distribution non corrélée qui est en lien avec la distribution de PGA qui prend en compte les conditions de site de la Figure 16. Pour les périodes de retour plus faibles, la distribution des valeurs de PGA est plus conforme à l'aléa sismique calculé sans prendre en compte des conditions de site.

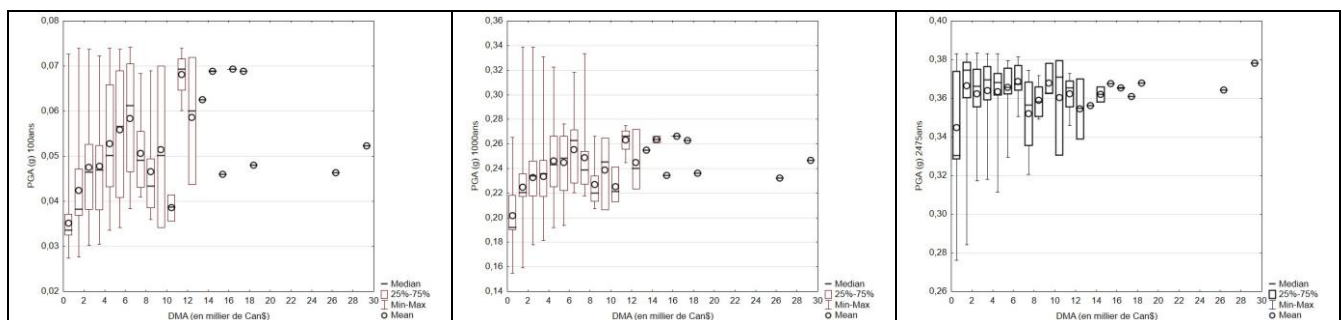


Figure 24. Relation entre la valeur de PGA (en g) pour les périodes de retour de 100, 1 000 et 2 475 ans et la valeur de DMA.

Ce diagramme en boîte montre la moyenne (cercles), le premier et dernier quartile (limite de la boîte), la médiane (trait horizontal) et le maximum et minimum de la valeur de PGA (pour des périodes de retour de gauche à droite de 100, 1 000 et 2 475ans) regroupées par valeur de DMA (pas de 1 000 Can\$).

Les graphes de la Figure 25 comparent de la même manière les valeurs de DMRA avec le PGA pour les trois périodes de retour précédentes. On note une très bonne corrélation entre les deux paramètres et ceci s'explique par la grande sensibilité du DMRA avec l'aléa sismique en lissant les différences de DMA par la valeur totale du bâti. Cette corrélation est moins évidente pour la période de retour de 2 475 ans qui est celle qui a les valeurs de PGA les plus influencées par les conditions de site.

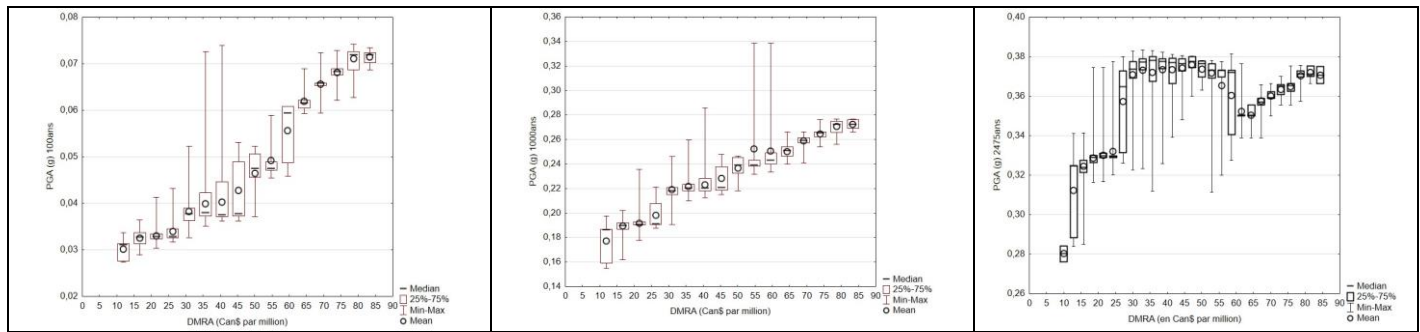


Figure 25. Relation entre la valeur de PGA (en g) pour les périodes de retour de 100, 1 000 et 2 475 ans et la valeur de DMRA.

Légende du graphe identique à celle de la Figure 24.

Nous comparons ensuite de la même manière sur le graphe de la Figure 26 les valeurs de DMA et DMRA avec le nombre de bâtiments par aire de diffusion. On note sur ce graphe que la valeur de DMA augmente avec le nombre de bâtiments par AD alors que cette augmentation est moins nette avec le DMRA.

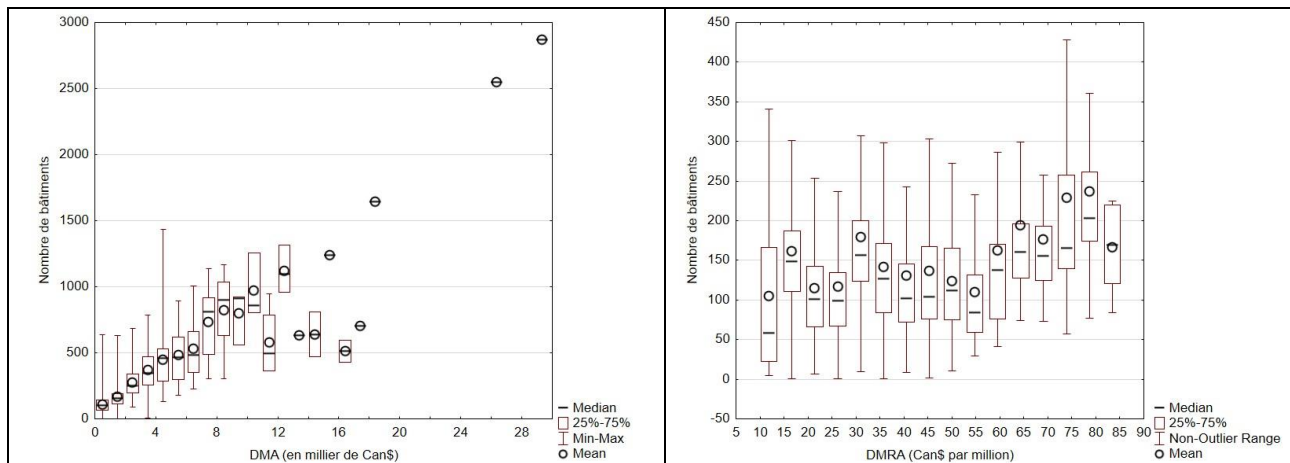


Figure 26. Relation entre le nombre de bâtiments et les valeurs de DMA et DMRA.

Légende du graphe identique à celle de la Figure 24.

Pour l'analyse du bâti résidentiel, nous avons distingué trois niveaux de conception en fonction de l'année de construction: avant 1970 – *Pre code*; entre 1970 et 1990 – *Low code* et après 1990 – *Moderate code*. Ce niveau de conception est un paramètre qui influence les valeurs de DMA et DMRA comme le montre les graphes de la Figure 27. Ils regroupent les aires de diffusion par valeurs de DMA ou DMRA avec un pas de 1 000 Can\$ et fournissent la valeur moyenne, médiane ainsi que les 25 et 75 percentiles du nombre de bâtiments et ce pour chaque niveau de conception. Une régression linéaire est calculée pour chacun des niveaux et sa ligne tracée sur le graphe.

On note que pour une certaine valeur de DMA (Figure 27 de gauche) le nombre moyen de bâtiments diminue d'autant que le niveau de conception est ancien, ce qui veut dire que plus le niveau de conception est faible, plus les dommages sont importants. Cette tendance n'est pas visible avec les valeurs de DMRA (Figure 27 de droite).

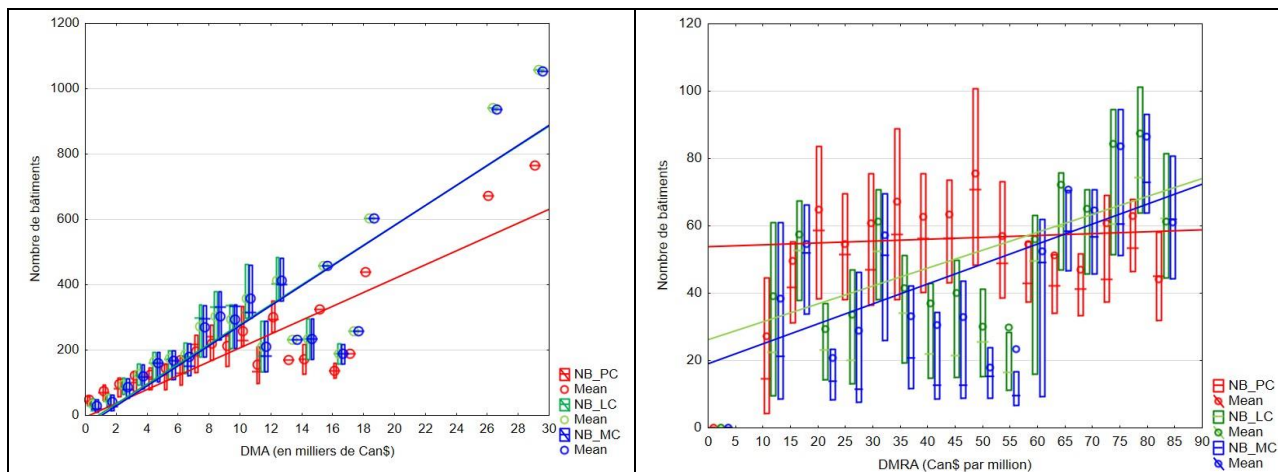


Figure 27. Relation entre le niveau de conception et les valeurs de DMA et DMRA pour tous les types de bâtiment.

Légende du graphe identique à celle de la Figure 24 sans représentation des valeurs minimum et maximum. Les trois niveaux de conception sont séparés ; en rouge pour pre-code (PC), vert pour low-code (LC) et bleu pour moderate_code (MC). Pour chaque niveau de code, une régression linéaire (lignes de même couleur que pour le niveau de conception) est calculée

Les graphes de la Figure 28 proposent le même type de comparaison mais pour les ossatures en bois W1. On note la même tendance avec un nombre moyen de bâtiments à ossatures bois pour une certaine valeur de DMA qui augmente avec le niveau de conception, avec un comportement identique pour les bâtiments construits après 1970 (*low code* et *moderate code*). Pour le DMRA (graphe de droite de la Figure 28), on retrouve une tendance similaire pour les ossatures bois *low* et *moderate code* alors que le DMRA moyen est moins sensible au nombre de bâtiments à ossatures bois *pre-code* (pente de la tendance linéaire plus faible que pour les autres niveaux de conception).

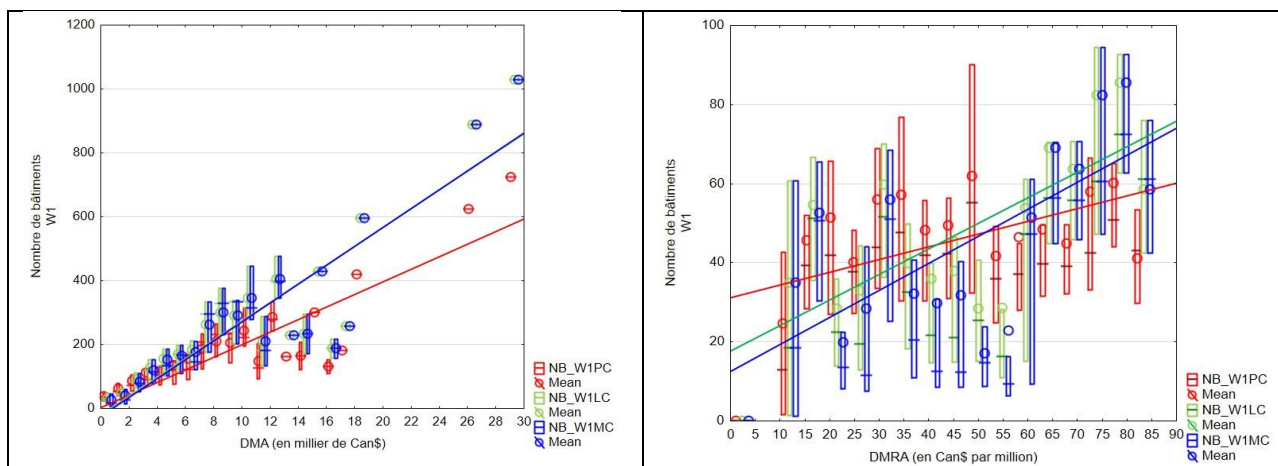


Figure 28. Relation entre le niveau de code parasismique et les valeurs de DMA ou DMRA pour les ossatures bois (W1).

Légende du graphe identique à celle de la Figure 24 sans représentation des valeurs minimum et maximum. Et cela pour les trois niveaux de code parasismique (en rouge pour pre-code PC, vert pour low-code LC et bleu pour moderate_code MC). Pour chaque niveau de code, une régression linéaire (lignes) est calculée.

Le faible nombre de bâtiments avec une structure en béton (C1, C2 et C3) et en maçonnerie non renforcée (URML et URMM) ainsi que leur distribution éparse dans la CMM ne permet pas de proposer une comparaison similaire à celle des ossatures bois. Les graphes de la Figure 29 comparent le DMA et le nombre moyen et médian de bâtiments en maçonnerie non armée (à gauche) et en béton, regroupé par pas de 1 000Can\$ pour le DMA. On note de nouveau une relation positive entre le DMA et ce nombre moyen bien que cette tendance est moins distincte pour les structures en béton.

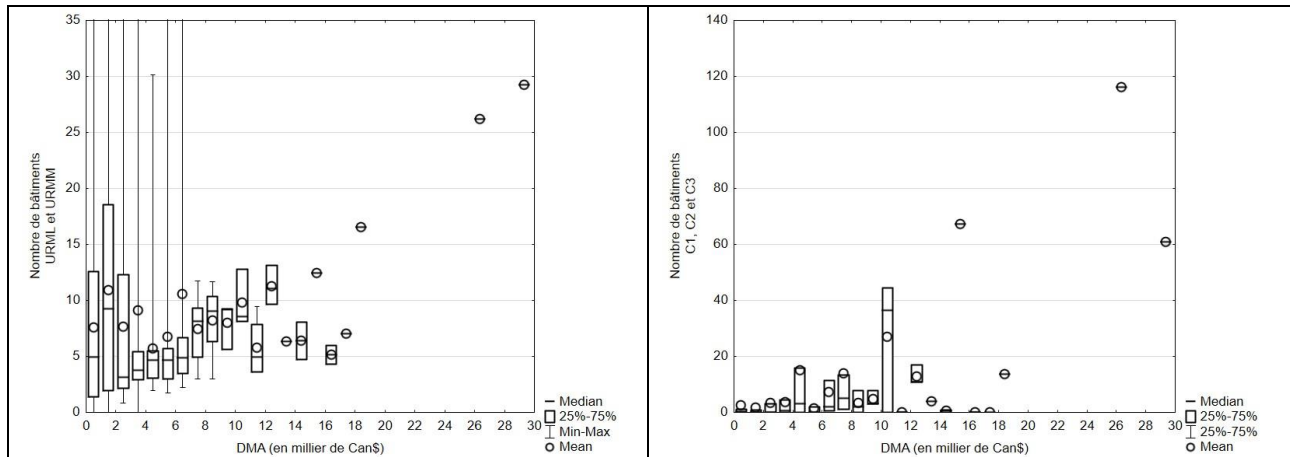


Figure 29. Relation entre la valeur de DMA et le nombre de structures en béton (C1 et C2) et en maçonnerie non renforcée (URML).

Légende du graphe identique à celle de la Figure 24.

Le graphe de la Figure 30 montre la relation entre les valeurs de DMA ou de DMRA regroupées par pas de 1 000 Can\$ et la valeur totale du bâti (structure et contenu). On note une relation positive entre le DMA et la valeur totale du bâti qui est intuitive ; plus la valeur foncière est grande plus le coût de remplacement ou de réparation sera grand pour un niveau de contraintes sismiques donnés. Et ce, au-delà de la résistance du bâti. On ne retrouve pas cette relation avec le DMRA qui représente le ratio entre le DMA et cette valeur totale mais est sensible à la distribution de l'aléa sur la région d'étude.

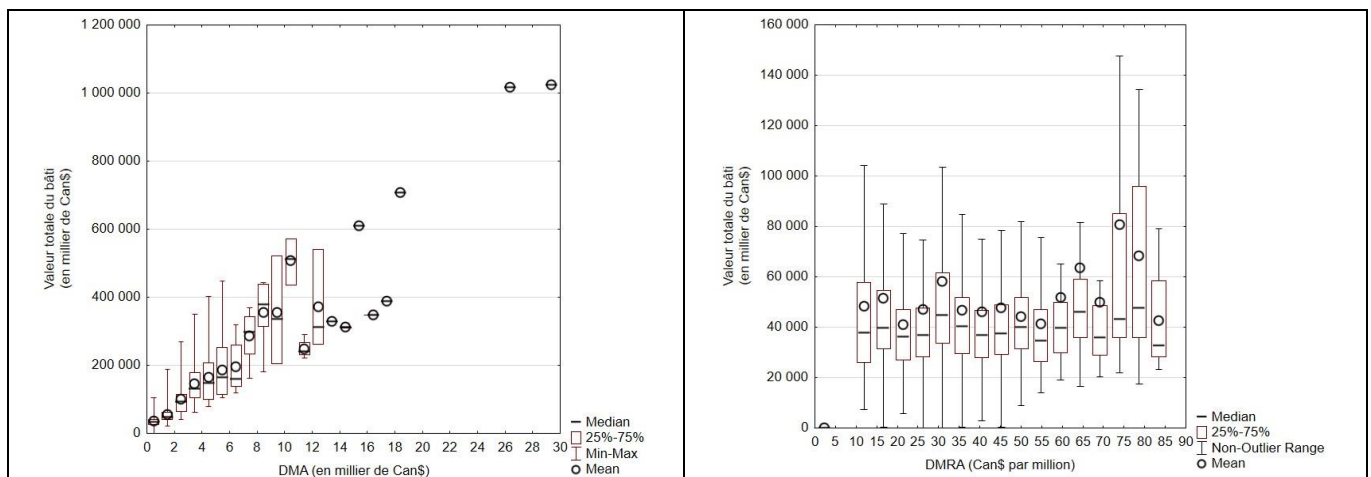


Figure 30. Relation entre la valeur totale du bâti et la valeur de DMA et DMRA.

Légende du graphe identique à celle de la Figure 24.

10.2. Études existantes dans d'autres régions

Très peu d'études comportant un calcul du DMA sont disponibles. Les plus avancées sont celles réalisées aux USA par l'Agence fédérale de gestion des urgences (FEMA) dans le cadre du National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP). Trois études ont été menées au niveau national. La première des études, publiée en 2001 (FEMA 2001) a utilisé la version 1996 des cartes d'aléa sismique fournies par le service géologique des USA (USGS), et a estimé les DMA au niveau national à 4.4 milliards de dollars (en US\$ de 1994). La Californie représentait la majeure partie des pertes, avec 3.3 milliards de dollars. La deuxième étude (FEMA 2008) incorpore les cartes d'aléa de 2002 et utilise des données d'inventaire actualisées. Elle prédit des pertes annualisées de 5.3 milliards de dollars (en US\$ de 2005). La Californie porte de nouveau la majorité des pertes annualisée avec 3.5 milliards de dollars. La troisième étude finalisée en 2016 montre que les pertes augmentent de 10% par rapport à celles calculées en 2008 (6.1 milliards), mais l'inflation durant cette période réduit fortement cette augmentation (quand on ajuste les résultats de 2008 et 2014 à 2014). De nouveau, 61% des pertes sont concentrées dans l'état de Californie.

Ces variations sont essentiellement dues aux variations de la population, de la valeur du bâti, ainsi qu'à une modification de l'aléa sismique pour des périodes de retour élevées et la meilleure prise en compte des conditions de site (FEMA, 2017). Les trois études ont utilisé Hazus et la méthode que nous utilisons dans ce projet à l'échelle des états et comtés pour calculer le DMA et DMRA. Les cartes de la Figure 31 montrent les résultats de l'étude de 2016 à l'échelle des comtés en termes de DMA, DMRA et DMA par habitant (FEMA, 2017).

Cette étude ne permet toutefois pas une comparaison aisée de nos résultats car les comtés avec des valeurs d'aléa similaires à celles de la CMM ont des valeurs de remplacement des bâtiments différentes. Les comtés pour lesquelles le niveau de PGA est équivalent entre les USA et la CMM (0.22g pour une période de retour de 1000 ans) sont ceux au nord de l'état de New-York. Les cartes de la Figure 30 indiquent que pour ces comtés, les valeurs de DMA et DMRA sont de l'ordre de 0.5-1 million et de 50-100 US\$/million, respectivement. Cette comparaison est aussi valable pour certains comtés du Wyoming qui ont des valeurs de DMRA plus faibles (10-50 US\$/million).

Les comtés qui ont des valeurs de DMA proches de celles calculée pour la CMM (**5.5 millions de US\$**) sont le Maine (5.7 millions), le Maryland (5.8 millions), Le Michigan (5.8 millions) ou le Wyoming (4.8 millions) selon les données pour 2014 (FEMA, 2017).

La valeur de DMRA des états de New York (25.4) ou du New Jersey (24) et de l'agglomération de New York-Northern New Jersey-Long Island (29) est proche de celle de la CMM (**25\$ par million**). La valeur de **DMA par habitant pour la CMM est de 1.3 US\$ par habitant**, valeur qui est plus faible que celle calculée pour les comtés au Nord de l'état de New-York (5-10\$) ou des comtés du Wyoming (1-5\$) avec un niveau d'aléa similaire.

Sousa (2008) propose une estimation du DMA pour le Portugal à l'échelle des comtés. Firuzi et al. (2019) calcul le DMA pour la ville de Téhéran (Iran) en utilisant la méthode de la FEMA (2007). Ils arrivent à une valeur de 33.1 millions \$. Ces deux études ne permettent toutefois pas de comparaison pertinente car la typologie du bâti, sa valeur et les niveaux d'aléa sismique sont différents.

A ce stade, nous pouvons conclure que les valeurs calculées pour la CMM sont cohérentes avec les calculs effectués aux USA.

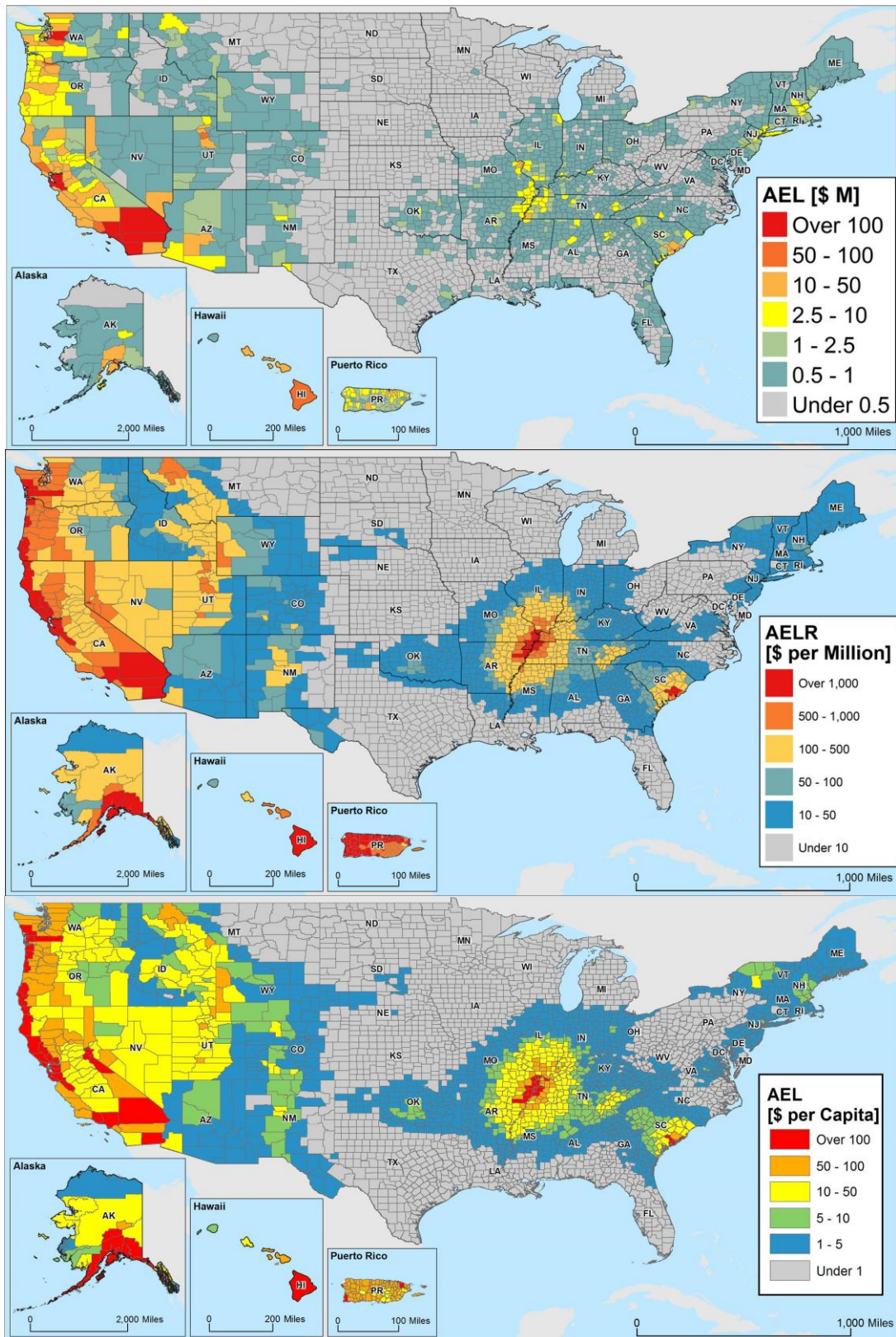


Figure 31. DMA, DMRA et DMA par habitant à l'échelle des comtés aux USA.

De haut en bas : DMA, DMRA et DMA par habitant (FEMA, 2017). Les unités sont indiquées dans la légende.

10.3. Calcul du DMA avec l'outil OpenQuake

La commission géologique élabore actuellement un catalogue national de scénarios de tremblement de terre, qui présente les secousses, les dommages, les pertes et les conséquences probables de tremblements de terre hypothétiques qui pourraient frapper la population canadienne. Ce catalogue ne comporte que les dommages causés aux immeubles et à leurs habitants selon une échelle qui correspond approximativement aux aires de diffusion du recensement. Ce projet est mené par les responsables du programme Géoscience pour la sécurité publique de la Commission géologique du Canada (Hobbs et al., 2021). Les résultats de ces scénarios ne sont pas encore disponibles.

Les calculs sont effectués avec un outil d'analyse développé par un consortium international de chercheurs nommé GEM (Global Earthquake Model). Cet outil, nommé OpenQuake (OQ), est une plateforme de calcul « open source » qui intègre les différents modules pour calculer l'aléa sismique, les dommages, les conséquences sur la population et les coûts liés à ces dommages (GEM, 2022). C'est cette plateforme qui est utilisée pour produire la sixième génération du modèle d'aléa sismique du Canada (SHM6) et les valeurs d'aléa qui seront incluses dans la version 2020 du code national du bâtiment du Canada (Kolaj et al., 2020).

L'inventaire des bâtiments résidentiels que nous utilisons dans Hazus a été reformaté pour être utilisables dans OQ. Les différents types de construction rencontrés dans la CMM sont associés à la taxonomie existante d'OpenQuake et les courbes de fragilité utilisées dans Hazus converties au format OQ. Enfin les paramètres pour calculer les pertes économiques qui sont utilisés dans Hazus sont reportés dans le modèle de vulnérabilité (*consequence model*) d'OpenQuake en l'adaptant aux spécificités de cet outil qui ne distingue pas les dommages structuraux et non-structuraux. Ce travail est détaillé dans le rapport de Pollet (2021) en Annexe C. Pour le calcul du DMA avec OQ, les données de l'aléa sismique pour les différentes périodes de retour sont celles utilisées avec Hazus. Le tableau 18 indique les coûts des dommages calculés avec Hazus et OQ pour les différentes périodes de retour et le DMA qui en résulte. Ces coûts sont séparés entre les dommages structuraux, non-structuraux et au contenu.

Selon Hazus	Coût des dommages(en millier de Can\$) pour différentes périodes de retour (en années)								DMA
	100	225	475	750	1000	1500	2000	2475	
Dommages structuraux	158.92	2391.72	18276.53	40106.55	71157.48	131954.68	215834.61	296830.29	273.68
Dommages non-structuraux	3733.43	54950.51	340728.83	664448.38	1110005.96	1839422.80	2745787.66	3502207.66	3790.93
Dommages au contenu	2345.81	32781.85	196518.94	379543.61	614508.69	1017630.03	1509944.52	1921872.29	2116.17
Total	6238.16	90124.08	555524.30	1084098.54	1795672.13	2989007.51	4471566.79	5720910.24	6180.78
Selon OQ									
Dommages structuraux	332.70	18623.66	88216.82	152731.13	237905.79	346486.88	472426.23	558542.11	749.88
Dommages non-structuraux	2564.19	83728.49	381971.99	678147.30	1068725.19	1652413.57	2409904.17	2992807.71	3629.50
Dommages au contenu	2174.08	64612.23	299396.75	538895.95	845093.18	1325057.96	1949217.73	2432363.60	2901.97
Total	5070.97	166964.38	769585.56	1369774.38	2151724.16	3323958.40	4831548.13	5983713.42	7281.34

Tableau 18. Analyse comparative pour le calcul du DMA entre Hazus et OpenQuake.

Le résultat des calculs est indiqué pour chaque période de retour et divisé entre les dommages structuraux, non-structuraux et au contenu. La valeur de DMA obtenue est indiquée dans la dernière colonne.

On remarque que les coûts calculés avec OQ sont supérieurs à ceux fournis par Hazus et ce pour toutes les périodes de retour sauf pour celle de 100 ans (Figure 32). La valeur de DMA calculée avec OpenQuake est supérieure de 17% par rapport à Hazus. Cette différence est en grande partie due à l'écart du coût des dommages structuraux entre Hazus et OQ d'un facteur proche de 3 et dans une moindre mesure à l'écart pour les dommages au contenu. Cette différence est inhérente au mode de calcul des coûts de remplacement entre Hazus et Openquake ; OQ ne permettant pas pour le moment de distinguer clairement les coûts structuraux et non-structuraux.

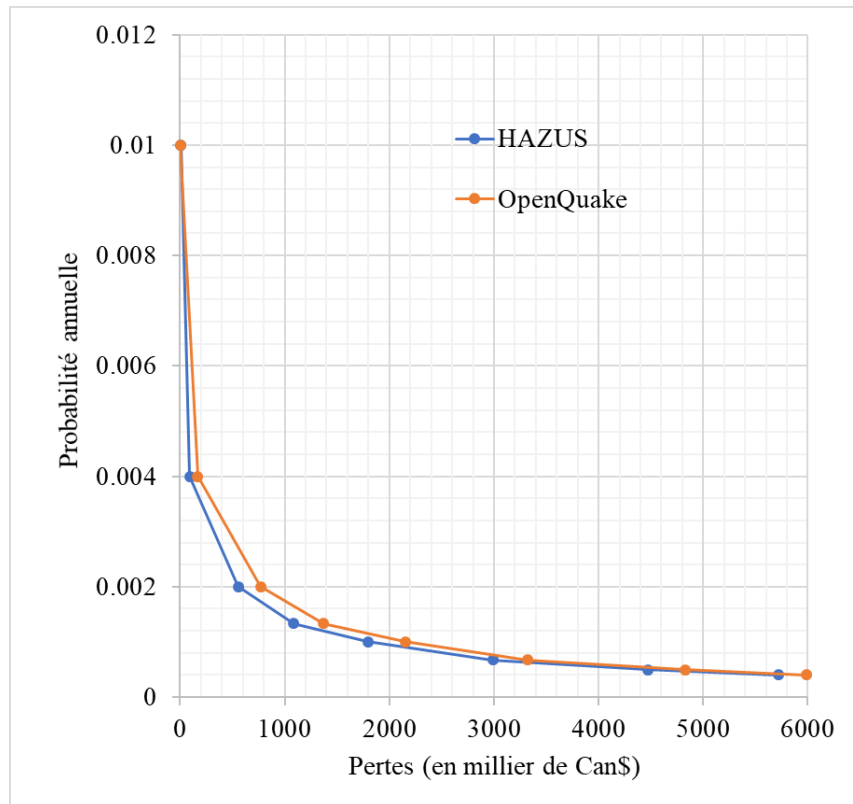


Figure 32. Comparaison des valeurs de pertes calculées avec Hazus et OpenQuake.

10.4. Changement avec SHM6

Au Canada, c'est la Commission géologique du Canada qui est chargée d'évaluer l'aléa sismique régional aux fins du Code national du bâtiment (CNB). Elle dresse les cartes des zones sismiques à partir d'une analyse statistique des tremblements de terre survenus par le passé et à la lumière des connaissances acquises au sujet de la structure tectonique et géologique du Canada. Sur les cartes, l'aléa sismique est représenté comme le mouvement du sol le plus violent susceptible de se produire dans une région selon une probabilité donnée. Les contours délimitent les zones où les secousses ressenties devraient être de même intensité. Ce travail a été renouvelé à six reprises, tous les 5 ans depuis 2005 et sur des périodes plus longues auparavant (Figure 33).

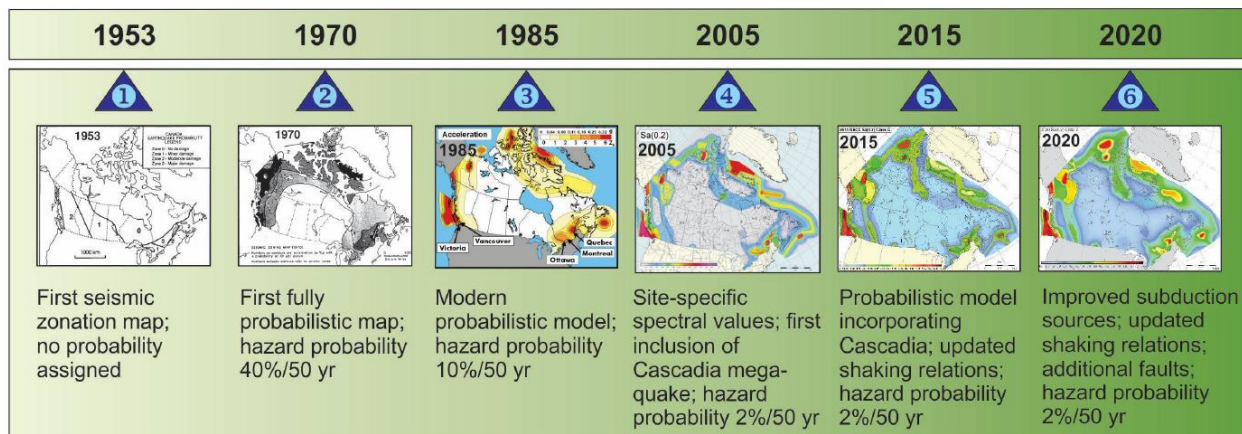


Figure 33. Les six modèles d'aléa sismique pour le Canada depuis 1953.

L'année de parution du modèle est indiquée dans le bandeau du haut (d'après Kolaj et al., 2020).

Le modèle d'aléa sismique de 6ème génération du Canada a été présenté en 2020 (Kolaj et al., 2020) sans qu'il ne soit encore officiellement accessible. Le graphe de la Figure 34 montre les valeurs d'accélération spectrale pour différentes périodes calculées pour le centre de Montréal (site de la Mairie) et un site de classe C par les modèle d'aléa sismique de 2005, 2010, 2015 et 2020 pour une période de retour de 2475 ans. On peut noter l'augmentation progressive des valeurs d'accélération pour des périodes supérieures à 0.2s (qui correspondent à des périodes de vibration des bâtiments de 2 étages et plus) excepté pour le modèle de 2015 qui a des valeurs les plus faibles au-dessous de 0.5s. Pour les périodes inférieures à 0.2s, cette progressivité n'est plus observée. Le modèle de 2020 est celui qui fournit les valeurs d'accélération les plus fortes toutes périodes confondues.

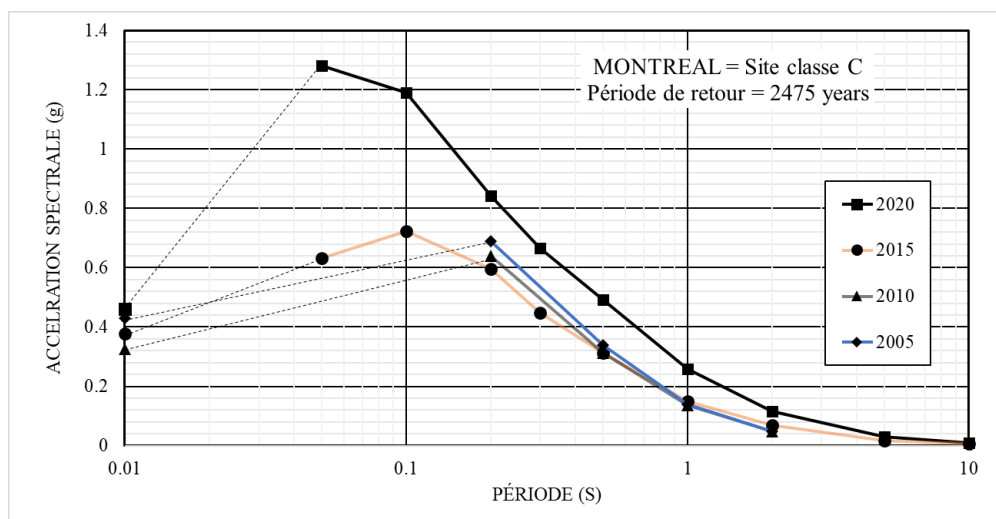


Figure 34. Spectres uniformes d'aléa selon les modèles d'aléa sismique de 2005, 2010, 2015 et 2020.

Les spectres présentés sont pour une période de retour de 2475 ans, pour site de classe C situé au centre de Montréal (mairie).

On note que la valeur de PGA pour un sol de type C augmente de plus de 20% entre les modèles d'aléa sismique de 2015 et 2020 quelquesoit les périodes de retour calculées. Cette augmentation est de plus de 40% pour les valeurs de $S_a(0.2s)$ et autour de 67% pour les valeurs de $S_a(1.0s)$. Les différences entre les valeurs 2015 et 2020 qui sont indiquées sur la carte de la

Figure 35 sont essentiellement dues à l'utilisation d'un nouveau modèle de lois d'atténuation pour l'Est Canadien (Adams et al., 2019).

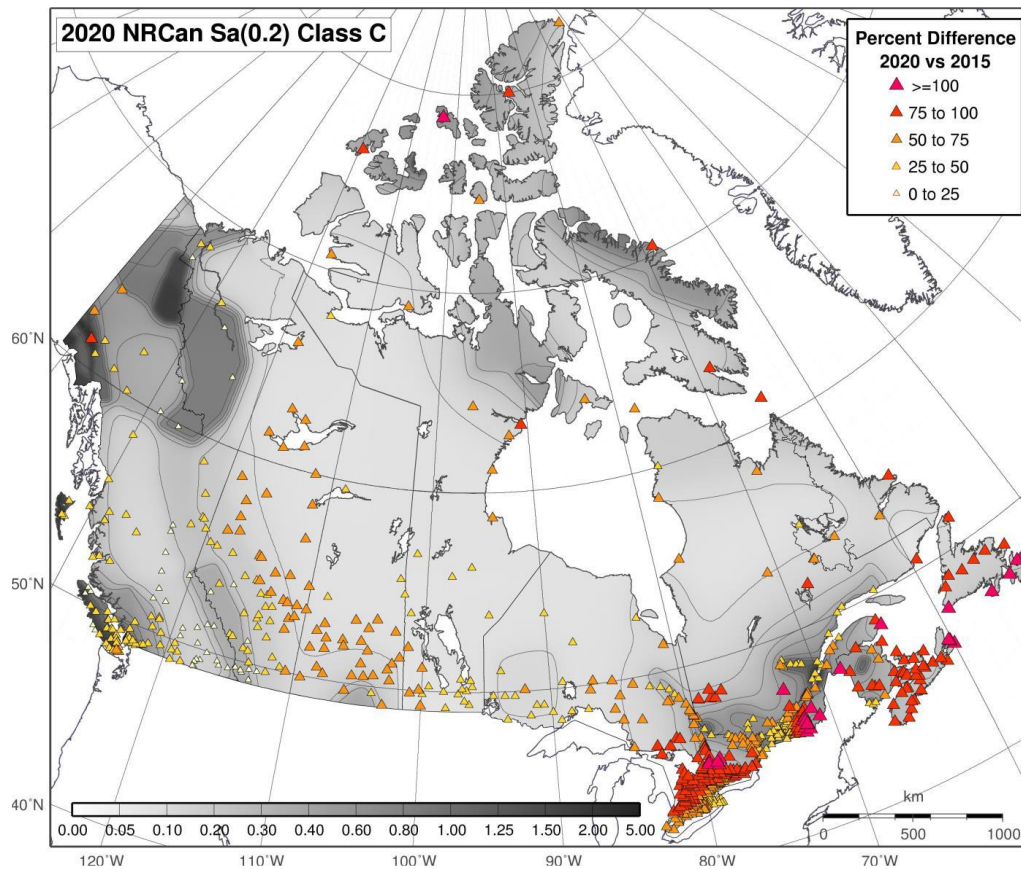


Figure 35. Changement de l'aléa en termes de $S_a(0.2s)$ entre 2020 et 2015 (en g).

Les triangles indiquent le pourcentage de changement par rapport au CCNB2015 pour certaines localités, tandis que l'ombrage gris indique l'aléa $S_a(0.2s)$ du SHM6 pour une période de retour de 2475 ans pour l'ensemble du Canada (Adams et al., 2019).

Le modèle SHM6 propose une nouvelle approche pour prendre en compte les conditions de site qui consiste à considérer le calcul de l'aléa pour un certain nombre de valeurs de V_{s30} à la place des classes de site (chaque classe de site est divisée en 4 valeurs de V_{s30} , deux formant les limites entre deux classes). Cette nouvelle approche permet d'éviter le saut brutal d'une classe de site à une autre qui était inhérent au modèle SHM5 comme le montre les graphes de la Figure 36.

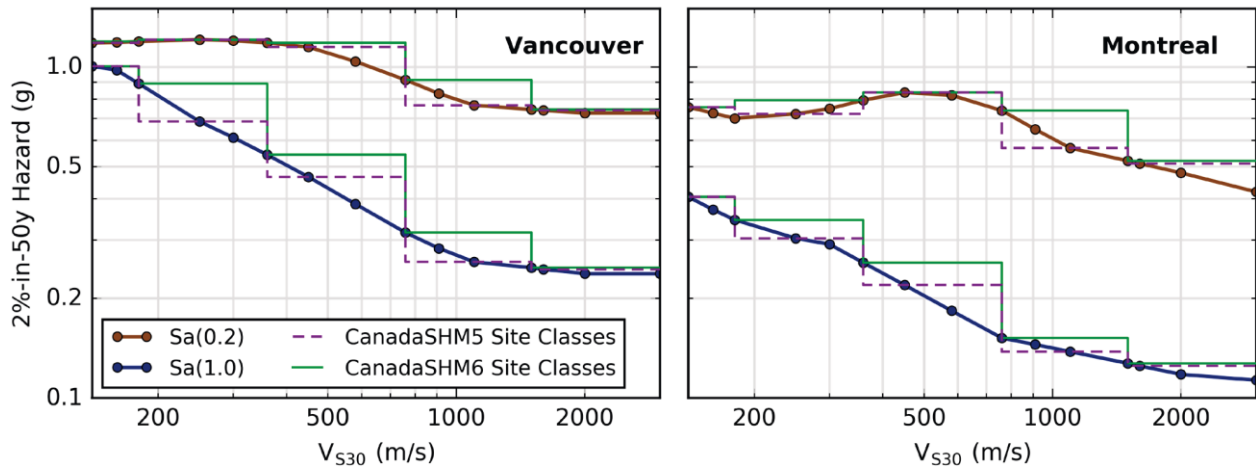


Figure 36. Aléa sismique en fonction de V_{s30} pour Vancouver et Montréal pour $S_a(0.2s)$ et $S_a(1.0s)$.

Les calculs de l'aléa sont pour une période de retour de 2475 ans en utilisant les classes de sites des modèles SHM5 (trait pointillé bleu) et SHM6 (trait vert). On note que le modèle SHM6 permet d'éviter le saut brutal d'une classe de site à une autre qui était inhérent au modèle SHM5 (Kolaj et al., 2020).

Cette modification de la prise en compte des conditions de site et du calcul de l'aléa dans le SHM6 va surement modifier les résultats du calcul de DMA par rapport au modèle SHM5 utilisé dans ce rapport. À la date de rédaction du rapport, Séisme Canada n'a pas encore fourni toutes les données concernant le SHM6 et nous ne pouvons pas encore estimer l'influence de ces changements.

11. Recommandations

Le DMA et DMRA sont des mesures globales qui estiment les pertes potentielles, dans le cas du risque sismique, liées aux tremblements de terre à différentes échelles géographiques. La distribution de ces valeurs dans une zone géographique donnée permet de :

- Développer des plans de mitigation des effets liés aux séismes ;
- Préparer des inventaires et mener des inspections de sécurité sismique des structures qui sont identifiées comme vulnérables ;
- Accroître la sensibilisation et l'éducation aux tremblements de terre et encourager le développement de groupes de travail autour de cette thématique.

Ces valeurs pour l'aléa sismique sont à comparer avec les valeurs calculées pour d'autres aléas qui peuvent toucher la région de la CMM. En considérant les dommages engendrés par toutes les périodes de retour des séismes, elles correspondent à ce qui devrait être provisionné (en actualisant régulièrement les données) chaque année pour faire face aux dommages éventuels.

Les calculs indiquent la prépondérance des dommages non-structuraux qui comptent pour plus de 60% des dommages et des pertes. Parmi les éléments non-structuraux, il faut distinguer ceux sensibles aux déplacements entre étages (mur non-porteur, mur extérieur, finitions et plaquages, etc..) et ceux sensibles à l'accélération (équipements mécaniques, électriques, etc.). Nous proposons pour un prochain mandat d'intégrer un volet de recherche afin de mieux caractériser le comportement des éléments non-structuraux aux sollicitations sismiques et ce plus particulièrement pour les constructions en ossatures bois et les maisons en maçonnerie qui forment une partie du bâti du centre de Montréal et des vieux centre-ville ou « ancien village » des municipalités en périphérie de l'île.

De plus, les courbes de fragilité proposées dans Hazus pour les bâtiments à ossature bois et maçonnerie non renforcée n'ont fait l'objet que d'une vérification partielle pour le Canada alors que ces constructions représentent en moyenne plus de 90% du bâti du pays. Ainsi, les dommages aux bâtiments en maçonnerie non armée (MNA) à la suite de secousses sismiques sont souvent causés par la défaillance hors plan des murs. Ceci est particulièrement pertinent dans le cas de la majorité des bâtiments en MNA dans l'est du Canada qui ont été construits avant la mise en place de prescriptions de conception parasismique. Des courbes de fragilité pour ces bâtiments sont disponibles en terme de PGA (Abo-El-Ezz et al., 2017) et il faudrait en faire une conversion de la demande sismique pour une utilisation complète dans Hazus. Pour ce qui concerne les ossatures légères en bois, des courbes de fragilité sont proposées pour le Sud-Ouest de la Colombie britannique dans le cas de séismes dans un contexte de subduction (Pan et al., 2020) qu'il faudrait modifier pour le contexte intra-plaque de l'Est du Canada.

L'augmentation des valeurs de mouvements du sol dans le 6^{ème} version de l'aléa sismique du Canada (SHM6) pour l'Est canadien va entraîner systématiquement des modifications dans les valeurs de DMA sur la CMM. Nous proposons de répéter l'analyse dès que la publication des cartes d'aléas sera officialisée et d'inclure une analyse annualisée de la quantité de débris pouvant être générée par un séisme.

A l'image de ce qui est produit régulièrement par la FEMA au niveau national, nous proposons d'étendre cette analyse pour toute la vallée du Saint Laurent dans un premier temps à

l'échelle des aires de recensement et ensuite au niveau des aires de diffusion en fonction de la disponibilité des données du bâti.

La dernière analyse de la FEMA inclut le calcul de la quantité de débris et du besoin en hébergement d'urgence pour différentes périodes de retour. Cette analyse est déjà disponible pour différents scénarios pour la CMM et pour la période de retour de 2 475 ans pour les municipalités de la CMM excluant Montréal. Nous proposons de compléter ces calculs pour des périodes de retour plus faibles.

12. Publications acceptées ou soumises durant le mandat

- Rosset, Ph., Bent, A., Halchuk, S. and Chouinard, L. (2022). Positive correlation of DYFI intensity data and microzonation in site classes for Ottawa, Quebec City and the metropolitan area of Montreal. Soumis à *Seismological Research Letter*.
- Rosset, Ph., Chouinard, L., Nollet, M-J., (2022). Consequences on residential buildings in Greater Montreal for a repeat of the 1732 M5.8 Montreal earthquake. En attente de publication à Springer Nature.
- Talukder, M.K.; Rosset, P.; Chouinard, L. Reduction of Bias and Uncertainty in Regional Seismic Site Amplification Factors for Seismic Hazard and Risk Analysis. *GeoHazards 2021*, 2, 277-301.
- * Chien, J., Castro, A., Onwuemeka, J., Liu, Y., Pollet, J., Rosset, P., Chouinard, L. (2021). Earthquake source parameter inversion and seismic hazard model in the western Quebec Seismic Zone. Proceedings of the American Geophysical Union 2021, New Orleans, USA, Dec. 13-17.
- * Chouinard, L., Rosset, P., Talukder, M. (2021). Bayesian Updating of Seismic Microzonation for the Greater Montreal. Proceedings of the Geological Association of Canada-Mineralogical Association of Canada 2021, London, Canada, Nov. 1-5, 44, 71.
- * Rosset, Ph., Chouinard, L., Nollet, M-J., (2021). Consequences on residential buildings in Greater Montreal for a repeat of the 1732 M5.8 Montreal earthquake. Proceedings of the 2021 annual Conference of the Canadian Society of Civil Engineering, Canada, May 21-26. 10 pages.
- * Chouinard, L., Rosset, Ph., Nollet, M-J., (2021). Evaluation of Earthquake Scenarios for the Greater Montreal Area. Proceedings of the annual Seismological Society of America meeting, USA, April 19-23. *Seismological Research Letter*, 92, 2B, 1426.
- * Bent, A., Rosset, Ph., Chouinard, L., Halchuk, S. (2021). Correlating Seismic Microzonation and Intensity Data in Three Urban Areas of Eastern Canada. Proceedings of the annual Seismological Society of America meeting, USA, April 19-23. *Seismological Research Letter*, 92, 2B, 1438.

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

13. Références

Adams, J., Allen, T.I., Halchuk, S., & Kolaj, M. (2019). Canada's 6 Generation Seismic Hazard Model, as Prepared for the 2020 National Building Code of Canada. Proceeding of the 12th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Quebec City, June 17-20, 2019, 8 pages

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.

Chouinard, L., Rosset, Ph., et Nollet, M.-J. (2020). Le risque sismique résidentiel dans le Grand Montréal ; Évaluation des dommages et des conséquences. Rapport université McGill et ETS, 62 pages.

Chouinard, L., Rosset, Ph., Youance, 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.

Chouinard, L. E., and Ph. Rosset (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, 85-93.

CNB (2015). Code National du Bâtiment. http://www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/publications/centre_codes/2015_code_national_batiment.html

Ezz, A.A., Houalard, C., Nollet, M., & Assi, R. (2017). Vulnerability assessment of seismic induced out-of-plane failure of unreinforced masonry wall buildings. Canadian Journal of Civil Engineering, 44, 1045-1055.

Federal Emergency Management Agency FEMA (2001). Hazus®99 Estimated Annualized Earthquake Losses for the United States, Federal Emergency Management Agency Mitigation Directorate, FEMA 366, Washington, D.C.

Federal Emergency Management Agency FEMA (2003). Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model Hazus®MH MR4 Technical Manual. Washington, D.C.: National Institute of Building Sciences.

Federal Emergency Management Agency FEMA (2008). Hazus®MH Estimated Annualized Earthquake Losses for the United States, Federal Emergency Management Agency, FEMA 366, Washington, D.C.

Federal Emergency Management Agency FEMA (2017). FEMA-P366 Estimated Annualized Earthquake Losses for the United States, FEMA report.

Firuzi, E., Ansari, A., Amini Hosseini, K. et al. (2019). Probabilistic earthquake loss model for residential buildings in Tehran, Iran to quantify annualized earthquake loss. Bull Earthquake Eng 17, 2383–2406. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00561-z>

GEM (2022). The OpenQuake-engine User Manual. Global Earthquake Model (GEM) OpenQuake Manual for Engine version 3.13.0., 204 pages.

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

Hobbs, T.E., Journeay, J.M., Rotheram, D. (2021), An Earthquake Scenario Catalogue for Canada: A Guide to Using Scenario Hazard and Risk Results. Geological Survey of Canada, Open File 8806, 22 pages, doi:10.4095/328364.

Jaiswal KS, Bausch D, Chen R, Bouabid J, Seligson H. (2015). Estimating Annualized Earthquake Losses for the Conterminous United States. Earthquake Spectra, 31(1_suppl):S221-S243. doi:10.1193/010915EQS005M

Kolaj, M; Halchuk, S; Adams, J; Allen, T I. (2020) Sixth Generation Seismic Hazard Model of Canada: input files to produce values proposed for the 2020 National Building Code of Canada. Geological Survey of Canada, Open File 8630, 15 pages, <https://doi.org/10.4095/327322>

Pan, Y., Ventura, C.E., & Tannert, T. (2020). Damage index fragility assessment of low-rise light-frame wood buildings under long duration subduction earthquakes. *Structural Safety*, 84, 101940.

Pollet J. (2021). Seismic risks for residential buildings for the metropolitan area of Montreal using openquake. Internal report, Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, 58 pages.

Rosset, Ph., Chouinard, L., Nollet, M-J., (2022a). Consequences on residential buildings in Greater Montreal for a repeat of the 1732 M5.8 Montreal earthquake. Accepted à Springer Nature

Rosset, Ph., Bent, A., Halchuk, S. and Chouinard, L. (2022b). Positive correlation of DYFI intensity data and microzonation in site classes for Ottawa, Quebec City and the metropolitan area of Montreal. *Soumis à Seismological Research Letter*.

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. <https://doi.org/10.5539/esr.v9n2p85>

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, June 17-20. 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, June 12-15. 4 pages.

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

Sommerville, P.G., McLaren, J.P., Saikia, C.K., and Helmberger, D.V. (1990). The 25 November 1988 Saguenay, Quebec, earthquake: source parameters and the attenuation of strong ground motion. *Bulletin of Seismological Society of America*, 80(5):11 18-1 141.

Sousa M. L. (2008). Annualized economic and human earthquake losses for mainland Portugal. *Proceeding of the The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, October 12-17, 2008, Beijing, China, 8 pages

Tinawi R., Mitchell D. and Hall T. (1990). Les dommages dus au tremblement de terre du Saguenay du 25 novembre 1988. *Can. J. Civ. Eng.* 17, 366-394.

Takahashi A. (2021). Updating the Microzonation Map for the Montreal Metropolitan Community. Internal report, Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, 27 pages.

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.

Aire de Diffusion	DMA	DMRA	DMA/h	DMA/bdg	Pop2018	Nbre de bdg	Nbre Bois	Nbre Acier	Nbre MM	Nbre Béton	Nbre Maç.	Nbre PreC	Nbre LowC	Nbre ModC	Total Bdg	Total contenu	Total Bdg+cont	PGA 100 ans	PGA 1000 ans	PGA 2475 ans	
24073730092	1.25	85.80	2.27	14.90	551	84	76	0	0	7	1	22	31	31	14 584.0	8 459.0	23 043.0	0.096	0.359	0.446	
24071710049	4.30	84.68	4.68	19.36	918	222	197	0	0	23	2	58	83	82	50 762.0	28 427.0	79 189.0	0.100	0.375	0.463	
24072720096	2.89	82.93	3.46	12.85	835	225	219	0	0	4	2	60	83	83	34 869.0	20 223.0	55 092.0	0.099	0.367	0.454	
24070700087	3.22	82.77	4.61	14.77	699	218	214	0	0	2	2	58	80	80	38 895.0	22 949.0	61 844.0	0.099	0.375	0.463	
24072720082	1.34	82.62	3.69	11.23	362	119	116	0	0	2	1	32	44	44	16 168.0	9 378.0	25 546.0	0.099	0.367	0.454	
24070700071	1.77	82.24	3.09	11.21	574	158	153	0	0	3	2	42	58	58	21 541.0	9 477.0	31 018.0	0.098	0.374	0.462	
24073730210	1.63	81.67	2.20	13.38	742	122	114	0	0	7	1	32	45	45	19 979.0	11 588.0	31 567.0	0.096	0.359	0.446	
24072720169	1.73	81.12	3.71	9.62	467	180	177	0	0	1	2	48	66	66	21 340.0	12 377.0	33 717.0	0.099	0.369	0.456	
24070700072	1.79	80.67	3.33	11.68	536	153	148	0	0	4	2	41	56	56	22 145.0	9 743.0	31 888.0	0.098	0.374	0.462	
24071710223	2.79	80.67	4.95	13.37	564	209	183	0	24	0	2	52	85	72	34 633.0	19 395.0	54 028.0	0.100	0.375	0.463	
24072720174	6.38	80.45	4.31	15.92	1480	401	386	0	0	11	4	106	148	147	79 346.0	46 020.0	125 366.0	0.099	0.367	0.454	
24072720168	2.04	80.43	3.77	10.51	540	194	191	0	0	1	2	52	71	71	25 342.0	14 698.0	40 040.0	0.099	0.369	0.456	
24071710158	5.56	80.38	6.61	21.14	841	263	231	0	30	0	2	65	106	91	69 176.0	38 738.0	107 914.0	0.100	0.373	0.460	
24072720172	2.56	80.03	3.97	10.34	646	248	245	0	0	1	2	66	91	91	32 027.0	18 575.0	50 602.0	0.099	0.368	0.455	
Aire de Diffusion	DMA	DMRA	DMA/h	DMA/bdg	Pop2018	Nbre de bdg	Nbre Bois	Nbre Acier	Nbre MM	Nbre Béton	Nbre Maç.	Nbre PreC	Nbre LowC	Nbre ModC	Total Bdg	Total contenu	Total Bdg+cont	PGA 100 ans	PGA 1000 ans	PGA 2475 ans	
24066663382	0.50	36.34	100.71	8.68	5	58	48	0	0	0	10	38	12	7	13 858.0	4 711.0	18 569.0	0.050	0.257	0.319	
24066662998	0.81	34.80	25.21	6.72	32	120	114	0	0	0	6	73	30	17	23 187.0	12 521.0	35 708.0	0.051	0.259	0.321	
24073730257	11.21	72.11	20.10	30.89	558	363	359	0	0	0	4	97	133	133	155 526.0	88 650.0	244 176.0	0.096	0.359	0.445	
24073730256	15.96	72.17	17.03	37.29	937	428	424	0	0	0	4	114	157	157	221 137.0	126 048.0	347 185.0	0.096	0.359	0.445	
24073730109	14.29	66.67	11.42	30.40	1251	470	465	0	0	0	5	126	172	172	214 339.0	98 596.0	312 935.0	0.096	0.359	0.446	
Aire de Diffusion	DMA	DMRA	DMA/h	DMA/bdg	Pop2018	Nbre de bdg	Nbre Bois	Nbre Acier	Nbre MM	Nbre Béton	Nbre Maç.	Nbre PreC	Nbre LowC	Nbre ModC	Total Bdg	Total contenu	Total Bdg+cont	PGA 100 ans	PGA 1000 ans	PGA 2475 ans	
24058580134	1.40	24.55	2.66	1395.66	524	1	0	0	0	1	0	0	0	1	56 847.0	22 739.0	79 586.0	0.049	0.253	0.314	
24058580687	3.08	24.55	1.07	385.60	2884	8	0	0	0	8	0	1	3	4	125 649.0	50 260.0	175 909.0	0.049	0.253	0.314	
24058580132	0.33	24.55	0.64	334.73	520	1	0	0	0	1	0	0	0	1	13 634.0	5 454.0	19 088.0	0.049	0.253	0.314	
24058580469	0.24	14.49	0.94	241.84	256	1	0	0	0	1	0	0	0	1	16 685.0	9 677.0	26 362.0	0.035	0.180	0.224	

24065650650	0.29	14.47	1.23	142.61	232	2	0	0	0	2	0	0	1	1	19 704.0	8 473.0	28 177.0	0.037	0.188	0.233
24058580136	0.81	25.12	1.48	134.35	545	6	1	0	0	5	0	1	2	3	32 090.0	13 478.0	45 568.0	0.049	0.253	0.314
24065650603	1.46	28.45	0.66	66.23	2206	22	10	0	0	12	0	4	8	10	51 207.0	26 116.0	77 323.0	0.051	0.258	0.320
24065650168	1.35	16.40	0.87	61.23	1549	22	3	0	0	19	0	4	9	9	82 160.0	49 296.0	131 456.0	0.037	0.187	0.232
24058580026	0.36	19.78	0.63	51.64	571	7	0	0	0	7	0	1	3	3	18 272.0	8 405.0	26 677.0	0.049	0.251	0.312
24066661305	0.20	16.82	0.45	48.89	432	4	1	0	0	2	1	2	1	1	11 629.0	3 373.0	15 002.0	0.036	0.187	0.232
24058580137	0.53	25.74	0.65	48.24	821	11	3	0	0	8	0	2	4	5	20 616.0	8 659.0	29 275.0	0.049	0.253	0.314
24065650281	0.35	15.20	0.57	44.23	619	8	4	0	0	4	0	2	3	4	23 278.0	12 104.0	35 382.0	0.037	0.187	0.231
24073730256	15.96	72.17	17.03	37.29	937	428	424	0	0	0	4	114	157	157	221 137.0	126 048.0	347 185.0	0.096	0.359	0.445
24066663443	4.80	51.97	1.44	35.84	3334	134	104	0	3	10	17	79	31	22	92 410.0	36 040.0	128 450.0	0.065	0.295	0.367
24066660852	1.02	53.07	1.85	35.31	552	29	25	0	0	2	1	16	8	5	19 294.0	8 683.0	27 977.0	0.066	0.299	0.371
24060600192	1.44	61.43	2.30	31.38	627	46	40	0	0	6	0	12	17	17	23 498.0	12 453.0	35 951.0	0.089	0.324	0.405
24073730257	11.21	72.11	20.10	30.89	558	363	359	0	0	0	4	97	133	133	155 526.0	88 650.0	244 176.0	0.096	0.359	0.445
24060600080	0.96	31.65	1.23	30.88	776	31	19	0	0	12	0	7	13	12	30 252.0	13 311.0	43 563.0	0.063	0.280	0.349
24073730109	14.29	66.67	11.42	30.40	1251	470	465	0	0	0	5	126	172	172	214 339.0	98 596.0	312 935.0	0.096	0.359	0.446
24073730254	10.99	67.13	7.78	30.36	1413	362	358	0	0	0	4	97	133	133	163 747.0	75 323.0	239 070.0	0.096	0.359	0.445
24065650612	0.70	14.77	0.60	30.27	1163	23	0	0	0	23	0	5	10	9	47 134.0	20 268.0	67 402.0	0.037	0.188	0.233

15. Annexe B. Rapport Interne Takahashi A. (2021)

Le rapport d'Adil Takahashi fait suite à son stage dans le cadre du programme *Summer Undergraduate Research in Engineering* (SURE) de 16 semaines. Il est fourni en fichier PDF

16. Annexe C. Rapport Interne Pollet J. (2021)

Le rapport de Johanna Pollet fait suite à son stage dans le cadre du programme *Summer Undergraduate Research in Engineering* (SURE) de 16 semaines. Il est fourni en fichier PDF

17. Annexe D. Explication des paramètres inclus dans les fichiers vectoriels « *RisqueAnnuel_CMM 2022 Data.xxx* »

Paramètres	Explication	Unité
ADIDU	Numéro de l'aire de diffusion selon Statistiques Canada	
Tract	Numéro de l'aire de diffusion selon Hazus	
ID_MRC	Identifiant de la municipalité régionale de comté	
MRC_Name	Nom de la municipalité régionale de comté	
DMA_1k	Domage moyen annuel	1000 Can\$
DMA_W_1k	Domage moyen annuel - Ossatures Bois	1000 Can\$
DMA_S_1k	Domage moyen annuel - Structures en acier	1000 Can\$
DMA_C_1k	Domage moyen annuel - Structures en béton	1000 Can\$
DMA_URM_1k	Domage moyen annuel - Structures en maçonnerie non armée	1000 Can\$
DMA_MH_1k	Domage moyen annuel - Maisons mobiles	1000 Can\$
DMRA_p1mill	Domage moyen relatif annuel	Can\$ par million
DMA_hbt	Domage moyen annuel par habitant	Can\$ par habitant
DMA_Bdg	Domage moyen annuel par bâtiment	Can\$ par bâtiment
Pop_2018	Population selon statistique Canada pour 2018	
Surf_1ksquarefeet	Surface totale	1000 pieds carrés
NB_Bdg	Nombre de bâtiments	
NB_W	Nombre de bâtiments - Ossatures Bois	
NB_S	Nombre de bâtiments - Structures en acier	
NB_MH	Nombre de bâtiments - Maisons mobiles	
NB_Béton	Nombre de bâtiments - Structures en béton	
NB_Maçonnerie	Nombre de bâtiments - Structures en maçonnerie non armée	
NB_PreC	Nombre de bâtiments - Pre-code	
NB_LowC	Nombre de bâtiments - Low-code	
NB_ModC	Nombre de bâtiments - Moderate-code	
Total_Bdg_1k	Valeur totale des bâtiments	1000 Can\$
Total_cont_1k	Valeur totale (bâtiment + contenu)	1000 Can\$
Total_value_1k	Valeur totale du contenu	1000 Can\$
Total_W_1k	Valeur totale - Ossatures Bois	1000 Can\$
Total_S_1k	Valeur totale - Structures en acier	1000 Can\$
Total_MH_1k	Valeur totale - Maisons mobiles	1000 Can\$
Total_Béton_1k	Valeur totale - Structures en béton	1000 Can\$
Total_Maçonnerie_1k	Valeur totale - Structures en maçonnerie non armée	1000 Can\$
PGA_100y	Accélération maximale de pointe pour une période de retour de 100 ans	g
PGA_225y	Accélération maximale de pointe pour une période de retour de 225 ans	g
PGA_475y	Accélération maximale de pointe pour une période de retour de 475 ans	g
PGA_750y	Accélération maximale de pointe pour une période de retour de 750 ans	g
PGA_1000y	Accélération maximale de pointe pour une période de retour de 1000 ans	g
PGA_1500y	Accélération maximale de pointe pour une période de retour de 1500 ans	g
PGA_2000y	Accélération maximale de pointe pour une période de retour de 2000 ans	g
PGA_2475y	Accélération maximale de pointe pour une période de retour de 2475 ans	g