

ETS-RT – 2004-001

**ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ
SISMIQUE DES BÂTIMENTS EXISTANTS
État des connaissances**

MARIE-JOSÉ NOLLET

**ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ SISMIQUE DES
BÂTIMENTS EXISTANTS
État des connaissances**

RAPPORT TECHNIQUE DE L'ÉTS

MARIE-JOSÉ NOLLET

Département de génie de la construction

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MONTREAL, 16 JUIN 2004

ETS-RT – 2004-001

**ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ SISMIQUE DES
BÂTIMENTS EXISTANTS**

État des connaissances

MARIE-JOSÉ NOLLET

Département de génie de la construction

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

La version électronique de ce rapport technique est disponible sur le site Web de l'École de technologie supérieure (<http://www.etsmtl.ca>).

Pour se procurer une copie papier, s'adresser à :

Service de la bibliothèque
École de technologie supérieure
1100, rue Notre-Dame Ouest
Montréal (Québec)
H3C 1K3

Téléphone : (514) 396-8946

Télécopieur : (514) 396-8633

Courriel : biblio@etsmtl.ca

© École de technologie supérieure 2004

La citation d'extraits ou la reproduction de courtes sections est permise à la condition de mentionner le nom de l'auteur et la source. Toute reproduction de parties quantitativement ou qualitativement importantes requiert l'autorisation du titulaire des droits d'auteur.

ISBN 2-921145-48-0

Dépôt légal : Bibliothèque nationale du Québec, 2004

Dépôt légal : Bibliothèque nationale du Canada, 2004

***EVALUATION OF THE SEISMIC VULNERABILITY OF EXISTING
BUILDINGS***

State of the art review

MARIE-JOSE NOLLET

ABSTRACT

Earthquake loss estimation is a rapidly developing field. It requires the evaluation of the seismic vulnerability of existing buildings, which is defined by the evaluation of damages the buildings will suffer for different earthquake intensity. This report presents a state of the art review on the evaluation of the seismic evaluation of existing buildings and considers the applicability of the available methods for the evaluation of the existing buildings of Quebec. The methods for the assessment of the seismic vulnerability defer in expenditure and precision and on their objective. The assessment of an individual building is usually performed by a detailed structural analysis. The methods for the assessment of the seismic vulnerability of a group of buildings generally rely upon the use of damage functions or damage matrices obtained from observation of damaged buildings in earthquake-struck areas or by simulation using numerical or analytical models of the buildings. The direct application of these functions to a specific group of buildings requires that their structural characteristics fit the description of the typological building class used to elaborate those functions.

The score assignment approach, such as those developed by the FEMA in the United-States, the NRC in Canada, and the respective earthquake authorities in Switzerland and Italy, aim to identify seismically hazardous buildings by exposing structural deficiencies. Since damage probabilities are not always directly associated to the score assigned to a building, its final score is not necessary an evaluation of its seismic vulnerability or its seismic risk. Among the different vulnerability studies performed in North America and in Europe, those realised for the cities of Aigle and Basel in Switzerland are of particular interest. They couple damages degree scale, seismic

intensity scale and analytical models to define vulnerability function for typical buildings of the area under study. These approaches could eventually be used for group of existing buildings of old town areas for the cities of Quebec or Montreal.

ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ SISMIQUE DES BÂTIMENTS EXISTANTS

État des connaissances

MARIE-JOSÉ NOLLET

RÉSUMÉ

L'estimation des pertes encourues suite à un séisme probable est un champ d'expertise en plein développement. Elle nécessite, en autres, l'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments existants laquelle se définit par le degré de dommages subit par une structure pour une intensité sismique donnée. Ce rapport présente une revue de l'état des connaissances dans ce domaine et explore l'applicabilité des méthodes d'évaluation disponibles aux bâtiments du Québec. Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique diffèrent par leur complexité, leur précision et leur objectif. L'évaluation d'un bâtiment unique se fait par des analyses structurales détaillées alors que les différentes approches d'évaluation de la vulnérabilité d'un ensemble de bâtiments reposent généralement sur l'utilisation de fonctions de vulnérabilité qui expriment le pourcentage de dommages subis par un type de structure pour différentes intensités sismiques. Ces fonctions (courbes ou matrices) sont élaborées à partir de l'observation des dommages lors de séismes passés, de l'opinion d'experts ou de modèles d'analyse. L'application directe de ces fonctions ne peut cependant pas se faire si la typologie des bâtiments à l'étude est différente de celle des bâtiments ayant servi à élaborer les fonctions de vulnérabilité.

Parmi les outils disponibles pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique il y a également les méthodes d'attribution de pointage comme celles développées par le FEMA aux États-Unis, le CNRC au Canada, et les autorités en gestion du risque sismique en Suisse et en Italie. Cette approche vise à identifier les bâtiments présentant un risque sismique élevé en mettant en évidence les déficiences structurales. Étant

donné que les pointages attribués à un bâtiment ne sont pas toujours associés à des probabilités de dommages, le pointage final du bâtiment ne reflète pas nécessairement sa vulnérabilité ou son risque sismique.

Parmi les études de vulnérabilité réalisées en Amérique et en Europe, celles portant sur les villes d'Aigle et de Bâle en Suisse sont particulièrement intéressantes. Elles jumellent l'utilisation de modèles d'analyses simples pour définir les fonctions de vulnérabilité propres à la typologie des bâtiments des secteurs étudiés, à l'utilisation des échelles de degrés de dommages et des échelles macrosismiques. Ces approches pourraient éventuellement être appliquées aux ensembles de bâtiments anciens des secteurs historiques des villes de Montréal ou de Québec.

AVANT-PROPOS

Ce rapport se veut une synthèse des connaissances sur l'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments existants. L'objectif principal de ce travail de recherche sur la vulnérabilité sismique est d'évaluer l'état de la situation au Québec, en particulier pour les villes de Montréal et Québec, par rapport à l'avancement des connaissances ailleurs dans le monde. L'aboutissement souhaité est l'élaboration d'un programme de recherche adapté à la réalité québécoise.

En parallèle à ce travail, Mme Karine Lefebvre, étudiante à la maîtrise à l'ÉTS procède actuellement à la définition des caractéristiques structurales des bâtiments du secteur historique du Vieux Montréal. Les caractéristiques ainsi définies permettront de remplir deux objectifs : (1) établir la méthode d'évaluation de la vulnérabilité la mieux adaptée pour ce secteur de la ville, et (2) identifier les éléments ou caractéristiques structurales pour lesquelles le comportement sismique est mal connu et nécessite des études et des analyses plus poussées.

La préparation de ce document a été rendue possible par la consultation de plusieurs articles, thèses, rapports et sites web ainsi que par des rencontres très enrichissantes avec des experts dans le domaine de la vulnérabilité sismique : Pr. Ian Smith., Dr. Lestuzzi et M. Pelissier de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne en Suisse, Pr. Petrini et Pr. Parisi de la Politecnico de Milan, Dr. Piazzo de l'Université de Trenton et M. Del Senno de l'IVALSA à Trento.

TABLE DES MATIÈRES

ABSTRACT	III
RÉSUMÉ	V
AVANT-PROPOS	VII
TABLE DES MATIÈRES	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	X
LISTE DES FIGURES.....	XI
1 INTRODUCTION	1
1.1 Généralités	1
1.2 Objectifs du rapport.....	4
2 DÉFINITIONS DE BASE	5
2.1 Intensité et magnitude sismique	5
2.2 Risque sismique.....	7
2.3 Aléa sismique	8
2.4 Vulnérabilité sismique.....	11
3 ÉVALUATION SISMIQUE.....	14
3.1 Évaluation structurale.....	14
3.2 Procédure d'évaluation sismique.....	16
4 MÉTHODES D'ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ	19
4.1 Observation de la vulnérabilité.....	22
4.2 Jugement expert.....	24
4.3 Modèles analytiques simples	26
4.4 Systèmes de pointage ou indice de vulnérabilité.....	29
4.5 Analyses détaillées	30
4.5.1 Analyse statique linéaire	30
4.5.2 Analyse dynamique linéaire.....	31
4.5.3 Analyse statique non linéaire	32
4.5.4 Analyse dynamique non linéaire	32

5	EXEMPLES D'APPLICATION DES MÉTHODES D'ÉVALUATION	33
5.1	Manuel de sélection des bâtiments en vue de leur évaluation sismique (IRC-CNRC, 1992b)	33
5.2	Procédure rapide d'évaluation sismique visuelle (FEMA-154)	36
5.2.1	Principes de la méthode	36
5.2.2	Utilisation du FEMA-154 (ATC-21) pour l'étude de la Ville de Portland en Oregon	38
5.3	La grille d'évaluation suisse (Lateltin, 2003)	42
5.4	La méthode GNDT, Italie	44
5.5	L'échelle macrosismique européenne EMS-98	46
5.5.1	Description de l'EMS-98	46
5.5.2	Utilisation de l'EMS-98 pour l'évaluation de la vulnérabilité de la Ville d'Aigle en Suisse	50
5.6	Études de vulnérabilité	53
5.6.1	Ville de Bâle en Suisse	53
5.6.2	Autres études	58
6	ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ SISMIQUE AU QUÉBEC	60
6.1	Sismicité de l'Est du Canada	60
6.2	Vulnérabilité sismique au Québec	62
6.2.1	Ville de Québec	63
6.2.2	Ville de Montréal	64
6.2.3	Travaux publics et Services gouvernementaux Canada	64
7	CONCLUSION	65
8	RECOMMANDATIONS	67
	BIBLIOGRAPHIE	69
	ANNEXES	74

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I :	Classification des méthodes et positionnement des références	21
Tableau II :	Format d'une matrice de dommages probables, selon Whitman 1974	23
Tableau III :	Classification typologique et cotes structurales de base (CNRC 1992).....	35
Tableau IV :	Classification typologique et cotes structurales de base du FEMA- 154 2002	36
Tableau V :	Sismicité définie dans le FEMA-154 2002	37
Tableau VI :	Liste des items du formulaire de niveau II du GNDT (Maçonnerie)	45
Tableau VII :	Pourcentages attribués aux indicateurs de l'EMS-98	51
Tableau VIII:	Détermination des degrés de dommages EMS-98 en pourcentage	52
Tableau IX :	Zones de sismicité effective pour des villes canadienne	61

LISTE DES FIGURES

Figure 1 :	Cartes d'aléa sismique pour le Canada et le sud-est du Canada (valeurs médianes de l'accélération spectrale amortie à 5% pour un sol de classe C et une probabilité sur 50 ans de 2%).....	10
Figure 2 :	Spectre d'aléa sismique de villes canadiennes	11
Figure 3:	Procédure d'évaluation structurale (ASCE, 2000a)	15
Figure 4 :	Classification selon le temps et la difficulté de calcul	19
Figure 5 :	Classification selon l'application	19
Figure 6 :	Distribution log-normale de DF	40
Figure 7 :	Distribution normale de $\ln(DF)$	40
Figure 8 :	Classes de vulnérabilité de l'EMS 98.....	47
Figure 9 :	Description des indicateurs de l'EMS-98.....	48
Figure 10 :	Courbes de dégâts typiques pour une classe de vulnérabilité (EMS- 98).....	49
Figure 11 :	Répartition des bâtiments de la Ville d'Aigle	51
Figure 12:	Courbes de vulnérabilité pour l'ensemble du bâti d'Aigle.....	52
Figure 13 :	Principe de l'approche de (Lang, 2002) pour développer les fonctions de vulnérabilité des bâtiments étudiés	54
Figure 14 :	Courbe de capacité d'un bâtiment en maçonnerie selon la méthode appliquée pour la ville de Bâle (Lang, 2002)	55
Figure 15 :	Fonction de vulnérabilité établie à partir de la courbe de capacité de la Figure 14.....	56
Figure 16 :	Courbes de fragilité pour la Ville de Bâle	57

1 INTRODUCTION

1.1 Généralités

Lorsque survient un tremblement de terre, la surface de la Terre se déplace horizontalement et verticalement, de quelques centimètres à quelques décimètres selon l'intensité du séisme. Ces mouvements se produisent généralement à la jonction des plaques tectoniques, là où elles entrent en collision ou se frottent les unes contre les autres. Il peut également s'agir de mouvements le long d'anciennes fractures ou zones de faiblesse de l'écorce terrestre, comme c'est le cas dans l'Est du Canada¹. La surface de la Terre oscille alors pendant plusieurs secondes suivant différentes fréquences superposées (de 0,1 à 50 Hz). Lorsque les secousses sont violentes, des blocs entiers de sol subissent un déplacement irréversible, des fissures s'ouvrent dans le sol et des pentes raides se mettent en mouvement. Les bâtiments et les ouvrages se mettent à bouger.

Les dommages directs causés par un séisme proviennent soit du mouvement de la faille ou des vibrations du sol. Ces dernières sont responsables de la majorité des dommages causés aux structures. Selon la nature des oscillations (amplitude, fréquence, durée) et de la construction (genre, mode), ils subissent des dégâts qui peuvent aller jusqu'à l'effondrement complet. Les pertes encourues résultant de ces dommages sont économiques, sociales et aussi humaines. Le séisme de mai 2003 à Boumerdes en Algérie et celui de décembre 2003 à Bam en Iran en sont malheureusement des exemples probants. Le séisme de Bourmedes, d'une magnitude de 6,8 sur l'échelle de Richter, s'est soldé par plus de 2000 morts et plus de 10000 blessés. Les dommages sévères aux structures dans les régions urbaines ont fait plus de 15000 sans abri (Adams et al., 2003). À Seattle, en février 2001, le séisme de Nisqually bien qu'ayant également une magnitude de 6,8, a eu des conséquences beaucoup moins graves². Une seule personne a perdu la vie alors que les dommages s'évaluent à environ deux milliards de

¹ <http://www.cgq-qgc.ca/tous/geotour/tremble2.htm>

² <http://www.scec.org/instant/01news/feature010313.html>

dollars US. La profondeur focale du séisme, localisée à plus de 52 kilomètres de la surface explique en partie la sévérité moindre des dommages. En 1995, le séisme de Kobe à Hyogo-ken Nambu au Japon, d'une magnitude de 7,2 a entraîné dans la mort 5000 personnes et causé des dommages majeurs aux propriétés (Shinozuka). En Californie, le séisme de Northridge (1994) d'une magnitude de 6,7, bien que moins mortel (57 morts) a causé des dommages aux infrastructures et aux structures, dont 3000 bâtiments jugés non sécuritaires, entraînant des pertes évaluées à 40 milliards de dollars américains. Les dommages et les interruptions de service suite au séisme de Loma Prieta (Californie) en 1989 ont été évalués à plus de 10 milliards US dont 6,8 milliards en dommages directs³.

Les pertes encourues lors de ces différents événements, surtout dans les zones densément peuplées, ont mis en évidence la nécessité de réduire les dommages potentiels des structures existantes (infrastructures et bâtiments) et d'évaluer leur vulnérabilité aux séismes.

L'estimation des pertes encourues, allant de l'interruption de service aux pertes en vie humaine, est un champ d'expertise en plein développement. Il s'agit d'une préoccupation importante pour les régions du monde où la probabilité d'occurrence de séisme de forte intensité est beaucoup plus élevée qu'ailleurs, mais aussi pour les régions moins sensibles, mais densément peuplées. La connaissance du risque sismique permet de mettre en place des mesures de mitigation pour diminuer les dommages potentiels tout en considérant la variable économique de l'équation.

Le Petit Robert définit le risque par « un danger éventuel plus ou moins prévisible ». Le risque est donc relié à la possible réalisation d'événements non désirés. Il prend en compte non seulement la probabilité d'occurrence de tels événements, mais aussi l'importance de leurs conséquences. On peut exprimer le risque sismique par la

³<http://www.eqe.com/publications/lomaprie/lomaprie.htm>

convolution de *l'aléa sismique*, de la *vulnérabilité* du bâti, et des *pertes* matérielles et humaines. Le risque, ainsi défini, s'exprime généralement en termes économique et social selon différents scénarios de séismes.

La vulnérabilité du bâti existant est probablement l'aspect de l'évaluation du risque sismique qui intéresse le plus les ingénieurs car elle dépend principalement des caractéristiques structurales et des déficiences qui leurs sont associées. On peut considérer qu'il y a deux grandes méthodes pour évaluer la vulnérabilité sismique des bâtiments :

1. Les études statistiques basées sur les dommages observés lors de séismes passés et qui permettent d'obtenir des matrices de dommages probables associées à une classe de bâtiment. Ces matrices servent ensuite à développer des fonctions de vulnérabilité donnant pour un type de bâtiment la probabilité qu'un certain degré d'endommagement survienne en fonction de l'intensité d'un séisme. La valeur des résultats est essentiellement probabiliste.
2. Les simulations par modèles numériques ou analytiques permettant d'obtenir la réponse d'une structure à un ou plusieurs scénarios de séismes. Les résultats sont généralement déterministes et valables pour un bâtiment en particulier.

La méthode choisie pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique dépendra de la qualité et de la quantité de données disponibles et de l'objectif visé, soit obtenir la vulnérabilité sismique d'un bâtiment unique ou d'un ensemble de bâtiment.

1.2 Objectifs du rapport

Ce rapport vise deux objectifs principaux :

1. Réaliser une revue de l'état des connaissances dans le domaine de l'évaluation de la vulnérabilité sismique pour un ensemble de bâtiments ;
2. Établir l'état de la situation au Canada et au Québec en ce qui concerne l'évaluation du risque sismique et de la vulnérabilité sismique du bâti existant. On s'intéresse en particulier à la ville de Montréal et de Québec, les deux régions les plus densément peuplées de la province.

Lorsqu'on traite de l'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments existants on fait appel à plusieurs notions qui se doivent d'être bien définies afin d'avoir une compréhension juste de la problématique. Ces définitions sont d'abord données au Chapitre 2 du rapport avant d'aborder plus en détail les procédures d'évaluation sismique au Chapitre 3. Les différentes méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique sont décrites en détail au Chapitre 4 et des exemples d'application sont présentés au Chapitre 5. On y décrit également les systèmes de pointages permettant d'obtenir un index de vulnérabilité et l'échelle macrosismique européenne (EMS-98). La situation au Québec est abordée au Chapitre 6 et une synthèse de l'information est faite au Chapitre 7. Le dernier chapitre jette les balises pour le développement d'un programme de recherche en évaluation de la vulnérabilité sismique adapté à la réalité québécoise.

2 DÉFINITIONS DE BASE

L'évaluation de la *vulnérabilité sismique* fait directement appel aux notions d'*intensité* et de *magnitude sismique*, de *risque* et d'*aléa sismique*. La définition de certains de ces termes comme *risque sismique*, *aléa sismique* et *vulnérabilité* varie parfois selon les sources documentaires ou le contexte d'utilisation. Dans ce chapitre, nous tenterons de définir ces notions afin d'établir une base commune qui sera utilisée pour le reste du rapport et qui permettra de mieux comprendre les méthodes d'évaluation présentées par la suite.

2.1 Intensité et magnitude sismique⁴

L'*intensité sismique* est la mesure de la force d'une secousse due à un tremblement de terre. Les premières échelles d'intensité sismique mesuraient l'intensité des répercussions des tremblements de terre sur les humains, les objets et les bâtiments. On doit la première échelle d'intensité sismique à l'Italien Rossi et au Suisse Forel qui proposèrent séparément en 1874 et 1881 des échelles similaires à dix échelons.

L'échelle d'intensité de Rossi-Forel a été modifiée en 1902 par Mercalli pour une échelle également à dix échelons. L'ajout de deux échelons à l'échelle de Mercalli a été faite par Cancani et Sieberg ; ce qui a donné naissance à la plupart des échelles à douze échelons utilisées aujourd'hui et entre autre à l'échelle **MCS** encore utilisée dans le sud de l'Europe. En 1931, Wood et Neumann traduisent cette échelle en anglais et elle devient l'échelle de Mercalli modifiée (**MM** ou **I_{MM}**). L'échelle de Mercalli modifiée (**MM**) est conçue pour décrire les effets d'un séisme, à un endroit donné, sur des objets naturels, sur des installations industrielles et sur les êtres humains. Elle s'échelonne de I (ressenti uniquement par quelques personnes dans des conditions particulièrement favorables) à XII (destruction totale). Il y a plusieurs versions de l'échelle **MM** souvent identifiées par l'année de leur création (**MM-31**, **MM-56**).

⁴ <http://geology.about.com/library/bl/blmagtable.htm> et Filiatrault, A. (1996). Éléments de génie parasismique et de calcul dynamique des structures. Montréal.

En 1964, Medvedev, Sponheuer et Karnik publient la première version de l'échelle **MSK** basée sur les échelles **MCS** et **MM-56**. Cette échelle diffère des précédentes par l'utilisation d'une méthode à la fois qualitative et quantitative de l'évaluation des dégâts. L'utilisation de l'échelle **MSK** s'est répandue rapidement en Europe, mais il est devenu rapidement évident que des améliorations étaient nécessaires pour rendre son utilisation plus claire et incorporer les techniques de construction. En 1988, la Commission géologique européenne a initié une révision en profondeur de l'échelle **MSK**. La version finale de cette révision est l'échelle macrosismique européenne, **EMS** publiée en 1992 et révisée à nouveau en 1998 (Grünthal, 1998). L'**EMS-98** est la première échelle d'intensité comprenant des instructions pour son utilisation. C'est aussi la première échelle utilisant des illustrations et des photos pour décrire les différents degrés de dommages des édifices traitant de la probabilité d'occurrence des différents degrés de dégâts. Au Japon, on utilise l'échelle d'intensité d'Omori à sept niveaux, dont le premier correspond au niveau **MM-VI**. Cette échelle est basée sur le comportement des structures japonaises typiques.

L'échelle de Richter, établie en 1935, mesure la *magnitude* des tremblements de terre, c'est-à-dire, la quantité d'énergie libérée. Elle est évaluée à partir de l'amplitude des ondes sismiques enregistrées par des instruments sensibles (sismographes) et liée à l'énergie libérée au foyer, c'est-à-dire le point d'origine du tremblement de terre. L'échelle de Richter est logarithmique, c'est-à-dire que chaque degré de l'échelle représente une magnitude de 10 fois plus élevée que le degré précédent. Ainsi, une magnitude de 7 indique que les amplitudes mesurées sont dix fois plus importantes que celle de magnitude 6 et 100 fois plus élevée que celle de magnitude 5.

Il existe plusieurs versions de la magnitude de Richter (**M**). La magnitude locale d'un séisme, **M_L**, est calculée à partir de la différence d'amplitude entre le séisme local et le séisme de référence de magnitude **M**. Au fil des ans, on s'est aperçu que la magnitude de Richter définie pour la Californie (**M_L**), ne s'appliquait pas à l'Est de l'Amérique du

Nord où les ondes sismiques s'atténuent différemment et à des profondeurs moindres. En 1973, Otto Nuttli, un séismologue de l'Université de Saint-Louis, a mis au point une magnitude qui correspondait mieux à la réalité de l'Est de l'Amérique. C'est une des formules que Nuttli a dérivée qui est utilisée pour mesurer les séismes de l'est du Canada. La formulation utilisée est appelée Magnitude Nuttli ou m_N . Afin de simplifier les communications auprès du public, les séismologues canadiens parleront souvent de la magnitude de Richter alors que strictement parlant les séismes de l'est du Canada sont mesurés suivant la magnitude Nuttli. Une exception existe pour les très graves et petits séismes de la région de Charlevoix où la magnitude M_L est utilisée.

On emploie trois autres échelles de magnitude : la magnitude des ondes de surface, M_S , la magnitude des ondes de volume, m_b et la magnitude du moment sismique, M_W , laquelle est de plus en plus utilisée par les séismologues pour décrire les séismes.

2.2 Risque sismique

Le risque tel que défini en introduction par « le convolution de *l'aléa sismique*, de la *vulnérabilité* du bâti et des *pertes* matérielles et humaines » peut aussi s'exprimer mathématiquement par :

$$R = \iint_{2\sigma} H(x) \cdot C(y) \cdot dx dy \quad (1)$$

où R est le risque calculé par l'intégration sur deux intervalles de confiance σ du produit de la fonction aléatoire $H(x)$ par la fonction de conséquences $C(y)$. Le risque englobe donc la notion de conséquences.

Le NORSAR⁵ définit le risque sismique ou « seismic or earthquake risk » par les probabilités des conséquences sociales et économiques d'un séisme. Plus précisément,

⁵ NORSAR : Fondation de recherche indépendante de Norvège opérant le Centre de données national norvégien

les pertes de vie, les blessures ou les dommages aux bâtiments attendus (probables) dans le cas d'un séisme, en relation avec un aléa sismique donné dans une région donnée.

Une définition du risque exprimant bien le rôle de la vulnérabilité dans l'évaluation de ce dernier est celle proposée par (Pelissier et Badoux, 2003) où le risque sismique R s'exprime par :

$$R = A \times Vu \times Va \quad (2)$$

où A est l'aléa sismique exprimé par une intensité et une période de retour (fréquence), il correspond à la fonction aléatoire $H(x)$ de l'équation (1). Vu est la vulnérabilité exprimée en termes de probabilités qu'un degré de dommages soit atteint pour une classe de bâtiment et Va est la valeur associée aux pertes humaines, mobilières et immobilières. L'évaluation des pertes économiques pour un niveau de dommages donné est souvent basée sur le rapport du coût de réparation sur la valeur de remplacement du bâtiment. Dans l'équation (2) le produit de la vulnérabilité Vu et de la valeur des pertes encourues Va correspond à la fonction de conséquence $C(y)$ de l'équation (1).

Dans ce rapport nous retiendrons la définition du risque sismique englobant l'aléa sismique, la vulnérabilité du bâti et la valeur des pertes, exprimée par l'équation (2).

2.3 Aléa sismique

Une définition commune de « *l'aléa sismique* » est la probabilité d'occurrence à une intensité sismique spécifiée pour une période de temps donné. Le glossaire du NORSAR définit les termes « seismic or earthquake hazard » ⁶ par tout phénomène physique associé à un séisme pouvant produire des effets non désirés sur les activités humaines. Ces phénomènes incluent les failles de surface, le tremblement de terre, les

⁶ Il est à noter que certaines traductions officielles traduisent le terme « seismic hazard » par risque sismique au lieu d'aléa sismique (voir CNRC (2003). Numéro spécial consacré aux exigences de calcul des séismes proposées au code national du bâtiment, édition de 2005. *Revue canadienne de génie civil*, 30(2). Introduction).

glissements de terrains, la liquéfaction, la déformation tectonique, le tsunami, la seiche et leurs effets sur l'utilisation du sol, des structures et des systèmes économiques. Cette définition inclut l'aléa sismique régional, ou la macrosismicité, et les effets de site ou microsismicité.

Les données obtenues par les cartes d'aléa sismique de type probabiliste du Canada sont la probabilité qu'une accélération (pga) ou une vitesse (pgv) horizontale maximale au sol donnée se produisent sur une certaine période de temps. Ces cartes divisent le pays en zones sismiques par *macrozonation*. Le Code National du bâtiment 1995 (IRC-CNRC, 1995) utilise une fréquence de séisme de 0,0021 par année (1/476 ans) ou une probabilité de dépassement de 10% en 50 ans. Dans la prochaine version du CNB 2005 (CNRC, 2003) les cartes d'aléa sismiques seront établies selon le nouveau modèle d'aléa sismique mis au point par la Commission géologique du Canada. Cette nouvelle carte d'aléa sismique donne l'accélération spectrale S_a avec une probabilité de dépassement de 2% en 50 ans (1/2 475 ans) correspondant à un séisme de plus forte intensité mais ayant une fiabilité plus uniforme à travers le pays (Figure 1). Ces cartes utilisent un spectre d'aléa uniforme (UHS) qui est disponible pour chaque ville. Le UHS est une représentation graphique de l'accélération spectrale en fonction de la période avec une probabilité uniforme tel qu'illustré à la Figure 2. Avec les cartes actuelles la probabilité des accélérations pga ou des vitesses pgv est uniforme, et servent à mettre à l'échelle un spectre standard afin d'obtenir l'accélération spectrale en fonction de la période. Cependant la probabilité d'un tel spectre n'est pas uniforme. Cette modification apportée à la carte d'aléa sismique du Canada vise à mieux représenter les variations régionales des spectres sismiques.

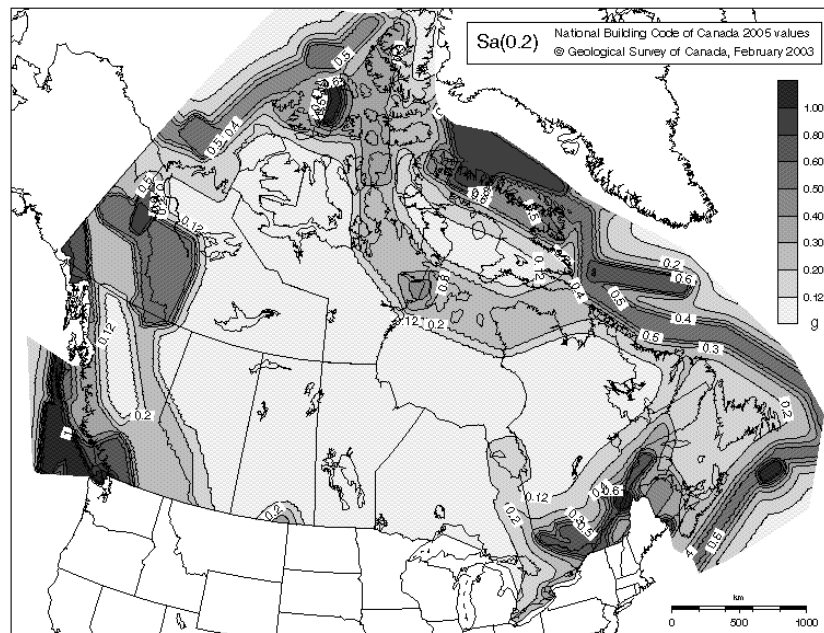


Figure 8. $S_a(0.2)$ for Canada (median values of 5% damped spectral acceleration for Site Class C and a probability of 2%/50 years).

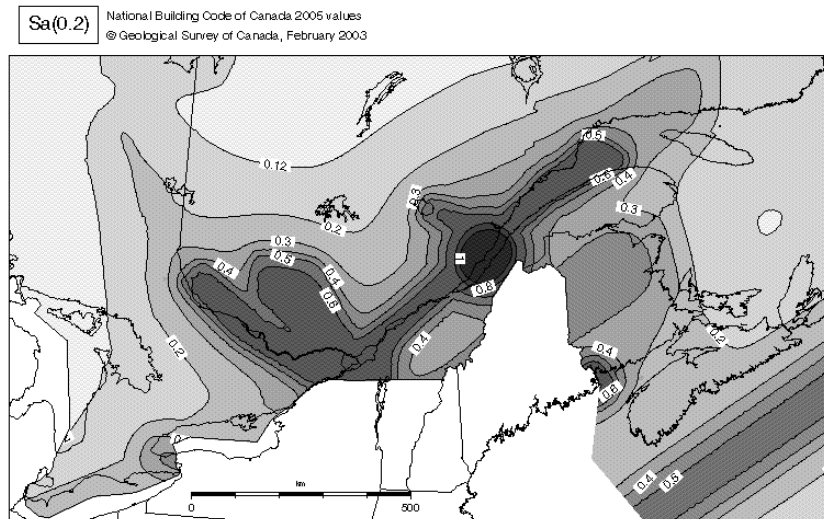


Figure 9. $S_a(0.2)$ for southeastern Canada (median values of 5% damped spectral acceleration for Site Class C and a probability of 2%/50 years).

Figure 1 : Cartes d'aléa sismique pour le Canada et le sud-est du Canada (valeurs médianes de l'accélération spectrale amortie à 5% pour un sol de classe C et une probabilité sur 50 ans de 2%)

Source : http://www.seismo.nrcan.gc.ca/hazards/OF4459/index_e.php

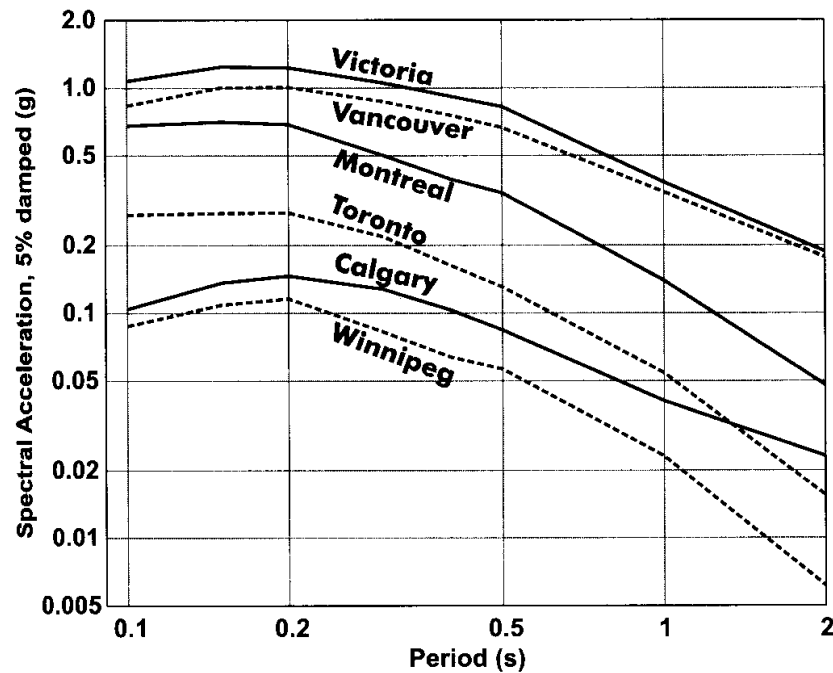


Figure 2 : Spectre d'aléa sismique de villes canadiennes

Source : (Adams et Atkinson, 2003) p. 267

Lors de la conception sismique d'un bâtiment les effets de sites sont considérés sous forme déterministe par l'utilisation d'un coefficient de fondation F appliqué au calcul du cisaillement à la base pour le CNB 1995, et appliqué au calcul de l'accélération spectrale de design pour le CNB 2005. Pour l'évaluation du risque sismique relié à un ensemble de bâtiments, l'effet de site devrait idéalement être considéré de façon probabiliste comme l'est l'aléa sismique régional. Afin d'obtenir de telles informations, il faut procéder à la microzonation d'un secteur plus restreint, une ville par exemple. Cet aspect de l'évaluation du risque sismique constitue un domaine de recherche en soit et n'est pas traité dans ce rapport.

2.4 Vulnérabilité sismique

Dans l'équation (2) la vulnérabilité sismique est exprimée en terme de probabilités qu'un degré de dommages soit atteint pour une classe de bâtiment à une intensité de

séisme donné. Cette définition fait référence aux fonctions de vulnérabilité obtenues à partir des matrices de dommages probables résultants des études statistiques basées sur les dommages observés lors de séismes passés ou par des consultations auprès d'experts (voir Section 4.1).

On retrouve dans la littérature d'autres définitions de la vulnérabilité, comme celle de Calgaro (1998), lorsqu'il définit le risque dans un contexte de fiabilité des structures :

« La vulnérabilité est le produit d'un aléa (probabilité de l'évènement) par le montant des dommages qu'il provoque : $V = P_{aléa} \times C_{dommage}$. Elle s'exprime généralement en unité monétaire ou parfois en degrés de dommages. »⁷

Cette définition correspond à la notion de risque telle qu'exprimée par l'équation (2).

Dans le document de travail du *Programme national de fiabilité des infrastructures essentielles du gouvernement du Canada*⁸ on définit la vulnérabilité comme « une caractéristique d'un élément de la conception, de la mise en œuvre ou du fonctionnement des infrastructures essentielles qui la rend susceptible d'être détruite ou perturbée par une menace. La vulnérabilité est synonyme de faiblesse. »

Le récent document S832-10 émis par l'Association Canadienne de Normalisation et intitulé « Lignes directrices en matière de diminution des risques sismiques concernant les composants fonctionnels et opérationnels des bâtiments (CFO) » définit la vulnérabilité sismique par la probabilité de défaillance ou d'affaissement d'un CFO, lorsqu'il subit un tremblement de terre (CSA, 2002). La cote de vulnérabilité obtenue pour un CFO donné est multipliée par les cotes des conséquences. La cote de vulnérabilité inclut l'aléa sismique correspondant à la région considérée. Cette définition est donc légèrement différente de celle exprimée par l'équation (2).

⁷ Traduction libre

⁸ http://www.ocipep.gc.ca/critical/nciap/disc_f.asp

Dans ce rapport nous retiendrons la définition de vulnérabilité sismique de l'équation (2), reliée à un degré de dommages pour une intensité sismique donnée en excluant l'aléa sismique.

3 ÉVALUATION SISMIQUE

L'évaluation sismique qui vise à vérifier la performance d'un bâtiment pour une intensité sismique donnée est un outil important dans l'évaluation de la vulnérabilité sismique d'un bâtiment ou d'un ensemble de bâtiments. L'évaluation sismique est une application particulière des procédures d'évaluations structurales s'appliquant à l'ensemble des cas de chargement sollicitant un bâtiment.

3.1 Évaluation structurale

Selon Melchers (2001) l'évaluation structurale vise à estimer la capacité de la structure à avoir une performance future acceptable pour les conditions et les charges appropriées. La procédure d'évaluation structurale la plus courante est celle recommandée par l'American Society of Civil Engineering (ASCE, 2000a). Elle est constituée de deux phases d'évaluation : (i) l'évaluation sommaire ou préliminaire a pour objectif de déterminer si des travaux de réparation sont exigés ou si une évaluation plus détaillée est nécessaire, et (ii) l'évaluation détaillée qui n'est requise que si l'information obtenue lors de l'évaluation préliminaire est insuffisante pour déterminer la nécessité et l'ampleur des travaux à effectuer. Le schéma de la Figure 3 illustre les étapes principales de l'évaluation structurale.

Cette procédure est générale et s'adresse à la vérification de la performance de la structure pour l'ensemble des cas de chargement.

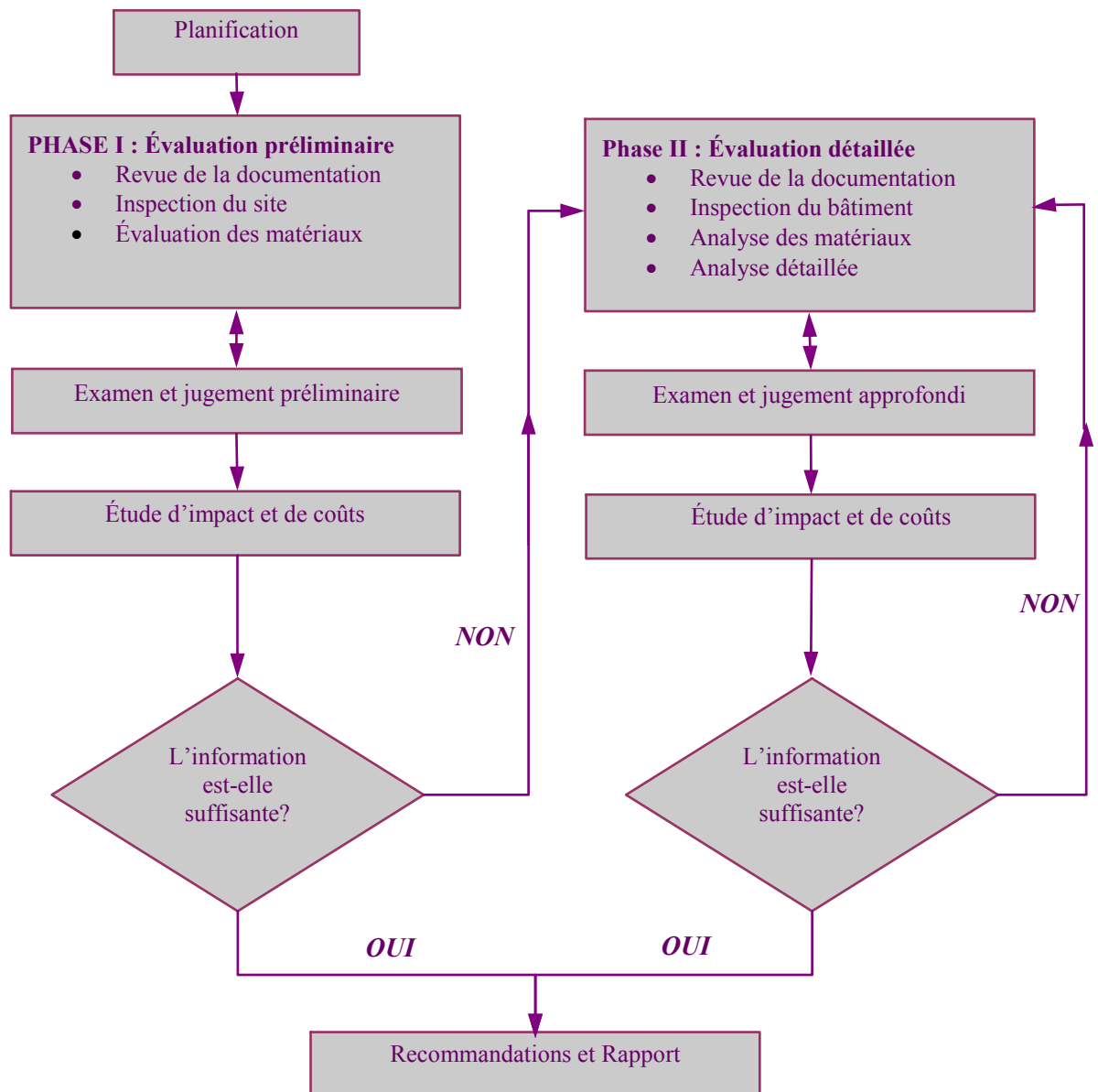


Figure 3: Procédure d'évaluation structurale (ASCE, 2000a)

3.2 Procédure d'évaluation sismique

L'évaluation sismique d'un bâtiment dans le but de vérifier sa performance pour un niveau de séisme donné requiert de bien connaître les différentes caractéristiques structurales requises pour une bonne performance sismique. Les « Lignes directrices pour l'évaluation sismique des bâtiments existant » de l'Institut de Recherche en Construction du Conseil National de Recherche du Canada (IRC-CNRC, 1992a) guident les ingénieurs en structure dans le processus d'une évaluation sismique. Ces directives, adaptées pour le Canada, sont basées sur celles du Federal Emergency Management Association FEMA-178 (BSSC, 1992b), handbook basé sur le rapport ATC-14 (1987) du Applied Technology Council de l'état de la Californie (Corporation sans but lucratif établie en 1971 pour renseigner les ingénieurs en structures sur les développements technologiques). La méthode proposée vise à vérifier l'aptitude de la structure à résister à un séisme sans subir de rupture avec une performance de sécurité des occupants. Il s'agit d'une méthode à deux phases d'application. La première phase consiste à identifier les déficiences sismiques de la structure à partir d'inspections et des plans détaillés en répondant par vrai ou faux à une série d'énoncés. Le document du CNRC contient six énoncés (liste de questions) couvrant les six éléments suivants :

- Le système de base ;
- Les systèmes verticaux de résistance aux forces latérales ;
- Les diaphragmes ;
- Les assemblages de charpentes (connexions) ;
- Les fondations ;
- Les éléments non structuraux.

Les énoncés vrais supposent que la caractéristique ou l'élément évalué est adéquat en terme de performance sismique. Tout énoncé faux nécessite de passer à la phase suivante. Les procédures décrites pour la phase II incluent des vérifications par des calculs rapides, telles que la rigidité latérale, le glissement d'étage, l'effort de cisaillement à la base des murs, etc... et une analyse détaillée. L'analyse détaillée

repose principalement sur la méthode d'analyse statique équivalente décrite dans le Code National du bâtiment aussi appelée méthode de la force latérale équivalente, et recommande une analyse dynamique élastique ou analyse du spectre de réponse pour les bâtiments élevés ou avec des irrégularités.

Une version plus récente des directives du FEMA-178 est le standard de l'American Society of civil Engineers, ASCE 31-03, paru en 2003 (ASCE, 2003) qui a été précédé du pré-standard FEMA-310 (ASCE, 1998). La procédure d'évaluation proposée comporte trois phases et considère la performance d'occupation immédiate en plus de sécurité des occupants. La première phase est semblable à celle des directives canadiennes, mais les énoncés sont adaptés au niveau de performance visé. La phase II consiste à l'analyse des déficiences potentielles identifiées à la phase I, ou l'analyse du bâtiment complet, à l'aide de procédures linéaires statique ou dynamique. La troisième phase de l'évaluation propose une procédure détaillée d'analyse non linéaire basée sur la méthode des déplacements conformément au document FEMA-273 (BSSC, 1997a) et plus récemment au FEMA-356 (ASCE, 2000b).

Cette procédure est adaptée pour l'évaluation sismique d'un seul bâtiment et n'offre pas la possibilité de faire de lien entre les dommages attendus et le séisme considéré.

Plusieurs documents existent pour faire suite à l'évaluation sismique et mettre en place des mesures de mitigations. En voici quelques exemples :

- Lignes directrices pour la protection parasismique des structures des bâtiments existants (IRC-CNRC, 1993)
- FEMA-172 : NEHRP handbook of techniques for the seismic rehabilitation of existing buildings (BSSC, 1992a)
- FEMA-273 : NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings (BSSC, 1997a)
- FEMA-274 : NEHRP Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (BSSC, 1997b)
- FEMA-356 : NEHRP Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (ASCE, 2000b)

Les Lignes directrices du CNRC et le FEMA-172 donnent des techniques de réhabilitation appropriées pour différents types de systèmes structuraux. Dans le FEMA-273 et le FEMA-356 on décrit des procédures d'analyse statiques linéaires, dynamiques linéaires et statiques non linéaires pour prédire la réponse sismique d'un bâtiment lorsqu'il est soumis à une sollicitation sismique. L'approche est basée sur les niveaux de performance décrite par (Hamburger et al., 1996).

4 MÉTHODES D'ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ

L'évaluation de la vulnérabilité d'un bâtiment ou d'un ensemble de bâtiments nécessite l'estimation des dommages potentiels aux différents types de structures et selon différentes intensités sismiques. Afin d'estimer les dommages probables, on a recourt à des approches empiriques ou à des analyses dynamiques théoriques des structures à l'étude. Les approches pour l'évaluation de la vulnérabilité sont multiples et peuvent être classées soit selon leur degré de difficulté en terme de temps de calcul (Lang, 2002), ou selon qu'on évalue la vulnérabilité d'un seul bâtiment ou d'un ensemble de bâtiment (Augusti et Ciampoli, 2000). Ces deux classifications sont illustrées respectivement à la Figure 4 et à la Figure 5.

<i>Investissement</i>					
<i>Application</i>	Ensemble de bâtiments			Bâtiment unique	
<i>Méthodes</i>	Observation de la vulnérabilité résultant de séismes	Jugement expert	Modèles analytiques simples	Attribution de pointage	Analyses détaillées

Figure 4 : Classification selon le temps et la difficulté de calcul

<i>Application</i>	<i>Méthode</i>
Bâtiment unique	Analyse structurale détaillée
	Analyse du comportement structural
	Analyse structurale par macro-éléments
	Analyse structurale simplifiée
	Jugement expert
Approches statistiques pour un ensemble de bâtiments	Classification typologique (DPM)
	Indices de vulnérabilité (pointage)
	Évaluations qualitatives
	Procédures hybrides

Figure 5 : Classification selon l'application

Chacune de ces classifications a ses avantages. La première, basée sur le temps et la difficulté de calcul permet de bien illustrer que les méthodes d'analyses détaillées sont

peu appropriées pour l'évaluation d'un ensemble de bâtiments. Par contre cette classification illustre moins bien le positionnement de certaines méthodes dites hybrides qui utilisent, par exemple, un système de pointage et les observations de la vulnérabilité.

La classification d'Augusti (Figure 5) a pour objectif de positionner l'évaluation de la vulnérabilité sismique des monuments historiques. Ces bâtiments uniques avec un comportement dynamique complexe se prêtent difficilement à des analyses par des modèles mécaniques simples en cas de haute sismicité. De plus, ces bâtiments ont subi une réduction de la résistance structurale avec le temps et on ne peut pas utiliser une approche basée sur l'extrapolation des dommages dus à un séisme antérieur. Les méthodes statistiques sont donc à exclure. Augusti propose une méthode hybride d'évaluation comparative pour des monuments semblables en utilisant la méthode des macro-éléments (Augusti et al. 2001).

Les différentes méthodes de la classification proposée par Lang dans sa thèse de doctorat (Figure 4) sont décrites dans les sections suivantes. Le Tableau I fait la synthèse du positionnement des différentes méthodes et des références pertinentes. À la classification de Lang, on a ajouté les méthodes hybrides afin de positionner les références les plus récentes découlant d'une combinaison des approches. Certaines de ces méthodes présentant un intérêt pour la suite de ce rapport sont décrites plus en détail au Chapitre 5.

Tableau I : Classification des méthodes et positionnement des références

	Observation de la vulnérabilité résultant de séismes passés	Jugement expert	Modèles analytiques simples	Attribution de pointage	Analyses détaillées
Description	DPM élaborées à partir des statistiques des séismes passés Fonctions de vulnérabilité pour différents types de bâtiments	DPM développées en se basant sur le jugement d'experts de plusieurs classes de bâtiments.	Modèles simples servant à identifier les mécanismes de ruptures potentiels et le degré de dommages résultant	Attribution de cotes aux bâtiments dans le but de les classer dans un inventaire	Procédure statique linéaire Dynamique linéaire Statique non linéaire Dynamique non linéaire
Application	Ensemble de bâtiments Valide pour une région étudiée ou une région similaire Ne considère pas les travaux de mise en conformité	Ensemble de bâtiments Difficilement applicable pour d'autres régions ou d'autres types de structures Méthode subjective comportant des incertitudes sur l'estimation des dommages et sur l'opinion formulée	Bâtiment unique ou bâtiments ayant des caractéristiques communes Les résultats consistent en des intervalles de valeurs	Un ensemble de bâtiments ou bâtiment unique Détermine la nécessité d'une analyse détaillée Considère les travaux de mise en conformité sismique	Un seul bâtiment, Phase II après la méthode de pointage
Références	Whitman, Reed et al. (1971) Coburn & Spence (1992)	ATC-13 (1985): HAZUS® (1997, 1999)	Portugal : (D'Ayala et al., 1997) Italie: (Faccioli et al., 1999), (Augusti et Ciampoli, 2000; Augusti et al., 2001; Augusti et al., 2002)	Canada : Manuel de sélection (1993) É.U. : FEMA 154-155 (1988, 2002) : Suisse : Grille d'évaluation Italie: Méthode GNDT	FEMA-178 (1992), FEMA-310 (1998) et ASCE 31-03 (2003) CNRC (1992) FEMA-273 (1997) et FEMA-356 (2000)
Méthodes hybrides	Hong (2003) : FEMA-178 et système d'inférence floue (basé sur le jugement d'experts) pour tenir compte des incertitudes. Résultat : INDEX DE PERFORMANCE				
	Fisher, Alvarez et al. (2002) : Macro-éléments inélastiques avec le logiciel HAZUS® pour un nombre limité d'édifices		Kanda, Iwsaki et al. (1997) : Analyses statiques non linéaires avec l'intégration de notions de fiabilité pour le calcul d'un index de performance		
	EMS (1992 et 1998) : fonctions de vulnérabilité basées sur les vulnérabilités observées et sur le jugement d'experts				
	Lang (2002) : Approche analytique avec procédure statique non linéaire. Résultat : courbes de capacité reliées à EMS-98 et fonctions de vulnérabilité				
	McCormack & Rad (1997) : Estimation des pertes à partir de la procédure FEMA 154-155 en utilisant les DPM de l' ATC-13				

4.1 Observation de la vulnérabilité

L'observation de la vulnérabilité vise en particulier à générer des matrices de dommages probables ou des fonctions de vulnérabilité.

Les matrices de dommages probables, ou **DPM** (Damage Probability Matrix), et les fonctions de vulnérabilité sont deux façons de représenter la relation probabiliste entre le niveau de dommages et l'intensité d'un séisme. Basées sur une classification typologique des bâtiments, les DPM peuvent être construites à partir de sondages sur les dommages survenus à la suite d'un séisme ou à partir du jugement d'experts. Ces matrices expriment la probabilité qu'une structure appartenant à une certaine classe de bâtiments subisse un certain niveau de dommages résultant d'un séisme d'une intensité donnée. Les dommages considérés sont structuraux et peuvent parfois inclure des dommages non structuraux. Les bâtiments sont classés selon leur typologie à partir de caractéristiques communes, comme par exemple, le matériau de construction, la technologie utilisée, l'année de construction, etc.

Après le séisme de San Fernando en 1971, les données sur les dommages relevés sur plus de 1600 bâtiments en acier et en béton ont servi à générer des matrices de dommages probables (Whitman et al., 1974). Ces matrices donnent la probabilité qu'un certain degré de dommages survienne pour une intensité sismique selon l'échelle de Mercalli modifiée. Whitman définit neuf degrés de dommages par une description subjective et par le rapport du coût des réparations sur le coût de remplacement, ou ratio de dommages (**DF** : damage factor).

Le Tableau II illustre le format typique d'une telle matrice de dommages probables. Dans chaque cellule vide on assigne le pourcentage de bâtiments subissant le degré de dommages pour l'intensité considérée. Le cumulatif des pourcentages attribués à chaque degré de dommages pour une intensité sismique donnée doit être de 100%. Pour certaines applications, il peut être suffisant d'utiliser un ratio de dommages moyen

(MDF). Pour chaque intensité sismique on évalue la valeur des dommages dans leur ensemble en pourcentage de la valeur totale. Le calcul du MDR se fait en pondérant les probabilités attribuées à chaque degré de dommages.

Tableau II : Format d'une matrice de dommages probables, selon Whitman 1974

Degré de dommages	Dommages structuraux	Dommages non structuraux	Ratio de dommages (%)	Intensité sismique			
				V	VI	VII	VIII
0	Aucun	Aucun	0-0,05	---	---	---	---
1	Aucun	Mineurs	0,05-0,3	---	---	---	---
2	Aucun	Localisés	0,3-1,25	---	---	---	---
3	Non observables	Étendus	1,25-3,5	---	---	---	---
4	Mineurs	Substantiels	3,5-4,5	---	---	---	---
5	Substantiels	Majeurs	7,5-20	---	---	---	---
6	Majeurs	Presque totaux	20-65	---	---	---	---
7	Bâtiment condamné		100	---	---	---	---
8	Effondrement		100	---	---	---	---
Pourcentage cumulatif				100%	100%	100%	100%
Ratios de dommages moyens (MDF)				---	---	---	---

Dans les études subséquentes, le nombre de degrés de dommages a été réduit à quatre, cinq ou six étant donné la difficulté à discerner les degrés. Par exemple, les matrices construites à partir de l'échelle macrosismique européenne utilisent cinq degrés de dommages comme illustré à la Section 5.5.

Les fonctions ou courbes de vulnérabilité sont la représentation graphique des DPM. Ces fonctions expriment généralement les dommages ou pertes attendus pour un bâtiment ou une classe de bâtiment en fonction de l'intensité du séisme, soit pour un degré de dommages donné ou une classe de bâtiments donnée ou pour un ensemble de bâtiments. Un exemple de courbes de vulnérabilité est donné à la Figure 12 de la Section 5.5.2. Lorsqu'on utilise une distribution probabiliste au lieu d'une courbe de vulnérabilité unique, on obtient une courbe de fragilité. Les courbes de fragilité décrivent la probabilité qu'un bâtiment appartenant à une certaine classe atteigne ou

dépasse un niveau de dommage donné pour un estimé déterministe de la réponse spectrale (accélération ou déplacement) tel qu'illustré à la Figure 16 de la Section 5.6.1.

En 1992, Coburn & Spence ont utilisé les données provenant des études de cas de plusieurs séismes à travers le monde pour développer des fonctions de vulnérabilités pour différents types de bâtiments avec cinq niveaux de dommages (Coburn et Spence, 1992). Des distributions normales étaient supposées pour l'élaboration de ces courbes donnant la probabilité de dépassement d'un niveau de dommage pour une intensité de séisme donnée.

Plusieurs études des dommages résultant des séismes ont été réalisées à travers le monde. Suite au séisme du Saguenay, (Paultre et al., 1993) ont relevé, à partir des réclamations d'assurance, la distribution spatiale des dommages en fonction de ratio de dommages. Les effets de site ont été pointés comme l'une des causes principales des dommages aux bâtiments. Les résultats n'ont cependant pas servi à élaborer des matrices de dommages probables.

L'approche par observation de la vulnérabilité exige beaucoup de données et n'est valide que pour la région étudiée ou une région similaire. Idéalement la classification typologique des bâtiments devrait être redéfinie pour chaque région en fonction des techniques de construction, des matériaux utilisés, etc. Cette méthode a aussi l'inconvénient de ne pas considérer les travaux de mise en conformité sismique.

Les matrices de dommages probables et les fonctions de vulnérabilité ont servi de base à plusieurs approches pour l'évaluation d'un ensemble de bâtiments. Ces approches seront décrites au Chapitre 5.

4.2 Jugement expert

Une autre méthode pour développer des fonctions de vulnérabilité en l'absence de données résultant de séismes est l'utilisation du jugement d'experts. À partir de

consultation de 58 experts, le rapport ATC-13 (ATC, 1985) dérive des matrices de dommages probables pour 78 classes d'installations dont 36 réfèrent à des bâtiments. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle fait appel à la subjectivité des experts et introduit des incertitudes sur l'estimation des dommages et sur l'opinion formulée. De plus, les matrices développées sont difficilement applicables dans d'autres régions et à d'autres types de structures. Cette méthode est cependant demeurée la référence jusqu'aux années 1990.

Le rapport ATC-13 a ensuite servi de fondement pour l'élaboration en 1997 du logiciel HAZUS[®] par le National Institute of Building Science (NIBS). Ce logiciel interactif permet d'évaluer le risque sismique à partir du jugement d'experts pour 36 modèles de bâtiments correspondant à la classification typologique du FEMA-178. Les données sismiques sont l'accélération spectrale et le déplacement spectral et permettent de considérer quatre niveaux de conception sismique : « high-code, moderate-code, low-code, pre-code ». Pour chaque type de bâtiment la description de quatre niveaux de dommages est donnée : légers, modérés, importants et perte totale. On calcule ensuite les valeurs limites des paramètres de capacité du bâtiment pour l'initiation des dommages pour chaque niveau de conception sismique. Ces paramètres sont, en autres, le déplacement inter-étage et les déplacements spectraux. HAZUS[®] donne pour chacune des quinze classes de bâtiments les données permettant d'obtenir les courbes de capacité et les courbes de fragilité. Les courbes de capacité, ou « pushover curves » donnent l'effort de cisaillement total V agissant sur une structure, ou d'accélération spectrale correspondante S_a , en fonction du déplacement latéral maximal Δ , ou le déplacement spectral S_d . Les courbes de fragilité décrivent la probabilité qu'un bâtiment appartenant à une certaine classe atteigne ou dépasse un niveau de dommage donné pour un estimé déterministe de la réponse spectrale (accélération ou déplacement).

4.3 Modèles analytiques simples

Lorsqu'il n'y a pas de données observables, il n'est pas possible d'établir des fonctions de vulnérabilité basées sur les observations ou sur le jugement d'experts. On utilise alors des modèles simples permettant de définir les mécanismes de ruptures probables et ainsi établir les degrés de dommages encourus sous l'effet d'un séisme donné.

Cette méthode a été utilisée pour l'estimation des pertes pour le district historique d'Alfama de Lisbonne (D'Ayala et al., 1997), qui suite à cette étude a été secoué par le séisme de Umbria-Marche en 1997. Le projet comprenait l'investigation par un système GIS des caractéristiques structurales de 200 bâtiments en maçonnerie non armée. Les informations sur les dimensions, l'état, l'usage, les matériaux, les ouvertures et autres caractéristiques ont été obtenues en parcourant les rues du district et en utilisant un formulaire de niveau I de type GNDT (Voir Sections 4.4 et 5.4). La description détaillée d'un nombre restreint de bâtiments (épaisseur des murs, présence de renforcement, etc.) a permis ensuite de procéder à l'analyse des mécanismes de rupture de chaque bâtiment, en considérant la maçonnerie comme étant un matériau rigide parfaitement plastique. La capacité en cisaillement statique équivalente sous l'effet de forces horizontales est ainsi déterminée en terme d'accélération critique a/g . Deux classes de ruptures étaient considérées : rupture hors du plan et la rupture en plan. Sept mécanismes de ruptures sont associés à ces classes. Les résultats ont permis de développer des relations entre la capacité en cisaillement (a/g) et les degrés de dommages selon l'échelle macrosismique européenne (EMS-92) associés aux mécanismes de rupture initiateurs. La corrélation entre l'accélération au sol et l'intensité sismique **MM** a permis ensuite de générer des fonctions de vulnérabilité pour ce cas particulier qu'on a comparées favorablement à celles obtenues par l'observation des dommages causés par le séisme historique de Lisbonne en 1755.

Une autre méthode analytique est celle développée par Calvi et utilisée pour évaluer les dommages potentiels pour la ville de Catania en Italie (Faccioli et al., 1999). Cette

approche utilise des états limites de déplacement associés à des critères définis d'initiation des dommages. Le modèle est très simple et n'utilise qu'un nombre limité de données : l'année de construction, le nombre d'étages et le matériau de construction (béton armé et maçonnerie). Les résultats de l'étude ont démontré que cette méthode analytique donne une évaluation des dommages équivalente à celle obtenue par la méthode de pointage couramment utilisée en Italie, la GNDT décrite à la Section 5.4. (Lang, 2002) propose une approche analytique semblable pour les bâtiments en béton armé de la ville de Bâle en Suisse (Voir Section 5.6.1).

Alors que la rapidité de l'approche analytique est directement reliée à la simplicité du modèle utilisé, sa précision ne l'est pas. C'est une approche beaucoup mieux adaptée pour l'évaluation d'un ensemble de bâtiments car elle a une valeur statistique.

L'utilisation de modèles simples telles que les approches analytiques (Lang, 2002), les macro-éléments (Augusti, Fisher) ou des modèles avec masses concentrées offre la possibilité d'analyser plusieurs types de structures et de considérer plusieurs niveaux de séisme. Plus les paramètres considérés sont nombreux, plus les résultats offrent la possibilité d'en faire un traitement statistique. Par contre, en augmentant le nombre de paramètres d'intrant on augmente aussi les incertitudes qui y sont associées. Certains auteurs se sont penchés sur le traitement statistique des résultats obtenus par l'analyse de modèles simples ou sur le traitement des incertitudes des données et des résultats.

Fisher (Fisher et al., 2002) propose un modèle dit « intégré » pour l'évaluation du risque sismique des bâtiments en considérant l'incertitude des données. Le comportement d'une centaine d'édifices est analysé à l'aide du logiciel HAZUS[®] et de modèles de macro-éléments inélastiques afin d'obtenir la période, la capacité en force latérale équivalente et le déplacement inter-étage élastique et maximum. Trois types de sol et trois spectres de dimensionnement sont considérés dans les analyses. Les résultats permettent d'établir l'accélération spectrale critique pour un niveau de performance et

d'y relier un index d'endommagement. Une particularité de l'approche de Fisher est l'utilisation de la logique floue basée sur le jugement expert permettant de considérer l'incertitude reliée aux données et à l'évaluation de la performance de la structure.

L'utilisation de modèles simples permet également d'obtenir éventuellement un index de performance pour un bâtiment. (Kanda et al., 1997) proposent une procédure d'analyse sismique par réponse inélastique d'une série de modèles soumis à plusieurs spectres de réponse (6 aléas sismiques différents). L'indice sismique « seismic margin index » β est évalué en posant une distribution de probabilité log-normale pour la réponse élastique équivalente et la résistance élastique de chaque étage d'un modèle, en appliquant les principes de fiabilité du second-moment (méthode de niveau II). Ceci permet de calculer la probabilité de rupture de chaque étage et d'obtenir l'indice sismique pour la structure.

Hong (Hong et al., 2003) calcule un index de performance en utilisant des modèles de comportement simplifiés et les critères de performance du FEMA-178. Il juge cependant que l'évaluation préliminaire telle que décrite dans la méthode du FEMA-178 présente certaines lacunes :

- Une liste des déficiences devrait être assemblée pour obtenir une conclusion rationnelle et compréhensive ;
- L'utilisation de connaissances empiriques pour la prise de décision est prépondérante ;
- L'existence de multi-critères de performances (capacité en cisaillement, déplacement inter-étage, etc...) rend le jugement final difficile ;
- Les incertitudes provenant des données disponibles incomplètes, des variations dans les précisions des commentaires des évaluateurs, des listes de déficiences incomplètes ou non représentatives, etc sont inhérentes à la procédure.

Hong propose une hiérarchie à multi-niveaux pour les critères de performance ; la structure dans son ensemble, les étages et les composantes. Les critères de performances diffèrent pour chaque niveau. Ces différents critères de performance sont évalués et pondérés à l'aide de facteurs de pondération linéaires basés sur la logique floue, c'est-à-

dire selon des variables qualitatives allant de « très pauvre » à « excellent ». Cette méthode permet de considérer les incertitudes mentionnées plus haut et de calculer à l'aide d'une méthode de composition simple un index de performance pour la structure.

L'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments historiques ou monuments est considérée par Augusti (Augusti et Ciampoli, 2000) comme une problématique différente des autres bâtiments. Il propose une évaluation comparative pour des monuments semblables en utilisant les macro-éléments. Cette approche analytique subdivise le bâtiment, ici une église, en éléments principaux tels que la façade, les parois, la coupole, la nef, etc.. Les modes de rupture propres à chaque macro-élément, en plan, hors du plan, etc. servent à évaluer leurs probabilités de rupture qui permettent subséquemment d'établir la probabilité de rupture de l'ensemble du bâtiment par une approche cinématique d'analyse limite (Augusti et al., 2001; Augusti et al., 2002). L'approche cinématique d'analyse limite suppose que la rupture sera définie par des critères de rupture dynamique et non statique.

4.4 Systèmes de pointage ou indice de vulnérabilité

Les systèmes de pointage ou de calcul d'indice de vulnérabilité ont pour objectif principal la sélection rapide des bâtiments aux fins d'un classement dans un inventaire. Des données nombreuses permettent d'avoir une approche statistique à l'interprétation des résultats.

Le principe de base de cette approche est l'attribution d'un pointage aux différents systèmes structuraux selon leur classe de vulnérabilité. L'observation de déficiences vient modifier le pointage de base jusqu'à l'obtention d'une cote finale se voulant le reflet de la vulnérabilité sismique du bâtiment par rapport à d'autres bâtiments du même type. Les cotes ou points attribués aux systèmes structuraux et aux déficiences sont généralement calibrés par des experts.

Le grand avantage des méthodes par systèmes de pointage est qu'il s'agit d'une méthode simple de la mesure de la vulnérabilité, mais sa valeur est essentiellement statistique. On doit également vérifier que des pointages égaux représentent réellement le même niveau de vulnérabilité indépendamment de la typologie des bâtiments et de leurs caractéristiques mécaniques, de même que des pointages différents doivent refléter l'écart réel de vulnérabilité. Cette approche ouvre la porte à l'estimation des pertes en la jumelant à des matrices de dommages probables. C'est ce qui a été fait entre autres pour l'estimation des pertes de la Ville de Portland en Oregon ((McCormack et Rad, 1997), Voir Section 5.2.2).

Les méthodes utilisées par un pays ou un autre se différencient généralement par le type de structures considérées, les éléments modifiant la performance, l'inclusion ou non des éléments non-structuraux et de la valeur économique des bâtiments. Parmi les pays possédant une méthodologie établie on retrouve entre autres les États-Unis, le Canada, la Suisse et l'Italie. Ces méthodes seront décrites au Chapitre 5.

4.5 Analyses détaillées

Les analyses détaillées font partie des méthodes d'évaluation les plus complexes et sont par conséquent mieux adaptées pour l'évaluation d'un bâtiment unique. Les différentes méthodes d'analyse détaillées peuvent être classées parmi les procédures linéaires (statique et dynamique) et les procédures non linéaires (statique et dynamique).

4.5.1 Analyse statique linéaire

L'analyse statique linéaire comme celle décrite dans les *Lignes directrices pour l'évaluation sismique des bâtiments existants* et dans l'ASCE 31-03 est l'approche des codes de conception. Le bâtiment est modélisé comme un système équivalent à un degré de liberté avec une rigidité élastique linéaire et un amortissement visqueux équivalent. La charge sismique est modélisée par une force latérale équivalente visant à reproduire le même niveau de contraintes et de déformations que le séisme représenté. De façon

générale, pour l'ensemble des codes de conception la force latérale équivalente, V , s'exerçant à la base de l'ouvrage est obtenue par le produit de la masse, m , par l'accélération spectrale, S_a , déterminée empiriquement ou par la méthode de Rayleigh's à partir de l'évaluation de la période du mode fondamental de vibration du bâtiment, T .

$$V = S_a m C_{global} \quad (3)$$

Le coefficient C_{global} inclut les effets de second ordre comme les fondations, l'importance du bâtiment, la diminution de la force due au comportement inélastique anticipé, et la dégradation de rigidité. Cette force est ensuite distribuée sur la hauteur de l'édifice et les efforts et déplacements résultant sont obtenus par une analyse statique linéaire.

Cette procédure est valable pour les bâtiments réguliers et dont la période fondamentale de vibration est prédominante. Pour les autres bâtiments, il est recommandé d'utiliser une analyse dynamique linéaire ou analyse du spectre de réponse.

4.5.2 Analyse dynamique linéaire

L'analyse dynamique linéaire ou l'analyse du spectre de réponse est utilisée pour les structures irrégulières ou en hauteur. Elle utilise tous les modes contribuant de manière importante à la réponse structurale totale. La structure est modélisée par un système à plusieurs degrés de libertés avec une matrice de rigidité linéaire élastique et une matrice d'amortissement visqueux équivalent. On peut ainsi calculer les réponses modales maximales. Ces contributions sont combinées statistiquement de façon à obtenir une réponse structurale approximative. Le séisme est généralement modélisé par une analyse spectrale modale ou par une analyse pas à pas (*time-history*) laquelle nécessite l'utilisation d'enregistrements de séismes. Dans les deux cas, les forces et les déplacements sont obtenus par une analyse linéaire élastique.

4.5.3 Analyse statique non linéaire

Dans la procédure d'analyse statique non linéaire, la non-linéarité de la relation force-déplacement des composantes individuelles de la structure est incorporée au modèle. Cette non-linéarité est due à la réponse inélastique du matériau. Plusieurs méthodes existent et certaines sont décrites dans le FEMA-273. La non-linéarité de la relation force-déplacement du bâtiment est représentée par une courbe de capacité, c'est-à-dire une courbe donnant la variation du cisaillement à la base en fonction du déplacement maximum. Cette courbe est obtenue en soumettant progressivement la structure à des forces latérales ou des déplacements dont l'intensité augmente jusqu'à l'effondrement, et qui sont distribués le long de la structure selon le mode de vibration fondamental. L'avantage d'une telle méthode est qu'elle considère l'inélasticité des matériaux et donne une meilleure approximation des efforts et déformations attendus durant un séisme. Par contre, seul le mode fondamental de vibration est considéré, rendant cette méthode moins appropriée pour les bâtiments irréguliers.

4.5.4 Analyse dynamique non linéaire

Cette méthode est semblable à la méthode statique non linéaire car elle considère la réponse inélastique des matériaux, et le séisme est modélisé par une analyse pas à pas. Il s'agit de la méthode la plus sophistiquée et qui est mieux adaptée aux applications de recherche pour décrire la réponse détaillée d'une structure. La réponse calculée est très sensible aux caractéristiques du séisme utilisé et il est préférable d'utiliser plusieurs enregistrements de séismes.

5 EXEMPLES D'APPLICATION DES MÉTHODES D'ÉVALUATION

Parmi les méthodes décrites au chapitre précédent certaines présentent un intérêt particulier pour l'étude de la vulnérabilité au Québec. Ces dernières sont particulièrement adaptées à des ensembles de bâtiments situés dans des régions de sismicité faible à moyenne et pour lesquelles on ne possède pas beaucoup de données sur la performance des structures aux séismes passés. C'est le cas des systèmes de pointage et des méthodes d'évaluation qui utilisent l'échelle macrosismique européenne. Dans ce chapitre, on décrit plus en détail ces approches ainsi que des exemples de leur application en Europe et en Amérique.

Toutes les méthodes de pointage sont basées sur le même principe d'attribution d'une cote à un bâtiment afin de refléter sa vulnérabilité par rapport à d'autres bâtiments. Quatre grilles d'évaluation sont présentées ici en mettant en évidence les similarités et les différences, et en distinguant les cotes référant au risque sismique et aux éléments le composant : l'aléa sismique, la vulnérabilité du bâti, et la valeur économique et sociale.

5.1 Manuel de sélection des bâtiments en vue de leur évaluation sismique (IRC-CNRC, 1992b)

Au Canada, la méthode de pointage est décrite dans le *Manuel de sélection des bâtiments en vue de leur évaluation sismique* (IRC-CNRC, 1992b). Basée sur le rapport ATC-21 (1988) des États-Unis, décrit à la section suivante, elle est adaptée à la sismicité et aux méthodes de construction du Canada. Des cotes sont attribuées à différents éléments du bâtiment après une inspection sur place, intérieure ou extérieure, ou suite à l'examen des dessins. Les bâtiments visés sont ceux couverts par la partie IV du Code National du bâtiment à l'exclusion des petits bâtiments (unifamilial ou petit plurifamilial). Les pointages considèrent les dangers non structuraux, l'importance du bâtiment et la catégorie d'occupation. Les cotes finales sont l'indice structural, **IS**, l'indice non structural, **INS**, et l'indice de priorité sismique, **IPS**, ce dernier étant la somme des deux indices précédents. Les indices sont obtenus selon l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
IS &= A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot E \\
INS &= B \cdot E \cdot F \\
IPS &= IS + INS
\end{aligned}
\tag{4}$$

La classification typologique de 15 types de structures est donnée au Tableau III ainsi que les cotes structurales de base, **C**, attribuées selon l'année de conception. La cote **C** varie de 1, pour les structures légères en acier ou les bâtiments construits après l'année de référence pour la conception sismique selon le CNB, à 3,5 pour les murs porteurs en maçonnerie non armée. L'indice structural final **IS** est obtenu en multipliant la cote structurale de base **C** du Tableau III par les cotes **A**, **B**, **D**, et **E** représentant respectivement : la sismicité, l'état du sol, les irrégularités du bâtiment et l'importance du bâtiment. Chacune de ces cotes varie selon que le bâtiment a été conçu avant ou après l'introduction des normes parasismiques, soit 1970 pour la structure et 1965 pour la sismicité et l'état du sol. La cote de base **C** considère également la présence de certains éléments parasismiques dans la conception des bâtiments construits après 1970 mais avant l'année de référence pour la conception sismique, soit 1990, ou 1985 pour les structures de béton.

L'indice non structural est le produit des cotes représentant l'état du sol **B**, l'importance du bâtiment **E** et les dangers liés aux éléments non structuraux **F**.

L'indice de priorité sismique **IPS** reflète l'écart du bâtiment par rapport aux exigences sismiques du CNB 1990. Un **IPS** supérieur à **30** indique qu'une analyse détaillée, telle que décrite à la Section 3.2, est requise.

Il est intéressant de noter que bien qu'aucune probabilité ne soit rattachée aux indices, l'indice structural calculé reflète en quelque sorte le risque sismique, tel qu'indiqué à l'équation 5. Il est le produit de l'aléa sismique régional et local, défini par les cotes **A** et **B**, de la vulnérabilité du bâti définie par le produit des cotes **C**, **D**, et de la valeur du

bâtiment en terme social (occupation et fonction), définie par la cote **E**. La valeur économique du bâtiment n'est pas prise en compte.

$$\begin{array}{ccccccc}
 \underline{IS} & = & (\underline{A \cdot B}) & \times & (\underline{C \cdot D}) & \times & \underline{E} \\
 \text{Indice Structural} & & \text{Sismicité} \times \text{État du sol} & & \text{(Type de structure} \times \text{Irrégularités)} & & \text{Importance} \\
 \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 \underline{R} & = & \underline{A} & \times & \underline{Vu} & \times & \underline{Va} \\
 \text{Risque} & & \text{Aléa sismique} & & \text{Vulnérabilité du bati} & & \text{Importance}
 \end{array} \quad (5)$$

Tableau III : Classification typologique et cotes structurales de base (CNRC 1992)

		Cote structurale de base C		
		Année de construction		
Type de structure	Description	< 70		> AR*
Structure de bois	OLB Ossature légère en bois	1,2	1,2	1,0
	PPB Poteaux et poutres en bois	2,0	2,0	1,0
Ossature en acier	OLA légère en acier	1,0	1,0	1,0
	OAM résistant aux moments	1,2	1,2	1,0
	OCA contreventée en acier	1,5	1,5	1,0
	AMB avec murs de cisaillement en béton	2,0	1,5	1,0
	AMR avec murs de remplissage en maçonnerie	3,0	2,0	1,0
Béton	OBM Ossature en béton résistant aux moments	2,5	1,5	1,0
	MBC Murs de béton travaillant en cisaillement	2,0	1,5	1,0
	BMR Ossature avec murs de remplissage en maçonnerie	3,0	2,0	1,0
	OBP Ossature en béton préfabriquée	2,5	1,8	1,0
	MBP Murs en béton préfabriqués	2,0	1,5	1,0
Maçonnerie	MAL Murs porteurs en maçonnerie armée, toits et planchers en platelages de bois ou de métal	2,5	1,5	1,0
	MAB Murs porteurs en maçonnerie armée avec diaphragmes en béton	2,5	1,5	1,0
	MNA Bâtiments à murs porteurs en maçonnerie non armée	3,5	3,5	

* : Année de référence pour la conception sismique. AR=1990 sauf pour le béton AR=1985

Il faut noter que bien qu'il soit mentionné dans le Manuel que l'approche originale de l'ATC-21 est adaptée aux méthodes de construction du Canada, les descriptifs des types de structures sont identiques à ceux de l'ATC-21.

5.2 Procédure rapide d'évaluation sismique visuelle (FEMA-154)

Suite au rapport ATC-21 le Federal Emergency Management Agency proposait en 1988 une procédure rapide d'évaluation sismique pour identifier les systèmes de résistance latérale primaires et les déficiences sismiques des bâtiments. Cette procédure est décrite dans les documents FEMA-154 et FEMA-155 dont la plus récente révision a été produite en 2002 (BSSC, 1988a; BSSC, 1988b; BSSC, 2002a; BSSC, 2002b).

5.2.1 Principes de la méthode

Suite à une évaluation visuelle rapide d'un bâtiment, on lui attribue une cote structurale de base (**BSH** : Basic Structural Hazard) selon sa typologie parmi 15 types de bâtiments définis au Tableau IV et selon la sismicité de la région définie par l'accélération maximale au sol (pga) (voir Tableau V). Cette cote varie de 1,6 pour les ossatures en béton armé avec des murs de remplissage en maçonnerie en zone de haute sismicité à 7,4 pour les structures en bois de charpente dans les zones de faible sismicité.

Tableau IV : Classification typologique et cotes structurales de base du FEMA-154 2002

Type de structure	Description	Cote initiale BSH		
		Sismicité		
		Faible	Moyenne	Élevée
Structure de bois	W1 Charpente de bois ($< 5000 \text{ pi}^2$)	7,4	5,2	4,4
	W2 Charpente de bois ($> 5000 \text{ pi}^2$)	6,0	4,8	3,8
Ossature en acier	S1 résistant au moment	4,6	3,6	2,8
	S2 contreventée en acier	4,8	3,6	3,0
	S3 légère en acier	4,6	3,8	3,2
	S4 avec murs de cisaillement en béton	4,8	3,6	2,8
	S5 avec murs de remplissage en maçonnerie	5,0	3,6	2,0
Béton	C1 Ossature en béton résistant aux moments	4,4	3,0	2,5
	C2 Murs de béton travaillant en cisaillement	4,8	3,6	2,8
	C3 Ossature avec murs de remplissage en maçonnerie	4,8	3,2	1,6
	PC1 Murs en béton préfabriqués	4,4	3,2	2,6
	PC2 Ossature en béton préfabriquée	4,6	3,2	2,4
Maçonnerie	RM1 M. porteuse armée diaphragmes flexibles	4,8	3,6	2,8
	RM2 M. porteuse armée diaphragmes rigides	4,6	3,4	2,8
	URM Maçonnerie non armée	4,6	3,4	1,8

Tableau V : Sismicité définie dans le FEMA-154 2002

Sismicité	PGA (T = 0,2 sec)	PGA (T = 1 sec)	MMI*
Faible	<0,167g	<0,067g	VI
Moyenne	0,167g à 0,5g	0,067g à 0,2g	VII, VIII
Élevée	≥ 0,5g	≥ 0,2g	IX

* Évaluation de l'échelle équivalente MMI selon (McCormack et Rad, 1997)

Dans la première édition du FEMA-154 en 1988 (ou ATC-21), la cote structurale de base (**BSH**) était développée à partir des matrices de dommages probables définies dans le rapport ATC-13 (ATC, 1985) pour 12 types de bâtiments. Dans ce rapport, les probabilités de dommages étaient établies à partir de l'opinion d'experts pour différentes intensités sismiques de l'échelle de Mercalli modifiée (MM). Dans la deuxième édition du FEMA - 154 (BSSC, 2002a) on intègre les nouvelles connaissances sur l'aléa sismique et sur la performance des bâtiments. La cote **BSH** est maintenant établie à partir des courbes de fragilité obtenues par le logiciel HAZUS[®], qui caractérise l'aléa sismique en termes d'accélération spectrale maximale. Les raisons principales ayant amené à ces changements sont de plusieurs ordres : (1) la tendance générale parmi les ingénieurs à utiliser l'accélération spectrale comme paramètre de dimensionnement, (2) la disponibilité des cartes d'aléa sismique en terme d'accélération spectrale, (3) la corrélation de plus en plus apparente entre la performance des bâtiments et le niveau d'accélération spectrale, (4) les efforts continus du FEMA pour améliorer les courbes de fragilité de HAZUS[®] pour 12 types de bâtiments et (5) le fait que HAZUS[®] constitue aux États-Unis une source reconnue et complète d'information.

Dans le FEMA-154 2002, la cote **BSH** correspond à la probabilité d'effondrement d'un type de bâtiment pour le séisme maximum probable. Elle est calculée par le négatif du logarithme en base 10 de cette probabilité.

$$BSH_{2002} = -\log_{10} [\text{Pr}(\text{Effondrement})] \quad (6)$$

La cote structurale de base est ensuite modifiée par l'ajout ou la soustraction de facteurs de modification de la performance **SM** établis selon les déficiences observées pour les différentes classes de bâtiment. La cote finale **S** est la mesure de la probabilité d'effondrement du bâtiment à l'étude.

$$S = BSH + \sum SM \quad (7)$$

Les caractéristiques structurales considérées par les facteurs de modification **SM** sont les suivantes :

- Hauteur du bâtiment : moyenne ou élevée
- Irrégularités : horizontales ou verticales
- Année de conception et de construction : pré-code et post-année de référence
- Types de sol (six)

La cote finale **S** varie théoriquement entre 0 et 9,8 et on recommande de procéder à une analyse détaillée pour tout bâtiment ayant obtenu une cote inférieure à 2.

Dans cette approche, la cote structurale de base **BSH** dépend de la zone d'aléa sismique et de la vulnérabilité reliée à la tenue au séisme du bâti (typologie et déficiences structurales). Il s'agit donc d'une cote donnant la classification du risque sismique associé au bâtiment sans considération de la valeur des pertes économiques ou humaines. Seule une note est indiquée sur le formulaire concernant le nombre de personnes occupant le bâtiment et la classe de fonctions de ce dernier.

5.2.2 Utilisation du FEMA-154 (ATC-21) pour l'étude de la Ville de Portland en Oregon

En 1997, McCormack a utilisé la procédure rapide d'évaluation du FEMA-154 (ATC-21) avec la distribution de dommages probables établies dans l'ATC-13 en 1985 pour évaluer la vulnérabilité sismique de 30 000 bâtiments non résidentiels de la Ville de Portland en Oregon (McCormack et Rad, 1997). Cette étude est basée sur les données disponibles dans la première version du FEMA-154 ou ATC-21 de 1985.

Le modèle proposé est essentiellement une extension des approches de l'ATC-13 et de l'ATC-21, avec un ajustement apporté à la moyenne au ratio de dommage moyen (MDF) de l'ATC-13 afin de considérer les sites sismiquement sensibles et les attributs de construction tels que décrits par les facteurs de modification de performance (SM) dans l'ATC-21 (Voir Section 5.2.1). À partir des données recueillies sur chaque bâtiment selon le formulaire ATC-21, et d'un système GIS, un algorithme permet de calculer la cote structurale finale **S** et de la modifier selon les conditions géologiques du site, pour finalement obtenir une évaluation des dommages. Les données comprennent : l'adresse, l'année de construction, le quartier, le nombre d'étages, le nom de l'édifice, le type d'occupation, le nombre d'usagers, les risques reliés aux chutes d'éléments non structuraux, le type de bâtiments, les facteurs de modifications de la performance, les étages flexibles et la torsion. Les données sur les conditions du sol ont été considérées à partir de cartes microsismiques de la région. Les résultats obtenus sont exprimés en pourcentage des dommages sur les bâtiments et en pertes de vies ou blessures.

Utilisation de l'approche ATC-13 et ATC-21

La cote structurale de base BSH de l'ATC-21 (1985) représente la probabilité que le facteur de dommages DF (exprimé en pourcentage de la valeur de remplacement) excède 60% de la valeur des bâtiments. Cette proportion est généralement acceptée comme le niveau pour lequel plusieurs structures sont une perte totale. C'est la limite inférieure approximative à partir de laquelle le potentiel d'effondrement et la menace pour la sécurité sont significatifs. Dans le rapport ATC-13, établissant les matrices de dommages, la distribution du DF pour une accélération au sol donnée est une distribution log-normale. On obtient de cette distribution la moyenne α , l'écart-type β et la variable normale réduite z pour la probabilité que DF excède 60%. La cote structurale de base est le négatif du logarithme en base 10 de cette probabilité.

$$BSH_{1988} = -\log_{10} [\Pr(DF \geq 60\%)] \quad (8)$$

La Figure 6 et la Figure 7 illustrent la distribution log-normale de DF et la distribution normale de la fonction $\ln(DF)$ ainsi que les données statistiques nécessaires au calcul de BSH.

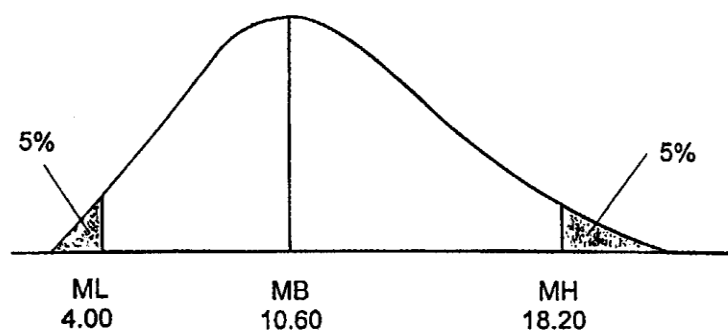


Figure 6 : Distribution log-normale de DF

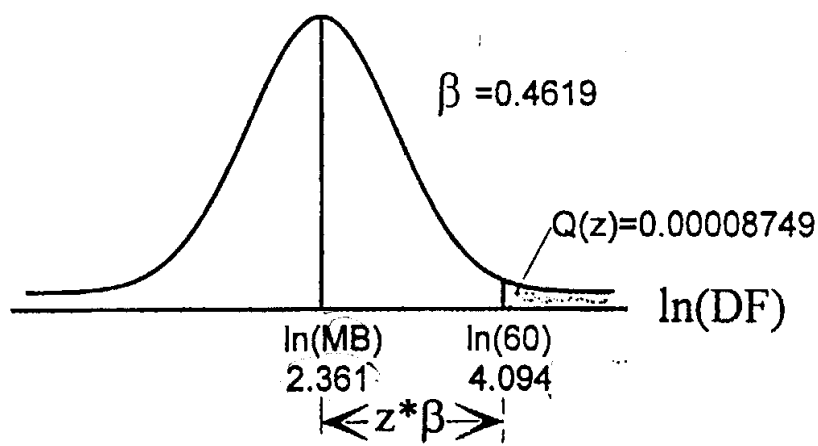


Figure 7 : Distribution normale de $\ln(DF)$

La méthodologie présentée dans le rapport ATC-21 (ou le FEMA-154) a pour objectif d'identifier et de coter les caractéristiques structurales. Il n'y a cependant pas de

méthode pour estimer de facteur de dommages DF. Une difficulté additionnelle vient du fait, que bien que BSH soit directement relié à DF, l'application des facteurs de modifications de la performance (SM) change la probabilité de dommages. Par exemple, un BSH de 3,02 sans ajout d'un facteur de modification de la performance SM donne une cote structurale finale S de 3,02. On peut alors renversé l'équation (8) et écrire :

$$[\Pr(DF \geq 60\%)] = 10^{-S} \quad (9)$$

La probabilité que DF excède 60% est alors de :

$$[\Pr(DF \geq 60\%)] = 10^{-(3,02)} = 0,0009528 \quad (10)$$

En ajoutant un SM de -1,0, la cote structurale devient 2,02 et la probabilité que DF excède 60% est alors 10 fois supérieure.

$$[\Pr(DF \geq 60\%)] = 10^{-(2,02)} = 0,009549 \quad (11)$$

Ceci illustre, selon McCormark, le manque de corrélation entre les SM et le BSH et rend difficile la corrélation entre la cote structurale S et le facteur de dommage DF.

Corrélation entre les facteurs de dommages DF et la cote structurale S

Afin d'utiliser les cotes structurales S calculées pour la Ville de Portland pour obtenir la distribution de dommages probables, McCormack utilise le ratio de dommages moyen (MDF), c'est-à-dire le DF avec une probabilité de dépassement de 50%. Il suppose, raisonnablement, que le MDF est relié à la cote structurale S par une déviation standard β égale à celle de la distribution normale de $\ln(\text{DF})$. Cette hypothèse permet de calculer une relation continue entre MDF et S pour cinq niveaux d'accélération au sol ($\text{pga} = 0,05, 0,10, 0,22, 0,47$ et $1,02\text{g}$). Cette procédure a été répétée pour les 12 types de structures décrites dans l'ATC-21, résultant en un total de 60 courbes de dommages.

Il intègre également des modifications au calcul de la cote structurale S pour considérer les conditions de site dont, un facteur d'amplification, un facteur de liquéfaction et un facteur de pente. Ces facteurs sont pris en compte de la même manière que les facteurs de modification de performance. Finalement, à partir des relations entre DF et le nombre d'occupants proposées dans l'ATC-13, il calcule la courbe donnant la portion de morts et de blessés graves en fonction des ratios de dommages.

5.3 La grille d'évaluation suisse (Lateltin, 2003)

La grille d'évaluation suisse a été établie afin de répondre à une décision du Conseil fédéral exigeant de recenser les bâtiments de la confédération des classes de fonctions II et III situés dans les zones d'aléa sismique 2 et 3 et d'en contrôler la tenue au séisme d'ici la fin 2004. La grille d'évaluation constitue l'outil de travail élaboré pour réaliser la première phase de ce programme. Son esprit est de même nature que les systèmes canadien et américain, mais considère en plus un indicateur pour la valeur d'assurance des bâtiments. L'indicateur de risque résultant est donc en millions de francs suisses.

La procédure d'évaluation repose principalement sur l'étude des plans d'architecte et exceptionnellement sur une visite du bâtiment. Elle vise à obtenir une estimation des risques reliés aux dommages corporels directs, aux dégâts aux bâtiments et aux dégâts

matériels. L'indicateur de risque **RZPS** est le résultat du produit d'un indicateur de dommages, corporels et matériels, **AZPS**, et d'un indicateur **WZ** de la probabilité d'effondrement. L'équation suivante résume la relation entre les différents indicateurs.

$$RZPS = AZPS \times WZ$$

$$RZPS = [(ADS + ADP) \cdot AIF] \times [WEP \cdot WB \cdot (1 + \sum Wi)] \quad (12)$$

L'indicateur **AZPS** est obtenu en combinant les indicateurs **ADS** relatif aux coûts, et l'indicateur **ADP** relatif aux dommages corporels. **ADS** donne la valeur d'assurance augmentée du coût inhérent au démantèlement des ruines et de la valeur du contenu. L'indicateur **ADP** est calculé à partir du taux d'occupation. La somme de ces deux indicateurs est ensuite multipliée par **AIF** qui est directement relié à la classe de fonction du bâtiment ou son importance. Le résultat rend compte des pertes associées à la valeur économique et sociale du bâtiment.

L'indicateur **WZ** reflétant la probabilité d'effondrement combine l'aléa sismique par les indicateurs **WEP** (zone sismique et année de conception) et **WB** (effet de site) et la tenue au séisme de la structure porteuse par la sommation de plusieurs indicateurs **Wi** considérant différentes caractéristiques structurales du bâtiment.

On peut reprendre l'équation (12) et mettre en évidence les termes reliés à l'aléa, la vulnérabilité et la valeur selon l'équation (2) définissant le risque sismique.

$$RZPS = AZPS \times WZ$$

$$\begin{array}{ccccccc} \underbrace{RZPS}_{\text{Risque}} & = & \underbrace{[(ADS + ADP) \cdot AIF]}_{\text{(Valeur économique et humaine) \times Importance}} & \times & \left[\underbrace{WEP \cdot WB}_{\text{(Aléa régional \times Aléa local)}} \times \underbrace{(1 + \sum Wi)}_{\text{Tenue au séisme}} \right] & & (13) \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ \underbrace{\widehat{R}}_{\text{Risque}} & = & \underbrace{\widehat{Va}}_{\text{Valeur économique et sociale}} & \times & \underbrace{\widehat{A}}_{\text{Aléa sismique}} & \times & \underbrace{\widehat{Vu}}_{\text{Vulnérabilité du bati}} \end{array}$$

Parmi les trois méthodes de calcul d'indicateurs de risques, la méthode suisse est celle dont la définition des indicateurs reflète de façon la plus complète la définition du risque sismique, car elle considère la valeur économique et sociale des pertes encourues.

5.4 La méthode GNDT, Italie

En Italie, l'utilisation d'une technique d'évaluation pour assigner des indices de vulnérabilité a été proposée pour la première fois par Benedetti et Petrini en 1984. Cette technique a été développée par la suite par le Groupe national de défense contre les tremblements de terre (GNDT) du Conseil national de recherche de l'Italie (CNR). La méthode GNDT, maintenant largement utilisée, a permis de répertorier des milliers de bâtiments à travers l'Italie (Augusti et Ciampoli, 2000). Elle comporte généralement deux niveaux d'évaluation avec un formulaire informatif et un formulaire détaillé pour les bâtiments en maçonnerie et en béton armé nombreux en Europe. Contrairement aux méthodes précédentes, le formulaire détaillé, ou de niveau II, permet de considérer les différents modes de rupture probables et des détails de construction pour les bâtiments en maçonnerie et les bâtiments en béton armé.

L'indice de vulnérabilité des bâtiments en maçonnerie est calculé avec le formulaire de niveau II, en combinant des informations descriptives (typologiques et qualitatives) et des informations quantitatives pour 11 items, décrits au Tableau VI. Des évaluateurs entraînés assignent à chaque item une classe de vulnérabilité parmi une possibilité de 4 (A-B-C-D). Ces classes de vulnérabilité sont croissantes contrairement à celles de l'EMS-98 qui sont décroissantes et au nombre de 6 (Voir Section 5.5). Pour chaque item et chaque classe correspond une cote S_i dont la contribution est pondérée par un facteur W_i . L'indice de vulnérabilité représentant la qualité sismique du bâtiment est obtenu en faisant la sommation des cotes S pondérées, tel que montré à l'équation (14).

$$V_g = \sum_{i=1}^{11} S_i \cdot W_i \quad (14)$$

L'indice ainsi obtenu est un indice de vulnérabilité et non un indice de risque sismique car il ne considère pas l'aléa sismique. Selon (Augusti et Ciampoli, 2000) un des problèmes associés à cette approche, en plus de la calibration difficile des coefficients de pondération, est que l'influence du comportement du sol sur la vulnérabilité soit négligée.

Tableau VI : Liste des items du formulaire de niveau II du GNDT (Maçonnerie)

Item	Description
1	Type et organisation du système porteur
2	Qualité du système porteur
3	Résistance conventionnelle
4	Implantation et fondations
5	Planchers et toitures (diaphragme)
6	Configuration en plan
7	Configuration en élévation
8	Maçonneries
9	Toiture
10	Éléments non structuraux
11	État de fait

Les données récoltées avec cette approche sont incorporées dans une base de données nationale. Plusieurs auteurs ont incorporé des modifications à la méthode afin de calculer différents indices de vulnérabilité. En utilisant les informations des formulaires du GNDT (Casciati et al., 1995) proposent une méthode pour calculer la qualité sismique d'un bâtiment en maçonnerie à l'aide d'un paramètre V_k . Ce paramètre considère un modèle de rupture par cisaillement qui prend en compte les déformations de flexion. Dans leur publication, ils intègrent dans un seul code de calcul l'évaluation des différents indices de vulnérabilité développés, comme par exemple l'indice de vulnérabilité VI_f qui considère deux modes de rupture pour les bâtiments en maçonnerie : rupture en plan et la rupture hors du plan. Cet indice est obtenu en combinant trois paramètres I_1 , I_2 et I_3 dérivés des modèles de rupture proposés dans la méthode GNDT. Les deux paramètres I_1 et I_2 sont reliés directement à quatre des onze

items du formulaire détaillé (voir Tableau VI). Les sept autres items servent à évaluer le troisième paramètre I_3 .

5.5 L'échelle macrosismique européenne EMS-98

Les échelles macrosismiques sont des fonctions de vulnérabilité basées sur l'observation de la vulnérabilité lors de séismes passés et sur le jugement d'experts. L'objectif premier de ces échelles est de mesurer la gravité d'une secousse sismique en fonction des effets observés dans une zone limitée mais elles peuvent également être utilisées pour des études de vulnérabilité.

5.5.1 Description de l'EMS-98

L'Échelle Macrosismique Européenne (Grünthal, 1998) contient 12 intensités (décrites en Annexe A) évaluées à partir des dommages observés sur les bâtiments et l'effet des secousses sur les gens et l'environnement. Créée en 1992 sous la recommandation de la XXIII^e Assemblée générale de la Commission sismologique européenne et révisée en 1998, elle se distingue des échelles existantes, comme l'échelle MSK qui lui a servi de point de départ, par l'utilisation des classes de vulnérabilité et des structures calculées. On distingue 15 types de structures auxquelles on assigne la classe de vulnérabilité la plus probable parmi un total de six classes. L'attribution de la classe la plus probable est généralement faite à partir d'opinion d'experts. Cette classification est donnée à la Figure 8.

Type de structure		Classe de vulnérabilité					
		A	B	C	D	E	F
MAÇONNERIE	Moellon brut, pierre tout venant	○					
	Brique crue (adobe)	○—					
	Pierre brute	-○					
	Pierre massive		—○—				
	Non renforcée, avec des éléments préfabriques	-○—					
	Non renforcée, avec des planchers en béton armé		—○—				
	Renforcée ou chaînée			-○—			
BÉTON ARMÉ	Ossature sans conception parasismique (CPS)	-.....—○—					
	Ossature avec un niveau moyen de CPS		-.....—○—				
	Ossature avec un bon niveau de CPS			-.....—○—			
	Murs sans CPS		-.....—○—				
	Murs avec un niveau moyen de CPS			-.....—○—			
	Murs avec un bon niveau de CPS				-.....—○—		
ACIER	Structures en charpente métallique			-.....—○—			
BOIS	Structures en bois de charpente		-.....—○—				

○ Classe de vulnérabilité la plus probable; — Intervalle probable;
..... Intervalle de probabilité plus faible, cas exceptionnels

Figure 8 : Classes de vulnérabilité de l'EMS 98

Afin de définir l'intensité sismique correspondant à une secousse, on utilise les dommages observés sur les différentes classes de vulnérabilité de structures. Cinq degrés de dommages sont considérés et peuvent se résumer ainsi :

- Degré 1 : Dommages négligeables à légers (pas de dommages structuraux et de légers dommages non structuraux)
- Degré 2 : Dommages modérés (légers dommages structuraux et dommages non structuraux modérés)
- Degré 3 : Dommages importants à lourds (dommages structuraux modérés et lourds dommages non structuraux)
- Degré 4 : Très lourds dommages (lourds dommages structuraux et très lourds dommages non structuraux)
- Degré 5 : Destruction (très lourds dommages structuraux)

L'EMS-98 propose une corrélation entre l'intensité sismique et l'endommagement des bâtiments. Elle utilise pour ce faire des indicateurs du type « un peu », « beaucoup » et « la plupart ». Par exemple, l'intensité EMS VII se décrit ainsi :

VII. Dégâts

*a) **La plupart** des personnes sont effrayées et essaient de se précipiter dehors. De **nombreuses** personnes éprouvent des difficultés à se tenir debout, en particulier aux étages supérieurs.*

*b) Les meubles sont déplacés et les meubles dont le centre de gravité est élevé peuvent se retourner. Les objets tombent des étagères en **grand nombre**. Les récipients, les réservoirs et les piscines débordent.*

*c) De **nombreux** bâtiments de la classe de vulnérabilité A subissent des dégâts de degré 3, **quelques-uns** de degré 4.*

*De **nombreux** bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 2, **quelques-uns** de degré 3.*

***Quelques** bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 2.*

***Quelques** bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 1.*

La Figure 9 indique l'interprétation qu'on doit faire de ces indicateurs.

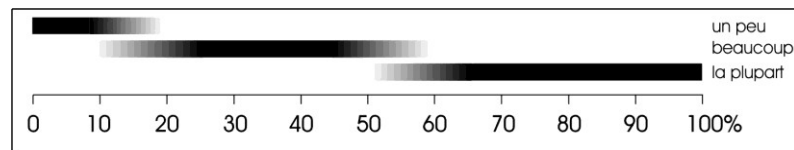


Figure 9 : Description des indicateurs de l'EMS-98

La description des dégâts à une certaine intensité mentionne généralement le degré de dégât le plus élevé auquel on peut s'attendre. Dans un cas idéalisé, on peut considérer que la distribution des dégâts entre les différents degrés pour des bâtiments de même vulnérabilité, soumis à la même intensité, est une distribution normale autour de la moyenne des dégâts du degré. Les degrés de dégâts de l'échelle EMS-98 sont une représentation discrète d'un continuum de degrés possibles de dégâts. La Figure 10 illustre les courbes de dégâts qu'on obtiendrait pour une classe de vulnérabilité donnée. On remarque qu'à une intensité sismique supérieure (courbe **c**) et à une intensité sismique inférieure (courbe **a**), la distribution normale devient respectivement, monotone croissante et monotone décroissante étant donné que les degrés de dommages des extrémités représentent des situations limites. Les cercles sur ces courbes sont les descriptions des dégâts aux différentes intensités de l'échelle EMS-98.

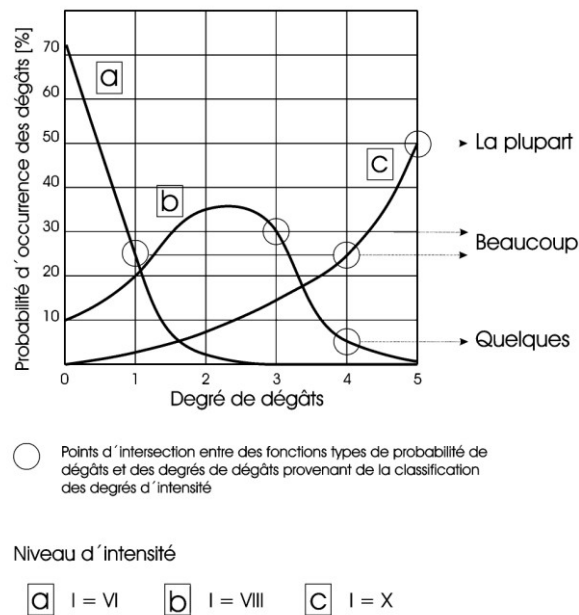


Figure 10 : Courbes de dégâts typiques pour une classe de vulnérabilité (EMS-98)

Ces courbes de dégâts peuvent être définies pour chaque classe de vulnérabilité, ainsi que pour des constructions différentes à celles décrites dans l'EMS-98, et éventuellement servir à des études d'estimation des dégâts potentiels.

5.5.2 Utilisation de l'EMS-98 pour l'évaluation de la vulnérabilité de la Ville d'Aigle en Suisse

Bien que conçues pour qualifier une secousse sismique après coup, on peut utiliser une échelle macrosismique dans un objectif d'évaluation de la vulnérabilité potentielle d'un ensemble de bâtiments dont les caractéristiques correspondent aux classes de bâtiments définis. La classification de l'EMS-98 a servi entre autres pour l'étude de la vulnérabilité sismique de la ville d'Aigle en Suisse (Brennet et al., 2001; Pelissier et Badoux, 2003).

À partir de la classification des structures de l'EMS-98 (Figure 8) le pourcentage de bâtiments se retrouvant dans chaque catégorie sismique est établi en parcourant les rues des différents quartiers de la ville. La répartition de chaque type de structure parmi les classes de vulnérabilité, A à F, est effectuée en attribuant un pourcentage aux symboles utilisés à la Figure 8. Par exemple, pour la ville d'Aigle, on a interprété quantitativement ces symboles : le trait tillé signifie 10%, le trait plein 20% et le cercle est la différence entre le 100% et les autres classes. Cette répartition obtenue est appliquée aux bâtiments de 3 et 3,5 étages. La répartition est ensuite modifiée selon le nombre d'étages d'après les informations disponibles dans la littérature sachant qu'un nombre d'étages supérieur augmente la vulnérabilité. La Figure 11 illustre la répartition des bâtiments de la Ville d'Aigle parmi les classes de vulnérabilité. Cette répartition est ensuite combinée avec les degrés de dommages de l'EMS-98 pour obtenir une courbe de vulnérabilité du bâti.

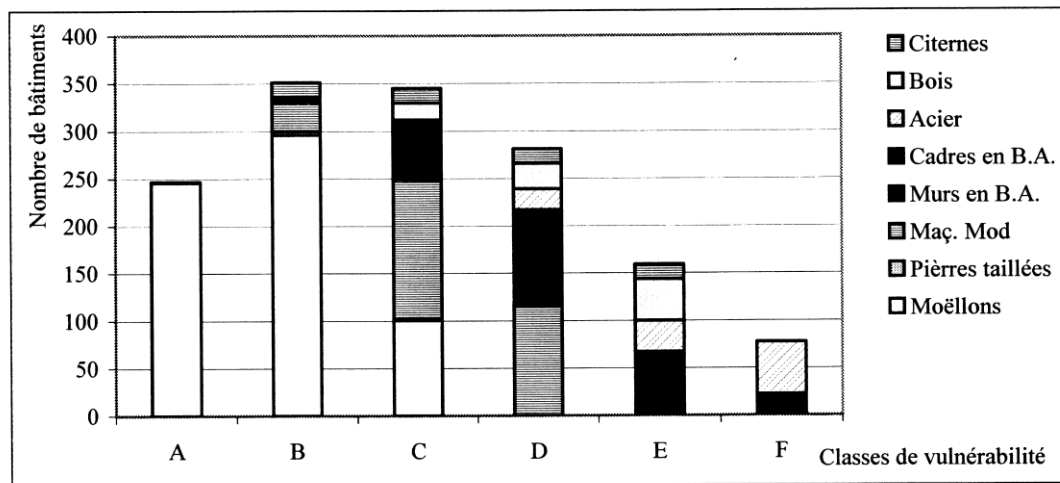


Figure 11 : Répartition des bâtiments de la Ville d'Aigle

L'objectif d'utiliser les classes de vulnérabilité de l'EMS-98 est dans un premier temps de construire des matrices de dommages probables servant à définir les fonctions de vulnérabilité. Pour déterminer la distribution des dommages EMS-98 du bâti on doit attribuer aux indicateurs EMS, « un peu », « beaucoup » et « la plupart », des valeurs quantitatives qui varieront selon le niveau de vulnérabilité considéré (Tableau VII).

Tableau VII : Pourcentages attribués aux indicateurs de l'EMS-98

	Cas optimiste	Cas normal	Cas pessimiste
Un peu	5%	8%	15%
Beaucoup	30%	35%	40%
La plupart	70%	75%	65%

En allouant à chaque classe de vulnérabilité une répartition dans les degrés de dommage de l'EMS-98 on dérive des matrices de probabilité de dommages (DPM) pour chaque intensité sismique. La matrice de dommage pour une intensité MSK de VII pour la vulnérabilité pessimiste de la ville d'Aigle est reproduite au Tableau VIII. À partir des matrices de dommages probables ainsi obtenues et de la répartition des bâtiments parmi les classes de vulnérabilité (Figure 11), on établit les courbes de vulnérabilité, soit les

dommages par degré de l'ensemble du bâti. La Figure 12 reproduit graphiquement ces courbes de vulnérabilité.

Tableau VIII: Détermination des degrés de dommages EMS-98 en pourcentage

MSK Intensité - VII					
A	DG5	0	B	DG5	0
	DG4	5		DG4	0
	DG3	25		DG3	5
	DG2	30		DG2	25
	DG1	30		DG1	40
	Rien	10		Rien	30
C	DG5	0	D	DG5	0
	DG4	0		DG4	0
	DG3	0		DG3	0
	DG2	5		DG2	0
	DG1	25		DG1	5
	Rien	75		Rien	95
E	DG5	0	F	DG5	0
	DG4	0		DG4	0
	DG3	0		DG3	0
	DG2	0		DG2	0
	DG1	0		DG1	0
	Rien	100		Rien	100

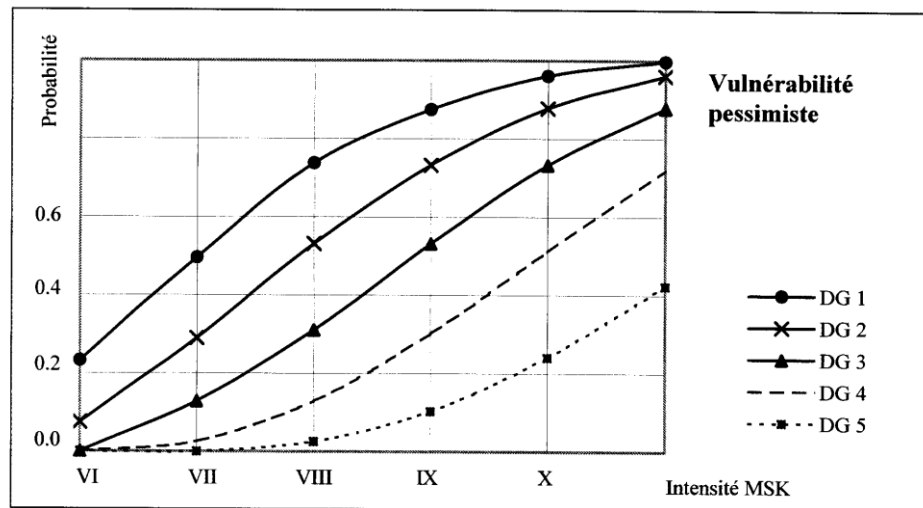


Figure 12: Courbes de vulnérabilité pour l'ensemble du bâti d'Aigle
Source : (Pelissier et Badoux, 2003)

Le risque sismique de la Ville d'Aigle est ensuite évalué à partir des courbes de vulnérabilité établies et en considérant la valeur assurable des bâtiments ainsi que l'aléa sismique régional. La Figure B-1 de l'annexe B illustre la procédure appliquée dans cette approche.

Une alternative pour établir la répartition d'un type de structure parmi les classes de vulnérabilité est d'utiliser une approche analytique simplifiée permettant d'évaluer l'intensité sismique correspondant à un degré de dégât tel que défini par l'EMS-98. Dans l'étude de Brennet, on analyse 5 bâtiments en maçonnerie non porteuse dont la configuration est représentative de la Ville D'Aigle. L'analyse de la tenue sismique est faite sur la base des normes FEMA-273, FEMA-356 et SIA-160 et on considère pour la vérification du comportement des murs deux modes de rupture, dans le plan et hors du plan. La tenue sismique est évaluée pour les deux directions principales de chacun des cinq bâtiments et selon deux états limites, soient celui d'occupation immédiate du FEMA correspondant approximativement au DG2 de l'EMS-98, et celui d'effondrement du FEMA correspondant approximativement au DG5 de l'EMS-98. La procédure détaillée est présentée à la Figure B-2 de l'annexe B.

5.6 Études de vulnérabilité

Outre les études portant sur les villes de Portland et d'Aigle présentées dans les sections précédentes, plusieurs études de vulnérabilité ont été réalisées à travers le monde, généralement pour une municipalité ou un secteur particulier d'une ville. Les exemples suivants illustrent quelques applications :

5.6.1 Ville de Bâle en Suisse

Dans le cadre d'un programme d'évaluation du risque sismique en Suisse, en particulier pour la ville de Bâle, le Service de sismologie suisse et l'Institut de génie des structures de l'École Polytechnique Fédérale de Zurich ont initié un projet conjoint sur les scénarios sismiques. Un des aspects du projet fait le point sur la vulnérabilité des

bâtiments résidentiels de Bâle (Lang, 2002). Suite à l'inventaire d'un secteur de la ville de Bâle, la vulnérabilité d'un pâté de maisons typique du quartier a été établie à partir d'une approche analytique basée sur des procédures statiques non linéaires. Pour chaque bâtiment étudié, en maçonnerie ou en béton armé, on définit les courbes de capacité en considérant les modes de ruptures dans le plan et hors du plan des différents murs composants le bâtiment. Cette courbe de capacité combinée à la demande en déplacement permet d'obtenir une fonction de vulnérabilité reliant le déplacement au déplacement spectral, lequel est directement relié à l'accélération spectrale quantifiant le séisme. Le principe de cette approche est illustré à Figure 13.

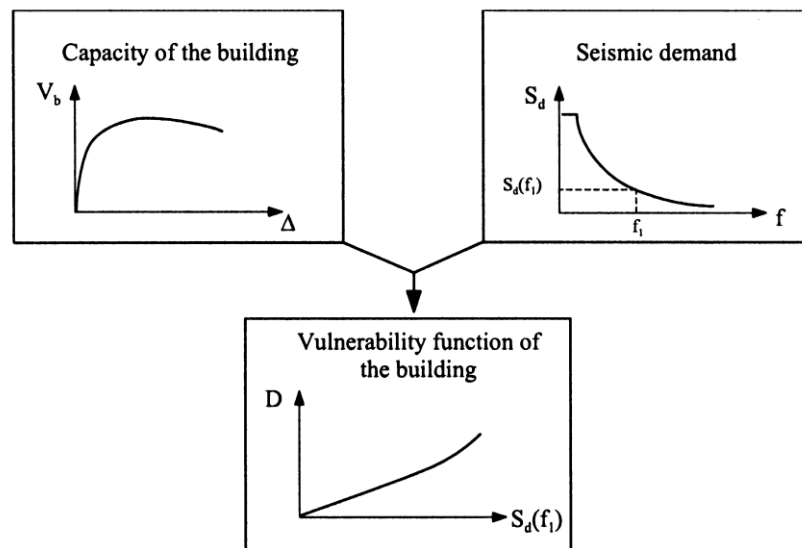


Figure 13 : Principe de l'approche de (Lang, 2002) pour développer les fonctions de vulnérabilité des bâtiments étudiés

Une fonction de vulnérabilité comporte l'identification des degrés de dommages. Ici on relie les degrés de dommages DG1 à DG5 aux niveaux de performance et à l'accélération spectrale telle qu'établie par le FEMA-273. Les degrés de dommages sont identifiés par la séquence de rupture des murs composant le bâtiment et indiqués sur la courbe de capacité. Cette dernière est ensuite modélisée par une courbe bilinéaire telle

qu'illustrée à la Figure 14. On pose l'hypothèse que la fréquence de ce modèle bilinéaire est la fréquence fondamentale du bâtiment, ce qui permet de définir l'accélération et le déplacement spectral correspondant à la zone sismique, ainsi que la demande en déplacement maximale. La vérification de la valeur du cisaillement élastique en comparaison avec la capacité en cisaillement, permet de reconstituer une fonction de vulnérabilité selon le déplacement spectral Figure 15. La procédure détaillée de cette méthode est décrite à la Figure C-1 de l'annexe C.

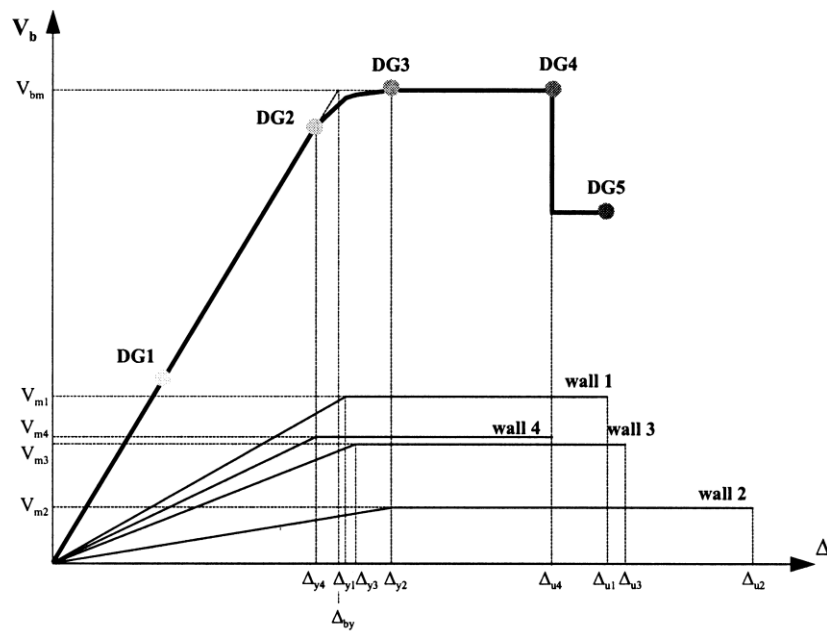


Figure 14 : Courbe de capacité d'un bâtiment en maçonnerie selon la méthode appliquée pour la ville de Bâle (Lang, 2002)

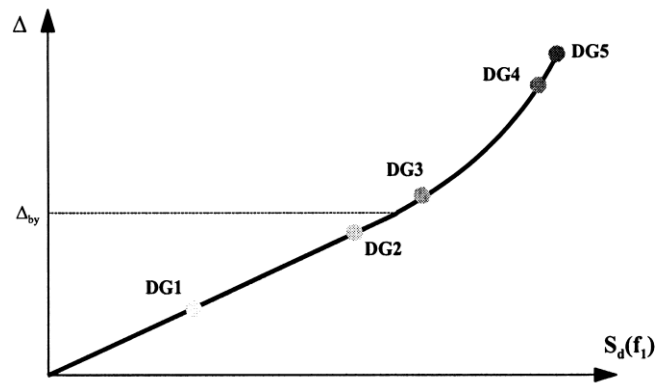
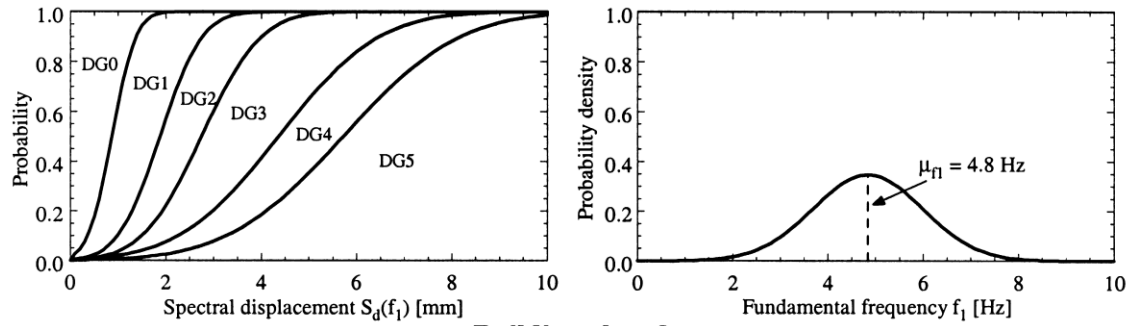


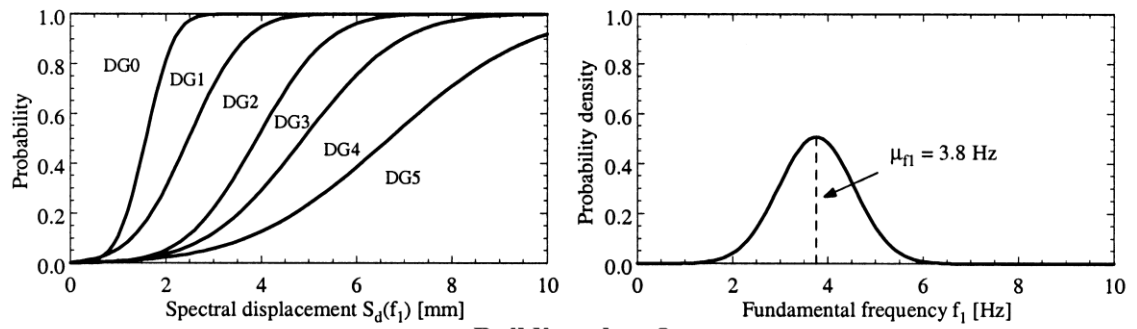
Figure 15 : Fonction de vulnérabilité établie à partir de la courbe de capacité de la Figure 14

Les résultats de l'analyse du secteur cible sont ensuite répartis en trois classes de bâtiments et appliqués à l'ensemble des bâtiments de la zone élargie. Les courbes de fragilité résultantes sont présentées à la Figure 16.

Building class 1



Building class 2



Building class 3

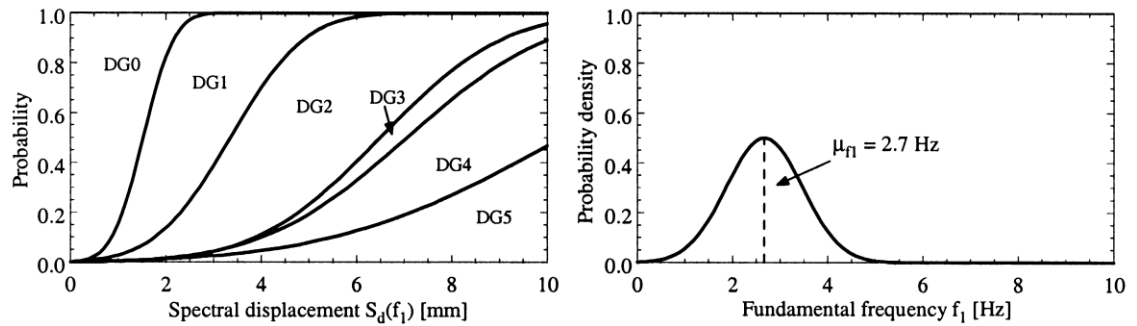


Figure 16 : Courbes de fragilité pour la Ville de Bâle

5.6.2 Autres études

Aux États-Unis, plusieurs institutions ont procédé à l'évaluation de la vulnérabilité sismique de l'ensemble de leurs bâtiments. L'Université de Berkeley en Californie a estimé les pertes reliées à trois catégories de séismes (occasionnels, rares et très rares) pour 114 structures situées sur le campus universitaire. Les données considérées : cartes de microzonation, l'aléa sismique et géologique, l'état des structures, les éléments non structuraux, l'usage et de taux d'occupation, et des données financières, ont permis de calculer des indicateurs de vulnérabilité pour l'effondrement structural, les dommages non-structuraux, le potentiel de morts et blessures et la fonctionnalité des installations.⁹

En 1991, l'Université de Memphis a procédé à l'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments du Campus universitaire en utilisant des données disponibles à partir d'un système GIS, l'année de construction, le type de construction et la valeur de remplacement¹⁰.

En 1994, Los Alamos National Laboratory a procédé à l'évaluation de la vulnérabilité sismique de 1482 bâtiments identifiant 169 bâtiments prioritaires. Des analyses sismiques détaillées ont été réalisées sur trois d'entre eux et les 166 autres ont été évalués à l'aide d'une méthodologie développée par LANL. Cette méthode donne des résultats comparables à ceux obtenus par la méthode du FEMA-178 mais a été jugée non fiable car elle n'est pas suffisamment détaillée¹¹.

⁹ <http://www.csc.noaa.gov/vata/seismic.pdf>

¹⁰ <http://www.ceri.memphis.edu/public/vulnerability.shtml>

¹¹ http://www.lasg.org/seismic2_b.html

La méthode de l'ATC-21 a été appliquée en 1998 pour l'évaluation de la vulnérabilité d'écoles, d'hôpitaux, de stations de pompiers et de ponts dans dix comtés de l'Arkansas Est¹².

En avril 2000, la Ville de Bogota en Colombie a défini une méthodologie basée sur un système de pointage pour développer un outil de gestion pour l'administration locale. Cet outil vise à établir les priorités et l'ordre des travaux de réhabilitation pour l'ensemble des bâtiments reliés aux 645 écoles de la Ville de Bogota. 2555 bâtiments ont ainsi été évalués. La méthodologie prend en considération des données physiques, structurales, non-structurales et géotechniques dont la microsismicité ainsi que l'usage et le taux d'occupation¹³.

¹² <http://erp-web.er.usgs.gov/reports/abstract/1992/cu.g2198.htm>

¹³ http://www.csc.noaa.gov/vata/VATIII_HRamirez.pdf

6 ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ SISMIQUE AU QUÉBEC

6.1 Sismicité de l'Est du Canada

Trois régions sont identifiées comme des zones sismiques au Canada : l'Ouest du Canada, le Nord et l'Est du Canada. Les séismes de l'Ouest canadien et du Nord sont généralement causés par le déplacement incessant de vastes segments de la croûte terrestre (appelés plaques tectoniques), lequel est la cause la plus fréquente (97 pour 100) des séismes dans le monde. L'Est canadien est situé dans une région continentale stable de la plaque de l'Amérique du Nord. L'activité sismique y est relativement faible et semble être liée à des champs de contrainte régionaux, étant donné que les séismes se concentrent dans les zones de faiblesse de la croûte terrestre. Néanmoins, des séismes dévastateurs de forte magnitude s'y sont produits dans le passé et il s'en produira inévitablement d'autres dans l'avenir. La Zone Sismique de Charlevoix, située à environ 100km en aval de la Ville de Québec, est la région sismique la plus active de l'Est du Canada. Historiquement, la zone a été sujette à cinq tremblements de terre de magnitude 6 ou supérieure : en 1663 (Mag. 7); 1791 (Mag. 6); 1860 (Mag. 6); 1870 (Mag. 6 1/2); et 1925 (magnitude MS 6.2 ± 0.3). La Zone Sismique de l'Ouest du Québec englobant la Vallée d'Ottawa de Montréal à Témiscamingue, a été par le passé le site d'au moins trois tremblements de terre importants. En 1732, un séisme dont la magnitude est estimée à 5,8 sur l'échelle de Richter a secoué Montréal causant des dommages importants. En 1935, un tremblement de terre d'une magnitude de 6,2 a secoué la région du Témiscamingue, et en 1944, un séisme dont l'épicentre était situé entre Cornwall (Ontario) et Massena (N.Y.) a entraîné des dommages évalués à deux millions de dollars (en dollars courants). Sa magnitude a été évaluée à 5,6. Cette zone sismique est secouée périodiquement par des tremblements de terre de plus faible intensité souvent ressentis par la population locale¹⁴. Dans un passé plus récent, le tremblement de terre du Saguenay en Novembre 1988 ayant une magnitude de 6 a causé

¹⁴ <http://www.seismo.nrcan.gc.ca/>

pour des dizaines de millions de dommages. Il s'agit du plus important séisme survenu en Amérique du Nord depuis 1935. Des dommages ont même été observés à Montréal, situé à 350 km de l'épicentre. En Novembre 1994, c'est dans la région de Québec, à Cap-Rouge qu'un séisme a surpris la population. D'une magnitude de 5,2, il a été ressenti sur un très grand territoire, du sud du Québec aux états du nord de la Nouvelle Angleterre en passant par l'est de l'Ontario.

Dans le Code National du Bâtiment 1995, une zone d'accélération (Z_a) et une zone de vitesse (Z_v) sont assignées aux villes canadiennes selon l'accélération (pga) et la vitesse maximale au sol (pgv). Le CNRC utilise une zone de sismicité effective, Z_e , pour comparer la sismicité des villes canadiennes. Cette dernière est égale à la zone de vitesse Z_v sauf si Z_a est supérieure à Z_v , alors la zone de sismicité effective Z_e est égale à Z_v+1 . Les zones de sismicité moyenne à élevée sont définies comme des zones ayant une sismicité effective, Z_e , supérieure ou égale à 2 pour des valeurs s'échelonnant entre 0 et 6.

Le Tableau IX donne les valeurs des zones de sismicité effective pour quelques villes canadiennes. On note que la sismicité effective de la ville de Québec est la même que celle de Vancouver, et que La Malbaie a une sismicité effective maximale de 6 tout comme Victoria.

Tableau IX : Zones de sismicité effective pour des villes canadienne

Villes de l'Ouest	Z_e 1995	S_a (0.2)	S_a (2.0)	Villes de l'Est	Z_e 1995	S_a (0.2)	S_a (2.0)
Queen Charlotte, C.B.	6	0,66	0,26	Ottawa, Ont.	3	0,67	0,045
Vancouver, C.B.	4	0,96	0,18	Montréal, Qc	3	0,69	0,048
Victoria, C.B.	6	1,20	0,19	Québec, Qc	4	0,59	0,048
Calgary, Alberta	1	0,15	0,023	La Malbaie, Qc	6	2,3	0,19
				Chicoutimi, Qc	5	0,62	0,047
				Moncton, N.B.	2	0,30	0,021

Dans la plus récente version du Code National du Bâtiment (2005), les données sismiques pour les villes sont l'accélération spectrale et non plus les zones d'accélération et de vitesse. Le Tableau IX donne également la valeur médiane (50^{ème} percentile) de l'accélération spectrale S_a , pour des périodes de 0,2 et 2,0 secondes, et une probabilité sur 50 ans de 2%. Certaines de ces valeurs sont également présentées sur la Figure 2 du Chapitre 2 pour les périodes intermédiaires. La différence entre la sismicité relative des villes selon le CNB 1995 et le CNB 2005 provient de l'utilisation d'un nouveau modèle de risque sismique. Il incorpore entre autres, les nouvelles connaissances tirées des récents tremblements de terre, et considère un niveau de probabilité sur 50 ans de 2% au lieu de 10%, ce qui correspond à des séismes de plus forte intensité. On peut aussi constater que les villes de l'Est canadien ont une accélération spectrale relativement plus importante pour les séismes de haute fréquence (faible période). Seule La Malbaie a une sismicité comparable à la ville de Victoria en basse et haute fréquence.

6.2 Vulnérabilité sismique au Québec

De façon générale le degré de conscientisation de la population au Québec vis-à-vis le risque sismique est relativement faible. En effet, l'histoire récente des séismes frappe peu l'imagination, et les craintes d'une autre tempête de verglas sont bien plus présentes à l'esprit de la population que les dommages reliés à un séisme éventuel. Bien que les tremblements de terre soient rares, comparativement à l'activité sismique de l'Ouest Canadien ou de la Californie, les impacts sociaux et économiques ne peuvent être négligés. Les nouvelles cartes sismiques indiquent que l'accélération spectrale des villes comme Montréal, Québec et Chicoutimi, ont une accélération spectrale de 0,69g, 0,59g et 0,62g pour une période de 0,2 seconde et une probabilité sur 50 ans de 2%. Durant le séisme du Saguenay de 1988, on a enregistré une accélération horizontale maximale au sol de 0,156g à Chicoutimi avec un fort contenu énergétique pour les hautes fréquences (faibles périodes). On peut donc penser que les dommages causés par un séisme éventuel, dont l'intensité correspond à celle définie par l'aléa sismique, seraient

beaucoup plus importants que ceux constatés durant le séisme de 1988. La définition du risque sismique associé à des villes comme Montréal et Québec, ayant une forte densité de population, est donc une question tout à fait pertinente.

6.2.1 Ville de Québec

Suite à la publication en 1992 des « Lignes directrices pour l'évaluation sismique des bâtiments existants » et du « Manuel de sélection des bâtiments en vue de leur évaluation sismique », la Ville de Québec a démarré un programme lui permettant de prioriser ses interventions en terme de réhabilitation sismique. Ce programme, entrepris en 1994, a permis de faire l'évaluation de la cote de priorité sismique (voir Section 5.1) pour quarante bâtiments municipaux les plus importants et de procéder à l'analyse détaillée d'une dizaine de bâtiments jugés potentiellement dangereux. Parmi les bâtiments inventoriés, ceux ayant un indice de priorité sismique élevé (entre 20 et 30) ou très élevé (supérieur à 30) présentaient un ou plusieurs des caractéristiques suivantes : murs de remplissage en maçonnerie, sol mou ou inconnu, irrégularités horizontales ou verticales. Ces études ont été réalisées par des consultants spécialisés pour un montant d'environ 85 000\$ et ont été rendues possibles grâce à la conscientisation des responsables des structures de la Ville (Matte et al., 1996; Caron et Jolicoeur, 2002).

Suite aux fusions municipales de 2002, la nouvelle ville de Québec possède maintenant un imposant parc immobilier d'un peu plus de 500 bâtiments de tout gabarit et dont la construction de certains remonte au début du siècle. La poursuite du programme d'évaluation implique par conséquent un investissement beaucoup plus important qu'à l'origine du programme.

Il faut noter que l'évaluation de l'indice de priorité sismique a été faite pour des bâtiments situés dans des secteurs différents de la ville. Il ne s'agit pas ici d'une étude de la vulnérabilité sismique d'un ensemble de bâtiments pour un secteur défini.

6.2.2 Ville de Montréal

Le CNRC a produit tout récemment des directives pour l'évaluation du risque sismique pour les composants fonctionnels et opérationnels des bâtiments (CSA, 2002), et la Ville de Montréal est actuellement en train d'en faire l'application sur une partie de ses bâtiments dans le cadre d'un projet de recherche de l'Université McGill. Cependant, il n'existe pas d'étude systématique de l'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments, ou de l'indice de priorité sismique pour la Ville de Montréal. Dans son projet de maîtrise à l'ÉTS, Mme Karine Lefebvre a procédé à la caractérisation structurale des bâtiments du Vieux-Montréal, ce qui a permis de mettre en évidence la diversité du bâti dans ce secteur et la présence importante de bâtiments en maçonnerie (44%) ou à structure mixte (acier ou béton avec murs de remplissage ou murs autoportant en maçonnerie). Ces deux types de structure sont reconnus pour avoir une vulnérabilité sismique élevée. L'étude permettra éventuellement d'établir la méthode d'évaluation de la vulnérabilité la plus appropriée pour ce secteur.

6.2.3 Travaux publics et Services gouvernementaux Canada

Un autre exemple de propriétaire soucieux de connaître la vulnérabilité de ses bâtiments, est Travaux publics et Services gouvernementaux Canada qui possède plusieurs bâtiments sur la colline parlementaire à Ottawa, et ailleurs au Canada. Dans cet optique, TPSGC a émis en mars 2001, une politique pour la résistance sismique de ses bâtiments. Principalement basée sur les Lignes directrices du CNRC, cette politique spécifie qu'une mise en conformité sismique doit être faite lors des travaux de rénovation des bâtiments situés en zones de sismicité effective (Z_e) modérée à élevée. Plusieurs de ces bâtiments étant construits en maçonnerie de pierre, TPSGC possède également des directives pour leur évaluation sismique. Basées sur les critères de performance du CNB 1995, ces directives définissent la procédure d'évaluation détaillée et donnent des méthodes de calcul pour les bâtiments en maçonnerie.

7 CONCLUSION

Dans un contexte où l'élaboration de mesure d'urgence pour se préparer à d'éventuelles catastrophes naturelles (verglas, inondation, séisme...) est de plus en plus répandue, l'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments va de soit. D'abord développées et appliquées dans des régions touchées régulièrement par les tremblements de terre, comme la Californie ou l'Italie, les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique voient leur application étendue à des régions de sismicité faible à moyenne comme la Suisse ou le centre de États-Unis (Portland).

Les objectifs de ce rapport visaient en premier lieu à établir une revue de l'état des connaissances sur l'évaluation de la vulnérabilité sismique pour un ensemble de bâtiments et en second lieu à établir la situation du Québec dans ce domaine.

Les différentes approches d'évaluation de la vulnérabilité reposent généralement sur des fonctions de vulnérabilité qui expriment le pourcentage de dommages subis par un type de structure pour différentes intensités sismiques. Ces fonctions (courbes ou matrices) sont élaborées à partir de l'observation des dommages lors de séismes passés, de l'opinion d'experts ou de modèles d'analyse. L'application directe de ces fonctions ne peut cependant pas se faire si la typologie des bâtiments à l'étude est différente de celle des bâtiments ayant servi à élaborer les fonctions de vulnérabilité.

Parmi les outils disponibles pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique il y a également les méthodes d'attribution de pointage comme celles du FEMA aux États-Unis, du CNRC au Canada, du GNDT en Italie et celle de la Suisse. Cependant, les probabilités de dommages n'étant pas toujours directement associées au pointage attribué à un bâtiment, son pointage final ne reflète pas nécessairement sa vulnérabilité sismique ou son risque sismique. En particulier, la méthode de sélection des bâtiments en vue de leur évaluation sismique du CNRC attribue un pointage qui représente l'écart entre les exigences de conception sismique du CNB 1990 et non le risque sismique en

tant que tel. Parmi les méthodes présentées, la méthode d'attribution de pointage Suisse est celle qui respecte mieux la définition du risque sismique en isolant les indices reliés à l'aléa sismique, à la vulnérabilité du bâti et à l'exposition (ou le coût économique et social).

Des études de vulnérabilité intéressantes ont été réalisées aux États-Unis et en Europe dont celles des villes d'Aigle et de Bâle en Suisse. Elles ont été réalisées dans le cadre d'un programme fédéral d'évaluation de la vulnérabilité sismique, ce qui a permis de développer des modèles analytiques simples pour les bâtiments en maçonnerie et en béton armé. L'applicabilité de ces modèles analytiques aux bâtiments du Québec est possible à condition qu'ils soient adaptés à la typologie des bâtiments des secteurs étudiés et aux normes nord-américaines.

L'intérêt de développer des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments anciens de villes comme Montréal ou Québec repose sur un aléa sismique régional relativement élevé par rapport à d'autres régions du Québec et du Canada et à une forte densité de bâtiments dans les anciens quartiers de ces villes. L'aléa sismique de la ville de Québec est comparable à celui de villes de l'Ouest canadien reconnues pour leur risque sismique élevé. Bien que l'aléa sismique régional de la ville de Montréal soit moindre, elle possède une forte densité de population et une concentration importante de bâtiments anciens dans des secteurs comme le Vieux-Montréal. D'ailleurs, la situation au Québec illustre une préoccupation grandissante pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique. La Ville de Montréal vient de mettre en œuvre un programme d'évaluation du risque sismique relié aux composants fonctionnels des bâtiments, alors que la Ville de Québec a entrepris en 1994 d'identifier les bâtiments prioritaires de son parc immobilier nécessitant des évaluations structurales détaillées.

8 RECOMMANDATIONS

Les recommandations découlant de ce rapport et portant sur l'étude de la vulnérabilité sismique des bâtiments existants pour des villes comme celles de Montréal ou Québec sont d'ordre général et spécifique.

Recommandations générales

Les études réalisées en Amérique et en Europe illustrent bien la faisabilité de procéder à l'évaluation de la vulnérabilité sismique d'un ensemble de bâtiments même dans un contexte où les données sur les séismes passés sont peu nombreuses. Au Québec, les bâtiments d'intérêt sont les bâtiments prioritaires et ceux localisés dans les vieux quartiers présentant un regroupement de bâtiments anciens dont les caractéristiques structurales n'ont pas été conçues pour la protection parasismique.

1. L'étude de la vulnérabilité sismique d'un parc de bâtiments éparpillés à travers la ville, comme c'est le cas des bâtiments prioritaires appartenant aux municipalités, peut se faire en utilisant la méthode de pointage du CNRC afin d'établir une classification des bâtiments. Les bâtiments identifiés comme les plus vulnérables devraient alors faire l'objet d'analyse détaillée. C'est l'approche adoptée par la Ville de Québec et qui pourrait également être appliquée à la Ville de Montréal.
2. L'étude de la vulnérabilité d'un secteur spécifique de la ville peut se faire par une des méthodes décrites dans ce rapport. Les secteurs les plus anciens des villes devraient être ciblés en premier, comme le Vieux-Montréal ou le Vieux-Québec.
3. Le choix de la méthode d'évaluation de la vulnérabilité pour les bâtiments existants des villes de Québec ou Montréal dépendra principalement de l'identification de leurs caractéristiques structurales. De plus, la méthode pourra différer selon le degré d'uniformité de la typologie des structures identifiées dans le secteur à l'étude.

Recommandations spécifiques

L'inventaire des caractéristiques structurales des bâtiments du Vieux-Montréal actuellement en cours indique déjà une grande variabilité dans les types de structures identifiées. Ceci s'explique surtout par le rôle économique joué par le Vieux-Montréal au début du siècle lequel à entraîner une évolution rapide du paysage urbain dans ce secteur. Par conséquent, il serait intéressant d'explorer l'applicabilité de l'utilisation des matrices de dommages probables définies dans le logiciel HAZUS puisqu'elles incluent l'ensemble de types de structures généralement construites en Amérique. Il faut cependant être prudent en ce qui concerne les bâtiments en maçonnerie, en particulier ceux construits au 18^{ème} siècle car ils sont souvent différents des bâtiments en maçonnerie du 19^{ème} siècle. Les méthodes d'évaluation appliquées en Suisse seraient à cet égard plus appropriées. Le secteur du Vieux-Québec, faisant partie du patrimoine mondial, possède un ensemble de bâtiments plutôt uniforme, généralement en maçonnerie et se prêterait bien à une étude de vulnérabilité sismique selon la méthode appliquée pour les villes d'Aigle ou de Bâle en Suisse. Il est par conséquent recommandé de :

1. Procéder à un inventaire détaillé des caractéristiques structurales des bâtiments des secteurs ciblés afin d'identifier la méthode d'évaluation la plus appropriée.
2. Évaluer en détail l'applicabilité des méthodes d'évaluation utilisées en Suisse pour les villes d'Aigle et de Bâle en les adaptant aux normes nord-américaines et en comparant la typologie des bâtiments identifiés.
3. Élaborer des modèles simples d'analyse permettant d'obtenir des fonctions de vulnérabilité appropriées pour les structures dont les caractéristiques ne correspondent pas de façon adéquate aux classifications typologiques déjà établies dans la littérature.

BIBLIOGRAPHIE

- Adams, B., Huyck, C., & Eguchi, R. (2003). *The Boumerdes (Algeria) Earthquake of May 21, 2003: Preliminary Reconnaissance Using Remotely Sensed Data*. MCEER : Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research. [<http://mceer.buffalo.edu/research/boumerdes/>]
- Adams, J., & Atkinson, G. (2003). Development of seismic hazard maps for the proposed 2005 edition of the National Building Code of Canada. *Revue canadienne de génie civil*, 30(2), 255-271.
- ASCE. (1998). *Handbook for the Seismic Evaluation of Buildings - A Prestandard* (Report No. FEMA 310). Washington D.C. : American Society of Civil Engineers. Developed for the Federal Emergency Management Agency.
- ASCE. (2000a). *Guideline for Structural Condition Assessment of Existing Buildings* (SEI-ASCE 11-99). Washington D.C. : American Society of Civil Engineers.
- ASCE. (2000b). *NEHRP Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings* (Report No. FEMA 356). Washington D.C. : American Society of Civil Engineers. Developed for the Federal Emergency Management Agency.
- ASCE. (2003). *Seismic Evaluation of Existing Buildings* (SEI/ASCE 31-03). Washington D.C. : American Society of Civil Engineers.
- ATC. (1985). *Earthquake Damage Evaluation Data for California* (ATC-13). Redwood City, California : Applied Technology Council.
- Augusti, G., & Ciampoli, M. (2000). Heritage buildings and seismic reliability. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2(2), 225-237.
- Augusti, G., Ciampoli, M., & Giovenale, P. (2001). Seismic vulnerability of monumental buildings. *Structural Safety*, 23(3), 253-274.
- Augusti, G., Ciampoli, M., & Zanobi, S. (2002). Bounds to the probability of collapse of monumental buildings. *Structural Safety*, 24(2-4), 89-105.
- Brennet, G., Peter, K., & Badoux, M. (2001). *Vulnérabilité et risque sismique de la ville d'Aigle - 1ère partie : Inventaire sismique et vulnérabilité du bâti traditionnel*. Lausanne : École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Faculté Environnement naturel, architectural et construit.

- BSSC. (1988a). *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards : a Handbook* (Report No. FEMA 154). Washington D.C. : Buildings Seismic Safety Council. Developed for the Federal Emergency Management Agency.
- BSSC. (1988b). *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards : Supporting Documentation* (Report No. FEMA 155). Washington D.C. : Buildings Seismic Safety Council. Developed for the Federal Emergency Management Agency.
- BSSC. (1992a). *NEHRP Handbook of Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings* (Report No. FEMA 172). Washington D.C. : Buildings Seismic Safety Council. Developed for the Federal Emergency Management Agency.
- BSSC. (1992b). *NEHRP Handbook for the Seismic Evaluation of Existing Buildings* (Report No. FEMA 178). Washington D.C. : Buildings Seismic Safety Council. Developed for the Federal Emergency Management Agency.
- BSSC. (1997a). *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings* (Report No. FEMA 273). Washington D.C. : Buildings Seismic Safety Council. Developed for the Federal Emergency Management Agency.
- BSSC. (1997b). *NEHRP Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings* (Report No. FEMA 274). Washington D.C. : Buildings Seismic Safety Council. Developed for the Federal Emergency Management Agency.
- BSSC. (2002a). *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards : a Handbook* (Report No. FEMA 154, 2nd ed.). Washington D.C. : Buildings Seismic Safety Council. Developed for the Federal Emergency Management Agency.
- BSSC. (2002b). *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards : Supporting Documentation* (Report No. FEMA 155, 2nd ed.). Washington D.C. : Buildings Seismic Safety Council. Developed for the Federal Emergency Management Agency.
- Calgaro, J. A. (1998). *Fiabilité et ouvrages de génie civil*. 2e conférence nationale sur la fiabilité des matériaux et des structures, JN-FIAB'98, Université de Marne la Vallée.
- Caron, A., & Jolicoeur, L. (2002). *La réhabilitation sismique des édifices municipaux à la Ville de Québec*. 30ème congrès de la Société canadienne de génie civil, Division Structures, Montréal.

- Casciati, F., Faravelli, L., & Liu, X. D. (1995). Lessons of rehabilitation design learned from statistical analyses of masonry seismic-vulnerability data. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 32(3), 133A.
- CNRC. (2003). Numéro spécial consacré aux exigences de calcul des séismes proposées au code national du bâtiment, édition de 2005. *Revue canadienne de génie civil*, 30(2).
- Coburn, A., & Spence, R. (1992). *Earthquake Protection*. Chichester : John Wiley & Sons.
- CSA. (2002). *Lignes directrices en matière de diminution des risques sismiques concernant les composants fonctionnels et opérationnels des bâtiments (CFO) (S832-01)*. Mississauga : Association canadienne de normalisation.
- D'Ayala, D., Spence, R., Oliveira, C., & Pomonis, A. (1997). Earthquake loss estimation for Europe's historic town centres. *Earthquake Spectra*, 13(4), 773-792.
- Faccioli, E., Pessina, V., Calvi, G. M., & Borzi, B. (1999). A study on damage scenarios for residential buildings in Catanis city. *Journal of Seismicity*, 3(3), 327-343.
- Filiatrault, A. (1996). *Éléments de génie parasismique et de calcul dynamique des structures*. Montréal : Éditions de l'École Polytechnique de Montréal.
- Fisher, T., Alvarez, M., De la Llera, J. C., & Riddell, R. (2002). An integrated model for earthquake risk assessment of buildings. *Engineering Structures*, 24, 979-998.
- Grünthal, G., Musson, R. M. W., Schwarz, J., & Stucchi, M. (1998). *European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98)*. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Volume 15, Luxembourg.
- Hamburger, R. O., Court, A. B., & Soulages, J. R. (1996). *Vision 2000 : A framework for performance-based engineering of buildings*. Proceedings of the 64th Annual Convention, Structural Engineers Association of California (SEAOC), 19-21 October 1995, 127-146.
- Hong, N. K., Hong, S.-G., & Chang, S.-P. (2003). Computer-supported evaluation for seismic performance of existing building. *Advances in Engineering Software*, 34, 87-101.

- IRC-CNRC. (1992a). *Lignes directrices pour l'évaluation sismique des bâtiments existants*. Ottawa : Institut de recherche en construction - Conseil national de recherches Canada.
- IRC-CNRC. (1992b). *Manuel de sélection des bâtiments en vue de leur évaluation sismique*. Ottawa : Institut de recherche en construction - Conseil national de recherches Canada.
- IRC-CNRC. (1993). *Lignes directrices pour la protection parasismique des structures des bâtiments existants*. Ottawa : Institut de recherche en construction - Conseil national de recherches Canada.
- IRC-CNRC. (1995). *Code national du bâtiment du Canada*. Ottawa : Institut en Recherche et construction - Conseil national de recherches Canada.
- Kanda, J., Iwasaki, R., Kobayashi, H., & Ellingwood, B. R. (1997). Probability-based seismic safety evaluation of existing buildings. *Engineering Structures*, 19(9), 708-717.
- Lang, K. (2002). *Seismic vulnerability of existing buildings*. Dissertation submitted to the Swiss Federal Institute of Technology (EPFZ), Zurich.
- Lateltin, M. (2003). *Appréciation de la sécurité parasismique des ouvrages de la Confédération*. Bienne (Suisse) : Office fédéral des eaux et de la géologie, Centrale de coordination pour la mitigation des séismes.
- Matte, Y., Cloutier, R., & Blouin, J. (1996). *Sélection des édifices municipaux en vue de leur évaluation sismique*. Ville de Québec, Dessau.
- McCormack, T. C., & Rad, F. N. (1997). An Earthquake Loss Estimation Methodology for Buildings Based on ATC-13 and ATC-21. *Earthquake Spectra*, 13(4), 605-621.
- Melchers, R. E. (2001). Assessment of existing structures - Approaches and research need. *Journal of Structural Engineering*, 127(4), 406-411.
- Paultre, P., Lefebvre, G., Devic, J.-P., & Côté, G. (1993). Statistical analyses of damages to buildings in the 1988 Saguenay earthquake. *Revue canadienne de génie civil*, 20, 988-998.
- Pelissier, V., & Badoux, M. (2003). *Vulnérabilité et risque sismique de la ville d'Aigle. 2ème partie : Estimation du risque sismique*. Lausanne : École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Faculté Environnement naturel, architectural et construit.

Shinozuka, M. (1995). *Preliminary Reports from the Hyogo-ken Nambu Earthquake of January 17, 1995*. MCEER : Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.
[http://mceer.buffalo.edu/publications/sp_pubs/kobereport/KobeReport.asp]

Whitman, R. V., Reed, J. W., & Hong, S.-T. (1974). *Earthquake damage probability matrices*. 5th World Conference on Earthquake Engineering, Rome.

ANNEXES

ANNEXE A : FORME ABREGEE DE L'ECHELLE EMS-98

La forme abrégée de l'Echelle Macrosismique Européenne, tirée de la partie principale, est conçue pour donner une vision très simplifiée et générale de l'échelle EMS. Elle peut, par exemple, être utilisée à des fins éducatives. *Cette forme abrégée ne convient pas pour les estimations d'intensité.*

Intensité EMS	Définition	Description des effets typiques observés (résumée)
I	Non ressenti	Non ressenti.
II	Rarement ressenti	Ressenti uniquement par quelques personnes au repos dans les maisons.
III	Faible	Ressenti à l'intérieur des habitations par quelques personnes. Les personnes au repos ressentent une vibration ou un léger tremblement.
IV	Largeement observé	Ressenti à l'intérieur des habitations par de nombreuses personnes, à l'extérieur par très peu. Quelques personnes sont réveillées. Les fenêtres, les portes et la vaisselle vibrent.
V	Fort	Ressenti à l'intérieur des habitations par la plupart, à l'extérieur par quelques personnes. De nombreux dormeurs se réveillent. Quelques personnes sont effrayées. Les bâtiments tremblent dans leur ensemble. Les objets suspendus se balancent fortement. Les petits objets sont déplacés. Les portes et les fenêtres s'ouvrent ou se ferment.
VI	Dégâts légers	De nombreuses personnes sont effrayées et se précipitent dehors. Chute d'objets. De nombreuses maisons subissent des dégâts non structuraux comme de très fines fissures et des chutes de petits morceaux de plâtre.
VII	Dégâts	La plupart des personnes sont effrayées et se précipitent dehors. Les meubles se déplacent et beaucoup d'objets tombent des étagères. De nombreuses maisons ordinaires bien construites subissent des dégâts modérés: petites fissures dans les murs, chutes de plâtres, chutes de parties de cheminées; des bâtiments plus anciens peuvent présenter de larges fissures dans les murs et la défaillance des cloisons de remplissage.
VIII	Dégâts importants	De nombreuses personnes éprouvent des difficultés à rester debout. Beaucoup de maisons ont de larges fissures dans les murs. Quelques bâtiments ordinaires bien construits présentent des défaillances sérieuses des murs, tandis que des structures anciennes peu solides peuvent s'écrouler.
IX	Destructions	Panique générale. De nombreuses constructions peu solides s'écroulent. Même des bâtiments bien construits présentent des dégâts très importants: défaillances sérieuses des murs et effondrement structural partiel.
X	Destructions importantes	De nombreux bâtiments bien construits s'effondrent.
XI	Catastrophe	La plupart des bâtiments bien construits s'effondrent, même ceux ayant une bonne conception parasismique sont détruits.
XII	Catastrophe généralisée	Pratiquement tous les bâtiments sont détruits.

**ANNEXE B : PROCÉDURE D'ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ POUR
LA VILLE D'AIGLE EN SUISSE**

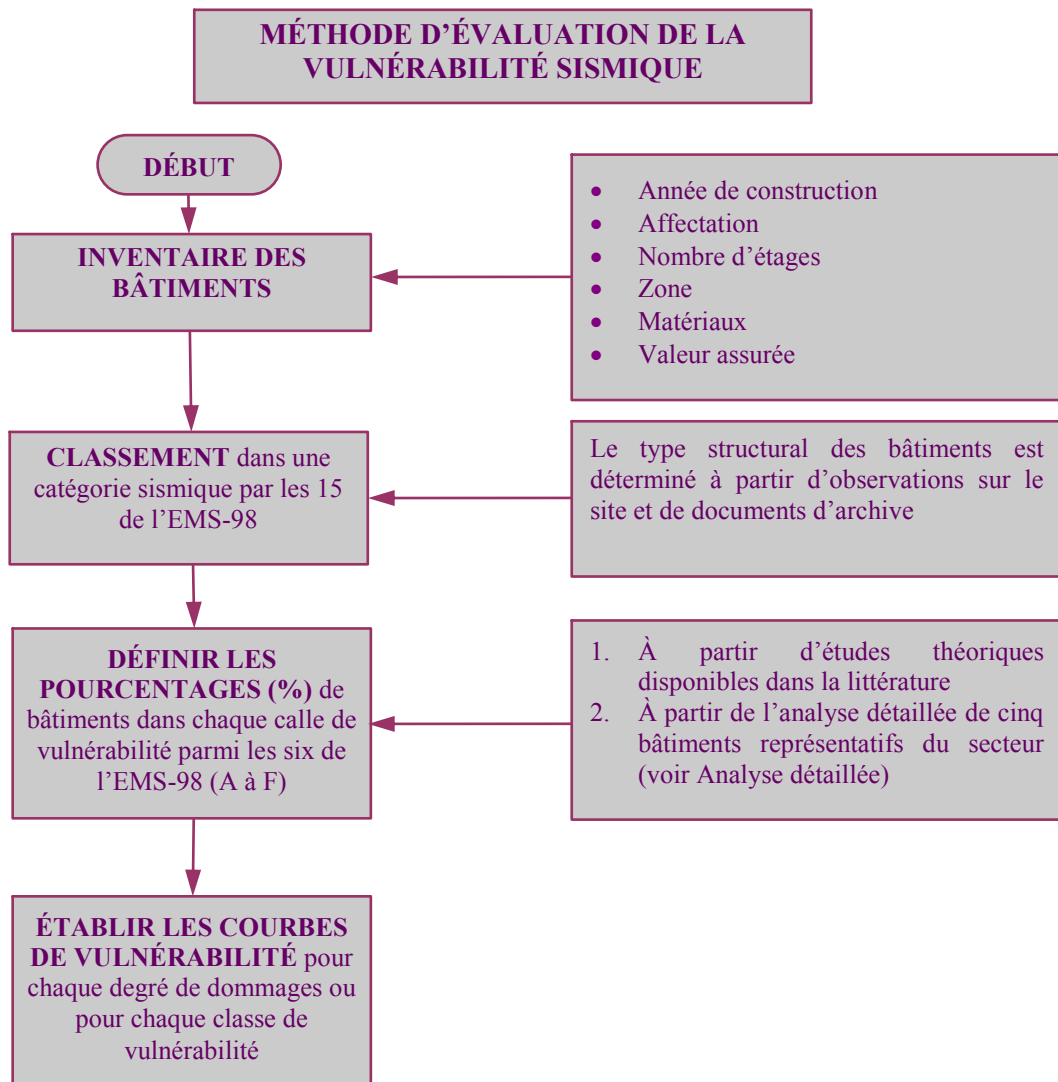


Figure B-1 : Procédure générale de la méthode d'évaluation

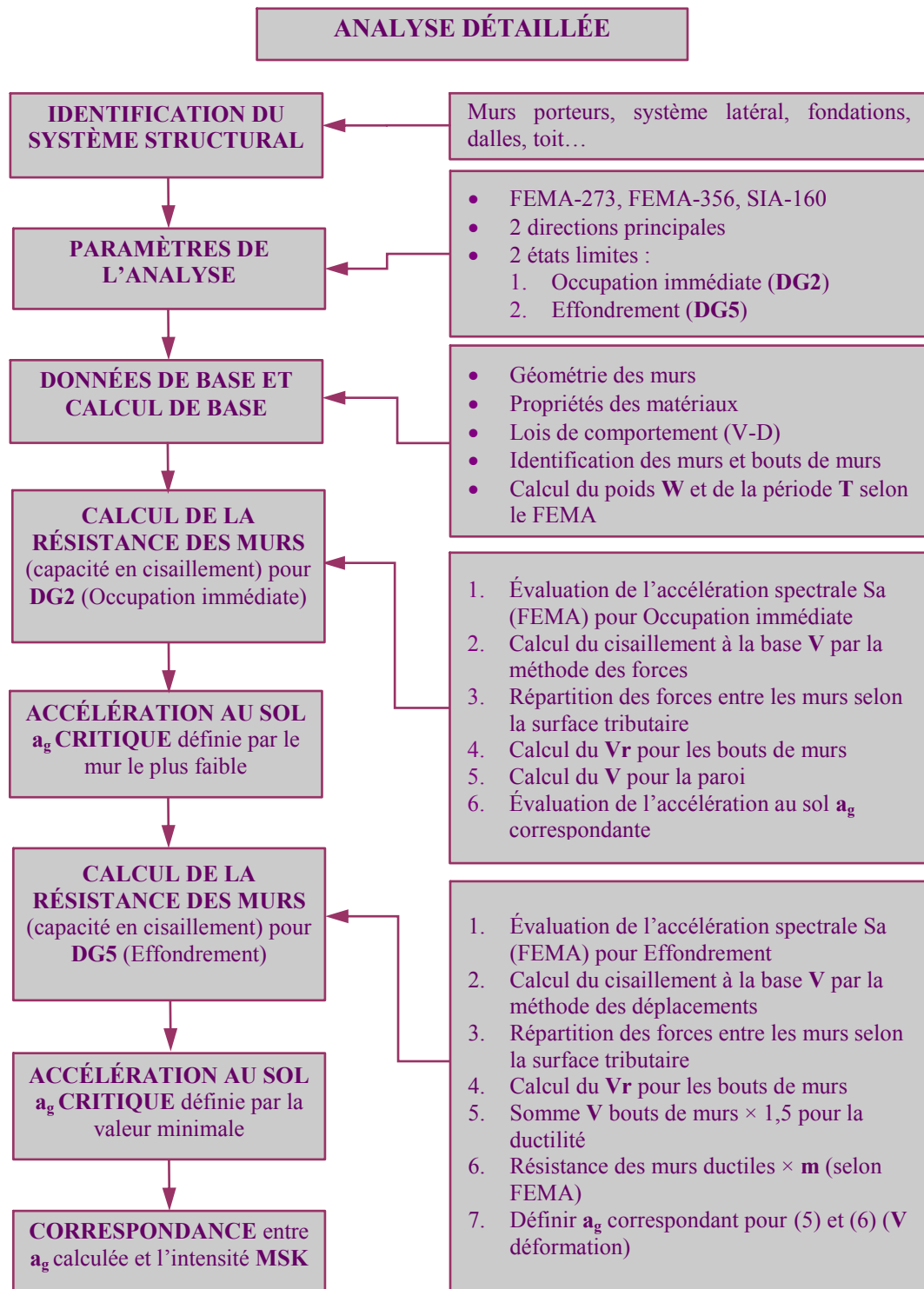


Figure B-2 : Méthode détaillée pour déterminer le degré de dommage

**ANNEXE C. PROCÉDURE D'ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ POUR
LA VILLE DE BASEL EN SUISSE**

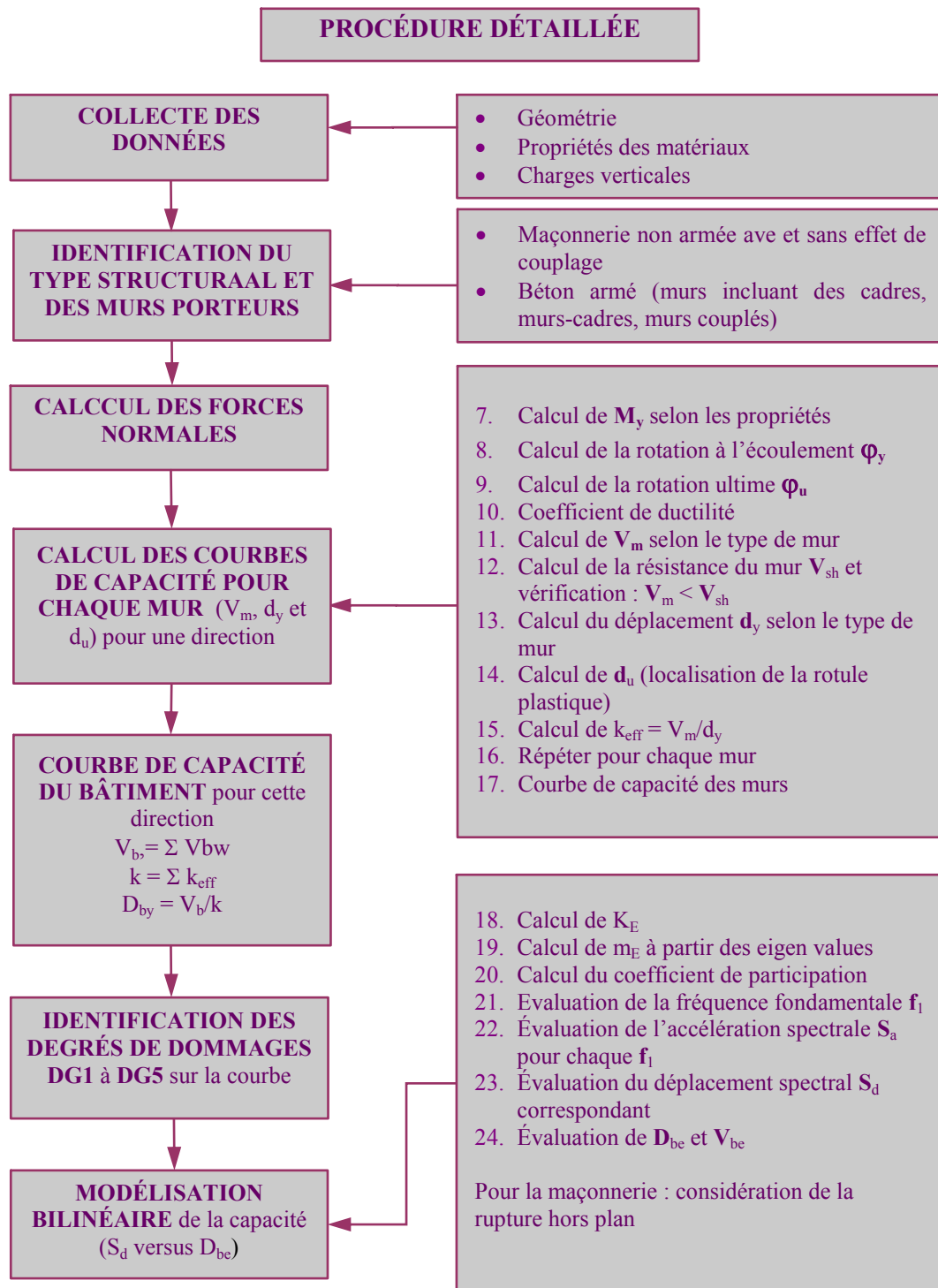


Figure C-1 : Procédure détaillée de l'évaluation de la vulnérabilité