



Montréal, Québec
May 29 to June 1, 2013 / 29 mai au 1 juin 2013

Procédure à 3-Niveaux pour l'évaluation sismique des écoles au Québec

Mohammed Mestar¹ et Marie-José Nollet², Frédéric Bourgeon¹, Jean Proulx³, Ghyslaine McClure⁴

¹Étudiants à la Maîtrise, Département de Génie de la Construction, École de technologie supérieure, Université du Québec, Canada.

²Professeure, Département de génie de la construction, École de technologie supérieure, Université du Québec, Canada.

³Professeur, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Canada.

⁴Professeure, Département de génie civil et mécanique appliquée, Université McGill, Canada.

Résumé: L'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments repose sur la cueillette d'information par inspection et l'étude de documentation. Cette approche n'est cependant pas réalisable pour l'évaluation d'un large parc immobilier, comme celui des écoles du Québec. Cet article présente une méthodologie de triage en amont de la procédure d'inspection pour identifier les bâtiments à inspecter. Au premier niveau, on vise l'ensemble des 2714 bâtiments scolaires du réseau public de la province, en écartant les bâtiments avec un risque faible. L'évaluation est basée sur trois paramètres : l'aléa sismique, l'année de construction et le nombre d'élèves. Au deuxième niveau, l'échantillon des écoles considéré est à l'échelle des commissions scolaires. Les irrégularités géométriques en plan et en élévation ainsi que les effets de site sont pris en compte à l'aide de cartes de microzonage sismique ou autres données géotechniques locales disponibles. Cette évaluation vise à identifier les bâtiments présentant un risque sismique modéré ou supérieur, nécessitant une inspection. Au troisième niveau, l'inspection des bâtiments identifiés au niveau 2 doit permettre d'établir une priorité d'évaluation détaillée (analyse structurale) parmi un nombre de bâtiments plus restreint. La procédure proposée est appliquée à un échantillon de bâtiments scolaires de Montréal, sur la base de données d'inspection visuelle. L'évaluation par des procédures indicielles, et des mesures par vibrations ambiantes (MVA) permettront de valider la capacité de la méthodologie proposée à identifier les bâtiments nécessitant une inspection.

1 Introduction

Dans l'est du Canada l'activité sismique est généralement modérée, à l'exception de la région de Charlevoix où elle est plus élevée. Les villes de Montréal et Québec, regroupant 33% de la population de la province¹, ont un niveau de risque sismique comparable avec des valeurs d'accélération maximale au sol de 0,33 g et 0,30 g, et d'accélération spectrale à 0,2 seconde de 0,64 g et 0,55 g, respectivement. Étant donné la taille de sa population, Montréal se classe au deuxième rang après Vancouver en termes de risque sismique au Canada.

Les rapports de reconnaissance des dommages dus aux tremblements de terre à travers le monde ont montré la faible performance sismique des bâtiments scolaires, lors de séismes modérés (Dolce 2006; Spence 2004). Le peu de détails parasismiques de ces bâtiments, vu leur âge, et la présence

¹ <http://www.stat.gouv.qc.ca>

d'irrégularités structurales expliquent les dommages structuraux et non structuraux (ATC 2004). En 1988, le séisme du Saguenay, d'une magnitude de 5,9 M_w , a provoqué des dégâts matériels estimés à des dizaines de millions de dollars (Tinawi et Mitchell 1990). Les dommages observés dans les bâtiments scolaires ont principalement été causés par les déplacements inter-étages de cadres faiblement ductiles, la présence d'étages faibles ainsi que par les effets d'amplification des ondes par les sols (Tinawi *et al.* 1989). Comme la plupart des bâtiments scolaires du Québec ont été construits sans conception parasismique (conception pré-1970), la situation actuelle soulève des préoccupations. Actuellement, aucun programme officiel d'évaluation de la vulnérabilité n'a été mis en œuvre à grande échelle pour la mitigation des risques sismiques de l'infrastructure publique. Les autorités provinciales et locales devront disposer de méthodes d'évaluation des risques sismiques adaptées à la fois à leurs parcs immobiliers et à leur sismicité locale, afin de hiérarchiser les interventions et mettre en place des programmes efficaces de gestion des risques.

L'ensemble du réseau d'enseignement du Québec compte plus de 4400 bâtiments toute vocation confondue. Près de 87% de ces bâtiments, dont 2714 bâtiments scolaires de niveau primaire et secondaire, sont sous la juridiction du Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport (MÉLS). La plupart des procédures d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments développées à ce jour, reposent sur la cueillette d'information par le biais de visites d'inspection visuelle et d'étude de plans. Considérant le nombre de bâtiments en jeu, il n'est pas raisonnable d'envisager, à court terme, l'inspection systématique de tous les bâtiments scolaires de la province pour procéder à leur évaluation. Cet article présente une procédure d'évaluation progressive à trois niveaux, où l'information prise en compte se précise à chacune des phases. L'objectif de l'évaluation de Niveau-1 est d'écarter les bâtiments présentant un risque sismique faible, alors que l'objectif de l'évaluation de Niveau-2 vise à identifier les bâtiments pouvant présenter un risque sismique plus important et devant passer à l'évaluation de Niveau-3 avec inspection visuelle. On présente ici les principes de la méthode et les résultats de l'évaluation de Niveau-1, appliquée aux 2714 bâtiments des écoles du réseau public, ainsi que les résultats de l'évaluation de Niveau-2, appliquée à 283 bâtiments de l'Île de Montréal. Le choix des critères d'évaluation utilisés est validé par l'application d'une évaluation de Niveau-3 à 15 bâtiments de l'Île de Montréal ayant fait l'objet d'une inspection visuelle.

2 L'évaluation de la vulnérabilité sismique des écoles

L'évaluation de la vulnérabilité est considérée comme un élément-clé pour la définition des stratégies de mitigation et la prévision des pertes dues aux tremblements de terre. À grande échelle, les procédures d'évaluation permettent de déterminer les écoles qui requièrent une analyse détaillée. En Colombie Britannique, Ventura *et al.* (2004) ont développé une méthode intitulée UBC-21, pour évaluer la vulnérabilité des bâtiments scolaires de 1 à 3 étages. Parmi les 850 écoles évaluées en zone à risque sismique élevé, 293 ont été jugées comme présentant un risque élevé de dommages en cas de tremblement de terre modéré à fort.

Aux États-Unis, le département de Géologie et des industries minérales de l'état de l'Oregon (DOGAMI) a réalisé une évaluation de vulnérabilité sismique de 2185 bâtiments scolaires moyennant des inspections et l'étude des plans de structures (McConnell 2007). En Italie, deux études ont été menées dans ce sens: (a) au niveau local, une étude d'évaluation en trois phases est réalisée avec, à chaque étape, une augmentation dans la précision des informations considérées (Dolce 2006) et, (b) au niveau national, une étude similaire est conduite mais reste à développer (Borzi *et al.* 2011). Ces deux exemples utilisent des approches appelées « méthodes d'évaluation rapides » qui servent à identifier des bâtiments présentant un risque et pouvant nécessiter une mitigation. La procédure décrite dans les documents du FEMA 154 et 155 (ATC 2002) s'appuie sur une classification typologique des structures et l'identification des caractéristiques pouvant présenter une déficience sismique (âge, irrégularité en plan ou en élévation, etc.) pour assigner un pointage à chaque bâtiment. Au final, les bâtiments dont le pointage est défavorable doivent être évalués par une analyse détaillée. Au Canada, une approche similaire (IRC92) a été développée pour la priorisation des bâtiments en vue de leur évaluation sismique (NRC-IRC 1992). Récemment révisée et présentée sous forme logicielle, cette approche repose sur la comparaison des exigences parasismiques du CNB 1990 et celles en vigueur au moment de la conception du bâtiment

(Saatcioglu et al. 2010). Karbassi et Nollet (2008) ont proposé une procédure inspirée de la méthode du FEMA 154, mais adaptée à la sismicité spécifique de l'est du Canada et tenant compte des facteurs d'amplification spectrale selon la catégorisation sismique des sites du CNB 2010 (NRC-IRC 2010). Tischer (2012) a proposé une procédure d'évaluation par pointage spécifique aux bâtiments scolaires et adaptée elle aussi du FEMA 154. Elle tient compte de la sévérité des irrégularités horizontales et verticales, le phénomène de cognement entre bâtiments adjacents et la détérioration des matériaux. La méthode a été validée par son application sur 101 bâtiments composant 16 écoles secondaires de l'Île de Montréal désignées par la Sécurité civile comme centres d'hébergement d'urgence en cas de catastrophe. Des inspections, des études de plans et des MVA ont servi à mener cette étude.

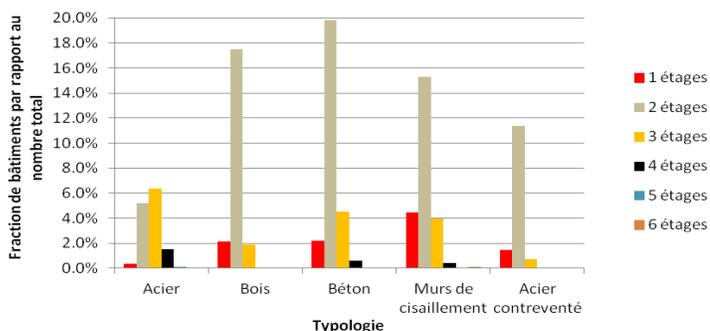
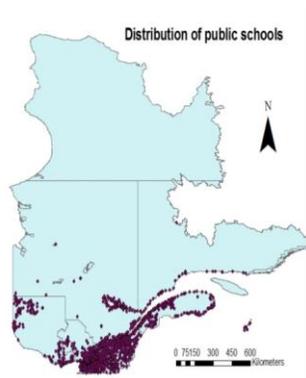
3 Caractéristiques des écoles au Québec

L'inventaire du portfolio des bâtiments scolaires de la province a permis d'identifier certaines caractéristiques essentielles au développement d'une procédure d'évaluation de la vulnérabilité sismique, notamment l'âge des bâtiments, leur hauteur et leur localisation. L'information repose sur une base de données compilée par le MÉLS et comportant les coordonnées géographiques des bâtiments, leur année de construction, le nombre d'élèves, leur superficie et le type structural. L'application libre Google[®] Maps a aussi été utilisée pour déterminer le nombre d'étages. La Figure 1a illustre la répartition des 3800 bâtiments scolaires du réseau public sur le territoire provincial (1 542 000 km²). La grande majorité des écoles sont situées au sud de la province le long de la vallée du Saint-Laurent, région à sismicité modérée.

Une étude de vulnérabilité sismique à grande échelle nécessite généralement le regroupement de bâtiments en des catégories structurales ou typologiques. La réponse des bâtiments aux sollicitations sismiques, définie en fonction du système de résistance aux forces latérales, est en général similaire au sein d'une même catégorie. Brayard (2008) décrit les cinq principaux types de système structural utilisés dans la construction des écoles au Québec. Avant 1950, l'acier prédomine la construction des écoles gérées par les institutions religieuses. Entre 1950-1970, période intensive de construction, le bois remplace l'acier pour les petites écoles et, pour des écoles plus importantes, les ossatures en béton armé avec murs de remplissage en maçonnerie non armée ou avec murs de cisaillement. Les écoles plus récentes construites dans les années 1980 sont, la plupart du temps, des ossatures en acier contreventé. L'année de construction est donc un indicateur du système constructif probable, mais, est avant tout reliée au niveau de conception sismique de la structure. Sur les 2714 bâtiments d'écoles publiques, 18% sont construits avant 1950, 62% entre 1950 et 1970, 12% entre 1970 et 1990 et 8% après 1990.

La réponse d'un bâtiment aux sollicitations sismiques dépend de la période fondamentale de vibration de la structure laquelle est fortement déterminée par le nombre d'étages. La Figure 1b montre la répartition des bâtiments scolaires selon le type structural probable et selon le nombre d'étages. On constate la nette dominance des écoles de 2 étages.

Les bâtiments scolaires sont souvent de forme irrégulière, en plan ou en élévation car la plupart des écoles offrent des activités variées (enseignement, administration, sport), ce qui mène à un agencement particulier. Cette irrégularité géométrique s'accompagne de façon systématique d'une irrégularité structurale pouvant occasionner des problèmes de torsion et de concentration d'efforts dans certains éléments structuraux augmentant ainsi le risque de dommages en cas de forts séismes. Par ailleurs, la différence de hauteur entre les étages, générée par les gymnases a pour effet d'augmenter les effets reliés à la torsion quand ils font partie de l'ensemble structural et la vulnérabilité au cognement lorsqu'ils sont séparés.



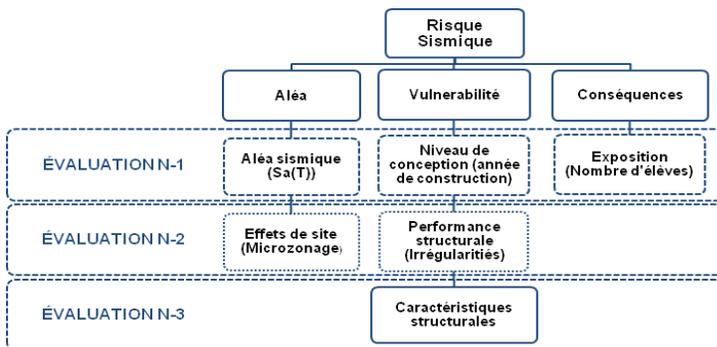
(a) Distribution sur le territoire provincial

(b) Répartition selon le type structural probable et le nombre d'étages.

Figure 1 : Distribution des bâtiments scolaires publics de la province de Québec.

4 Procédure à 3-niveaux

Le risque sismique exprime les probabilités des conséquences sociales et économiques d'un séisme. Cette notion fait intervenir trois paramètres: l'aléa sismique, incluant les effets de site, la vulnérabilité des bâtiments exposés au séisme et les conséquences des dommages structuraux potentiels. Les conséquences tiennent généralement compte des aspects socio-économiques. Le concept général de la procédure d'évaluation à 3-niveaux repose sur cette définition du risque et est représenté à la Figure 2, où à chaque étape d'évaluation (niveau), les bâtiments sont assignés à l'un des quatre groupes de priorité.



(a) Schéma de la procédure

Groupe	Désignation
G4	Écoles à risque sismique faible
G3	Écoles à priorité faible devant aller au Niveau-2, éventuellement au Niveau-3
G2	Écoles à priorité modérée devant aller au Niveau-2, éventuellement au Niveau-3
G1	Écoles à priorité élevée nécessitant une évaluation de Niveau-3

(b) Définition des groupes de priorité

Figure 2: Procédure d'évaluation à 3 niveaux.

À un Niveau-1, la taille de l'échantillon est à l'échelle de la province et on s'intéresse aux 2714 bâtiments scolaires publics de niveau primaire. L'évaluation vise alors à écarter les bâtiments présentant un risque sismique faible (Groupe G4). Au Niveau-2, l'échantillon des écoles considérées est de taille moins importante (niveau de la commission scolaire) et regroupe de 30 à 185 bâtiments. L'évaluation vise alors à identifier, parmi les bâtiments assignés aux groupes G2 et G3, les bâtiments pouvant présenter un risque sismique plus élevé et devant faire l'objet d'une inspection visuelle (groupe G1) en priorité. Enfin, au Niveau-3, les écoles identifiées au Niveau-2 sont évaluées selon une procédure plus détaillée nécessitant une inspection visuelle. L'inspection réalisée vise à obtenir les informations nécessaires (caractéristiques structurales, déficiences sismiques, etc.) pour établir une priorité d'évaluation détaillée (analyse structurale) parmi un nombre de bâtiments plus restreint. L'inspection cible d'abord les bâtiments assignés au groupe G1 et éventuellement ceux du groupe G2. À ce stade, l'étude est strictement structurale et ne considère pas les problèmes éventuels de fonctionnalité.

5 Évaluation de Niveau-1

5.1 Critères d'évaluation

Les informations de base qui servent au premier niveau d'évaluation indiquent l'importance relative de chacun des trois paramètres du risque sismique : aléa, vulnérabilité et conséquences. Les trois paramètres sélectionnés pour cette première étape globale doivent être facilement accessibles et suffisamment précis, idéalement directement disponibles dans la base de données du MÉLS, ce sont : (a) l'aléa sismique (AS), défini au le Code National du Bâtiment par les valeurs d'accélération spectrale à 0,2s, $S_a(0,2s)$, à l'emplacement de chaque bâtiment, (b) l'année de construction (AC), indiquant le niveau de conception parasismique d'une structure, (c) le nombre d'élèves (NE) traduisant les conséquences des dommages éventuels (Figure 2a). Selon les valeurs des trois paramètres (AS, AC et NE) les bâtiments se verront classifiés dans l'un ou l'autre groupe de priorité (groupes G1 à G4). L'attribution à ces groupes se fait en fonction de trois catégories de risque relatif (élevé, modéré et faible) définies pour chaque paramètre (AS, AC et NE) et décrites au Tableau 1.

Tableau 1 : Catégories de risque sismique relatif par critère pour l'évaluation de Niveau-1.

Risque relatif	Aléa sismique (AS)	Année de construction (AC)	Nombre d'élèves (NE)
Élevé	$S_a(0,2s) \geq 0,65g$	$AC < 1970$	$NE \geq 1000$
Modéré	$0,50g \leq S_a(0,2s) < 0,65g$	$1970 \leq AC < 1990$	$100 \leq NE < 1000$
Faible	$S_a(0,2s) < 0,50 g$	$AC \geq 1990$	$NE < 100$

Les données les plus récentes d'aléa sismique (AS) publiées par Ressources Naturelles Canada² sont représentées sous forme d'un spectre d'aléa uniforme, à une probabilité de dépassement de 2% en 50 ans, pour des coordonnées géographiques spécifiques. Cette représentation spectrale permet de mieux distinguer les effets sismiques sur les structures en fonction de leur période naturelle de vibration. Dans le but d'attribuer un niveau de risque relatif (élevé, modéré ou faible) aux bâtiments, la valeur de $S_a(0,2s)$ à l'emplacement correspondant a été choisie comme critère sur la base d'une relation directe simple entre le nombre d'étages (N) d'un bâtiment et sa période naturelle (approximativement $T=0.1N$). Le nombre d'étages de 1853 des 2714 bâtiments a été déterminé à partir de l'application Google[®] Maps. Plus de 97 % des écoles ont 3 étages ou moins, avec une période fondamentale estimée de l'ordre de 0.1 à 0.3s. Les limites des valeurs de $S_a(0,2s)$ entre les trois catégories de risque sismique ont été établies à partir de la distribution de la population et des écoles selon les valeurs d'accélération spectrales des villes de la province.

Bien que le SRFS soit un paramètre clé de la vulnérabilité sismique d'une structure, cette information n'est introduite qu'à la troisième phase de l'évaluation en raison de la nécessité d'une inspection et de l'étude des plans pour confirmer les caractéristiques structurales (voir Figure 2). En contrepartie, l'année de construction (AC) étant un indicateur fiable du niveau de conception parasismique d'une structure, ce paramètre a été choisi pour représenter la vulnérabilité de la structure. Trois périodes de construction sont définies selon l'évolution des règles de conception parasismiques conformément au Code de Construction National (NRC-IRC 2010) et autres normes de conception. Des clauses parasismiques ont été adoptées dans le CNB dès sa première publication en 1941. Toutefois, c'est seulement en 1970 qu'on a utilisé les premières cartes sismiques probabilistes. Mitchell et al. (2010) ont comparé la force sismique latérale calculée pour des bâtiments en béton armé à ductilité variable pour différentes années de construction. Ils soulignent une augmentation allant jusqu'à 15% de l'effort sismique (la force de cisaillement à la base) pour les systèmes conventionnels construits après 1970. Environ 64% des écoles ont été construites pendant la période 1950-1970, pour lesquelles on peut considérer la force de cisaillement à peu près constante. Les bâtiments construits avant 1970 sont donc considérés comme des bâtiments « pré-code » à vulnérabilité plus élevée. La version 1990 du CNB a introduit la notion de ductilité de la construction dans les études sismiques et les bâtiments construits après cette date sont considérés comme à faible vulnérabilité.

² <http://www.seismescanada.mcan.gc.ca>

Le nombre d'élèves (NE) a été choisi pour représenter le paramètre exprimant les conséquences. Les études statistiques sur les séismes passés ont montré qu'il y avait une corrélation nette entre les bâtiments détruits et les pertes en vies humaines. Afin d'établir la relation entre les catégories de risque sismique et le nombre d'élèves, une analyse statistique de la récurrence du nombre d'élèves par école a été réalisée, et le MÉLS confirme que les petites écoles de villages ont moins de 100 élèves, alors que les écoles importantes ont plus de 1000 élèves.

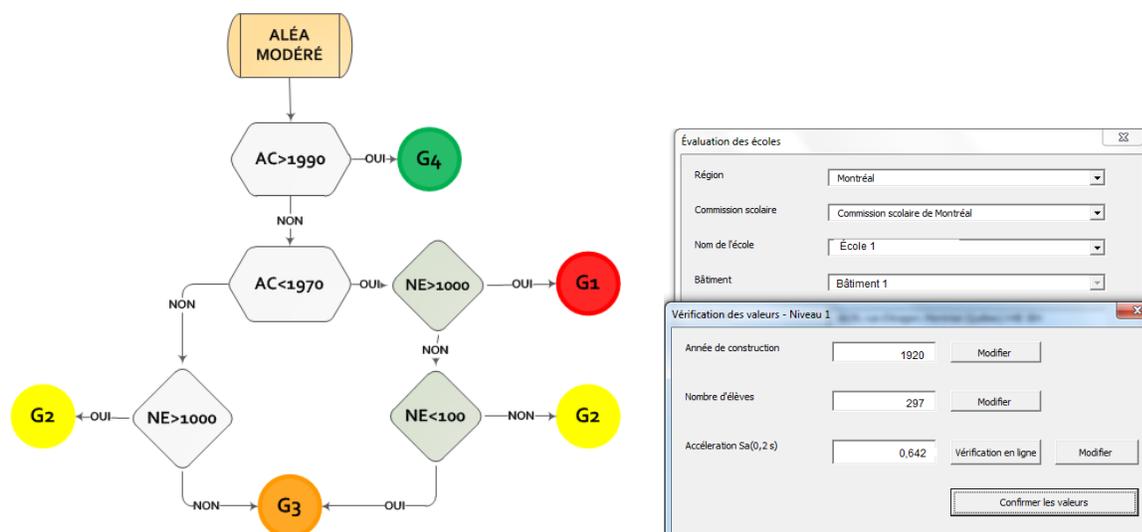
Le Tableau 2 donne la proportion de bâtiments dans chaque catégorie de risque sismique relatif pour l'ensemble des 2714 bâtiments scolaires. En termes d'aléa sismique et d'exposition (AS et NE), la plupart des écoles pourraient être considérées comme étant à risque modéré, tandis qu'en terme de vulnérabilité (AC) un grand nombre d'écoles (83%) pourrait être considéré à risque élevé.

Tableau 2 : Proportion des bâtiments dans chaque catégorie de risque sismique relatif

Risque relatif	Aléa sismique (AS)	Année de construction (AC)	Nombre d'élèves (NE)
Élevé	2,7%	83,0%	5,7%
Modéré	72,3%	11,9%	73,9%
Faible	25,0%	5,2%	20,4%

5.2 Arbres décisionnels pour l'attribution des groupes de priorité

La classification des écoles dans les quatre groupes de priorité est représentée sous forme d'arbre logique pour les trois régions d'aléa sismique relatif. En aléa faible, seuls les groupes G3 et G4 sont considérés alors qu'en aléa élevé la prépondérance est donnée aux groupes G1 et G2. À titre d'exemple, la Figure 3a illustre l'arbre décisionnel pour l'aléa sismique modéré ($0,50g \leq Sa(0,2s) < 0,65g$). Les bâtiments scolaires construits après 1990 sont systématiquement affectés au groupe G4 et sont donc écartés des évaluations suivantes. Les écoles construites avant 1970 et avec plus de 1000 élèves sont affectées au groupe G1 et feront l'objet de l'évaluation Niveau-3, laquelle nécessite une inspection et l'étude des plans structuraux. Les écoles restantes sont affectées aux groupes G2 ou G3 et feront l'objet d'une évaluation intermédiaire (Niveau-2). La procédure d'évaluation de Niveau-1 (et Niveau-2) ont été intégrées à une interface logicielle (programmée en VBA) pour permettre à un utilisateur de déterminer le groupe de priorité, comme illustré en exemple à la Figure 3b.



(a) Arbre logique

(b) Interface logicielle

Figure 3 : Définition des groupes au Niveau-1 pour le risque sismique modéré.

5.3 Résultats

La première étape d'évaluation des 2714 bâtiments scolaires publics (Niveau-1) a donné les résultats suivants: (i) 424 bâtiments sont classifiés à faible risque et ne nécessitent pas une évaluation sismique plus détaillée, (ii) 112 bâtiments classés prioritaires et doivent passer à l'étape d'évaluation de Niveau-3 et, (iii) les bâtiments scolaires restants sont considérés comme ayant une priorité modérée pour l'évaluation détaillée. Vu le minimum d'information utilisé pour cette classification, l'évaluation de Niveau-2 doit être effectuée sur les bâtiments scolaires des groupes G2 et G3 et ce, afin de confirmer leur priorité au moyen d'information additionnelle.

6 Évaluation de Niveau-2

L'objectif de l'évaluation de Niveau-2 est d'établir la priorité d'évaluation des bâtiments au niveau suivant (Niveau-3). Le groupe (G2 ou G3) initialement attribué aux bâtiments suite à l'évaluation de Niveau-1, est revu en considérant les informations sur le microzonage ainsi que les données relatives aux configurations en plan et en élévation des bâtiments qui présentent des irrégularités géométriques défavorables. À ce niveau, une inspection détaillée des écoles n'est pas nécessaire, à moins qu'une donnée technique n'apparaisse douteuse. Le groupe initial (G2 ou G3) peut ainsi être modifié vers un groupe de priorité plus élevée (G2 ou G1) ou reclassé au groupe G3 à priorité plus faible.

6.1 Microzonage

Au Québec, on dispose actuellement de cartes de microzonage sismique pour l'île de Montréal (CSRN³), la ville de Québec (LeBoeuf *et al.* 2011), et la région de Gatineau⁴. Ces cartes identifient les sites géotechniques selon les cinq catégories sismiques d'emplacement (A, B, C, D et E), définies dans le CNB 2010 (NRC-IRC 2010). Chaque catégorie est associée à des facteurs d'amplification et est déterminée au moyen des paramètres géotechniques de l'emplacement (vitesse des ondes de cisaillement dans les premiers 30 m du sol, et la résistance au cisaillement non drainée ou essai de pénétration standard). La classe (F) n'est pas cartographiée puisqu'elle réfère à des sites plus complexes demandant une évaluation spécifique. Lors de l'évaluation de Niveau-2, les effets d'amplification des sites de catégories D et E peuvent conduire à une reclassification dans un groupe de priorité plus élevée. Les sites de catégories A et B sont associés à de la roche fracturée ou saine et une dé-amplification se produit par rapport à la catégorie de référence C. L'évaluation de Niveau-2 reclasse ces bâtiments dans le groupe de priorité G3, sauf en cas d'irrégularités sévères en zone d'aléa sismique élevé.

6.2 Irrégularités géométriques horizontales et verticales

Les irrégularités en plan sont des paramètres qui augmentent la vulnérabilité sismique des bâtiments, ce qui les désigne comme paramètre clé dans l'évaluation de Niveau-2. Selon ASCE/SEI-7-10 (ASCE 2010) une irrégularité plane est présente dès qu'un côté en saillie dépasse de 15% la dimension principale dans une direction donnée. Tischer (2012) a utilisé un taux de 30% pour qualifier une irrégularité sévère. Ces deux conditions sont utilisées pour qualifier les irrégularités en plan de type « faible », « modéré » et « sévère ». Les irrégularités géométriques verticales sont considérées selon les limites du CNB 2010 (NRC-IRC 2010) pour les irrégularités de type « faible » et « modéré » quand la dimension horizontale de tout étage est de 30% inférieure ou supérieure à la dimension de l'étage adjacent, et la limite utilisée dans le projet de l'état d'Oregon pour l'irrégularité « sévère » (McConnell 2007) c'est-à-dire, quand la dimension horizontale de tout étage est de 30% supérieure à la dimension de l'étage adjacent sur deux étages et plus. Le Tableau 3 présente les critères ayant servi à la redéfinition des groupes issus du premier niveau d'évaluation et ajustés en fonction de la validation présentée à la section 6.4. La catégorie sismique du site et la sévérité des irrégularités géométriques en plan sont d'abord considérées. Le but est de décider si un bâtiment doit garder son appartenance aux groupes G2 ou G3, ou bien être promu à un groupe supérieur. L'effet des irrégularités verticales sévères est à considérer pour tout emplacement

³ CSRN : Canadian Seismic Research Network (<http://csrn.mcgill.ca/main.htm>)

⁴ <http://http-server.carleton.ca/~dariush/Microzonation/main.html>

de catégorie C en présence d'irrégularité plane modérée ou sévère (en cas de sismicité modérée ou élevée). Dans ce cas, le bâtiment est reclassé dans un groupe de priorité plus élevée.

Tableau 3: Critères de classification du Niveau-2 selon la catégorie de site et les irrégularités en plan.

Catégorie d'emplacement	Aléa sismique faible $S_a(0,2) < 0,50 \text{ g}$			Aléa sismique modéré ou élevé $S_a(0,2s) \geq 0,50 \text{ g}$		
	Irrégularité faible	Irrégularité modérée	Irrégularité sévère	Irrégularité faible	Irrégularité modérée	Irrégularité sévère
A, B	G3	G3	G3	G3	G3	G2 ou G3
C	G3	G2 ou G3	G2 ou G3	G3	G2* ou G3*	G2* ou G3*
D	G2 ou G3	G2 ou G3	G2	G2	G2	G1
E	Promouvoir	Promouvoir	Promouvoir	G2	G1	G1

*Groupes promus en cas d'irrégularité verticale sévère.

Afin d'identifier rapidement la présence d'irrégularités géométriques en plan et les qualifier de faibles, modérées ou élevées, on utilise la base de données CANVEC⁵ donnant l'empreinte des bâtiments. Une corrélation est établie entre les critères qualifiant les irrégularités géométriques et le ratio de l'aire de l'empreinte du bâtiment et son aire enveloppe, définie via ArcGIS[®]. L'identification d'irrégularité verticale peut se faire à partir de l'application Google[®] Maps.

6.3 Résultats

À cette phase d'évaluation, 283 des 425 bâtiments de l'Île-de-Montréal ont été étudiés en utilisant les données de microzonage sismique et de configuration géométrique. La Figure 5 montre la distribution de bâtiments dans les groupes de priorité après les évaluations de niveaux 1 et 2. Le nombre de bâtiments appartenant au groupe G1 a augmenté de 8% après la deuxième phase d'évaluation, passant de 10 à 35, dû en grande partie au critère de microzonage. Le nombre de bâtiments du groupe G2 a diminué de 86% à 74% : bien que ce nombre demeure élevé il s'agit d'une approche conservatrice.

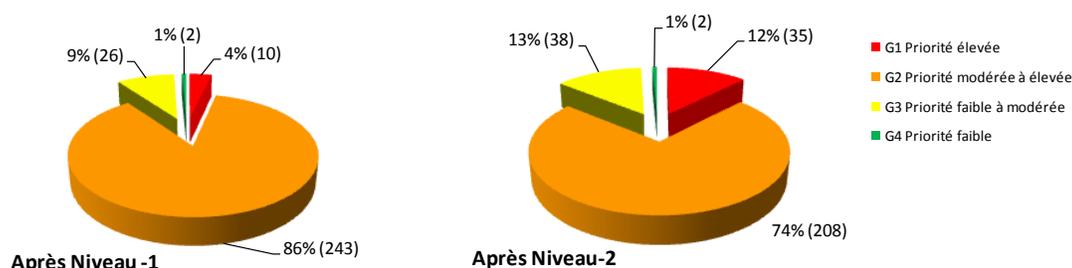


Figure 5: Résultats d'évaluation de niveaux 1 et 2 des bâtiments scolaires de l'Île-de-Montréal.

6.4 Validation de la procédure d'évaluation de Niveau-2

Le choix des critères de l'évaluation de Niveau-2 est validé par : (i) l'étude des fréquences naturelles des bâtiments, et (ii) l'application d'une évaluation de Niveau-3 avec 3 méthodes de pointage. Les fréquences de vibration de 10 bâtiments scolaires, ayant fait l'objet de MVA, ont été analysées. Une augmentation de près de 90% à 260% des premières fréquences sont observées pour des irrégularités planes sévères en forme de « L », confirmant la pertinence des irrégularités en plan comme paramètre d'évaluation au Niveau-2. D'autres mesures sont en cours afin de valider ce constat pour d'autres configurations et degrés de sévérité. Le Tableau 4 montre le classement obtenu suite à l'évaluation de Niveau-2 pour 15 bâtiments scolaires de l'Île-de-Montréal, comparé avec les résultats donnés par trois méthodes de pointage (NRC92, Karbassi et Tischer) suite à une inspection visuelle. Les méthodes de pointage

⁵ <http://geogratris.cgdi.gc.ca/geogratris/fr/index.html>

donnent souvent des classements différents, car les paramètres influents ne sont pas les mêmes. L'année de construction a une influence prépondérante dans la méthode NRC92, alors que les irrégularités structurales, le sol et type structural sont des paramètres influents dans les méthodes Karbassi et Tischer. Ainsi il n'y a pas nécessairement de correspondance directe entre les valeurs des indices d'une méthode à l'autre et les critères d'interprétation varient. L'objectif de cette comparaison est donc de s'assurer que les groupes extrêmes (Groupes G1 et G4) sont cohérents avec les trois méthodes et que la répartition entre les groupes G2 et G3 est conservatrice. Le code de couleur utilisé (voir figure 5) permet de comparer les classements relatifs. En général, les groupes de priorité du Niveau-2 sont cohérents ou conservateurs par rapport aux indices des méthodes de pointage. À noter, que les bâtiments construits après 1990 sont assignés directement au groupe G4 car considérés à risque faible. L'échantillon étant relativement petit, il s'agit d'une première phase de validation qui se poursuivra avec l'ajout de données d'inspection de bâtiments de Montréal et d'autres régions.

Tableau 4: Classement prioritaire d'écoles selon trois méthodes de pointage et le Niveau-2.

École	AC	Type Structural*	NE	Type sol	Irrégularité plane	Irrég. verticale	Niveau-2	NRC 1992	Karbassi	Tischer
1	1952	BMR	450	D	Sévère	Aucune	G1	46.5	0.5	1
2	1968	OBM	560	C	Sévère	Aucune	G2	19.8	1.6	1.7
4	1960	BMR	250	D	Modérée	Modérée	G2	16.5	1.6	2.3
7	1980	OBM+MCB	466	C	Modérée	Sévère	G2	10.2	2	1.1
3	1952	PPB	299	C	Sévère	Aucune	G2	35.6	2	2.6
5	1957	PPB	442	C	Sévère	Aucune	G2	35.6	2.9	2.9
9	1963	BMR	600	B	Modérée	Faible	G3	46.5	1	1.8
12	1957	BMR	427	B	Faible	Aucune	G3	34.9	1.6	3.3
13	1980	BMR	560	D	Faible	Aucune	G3	14.9	2.1	1.1
8	1978	MCB	615	B	Faible	Aucune	G3	7.9	2.3	4.5
11	1964	OBM	608	B	Faible	Aucune	G3	14.7	2.5	3.6
6	1970	BMR	507	C	Modérée	Aucune	G3	4.9	2.6	3.3
10	1954	PPB	79	B	Faible	Aucune	G3	35.6	2.9	3.7
14	1995	MCB	450	D	Sévère	Aucune	G4	6.6	1.6	2.3
15	1993	OCA	313	B	Sévère	Modérée	G4	7.4	2.1	2.9

*Type structural défini selon NRC-IRC (1992)

7 Évaluation de niveau-3

Cette étape d'inspection visuelle tient compte des caractéristiques structurales, irrégularités, etc., nécessaires pour établir une priorité d'évaluation détaillée (analyse structurale) parmi un nombre de bâtiments plus restreint. D'abord appliquée aux bâtiments du groupe de priorité G1 elle est ensuite appliquée aux bâtiments du groupe G2. L'application des méthodes de pointage existantes illustre bien la disparité entre les classements obtenus et l'importance d'une méthode de pointage adaptée dont les paramètres influents sont représentatifs des bâtiments étudiés. Les travaux de Tischer sur les écoles de Montréal servent de support au développement d'une méthode de Niveau-3 adaptée aux écoles primaires de la province. L'analyse des données d'inspection sur un plus grand nombre de bâtiments et l'analyse des données des MVA, permettant d'obtenir les caractéristiques dynamiques, serviront à dégager des recommandations pour adapter la méthode actuelle.

8 Conclusion

Cet article a présenté une procédure à 3-niveaux pour l'évaluation sismique des écoles de la province de Québec. Après les deux premiers niveaux d'évaluation, les bâtiments scolaires sont classifiés selon quatre groupes de priorité allant de niveau faible à élevé. La première étape a identifié les écoles à faible risque sismique, en se servant de l'aléa, de l'année de construction et du nombre d'élèves. La seconde étape a identifié les écoles nécessitant une évaluation plus détaillée avec inspection visuelle et étude des plans. Les paramètres considérés sont le type de sol et les irrégularités géométriques, en plan et en élévation. Au dernier niveau, les bâtiments ciblés sont évalués par une inspection visuelle et l'application

d'une méthode de pointage. La validation de cette procédure se poursuit par son application à un plus grand nombre de bâtiments scolaires.

Remerciements

Les auteurs remercient le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) pour son support financier dans le cadre du programme de subventions de projets de recherche stratégiques (projet no. STPGP/396464).

Références

- ASCE. 2010. Minimum design loads for buildings and other structures (ASCE/SEI 7-10), Structural Engineering Institute, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- ATC. 2002. FEMA 154 Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook and FEMA 155 Supporting Documentation, Second Edition. Applied Technology Council, California.
- ATC. 2004. FEMA 424 Design Guide for Improving School Safety in Earthquakes, Floods, and High Winds. Applied Technology Council, California.
- Borzi, B., Ceresa P., Faravelli M., Fiorini E. and Mauro, O. 2011. Definition of a prioritisation procedure for structural retrofitting of Italian school buildings. *3rd ECCOMAS Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (2011)*, Corfu, Greece, **No. 302**.
- Brayard, P. 2008. Étude du comportement sismique des écoles typiques du Québec. Master Thesis, École de technologie supérieure, Department of Construction Engineering, Montréal, Canada.
- Dolce, M., Kappos A., Masi A., Penelis G. and Marco, V. 2006. Vulnerability assessment and earthquake damage scenarios of the building stock of Potenza (Southern Italy) using Italian and Greek methodologies. *Engineering Structures*. **28:3** 357–371.
- NRC-IRC. 1992. Manual for Screening of Buildings for Seismic Investigation. Institute for Research in Construction, National Research Council, Ottawa, Canada.
- Karbassi, A. and Nollet M.-J. 2008. Development of an index assignment procedure compatible with the regional seismicity in the province of Quebec for the rapid visual screening of existing buildings. *Canadian Journal of Civil Engineering*. **35**: 925-937.
- LeBoeuf, D., Perret, D., Nollet, M.-J., Lamarche, L., Nastev, M. and Parent, M. 2011. Microzonage sismique des Villes de Québec-Ancienne-Lorette et Réserve indienne de Wendake (Catégories d'emplacement), Geological Survey Commission of Canada, **Open File #6875**.
- McConnell, V. S. 2007. Statewide seismic needs assessment: Implementation of Oregon 2005 Senate Bill 2 relating to public safety, earthquakes, and seismic rehabilitation of public buildings, State of Oregon, Department of Geology and Mineral Industries, Portland (<http://www.oregongeology.org/>).
- Mitchell, D., Paultre, P., Tinawi, R., Saatcioglu, M., Tremblay, R., Elwood, K., Adams, J. and DeVall, R. 2010. Evolution of seismic design provisions in the National Building Code of Canada, *Canadian Journal of Civil Engineering*. **37**: 1157–1170.
- NRC-IRC. 2010. National Building Code, Canada 2010, National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Ottawa, Ontario.
- Saatcioglu, M., Shooshtari, M. and Foo, S. 2010. Seismic screening of buildings in Canada. *9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Toronto, **No.1239**.
- Spence, R. 2004. Strengthening school buildings to resist earthquakes: Progress in European countries, in *Keeping schools safe in earthquakes* (Ch. 18), Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Tinawi, R. and Mitchell, D. 1990. The 1988 Saguenay earthquake: Damage to schools and post-disaster buildings. *Canadian Journal of Civil Engineering*. **4**: 573-590.
- Tinawi, R., Mitchell D. and Law, T. 1989. The 1988 Saguenay earthquake - A site visit report. Canadian National Committee on Earthquake Engineering, **Open File Report #1999**.
- Tischer, Helene 2012. Rapid seismic vulnerability assessment of school buildings in Québec. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Canada.
- Ventura, C. E., Taylor, G., White, T., Clement, G., Weichert, D., and Mill, A. 2004. "User guide for UBC-21 low-rise buildings, rapid seismic risk assessment software for British Columbia buildings." University of British Columbia, Vancouver, BC.
- Hunter J.A., H.L. Crow, D. Motazedian, et al. (2009). "City of Ottawa Seismic Site Classification Map from Combined Geological/Geophysical Data", Geological Survey of Canada, Open File Report 6191.