

# Évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments à ossature de bois en milieu urbain

par

Fatima ZAYTOUN

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE  
LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION  
M.Sc.A.

MONTREAL, LE 22 AOÛT 2025

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Fatima Zaytoun, 2025



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

**PRÉSENTATION DU JURY**

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Ahmad Abo El Ezz, directeur de mémoire  
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Abdelatif Merabtine, président du jury  
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Georges El-Saikaly, membre du jury  
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

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

LE 19 AOÛT 2025

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEUR





## **REMERCIEMENTS**

Je tiens, tout d'abord, à remercier mon directeur de recherche Professeur Ahmad Abo El Ezz pour son encadrement, sa disponibilité, son soutien financier, et surtout pour ses précieux conseils qui m'ont permis de mener à bien cette recherche.

Je tiens à adresser mes plus sincères remerciements à Professeur Luc Chouinard et Dr. Philippe Rosset de l'université McGill pour leurs soutiens particulièrement dans les analyses des scénarios sismiques de logiciel Hazus dans le cadre du projet sur l'évaluation des risques sismiques des bâtiments résidentiels au Québec.

Sur un plan plus personnel, je souhaite exprimer ma profonde gratitude à mon mari, Ali, pour son soutien, ses encouragements constants et son aide précieux. Un grand merci à mes petites filles, Aseel et Areej, dont l'amour, la joie et la curiosité m'encouragent chaque jour à avancer avec détermination. Je tiens aussi à exprimer ma reconnaissance à mes parents pour leur encouragement tout au long de mon parcours.



# **Évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments à ossature de bois en milieu urbain**

Fatima ZAYTOUN

## **RÉSUMÉ**

Les tremblements de terre sont des catastrophes naturelles majeures qui causent d'importantes pertes sociales et économiques dans les régions sujettes à l'activité sismique. Les pertes considérables des tremblements de terre passés ont mis en évidence la nécessité d'évaluer la vulnérabilité sismique et les risques des structures existantes. Au Québec, les maisons à ossature de bois existantes ont été construites selon des méthodes conventionnelles avec des exigences prescriptives, sans calculs d'ingénierie sismique pour la capacité latérale à résister aux forces sismiques. Il est essentiel d'évaluer la vulnérabilité sismique de ces maisons afin de quantifier leur performance attendue après un tremblement de terre et de planifier les mesures d'atténuation sismique. L'objectif de cette étude est d'évaluer leur vulnérabilité en développant des caractéristiques analytiques de capacité et de fragilité, et en analysant leur réponse structurelle face aux forces sismiques. De plus, l'étude estime les pertes potentielles que ces maisons pourraient subir dans différents scénarios sismiques, fournissant des données essentielles sur leur performance lors de tremblements de terre de différentes intensités. Dans la première partie de cette étude, une méthodologie simplifiée est utilisée pour développer les courbes de capacité des maisons à un étage et à deux étages, basées sur la caractérisation structurelle de six maisons prototypes. Ensuite, les fonctions de fragilité basées sur les déplacements et les accélérations sont développées en fonction des seuils de dérive et d'accélération disponibles dans la littérature pour différents états de dommages pour les composants structuraux et non structuraux. Dans la deuxième partie, les pertes économiques directes potentielles induites par les tremblements de terre de ces maisons ont été étudiées sous plusieurs scénarios, en considérant 60 scénarios de tremblement de terre avec des magnitudes, distances et classes de site variées. Ces scénarios de perte ont été analysés à l'aide du logiciel Hazus, puis un modèle prédictif a été développé pour estimer les pertes en termes de taux de perte de bâtiment, défini comme le rapport de la perte économique divisée par le coût total de remplacement du bâtiment. Des équations ont été élaborées pour corréliser les taux de perte directement en fonction des intensités sismiques, y compris l'accélération maximale du sol et les accélérations spectrales à 0,3s et 1,0s, respectivement. L'étude a démontré que les maisons à deux étages sont plus vulnérables et subissent davantage de dommages lors de tremblements de terre modérés par rapport aux maisons à un étage. Les équations de taux de perte prédictifs sont particulièrement utiles pour l'évaluation rapide des pertes économiques directes dans le cadre des études d'évaluation des risques sismiques à l'échelle régionale.

**Mots-clés :** Vulnérabilité sismique, maison à ossature légère en bois, courbes de capacité, fonctions de fragilité, estimation des pertes, scénarios



## Seismic vulnerability assessment of wood frame buildings in urban areas

Fatima ZAYTOUN

### ABSTRACT

Earthquakes are significant natural hazards that cause considerable social and economic losses to the built environment in regions prone to seismic activity. The considerable losses from past earthquakes have highlighted the critical need for assessing the seismic vulnerability and risks of existing structures. In Quebec, existing wood frame houses were built using conventional construction methods with prescriptive requirements without engineering seismic calculations for lateral capacity to resist earthquake forces. It is crucial to assess the seismic vulnerability of these houses for the quantification of their expected performance after earthquakes and for pre-earthquake planning for seismic mitigation. The objective of this study is to evaluate their vulnerability by developing analytical capacity and fragility characteristics and analyzing their structural response to seismic forces. Additionally, the study estimates the potential losses these houses could experience under various seismic scenarios, providing essential data on their performance during earthquakes of different intensities. In the first part of this study, a simplified analytical methodology is used to develop the capacity curves for one-story and two-story houses based on structural characterization of six prototype houses. Displacement and acceleration-based fragility curves are then developed based on drift and accelerations thresholds available in literature for various damage states in structural and non-structural components. In the second part, the potential earthquake induced direct economic losses of these houses were studied under multiple scenarios, considering 60 earthquake scenarios with varied magnitude, distance and site class. These loss scenarios were analyzed using the Hazus software, and a predictive model was then developed to estimate losses in terms of building loss rate, defined as the ratio of economic loss divided by the total replacement cost of the building. Equations were developed to correlate the loss rates directly as a function of seismic intensities including peak ground acceleration and spectral accelerations at 0.3s and 1.0s, respectively. The study demonstrated that two-story houses are more vulnerable and experience more damage during moderate earthquakes compared to one-story houses. The predictive loss rate equations are particularly useful for rapid assessment of direct economic losses in the framework of regional scale seismic risk assessment studies.

**Keywords:** Seismic vulnerability, light wood frame houses, capacity curves, fragility curves, loss estimation, scenarios



## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	11
1.1 Risque sismique .....	11
1.2 Paramètres d'un séisme.....	13
1.2.1 Magnitude .....	14
1.3 Zones sismiques au Canada .....	15
1.4 Comportement sismique des maisons à ossature en bois lors de séismes passés .....	18
1.5 Construction à ossature bois conventionnelle.....	20
1.6 Courbes de poussée, courbes de capacité et méthode du spectre de capacité.....	22
1.7 Courbes de fragilité et de vulnérabilité .....	24
1.7.1 Courbes de fragilité.....	24
1.7.2 Fonctions de vulnérabilité.....	26
1.8 HAZUS .....	27
1.8.1 Classification des types d'habitations dans Hazus .....	27
1.8.2 Méthodologie d'évaluation des risques sismiques Hazus .....	29
1.9 FEMA P-807 (FEMA, 2012) .....	29
1.9.1 Définition de la méthodologie simplifiée de la norme FEMA P-807 (FEMA, 2012) .....	29
1.9.2 Méthodologie d'élaboration des courbes charge-déplacement dans les assemblages muraux à revêtements multiples à l'aide de la norme FEMA P807 (FEMA, 2012).....	30
1.10 Analyse des dommages et des pertes .....	33
1.10.1 Approche AEBM pour l'évaluation du risque sismique.....	34
1.10.2 Estimation des pertes sismiques selon différents scénarios .....	35
1.10.3 Outil d'aléa sismique du Code national du bâtiment du Canada (CNBC) .....	37
1.11 Conclusion .....	38
CHAPITRE 2 DÉVELOPPEMENT DES COURBES DE CAPACITÉ ET DE FRAGILITÉ BASÉES SUR LA CARACTÉRISATION DES BÂTIMENTS.....	39
2.1 Caractérisation des bâtiments à ossature bois.....	39
2.2 Présentation des courbes de poussée selon FEMA P-807 (FEMA, 2012).....	45
2.3 Dérivation et interprétation des courbes de capacité à partir de l'analyse par poussée.....	49
2.3.1 Forme de la courbe de capacité et facteurs de dégradation dans la méthodologie Hazus .....	51
2.4 Courbes de capacité développées pour les maisons à ossature légère en bois à un et deux étages .....	53

2.5	Analyse comparative des courbes de capacité dérivées et des courbes Hazus .....	56
2.6	Caractéristiques de fragilité des cas étudiés.....	59
2.6.1	Paramètres des courbes de fragilité structurelle et des courbes de fragilité des éléments non structurels sensibles à la dérive.....	59
2.6.2	Paramètres d'accélération des éléments non structurels.....	63
2.7	Conclusion .....	65
CHAPITRE 3	ESTIMATION DES PERTES .....	67
3.1	Méthodologie d'estimation des pertes sismiques .....	67
3.1.1	Outils d'analyse et paramètres d'entrée.....	67
3.1.2	Modélisation de scénarios basés sur la CEUS pour l'estimation des pertes sismiques.....	68
3.2	Résultats de l'estimation des pertes et analyse de régression détaillée des courbes de pertes.....	72
3.3	Discussion des résultats .....	78
3.3.1	Comparaison entre la classes standard Hazus W1 et les classes affinées .....	78
3.3.2	Comparison with previous loss estimation study.....	80
3.4	Application des courbes d'estimation des pertes aux grandes villes du Québec.....	82
3.5	Conclusion .....	85
CONCLUSION	.....	87
RECOMMANDATIONS	.....	89
ANNEXE I	PLANS DES MAISONS PROTOTYPES À UN ÉTAGE .....	91
ANNEXE II	PLANS DES MAISONS PROTOTYPES À DEUX ÉTAGES.....	95
ANNEXE III	EXEMPLE D'APPLICATION DE LA MÉTHODE FEMA P807 (FEMA, 2012) À UNE MAISON D'UN ÉTAGE.....	99
ANNEXE IV	COURBES DE POUSSÉE POUR LES SIX PROTOTYPES.....	101
ANNEXE V	DÉVELOPPEMENT DE LA COURBE DE CAPACITÉ DE LA CLASSE W1 STANDARD DE HAZUS .....	103
ANNEXE VI	GUIDE D'UTILISATION DU LOGICIEL AEBM.....	107
ANNEXE VII	EXEMPLE D'ANALYSE DE RÉGRESSION .....	111
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	.....	117



## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Exemples d'états de dommages - Bâtiments à ossature légère en bois (W1) Adapté de Hazus 5.1 (2022) .....26
Tableau 1.2	Description des classes de site .....37
Tableau 2.1	Dimensions du type de maison avec un étage : Longueur, largeur et hauteur .....43
Tableau 2.2	Dimensions du type de maison avec deux étages : Longueur, largeur et hauteur .....43
Tableau 2.3	Données de courbe charge-déplacement pour le matériau de contreventement Tiré de FEMA P-807 (2012).....46
Tableau 2.4	Données requises pour développer les courbes de fragilité des composants structurelle d'une maison à un étage .....61
Tableau 2.5	Données requises pour développer les courbes de fragilité des composants non structurels sensibles au déplacement relatif.....61
Tableau 2.6	Courbes de fragilité structurelle, incluant les valeurs médianes et les valeurs $\beta$ , pour les deux types de maisons.....62
Tableau 2.7	Paramètres des courbes de fragilité sensibles au déplacement des éléments non structurels, incluant les valeurs médianes et les valeurs $\beta$ , pour les deux types de maisons.....63
Tableau 2.8	Paramètres des courbes de fragilité pour les composants non structurels sensibles à l'accélération, incluant les valeurs médianes et les valeurs $\beta$ , pour les deux types de maisons.....64
Tableau 3.1	Coordonnées de la maison étudiée.....69
Tableau 3.2	Distance entre l'épicentre et les maisons étudiées (Répi).....69
Tableau 3.3	Intensités sismiques et taux de perte total (LR) pour une maison d'un étage à différentes distances de l'épicentre (Mw = 6, type de sol C), générés avec l'AEBM.....70

Tableau 3.4	Intensités sismiques et taux de perte total LR (%) pour une maison d'un étage selon différentes magnitudes sismiques, générés avec l'AEBM .....	71
Tableau 3.5	Intensités sismiques et taux de perte total LR (%) pour une maison d'un étage selon différents types de sol, générés avec l'AEBM .....	72
Tableau 3.6	Intensités sismiques pour différentes localités au Québec fournies par l'outil en ligne de Séisme Canada selon le CNB 2020, avec une probabilité de dépassement de 2 % sur une période de 50 ans et une classe de site C .....	73
Tableau 3.7	Équations pour le calcul de taux de perte total LR(%) des maisons à un et deux étages en fonction de $P_g$ (g) .....	78
Tableau 3.8	Équations pour le calcul de taux de perte total LR(%) des maisons à un et deux étages en fonction de $S_a$ (0.3s) (g) .....	78
Tableau 3.9	Équations pour le calcul de taux de perte total LR(%) des maisons à un et deux étages en fonction de $S_a$ (1s) (g) .....	78
Tableau 3.10	Intensité sismique pour différentes grandes villes, fournie par l'outil en ligne de Séisme Canada selon le CNB 2020, avec une probabilité de dépassement de 2 % sur une période de 50 ans et une classification de site de type C .....	83
Tableau 3.11	Intensité sismique pour différentes grandes villes, fournie par l'outil en ligne de Séisme Canada selon le CNB 2020, avec une probabilité de dépassement de 10 % sur une période de 50 ans et une classification de site de type C .....	83
Tableau 3.12	Comparaison des taux de perte totaux entre les deux nouvelles classes et la norme W1 de Hazus pour un aléa sismique avec une probabilité de dépassement de 2 % sur une période de 50 ans dans différentes villes du Québec .....	84
Tableau 3.13	Comparaison des taux de perte totaux entre les deux nouvelles classes et la norme W1 de Hazus pour un aléa sismique avec une probabilité de dépassement de 10 % sur une période de 50 ans dans différentes villes du Québec .....	85

## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 0.1	Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité sismique des maisons à ossature de bois.....7
Figure 1.1	Définition du risque sismique .....12
Figure 1.2	Caractéristiques d'une onde sismique.....14
Figure 1.3	Distribution du risque sismique urbain au Canada Tirée de Adams et al. (2002).....15
Figure 1.4	Répartition des zones sismiques au Québec Tirée de ressources naturelles Canada (2021) .....16
Figure 1.5	Carte d'aléa sismique du Canada Tirée de Séismes Canada (2021).....17
Figure 1.6	(a) Dommages et déplacement de cisaillement dans les murs du premier étage tiré de (ATC, 2002a) ; (b) Fissuration des murs en stuc du premier étage Tirée de ATC (2002).....20
Figure 1.7	Intersection entre le spectre de la demande et la courbe de capacité .....24
Figure 1.8	(a) Courbes de fragilité ; (b) Courbe de vulnérabilité Tirée de Abo El.Ezz (2013) .....27
Figure 1.9	Composition d'un mur avec contreplaqué et plaque de plâtre .....32
Figure 1.10	Courbes charge-déplacement pour deux combinaisons : (a) 100% contreplaqué et 50% plaque de plâtre ; (b) 50% contreplaqué et 100% plaque de plâtre.....32
Figure 1.11	(a) Exemple de plan du premier étage d'une maison ; (b) Courbe de charge – déplacement du premier étage de maison .....33

Figure 1.12	Frontière entre les deux régions WUS et CEUS Tirée de Hazus 5.1 (2022).....	36
Figure 2.1	Illustration d'un exemple de maison avec un étage développé à partir des rapports du SCHL (1974) : (a) Vue 3D ; (b) plan du prototype d'une maison.....	41
Figure 2.2	Illustration d'un exemple de maison avec deux étages développés à partir des rapports du SCHL (1974) : (a) Vue 3D ; (b) plan du prototype d'une maison.....	42
Figure 2.3	Distribution du type de parements pour les habitations de moins de 11 logements de l'île de Montréal .....	44
Figure 2.4	Illustration des types de matériaux de construction utilisée : (a) pour les murs extérieurs ; (b) les murs intérieurs .....	44
Figure 2.5	Paramètres clés pour la construction de la courbe de poussée selon la méthode FEMA P-807 .....	47
Figure 2.6	Courbe de poussée pour prototype 1 d'une maison à un étage.....	48
Figure 2.7	Courbe de poussée pour prototype 1 d'une maison à deux étages .....	48
Figure 2.8	Méthodologie de transformation d'une courbe de poussée en courbe de capacité .....	50
Figure 2.9	(a) Courbe de capacité en cisaillement avec défaillance séquentielle et enveloppe HAZUS; (b) Courbe de capacité pour le comportement fragile avec enveloppe HAZUS; (c) Courbe de capacité ductile avec résistance supplémentaire au-delà de l'état plastique Tirée de HAZUS-MH (2002).....	52
Figure 2.10	Illustration d'une courbe de capacité compatible avec la méthodologie Hazus.....	53
Figure 2.11	Courbes de capacité des différents prototypes de maisons à ossature légère en bois d'un étage et courbe moyenne correspondante .....	54

Figure 2.12	Courbes de capacité des différents prototypes de maisons à ossature légère en bois à deux étages et courbe moyenne correspondante.....	55
Figure 2.13	Illustration pour courbe de capacité moyenne pour une maison avec un étage et maison avec deux étages.....	56
Figure 2.14	Illustration des courbes de capacité obtenues avec la méthodologie simplifiée de FEMA P-807 pour maison à un étage et deux étages, ainsi que pour la catégorie W1 de Hazus.....	58
Figure 2.15	Courbes de fragilité pour les maisons à un étage basées sur les paramètres de fragilité structurelle .....	62
Figure 2.16	Courbes de fragilité pour les maisons à deux étages basés sur les paramètres de fragilité structurelle.....	63
Figure 2.17	Courbes de fragilité en fonction de l'accélération pour les maisons à un et deux étages .....	65
Figure 3.1	Régression du LR(%) maison à un étage en fonction du (a) PGA ; (b) de Sa(0,3s) ; (c) de Sa(1s) développées à partir des résultats obtenus de l'AE BM .....	75
Figure 3.2	Régression du LR(%) pour maison à deux étages en fonction du (a) PGA ; (b) de Sa(0,3s) ; (c) de Sa(1s) développées à partir des résultats obtenus de l'AE BM .....	76
Figure 3.3	Régression du LR(%) pour W1 Hazus en fonction du (a) PGA ; (b) de Sa(0,3s) ; (c) de Sa(1s) développées à partir des résultats obtenus de l'AE BM .....	77
Figure 3.4	Courbes moyennes de régression du LR (%) en fonction de Sa(0,3s) pour les deux nouvelles classes maison à un étage, et deux étages et la classe W1 standard de Hazus .....	80
Figure 3.5	Comparaison des ratios de pertes sismiques avec les résultats de l'étude Northridge .....	81



## **LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES**

AEBM	Advanced Engineering Building Module
ASCE	American Society of Civil Engineers
ATC	Applied Technology Council
CEUS	Central and Eastern United States
CNBC	Code National du Bâtiment du Canada
CSM	Capacity Spectrum Method
DS	Damage State
ENA	Eastern North America (GMPE)
FEMA	Federal Emergency Management
GIS	Geographic Information System
GMPE	Ground Motion Prediction Equation
GMM	Ground Motion Model
HAZUS	Hazards United States Loss Estimation Method
IBC	International Building Code
IM	Intensity Measure
NBCC	National Building Code of Canada
NRC	Natural Resources Canada
PGA	Peak Ground Acceleration
PGV	Peak Ground Velocity
SCHL	Société Canadienne d'Hypothèques et de Logement.
USGS	United States Geological Survey
WUS	Western United States





## LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

<i>Au</i>	Accélération spectrale au point ultime
<i>Ay</i>	Accélération spectrale au point d'élasticité
<i>Du</i>	Déplacement spectral au point ultime
<i>Dy</i>	Déplacement spectral au point limite d'élasticité
<i>g</i>	Accélération gravitationnelle
<i>IM</i>	Mesure d'intensité sismique
<i>IMM</i>	Intensité de Mercalli modifiée
<i>K</i>	Facteur de dégradation
<i>Lw</i>	Longueur de mur
<i>LR</i>	Taux de perte totale
<i>mb</i>	Magnitude basée sur les ondes de volume
<i>MDF</i>	Facteur moyen de dommage
<i>ML</i>	Magnitude locale
<i>MS</i>	Magnitude basée sur les ondes de surface
<i>MSE</i>	Erreur quadratique moyenne
<i>Mw</i>	Magnitude du moment sismique
<i>P</i>	Probabilité
<i>PFA</i>	Accélération maximale du plancher
<i>Qop</i>	Facteur d'ouverture
<i>Qot</i>	Facteur de renversement
<i>REPI</i>	Distance horizontale entre le site considéré et l'épicentre
<i>Sdy</i>	Déplacement spectral à l'élasticité
<i>Sau</i>	Accélération spectrale ultime
<i>Say</i>	Accélération spectrale à l'élasticité
<i>Sc</i>	Classe de site
<i>Sdu</i>	Déplacement spectral ultime
<i>V</i>	Force de cisaillement à la base
<i>V1x</i>	Force de cisaillement
<i>Vs30</i>	Vitesse moyenne de l'onde de cisaillement dans les 30 premiers mètres du site

$W$	Poids du bâtiment
$W1$	Maison type Hazus à ossature bois, un ou deux étages
$\alpha_1, \alpha_2$	Facteurs modaux de poussée
$\beta$	Écart-type logarithmique
$\Delta$	Taux de dérive inter-étage
$\Delta I, x$	Rapport de dérive

## INTRODUCTION

### Contexte et problématique

Au fil du temps, les tremblements de terre ont causé d'importants dégâts et de profondes perturbations économiques et sociales dans les communautés du monde entier. Bien que l'est du Canada soit situé dans une région à sismicité modérée, les tremblements de terre peuvent toujours représenter un danger réel et présent, comme l'a démontré le tremblement de terre du Saguenay du 25 novembre 1988 (Mw 5,9) (Chouinard et Rosset, 2007). Le séisme du Saguenay de 1988 est l'un des événements sismiques les plus importants des dernières décennies dans l'est de l'Amérique du Nord. Des dommages ont été observés jusqu'à 350 km de l'épicentre, causant une grande variété de dommages géotechniques et structurels à d'importants bâtiments tels que des écoles, des hôpitaux et des commerces (Mitchell et al., 1990) et a été ressenti aussi loin à l'ouest que Toronto et au sud que Washington, D.C. (Paultre et al., 1993).

Dans le contexte des constructions résidentielles, les séismes passés, tels que celui de San Fernando en 1971 et celui de Northridge en 1994 en Californie, ont montré qu'un nombre considérable de pertes s'est produit dans les maisons à ossature en bois, qu'elles soient à un ou deux étages (Rainer et Karacabeyli, 2000). Après le séisme de San Fernando en 1971, McClure (1973) a rapporté que de nombreuses maisons unifamiliales à ossature en bois se comportaient mal. L'ampleur des dégâts variait considérablement en fonction du type de sol sur lequel les maisons étaient construites ainsi que des méthodes de construction utilisées. Des vulnérabilités similaires ont été observées après le séisme de Northridge en 1994. Dans le cadre d'un effort de reconnaissance post-séisme, Filiatrault et Stieda (1995) ont examiné les dommages causés aux maisons à ossature en bois et ont identifié plusieurs faiblesses structurelles critiques. Leur étude a mis en évidence une série de stratégies d'atténuation conçues pour améliorer la résistance sismique de ces bâtiments.

Étant donné que les maisons à ossature en bois sont couramment utilisées dans les zones résidentielles de l'est du Canada, il est essentiel de comprendre les impacts potentiels des tremblements de terre sur ces maisons. Par conséquent, l'évaluation du risque sismique est essentielle pour permettre une atténuation efficace des catastrophes, la planification de la résilience, ainsi que l'élaboration de stratégies d'intervention d'urgence et de rétablissement. Depuis l'introduction de la première carte de zonage sismique dans le Code national du bâtiment du Canada (CNBC) de 1953, les dispositions relatives à la conception sismique ont été régulièrement mises à jour. Le CNBC de 2005 a marqué une étape importante et a apporté des changements significatifs à ces dispositions (Mitchell et al., 2010). Dans l'est du Canada, la plupart des maisons résidentielles à ossature en bois existantes ont été construites selon une approche conventionnelle (Rainer et al., 2004). Le chapitre 9 du CNBC décrit l'approche de la construction conventionnelle pour les bâtiments de trois étages au maximum et d'une superficie maximale de 600 m<sup>2</sup>, et se concentre principalement sur les exigences normatives plutôt que sur les calculs techniques détaillés. Pour les autres types de bâtiments, la conception sismique est régie par les principes d'ingénierie énoncés dans la partie 4 du CNB, ce qui nécessite une évaluation plus détaillée.

Par conséquent, les évaluations de la vulnérabilité sismique sont essentielles pour quantifier la performance sismique attendue des bâtiments à ossature en bois conventionnels lors des tremblements de terre. Cependant, peu d'études ont été menées dans l'est du Canada sur la vulnérabilité sismique de ce type de construction. La simulation de la réponse sismique des bâtiments à ossature en bois peut être réalisée à l'aide de diverses méthodes analytiques, telles que l'analyse statique non linéaire (analyse pushover), l'analyse dynamique non linéaire en domaine temporel et les méthodes par éléments finis. Ces méthodes permettent une évaluation détaillée de la performance d'un bâtiment et fournissent une simulation précise de la façon dont le bâtiment se comportera pendant les séismes, en tenant compte de facteurs tels que la non-linéarité des matériaux, les effets dynamiques et l'interaction entre les composants structurels. Cependant, malgré la précision de ces méthodes, elles nécessitent l'utilisation de plateformes logicielles spécialisées qui sont parfois sophistiquées et techniquement exigeantes. En outre, ces simulations sont généralement adaptées à des bâtiments individuels, sur la base de leurs

spécifications et configurations structurelles. Ces méthodes ont été utilisées dans des recherches antérieures, comme l'étude menée par White et Ventura (2007), où des modèles non linéaires de maisons unifamiliales typiques à ossature en bois ont été développés sur la base de données expérimentales, puis les modèles ont été analysés à l'aide de procédures dynamiques non linéaires dans le cadre du programme SAWS (Seismic Analysis of Wood frame Structures) afin de simuler le comportement sismique des structures et d'évaluer leurs performances lors de séismes. En raison de la complexité des méthodes avancées qui nécessitent une modélisation et une analyse détaillées, il existe un besoin de méthodologies simplifiées qui peuvent fournir des estimations raisonnables du risque sismique avec moins d'efforts de calcul.

Ceci est particulièrement important lors de l'évaluation d'un grand nombre de bâtiments à ossature bois dans le contexte de l'évaluation du risque sismique à l'échelle régionale, où le temps et les ressources sont limités. Pour y remédier, des méthodes simplifiées ont été développées afin d'estimer plus efficacement le risque sismique. La FEMA P-807 (FEMA, 2012), créée par l'Agence fédérale de gestion des urgences, a été adoptée dans cette étude. Elle fournit une procédure étape par étape pour évaluer les bâtiments à ossature bois sur la base d'une vaste base de données expérimentale de la réponse latérale des murs de cisaillement à ossature bois.

L'analyse du risque sismique implique la combinaison de trois facteurs clés l'aléa, l'exposition et la vulnérabilité de l'exposition (Pelissier et Badoux, 2003). La vulnérabilité est généralement quantifiée à l'aide d'ensembles de courbes de capacité qui estiment la caractérisation force-déformation latérale des bâtiments, ainsi que de fonctions de fragilité qui décrivent la probabilité qu'une structure atteigne un niveau de dommage pour une intensité sismique donnée. Aux États-Unis, le logiciel de gestion multi-risques HAZUS-MH (2011) est un outil développé par la Federal Emergency Management Agency (FEMA) pour estimer les impacts économiques d'un séisme (Kircher et al., 2006). Actuellement, Hazus est l'outil d'évaluation du risque sismique le plus utilisé en Amérique du Nord. Il contient des données sur la vulnérabilité des différents types de construction que l'on trouve en Amérique du Nord. L'une de ses caractéristiques principales est la classification des habitations en groupes spécifiques

selon leurs caractéristiques structurelles. Pour les structures légères en bois, il combine les maisons à un étage et celles à deux étages en un seul groupe, appelé W1.

D'autre part, des recherches récentes menées par (Heresi et Miranda, 2022) ont mis en évidence le fait que les maisons à un étage et à deux étages réagissent différemment aux charges sismiques latérales et devraient être classées en deux catégories distinctes. Pour améliorer la précision des estimations des pertes, il est essentiel de développer des fonctions de vulnérabilité plus raffinées tenant compte de la hauteur, des matériaux de construction et des différences structurelles entre les maisons à ossature en bois. Un système de classification séparant les maisons à un et à deux étages pourrait fournir des prévisions de pertes sismiques plus réalistes et contribuer à une meilleure évaluation des risques et à des stratégies d'atténuation.

La présente étude aborde ces limites et développe une méthodologie pour évaluer la vulnérabilité sismique des maisons à ossature légère en bois de l'Est du Canada, qui ont été construites selon des méthodes conventionnelles. Comme ces résidences nécessitent une analyse adaptée, l'étude analysera les caractéristiques structurelles de ces maisons, en développant des fonctions de vulnérabilité qui tiennent compte de leurs configurations spécifiques. En outre, des modèles d'estimation des pertes seront développés pour chaque type de maison afin de fournir des prévisions précises des dommages et des pertes économiques dans le cadre de différents scénarios sismiques.

## **Objectives**

L'objectif principal du projet est d'évaluer la vulnérabilité sismique des maisons à ossature bois existantes dans les zones urbaines de l'Est du Canada. Pour atteindre cet objectif principal, plusieurs objectifs spécifiques ont été définis :

- 1) Développer des courbes de capacité analytiques en utilisant l'analyse statique non linéaire pour simuler le comportement structurel sous des charges sismiques.

- 2) Dériver des courbes de fragilité analytiques pour chaque typologie de maison afin d'évaluer leur vulnérabilité à divers événements sismiques.
- 3) Simuler des scénarios réalistes de séismes dans les zones d'étude et estimer les pertes sismiques potentielles, y compris les dommages structurels et non structurels.

## **Méthodologie**

Pour atteindre les objectifs de cette étude, une méthodologie structurée a été développée pour évaluer la vulnérabilité sismique des maisons à ossature bois existantes dans les zones urbaines de l'Est du Canada. Cette méthodologie est illustrée à la Figure 0.1.

Pour atteindre le premier objectif du projet, des courbes de capacité ont été développées pour différents prototypes de maisons, en distinguant les maisons à un étage et les maisons à deux étages. Les courbes de poussée développées selon la méthodologie FEMA P-807 (FEMA, 2012) et appliquées à des prototypes représentatifs des pratiques de construction courantes.

Après avoir développé les courbes de capacité, les courbes obtenues ont été normalisées en termes d'accélération spectrale et de déplacement spectral comme le recommande la méthodologie Hazus (Hazus 5.1, 2022) permettant une comparaison de la capacité latérale de ces maisons avec la norme W1 de Hazus, qui regroupe à la fois les maisons à un étage et celles à deux étages.

Pour atteindre le deuxième objectif spécifique, des fonctions de fragilité pour les maisons à un et deux étages ont été développées en utilisant les équations et les paramètres décrits dans le manuel technique Hazus. Ces fonctions ont été créées pour les composants structurels, la dérive non structurelle et l'accélération non structurelle. Les fonctions de fragilité résultantes illustrent la probabilité que chaque type de maison atteigne des états de dommages spécifiques sous différentes intensités sismiques. Ces fonctions de fragilité seront utilisées pour analyser et évaluer la performance sismique des maisons prototypes.

Pour atteindre le troisième objectif, 60 scénarios sismiques ont été élaborés afin de couvrir un large éventail de conditions. La magnitude des séismes considérés était de 6, 6,5 et 7, et différents types de sol (A, B, C et D) ont été pris en compte pour tenir compte des effets d'amplification du sol. L'emplacement de l'épicentre a également été modifié pour refléter les différentes conditions sismiques et la distance entre l'épicentre et la maison a été considérée comme variant de 10 km à 40 km. Les équations de prédiction du mouvement du sol (GMPE) représentatives de la sismicité de l'Est de l'Amérique du Nord ont été utilisées. Le module avancé d'ingénierie des bâtiments (Advanced Engineering Building Module, AEBM) de Hazus a servi à modéliser et exécuter les différents scénarios. Parmi les 60 scénarios développés, 35 ont été utilisés pour l'élaboration des courbes d'estimation des pertes. Pour élaborer les courbes d'estimation des pertes, une analyse de régression et des équations statistiques ont été employées afin de mieux comprendre la relation entre les mesures d'intensité sismique, telles que l'accélération maximale du sol et les accélérations spectrales à 0,3 s et 1,0 s) et les pertes économiques directes estimées en termes de taux de perte (LR), lequel correspond au ratio entre les pertes économiques estimées et le coût de remplacement du bâtiment. Une analyse comparative a été réalisée entre les estimations de pertes dérivées des courbes de capacité nouvellement développées pour les maisons à un et deux étages et celles de la classification standard W1 afin de quantifier les écarts obtenus. Enfin, l'outil de calcul des risques sismiques du Code national canadien du bâtiment (CNBC) a été utilisé pour calculer les caractéristiques sismiques de différents centres urbains de la province de Québec afin d'évaluer la performance sismique relative des maisons à ossature bois pour des intensités de mouvement du sol correspondant à des probabilités de dépassement de 2 % et de 10 % en 50 ans.



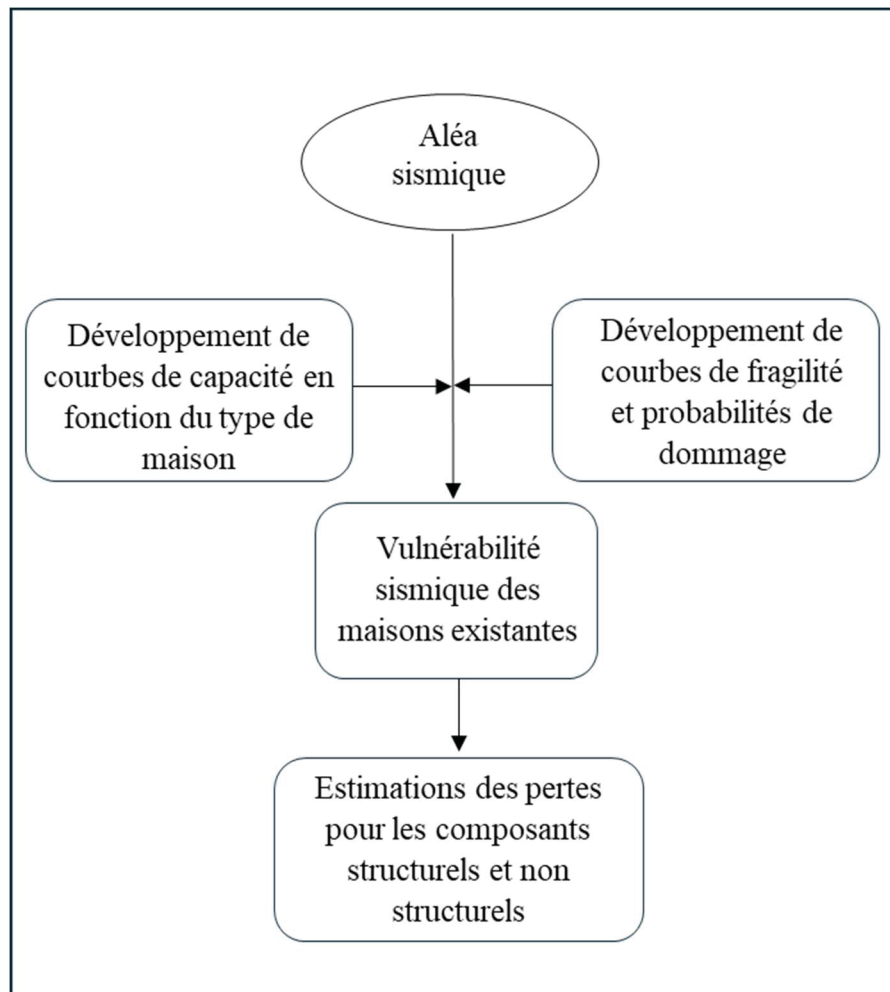


Figure 0.1 Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité sismique des maisons à ossature de bois

## Organisation et contenu du mémoire

Le mémoire se compose de trois chapitres. Le premier chapitre est une revue de la littérature sur l'évaluation du risque sismique des maisons unifamiliales. Il met en évidence les facteurs qui affectent cette évaluation et contribuent à la vulnérabilité sismique de ces maisons. Le chapitre donne un aperçu des méthodes utilisées pour générer des courbes de poussée, des courbes de capacité, des fonctions de fragilité et de vulnérabilité, en utilisant des approches simplifiées comme le manuel technique Hazus (Hazus 5.1, 2022) et FEMA P-807 (FEMA,

2012). En outre, il aborde les étapes nécessaires à l'analyse des dommages et des pertes, y compris l'élaboration de scénarios sismiques et les équations de prédiction du mouvement du sol (GMPE), utilisées dans l'Est du Canada.

Le chapitre deux présente la vérification de la méthodologie FEMA P-807 (FEMA, 2012) et le développement des courbes de capacité pour six prototypes différents, ainsi que les courbes de capacité moyennes pour chaque type de maison. Ce chapitre comprend également la normalisation de ces courbes de capacité en termes d'accélération spectrale et de déplacement spectral, en utilisant les directives Hazus, ce qui permet une comparaison directe de la capacité latérale de ces maisons avec la norme W1 de Hazus qui combine à la fois les maisons à un étage et les maisons à deux étages. De plus, ce chapitre couvre le développement des fonctions de fragilité, qui illustrent la probabilité de dépasser différents états de dommage.

Le chapitre 3 examine les différents scénarios développés pour étudier l'estimation des pertes économiques directes pour les types de maisons à un et deux étages, en soulignant l'impact de la magnitude, du type de sol et de la distance épacentrale sur les résultats. Il décrit les étapes clés nécessaires pour générer et exécuter ces scénarios à l'aide du modèle AEBM, y compris la sélection de l'équation de prédiction du mouvement du sol, qui combine plusieurs équations d'atténuation. Pour développer des courbes d'estimation des pertes pour la zone sismique modérée, 35 des 60 scénarios ont été sélectionnés. Ce filtrage était basé sur les caractéristiques sismiques moyennes maximales observées dans plusieurs endroits au Québec, y compris Charlevoix, Montréal, Trois-Rivières, Gatineau, Saguenay et Sherbrooke, en tenant compte d'une probabilité de dépassement de 2 % sur 50 ans.

Les courbes d'estimation des pertes ont été générées en utilisant trois paramètres sismiques différents : PGA,  $S_a(0.3s)$ , et  $S_a(1s)$ , permettant une analyse détaillée des tendances et de la relation entre les ratios de pertes et les caractéristiques sismiques. L'analyse de régression et la modélisation statistique ont été utilisées pour garantir une estimation robuste tout en tenant compte des incertitudes liées aux données et au modèle. Une analyse comparative a été réalisée pour les types de maisons à un étage, à deux étages et pour la typologie W1 du Hazus, ce qui

a permis de mieux comprendre les variations des performances structurelles. Des études de cas spécifiques ont été réalisées pour Gatineau, Montréal, Sherbrooke et la ville de Québec, en tenant compte de deux probabilités de dépassement différentes (2 % et 10 % sur 50 ans), afin d'évaluer la sensibilité des prévisions de pertes à différents niveaux d'aléa sismique.

### **Contributions de la thèse**

1) De nouveaux ensembles de courbes de capacité et de fonctions de fragilité, représentatifs de la construction conventionnelle de maisons à ossature en bois dans l'Est du Canada, ont été développés. Ces ensembles de courbes ont été utilisés pour effectuer l'estimation des pertes dans des logiciels standardisés tels que Hazus et sont facilement disponibles pour être intégrés dans d'autres outils d'évaluation des risques sismiques.

2) De nouveaux modèles prédictifs ont été élaborés pour estimer directement le taux de pertes économiques en fonction des mesures d'intensité sismique. Ces équations prédictives du taux de perte sont particulièrement utiles pour l'évaluation rapide des pertes économiques directes dans le cadre d'études d'évaluation du risque sismique à l'échelle régionale.



## CHAPITRE 1

### REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre présente une revue de littérature sur l'évaluation de la vulnérabilité sismique des maisons légères à ossature de bois à un et deux étages. Il couvre les concepts fondamentaux du risque sismique, la sismicité de l'Est du Canada, en particulier de la province de Québec, et les principes d'évaluation sismique. Le chapitre aborde également les méthodes de construction utilisées pour ces maisons, en particulier la construction conventionnelle et la classification des habitations selon Hazus (Hazus 5.1, 2022). En outre, il décrit les paramètres essentiels et la méthodologie nécessaires pour élaborer les courbes de poussée, de capacité et de fragilité pour ces habitations. La section finale traite de l'analyse des dommages et des pertes, en expliquant les étapes nécessaires pour calculer les pertes économiques selon différents scénarios sismiques, et en évaluant les équations de prédiction du mouvement du sol (GMPE) appropriées pour l'Amérique du Nord.

#### 1.1 Risque sismique

Le risque sismique  $R$  fait référence aux dommages potentiels qu'un tremblement de terre peut causer aux bâtiments, aux infrastructures et aux vies humaines pour un site ou une région donnée. Selon Pelissier et Badoux (2003), le risque sismique est une combinaison de trois facteurs, comme l'indique l'équation (1.1).

$$R = A * V_u * V_a \quad (1.1)$$

$A$  représente l'aléa sismique, défini comme la probabilité qu'un séisme d'une certaine magnitude affecte une région donnée. Ce phénomène naturel est caractérisé par son intensité et sa période de retour (ou fréquence). En plus de la sismicité, des effets de site peuvent être inclus dans l'aléa. Ces effets comprennent les conditions du sol qui provoquent une amplification ou une liquéfaction.

Vu, représentant la vulnérabilité du système considéré, est définie comme le degré auquel cette structure peut être affectée par un séisme. Elle est généralement quantifiée par le niveau de dommages observés. Et  $V_a$  représente la valeur totale des pertes potentielles, incluant les pertes en vies humaines, les biens mobiliers et immobiliers. Étant donné que le risque sismique dépend de ces trois facteurs, il varie considérablement d'une région à une autre. Il est généralement exprimé de manière quantitative. Ce risque est non seulement affecté par les caractéristiques de l'aléa sismique lui-même, mais aussi par la qualité de la construction des bâtiments dans la zone touchée.

La Figure 1.1 présente la définition du risque sismique en tant que fonction de l'aléa et de la vulnérabilité.

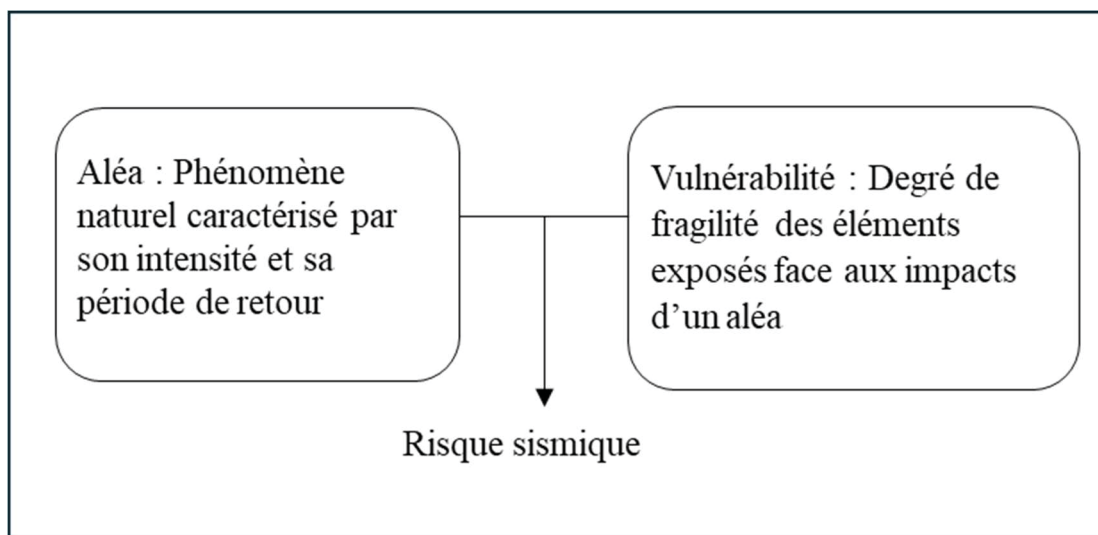


Figure 1.1 Définition du risque sismique

## 1.2 Paramètres d'un séisme

Les tremblements de terre sont des phénomènes géologiques qui provoquent des vibrations à la surface du sol. Selon Ressources naturelles Canada (2025), environ 5 000 séismes se produisent chaque année. La plupart sont de faible intensité, ne durent que quelques secondes et ne causent pas de dommages. Les séismes sont principalement causés par le mouvement des plaques tectoniques, les grandes plaques qui composent la couche externe de la Terre. Ce processus est bien expliqué par la théorie élastique de Reid (Filiatrault, 1996). Selon cette théorie, au fur et à mesure que la croûte terrestre se déplace lentement, des contraintes s'accumulent progressivement le long des lignes de faille. Ces contraintes s'accumulent jusqu'à ce qu'elle dépasse la résistance des roches, provoquant un déplacement soudain. Cette libération soudaine d'énergie génère des ondes sismiques, qui se propagent à travers la Terre et provoquent les secousses du sol que l'on observe lors d'un séisme. Jusqu'à présent, les scientifiques ne peuvent pas prédire le moment, le lieu ou l'ampleur exacts d'un séisme. Les ondes sismiques sont définies par trois points clés : l'hypocentre, qui est le point d'origine du séisme et peut se situer à différentes profondeurs ; l'épicentre, qui est le point situé à la surface de la Terre directement au-dessus de l'hypocentre ; et la profondeur focale, qui est la distance verticale entre l'hypocentre et l'épicentre. La Figure 1.2 illustre les points clés d'une onde sismique.

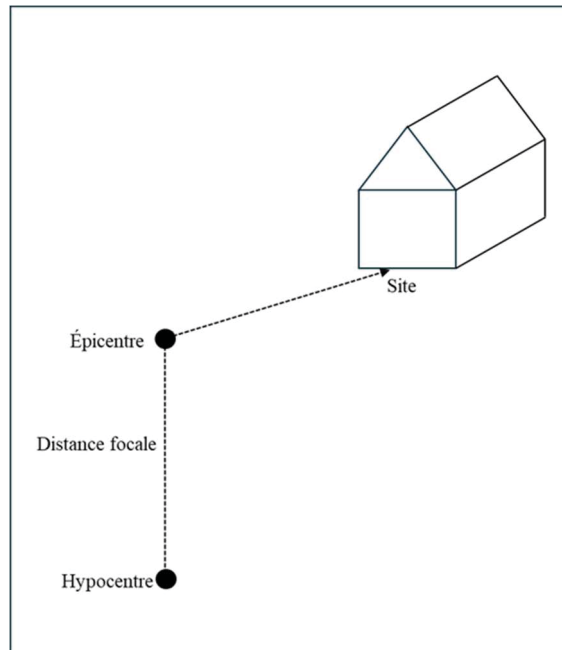


Figure 1.2 Caractéristiques d'une onde sismique

### 1.2.1 Magnitude

L'ampleur d'un séisme est quantifiée par sa magnitude, qui traduit l'énergie libérée et l'intensité des ondes sismiques émises. En 1935, l'échelle ML de Richter a été introduite dans le sud de la Californie pour comparer les magnitudes relatives des séismes. Richter a adopté le sismomètre à torsion mis au point par Wood-Anderson. Pour élaborer son échelle, il a tenu compte de la relation entre l'amplitude maximale mesurée par l'instrument et la distance de l'épicentre (Filiatrault, 1996). Au fil du temps, l'idée originale de Richter a été développée et affinée et d'autres échelles de magnitude ont été mises au point, notamment la magnitude de l'onde de corps  $M_b$  et la magnitude de l'onde de surface  $M_s$ , toutes ces échelles étant logarithmiques. En 1970, l'échelle de magnitude du moment  $M_w$  a été développée et est devenue la plus utilisée pour mesurer la magnitude des tremblements de terre, en particulier pour les tremblements de terre les plus importants. Elle est basée sur le moment sismique, plutôt que sur les amplitudes des ondes sismiques enregistrées par les sismographes. Au Canada, les magnitudes des séismes sont généralement exprimées à l'aide de l'échelle de magnitude du moment ( $M_w$ ).



### 1.3 Zones sismiques au Canada

Au Canada, il existe trois zones sismiques : L'Ouest du Canada, le Nord du Canada et l'Est du Canada. Les séismes dans l'Ouest et le Nord du Canada sont généralement causés par le mouvement continu de grands segments de la croûte terrestre, appelés plaques tectoniques. Ce processus est la cause la plus fréquente des tremblements de terre dans le monde, puisqu'il est à l'origine de 97 % des événements. Contrairement à l'Ouest et au Nord du Canada, l'Est du Canada se trouve dans une partie stable de la plaque nord-américaine, où les causes de l'activité sismique restent inexplicées. Cependant, les séismes dans ces régions semblent être liés aux champs de contraintes régionaux, avec une concentration des événements sismiques dans des zones de faiblesse de la croûte terrestre (Séismes Canada, 2021). La Figure 1.3 illustre la répartition du risque sismique urbain au Canada. Elle indique que plus des trois quarts de la vulnérabilité totale sont concentrés dans six grandes villes : Vancouver, Montréal, Québec, Toronto, Victoria et Ottawa/Hull. Vancouver et Montréal présentent les risques sismiques les plus élevés, tandis que le reste du risque est réparti dans d'autres municipalités à risque relatif plus faible.

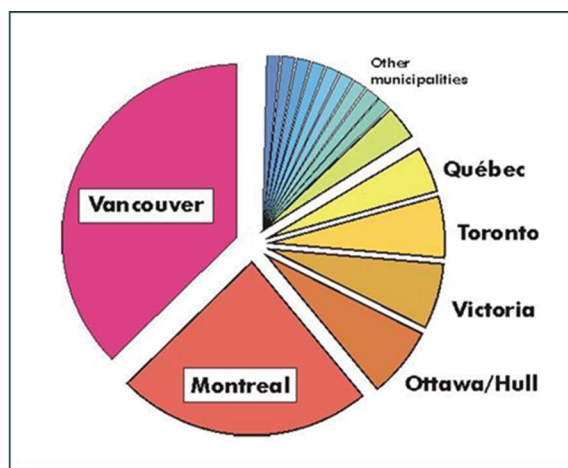


Figure 1.3 Distribution du risque sismique urbain au Canada  
Tirée de Adams et al. (2002)

Le Québec comprend trois principales zones sismiques : la région de Charlevoix-Kamouraska sous le fleuve Saint-Laurent, la partie ouest de la province incluant Gatineau et Montréal, ainsi que le Bas-Saint-Laurent. La zone sismique de Charlevoix, située à environ 100 km à l'est de la ville de Québec, est la région la plus active en matière de sismicité dans l'est du Canada. Cette zone a enregistré deux séismes d'une magnitude de 7 : un en 1663 (M7,3) et un autre en 1791 (M7), ainsi que trois séismes d'une magnitude de 6 en 1860 (M6), 1870 (M6,5) et 1925 (M6,2). La Figure 1.4 montre les trois principales zones sismiques du Québec, selon Ressources naturelles Canada (2021).

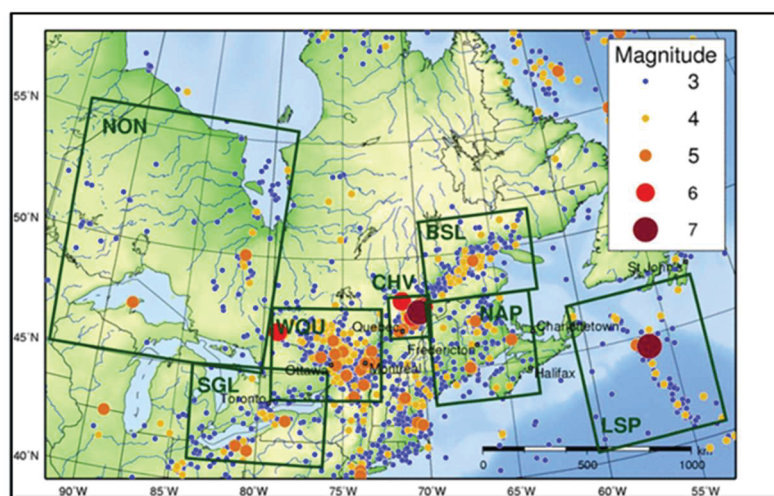


Figure 1.4 Répartition des zones sismiques au Québec  
Tirée de ressources naturelles Canada (2021)

Ressources naturelles Canada (CNRC) a produit des cartes pour chaque province afin de montrer les mouvements basés sur l'accélération spectrale à différentes périodes, notamment 0,05, 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, 1,0, 2,0, 5,0 et 10,0 secondes. La Figure 1.5 représente une carte simplifiée des aléas sismiques tirée du Code national du bâtiment du Canada 2015 (CNBC) pour la province de Québec.

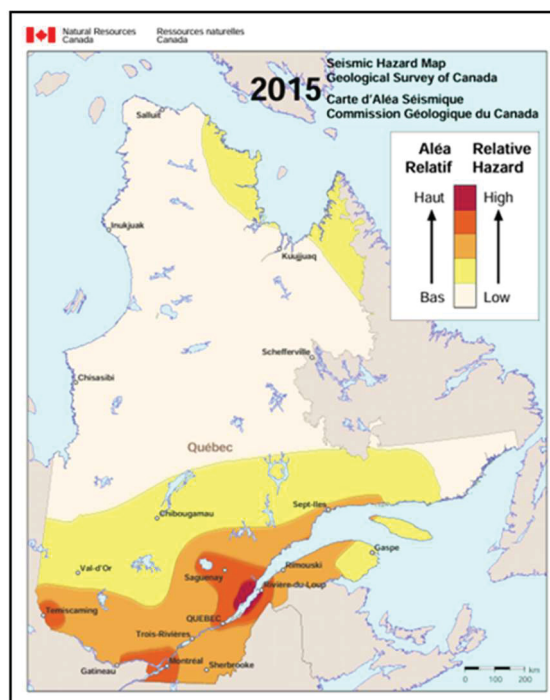


Figure 1.5 Carte d'aléa sismique  
du Canada  
Tirée de Séismes Canada (2021)

Au fil du temps, la cartographie de l'aléa sismique au Canada a évolué vers une méthode probabiliste plus sophistiquée, utilisant des paramètres d'accélération spectrale à faibles probabilités pour des prévisions plus précises. Le modèle d'aléa sismique de 6<sup>e</sup> génération, développé pour le Code national du bâtiment du Canada 2020 (CNBC2020), introduit des mises à jour significatives des modèles de mouvement du sol (GMM), qui ont augmenté l'aléa sismique prédit, en particulier dans l'est du Canada. En outre, l'aléa est désormais calculé directement pour chaque type de site standard, ce qui supprime le besoin de tableaux supplémentaires dans les codes du bâtiment. Ces changements sont conformes aux meilleures pratiques mondiales et garantissent que les évaluations de l'aléa sismique sont plus précises et plus fiables (Adams et al, 2020).

#### **1.4 Comportement sismique des maisons à ossature en bois lors de séismes passés**

Les maisons unifamiliales à ossature en bois sont la forme la plus courante de construction résidentielle dans les régions sismiquement actives telles que les États-Unis, le Canada et la Nouvelle-Zélande (Heresi & Miranda, 2020). Au cours des dernières décennies, plusieurs séismes de magnitude modérée (Mw 6.0-6.9) survenus en Californie ont causé des dommages importants à ces structures, entraînant des pertes financières considérables. Les types de dommages observés variaient en gravité, l'une des principales formes étant les dommages aux murs de cisaillement, qui est classé comme grave en raison de son impact sur l'intégrité structurelle des maisons. Ce type de dégâts a souvent conduit à l'apposition d'une étiquette rouge, indiquant que la maison était dangereuse à occuper. Une autre forme courante de dégâts concerne les cheminées, qui présentent des risques de chute et augmentent les risques d'incendie et d'intoxication au monoxyde de carbone. Ces problèmes ont été une cause majeure de l'attribution d'une étiquette jaune aux maisons touchées, limitant ainsi leur utilisation (Heresi & Miranda, 2020). Par conséquent, les séismes modérés en Californie ont conduit à l'étiquetage jaune ou rouge de milliers de bâtiments et, plus important encore, au déplacement de dizaines de milliers de résidents de leur domicile pour de longues périodes. Un autre événement majeur ayant révélé la vulnérabilité des maisons à ossature en bois fut le séisme de San Fernando en Californie en 1971. Selon les statistiques de la ville de San Fernando, de la ville de Los Angeles et du comté de Los Angeles, environ 20 500 maisons unifamiliales ont été endommagées lors de ce séisme. Parmi elles, 730 maisons ont été démolies ou ont nécessité une réhabilitation importante. Les autorités locales ont estimé le total des dommages subis par les maisons unifamiliales à 58 millions de dollars. Par ailleurs, des estimations plus larges, couvrant l'ensemble de la zone affectée, évaluent les pertes liées aux habitations unifamiliales à environ 114,4 millions de dollars, sans tenir compte de la valeur des terrains et des contenus (McClure, 1973).

De même, des études menées après le séisme de Northridge en 1994 ont révélé plusieurs faiblesses majeures dans la construction résidentielle à ossature en bois, notamment dans les maisons unifamiliales et les immeubles d'appartements. Étant donné les similitudes dans les

pratiques de construction résidentielle entre le Canada et les États-Unis, ces résultats soulignent l'urgence d'améliorer les stratégies de conception sismique et de renforcement des bâtiments à ossature en bois dans les régions sujettes aux tremblements de terre (Filiatrault et Stieda, 1995).

Le séisme de Christchurch, en Nouvelle-Zélande, qui a atteint une magnitude de Mw 6,3 en 2011, a encore mis en évidence ces vulnérabilités. Il a provoqué une importante liquéfaction, un phénomène dans lequel le sol se comporte temporairement comme un liquide, et a ainsi causé de graves dommages à des milliers de maisons à ossature bois (Buchanan et al., 2011). Le séisme a fait 185 morts et rendu environ 16 000 maisons inhabitables, provoquant d'importants déplacements de population. Les coûts de réparation et de reconstruction après le séisme de février 2011 ont été estimés à environ 20 milliards de dollars.

Sur la base de l'enquête et des études menées après les séismes passés, les résultats soulignent que les performances des maisons à ossature bois doivent être évaluées individuellement, en fonction de leurs caractéristiques spécifiques. Par exemple, les maisons à deux étages et à demi-niveaux ont subi des dommages plus importants que les maisons à un étage, comme l'a démontré le séisme de San Fernando (McClure, 1973). Heresi et Miranda (2022) ont fourni une comparaison détaillée des performances sismiques entre les maisons en bois à un et deux étages, mettant en évidence des différences significatives. Leur analyse montre que les maisons à deux étages subissent généralement des déplacements spectraux plus importants ainsi que des dérives inter-étages plus élevées. Ils ont constaté que les maisons à deux étages sont nettement plus vulnérables et subissent en moyenne des déplacements spectraux 4,7 fois plus importants que ceux des maisons à un étage. En outre, les maisons à deux étages ont tendance à concentrer les contraintes de déformation au premier étage, ce qui entraîne des dérives entre étages 4,6 fois plus importantes que celles observées dans les maisons à un étage. Sur cette base, les maisons à deux étages ont tendance à subir des dommages importants au premier étage, tandis que les étages supérieurs restent souvent presque intacts (Heresi et Miranda, 2022). L'étude souligne l'importance de distinguer les maisons à ossature bois à un et deux étages dans les évaluations de la performance sismique. Des observations réelles, telles que le

séisme de Northridge en 1994, confirment ces résultats en montrant des schémas de dommages similaires dans des bâtiments réels. La Figure 1.6 présente des exemples de maisons à deux étages qui ont subi des dommages lors du séisme de Northridge en 1994. La figure montre que les dommages sont concentrés au premier étage, tandis que l'étage supérieur semble avoir subi peu ou pas de dommages (Heressi et Miranda, 2022).

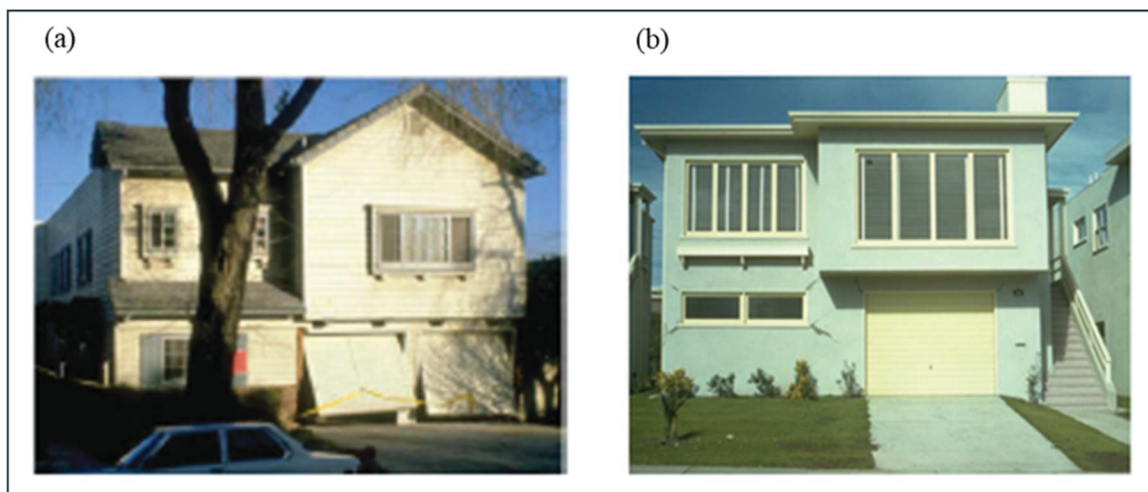


Figure 1.6 (a) Dommages et déplacement de cisaillement dans les murs du premier étage tiré de (ATC, 2002a) ; (b) Fissuration des murs en stuc du premier étage  
Tirée de ATC (2002)

## 1.5 Construction à ossature bois conventionnelle

La construction à ossature bois est le type de structure prédominant pour les maisons individuelles et les immeubles multifamiliaux de faible hauteur en Amérique du Nord, représentant environ 90 % de l'ensemble des habitations résidentiels, comme le soulignent (Fischer et al., 2001). Dans l'est du Canada en particulier, de nombreuses maisons unifamiliales à un ou deux étages sont généralement construites à ossature bois. Le Code national du bâtiment du Canada a été publié pour la première fois en 1941 et ne comprenait aucune disposition relative à la conception parasismique ; des éditions subséquentes ont été publiées au fil des ans. La version la plus récente, publiée en 2020, offre des lignes directrices complètes pour garantir la sécurité structurelle des bâtiments dans diverses conditions de charge, y compris les séismes. Les maisons à ossature légère en bois sont très répandues au Canada, où

elles peuvent être classées en deux catégories : les maisons à un étage et les maisons à deux étages. Il est essentiel de distinguer ces deux catégories afin d'évaluer la vulnérabilité des structures existantes en fonction de leurs caractéristiques spécifiques. Les principales typologies de constructions en bois observées au Canada comprennent les bâtiments résidentiels à ossature légère de faible hauteur et de hauteur moyenne.

Dans le cadre de cette recherche, les maisons à ossature en bois conventionnelles sont analysées, en mettant en évidence les paramètres clés qui influencent significativement la capacité d'une structure à résister aux forces latérales. L'un des facteurs clés est la configuration des étages, car le nombre d'étages influe considérablement sur la réponse sismique en raison des différences de répartition du poids et de hauteur.

Au-delà du nombre d'étages, d'autres caractéristiques structurelles jouent également un rôle crucial dans la vulnérabilité sismique. Des facteurs tels que la géométrie globale, l'emplacement et la taille des ouvertures murales, telles que les fenêtres et les portes, ainsi que les irrégularités dans le plan de la maison peuvent avoir un impact significatif sur les performances structurelles. De plus, les matériaux de construction contribuent de manière significative à la résistance latérale globale d'une structure. Cela inclut à la fois les matériaux de la façade extérieure et la configuration des murs intérieurs, qui influencent la capacité du bâtiment à résister aux charges sismiques. Le type de matériau de revêtement en bois, qui peut varier entre le contreplaqué ou les planches de bois horizontales, joue un rôle crucial dans la stabilité latérale. De même, la configuration des murs intérieurs, généralement en plaques de plâtre, et la façade extérieure, qui peut être en bois ou en brique, influent également sur la résistance sismique de la structure.

En analysant attentivement les éléments de conception tels que la configuration des étages, le choix des matériaux, le type de façade, la disposition des murs intérieurs et les ouvertures, il est possible d'étudier la vulnérabilité sismique de chaque type de maison individuellement. La partie 9 du NBCC fournit des exigences normatives pour la conception et la construction de petits bâtiments conventionnels. Ces bâtiments sont généralement limités à trois étages ou



moins et ont une superficie maximale de 600 mètres carrés (NBCC, 2020). Cette partie fournit des exigences normatives qui permettent des méthodes de construction standardisées et simples, sans nécessiter d'analyse technique détaillée. Elle ne comprend donc pas de dispositions relatives à la conception parasismique.

D'autre part, la partie 4 du NBCC traite de la conception de structures plus grandes et plus complexes. Elle comprend des méthodologies d'ingénierie détaillées pour la conception parasismique, abordant des facteurs tels que l'analyse dynamique, les spectres de réponse, la ductilité, la résistance et les conditions spécifiques au site. Ces dispositions sont essentielles pour garantir la résilience et la sécurité des bâtiments dans les régions sismiques, en particulier ceux qui dépassent les limites de la construction conventionnelle.

Au fil des ans, de nombreuses maisons à ossature en bois existantes au Canada ont été construites conformément aux directives conventionnelles énoncées dans la partie 9 du CCBN. Bien que cette méthode de construction présente de nombreux avantages, notamment sa flexibilité et sa rentabilité, elle pose également des défis particuliers en matière de vulnérabilité sismique. Ces directives s'appuient sur des règles empiriques élaborées à partir de nombreuses années d'expérience dans le domaine de la construction plutôt que sur des calculs techniques détaillés et des analyses sismiques. Par conséquent, les structures non conçues par des ingénieurs et construites selon ces normes conventionnelles ont une résistance sismique inconnue. De nombreuses maisons à ossature en bois peuvent donc être exposées à des risques de dommages sismiques, ce qui souligne l'importance d'une évaluation quantitative de leur résistance sismique.

## **1.6 Courbes de poussée, courbes de capacité et méthode du spectre de capacité**

Les courbes de poussée et les courbes de capacité sont des outils essentiels dans l'analyse structurelle. Lors de l'étude de la performance sismique des structures, il est crucial de différencier la courbe de poussée de la courbe de capacité. La courbe de poussée est dérivée d'un graphique représentant le cisaillement statique équivalent à la base en fonction du



déplacement du bâtiment au niveau du toit. Cette méthode, décrite dans le manuel technique du module d'ingénierie avancée des bâtiments (AEBM) de la FEMA, fournit une approche simple mais efficace pour estimer la capacité de résistance d'un bâtiment. À mesure que des forces latérales sont appliquées de manière incrémentielle, la courbe de pushover révèle la réponse du bâtiment, y compris les transitions entre le comportement élastique et inélastique, ce qui aide à comprendre les performances sous charge sismique (FEMA, 2002). D'autre part, la courbe de capacité est dérivée de l'analyse de poussée. Cette transformation normalise la réponse structurelle en termes d'accélération spectrale ( $S_a$ ) et de déplacement spectral ( $S_d$ ). Chaque courbe de capacité est définie par deux points clés qui sont le point de limite d'élasticité et le point ultime. Cette courbe met en évidence la force latérale que le bâtiment peut résister avant la rupture (Hazus 5.1, 2022).

La conversion de la courbe de poussée en courbe de capacité permet une comparaison directe avec la demande spectrale, qui représente les forces sismiques attendues. Cette transformation normalise la réponse structurelle en termes d'accélération spectrale et de déplacement spectral. La performance sismique du bâtiment est déterminée à l'intersection de la courbe de capacité et du spectre de demande, connue sous le nom de point de performance, comme décrit dans le manuel technique du module d'ingénierie avancée des bâtiments (AEBM) de la FEMA (FEMA, 2002). La Figure 1.7 montre un exemple d'intersection entre la demande sismique et la courbe de capacité, connue sous le nom de méthode du spectre de capacité, qui permet d'évaluer la performance sismique de la structure en comparant la demande sismique à sa capacité.

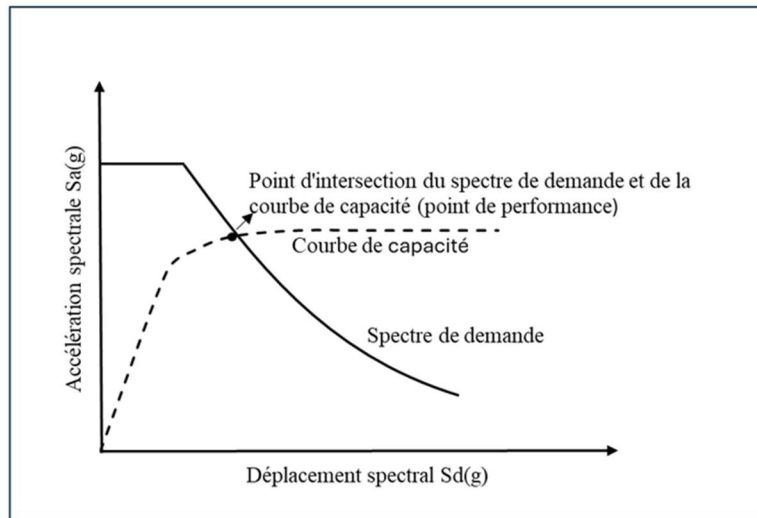


Figure 1.7 Intersection entre le spectre de la demande et la courbe de capacité

## 1.7 Courbes de fragilité et de vulnérabilité

Avant de procéder à l'élaboration des courbes de fragilité et de vulnérabilité, il est essentiel de clarifier les définitions de ces termes et de les différencier afin d'éviter toute confusion.

### 1.7.1 Courbes de fragilité

Les courbes de fragilité sont des modèles graphiques utilisés pour fournir la probabilité d'atteindre ou de dépasser un certain niveau de dommages (aucun, léger, modéré, important ou complet) en fonction d'une intensité sismique donnée. Elles peuvent être représentées par l'équation suivante (1.2) :

$$Fragilité = P(DS / IM) = x \quad (1.2)$$

où DS est l'état limite de dommage de la structure, IM est la mesure de l'intensité sismique qui est généralement exprimée en termes d'accélération maximale du sol (PGA) ou d'accélération spectrale  $Sa(T)$  ou de réponse spectrale au déplacement (Sd) et x est la valeur de probabilité résultante (Hanus 5.1, 2022).

Les courbes de fragilité sont représentées par une distribution de probabilité log-normale avec une valeur médiane et un écart type. La valeur médiane représente le niveau de déplacement spectral, tandis que l'écart type ( $\beta$ ) indique la dispersion ou la variabilité des données autour de la médiane. La distribution log-normale est généralement utilisée car elle s'est avérée bien adaptée à la distribution des dommages structurels (Wen et al., 2004). Il existe de nombreuses approches pour créer des courbes de fragilité, telles que les méthodes empiriques, les méthodes analytiques et les méthodes basées sur le jugement, qui s'appuient sur l'avis d'experts et une évaluation subjective pour déterminer la probabilité de dommages pour différents niveaux d'intensité sismique, ou une combinaison de ces modèles, connue sous le nom de méthode hybride (Rossetto et Elnashai, 2005). Toutes les méthodes utilisées pour prédire la vulnérabilité sismique comportent des incertitudes. Cependant, en raison de la disponibilité limitée des données sur les dommages observés dans les régions modérément sismiques comme l'est du Canada et de la nature subjective des évaluations d'experts, la modélisation récente de la vulnérabilité repose principalement sur des méthodes analytiques (Abo El Ezz, 2013). L'analyse de la fragilité des maisons repose sur des modèles probabilistes de la demande sismique ainsi que sur la capacité des composants à résister à cette demande, qui est caractérisée par des états limites correspondant à différents niveaux de dommages. Ces états limites sont décrits de manière qualitative. Le Tableau 1.1 présente les quatre états de dommages définis dans (HAZUS 5.1, 2022) pour la maison W1, qui désigne les maisons à ossature légère en bois de un et deux étages, construites selon des méthodes conventionnelles.

Tableau 1.1 Exemples d'états de dommages - Bâtiments à ossature légère en bois (W1)  
Adapté de Hazus 5.1 (2022)

Damage state	Description
Léger	Fissures mineures, n'affectant pas l'intégrité structurelle.
Modéré	Ces dommages comprennent de grandes fissures dans le plâtre ou les plaques de plâtre près des portes et des fenêtres, ainsi que de petites fissures diagonales dans les panneaux muraux de cisaillement.
Étendu	Ces dommages comprennent de grandes fissures diagonales dans les panneaux muraux de cisaillement, ainsi que des fissures importantes au niveau des joints des panneaux de contreplaqué.
Complet	Ces dommages indiquent une instabilité structurelle grave, avec un déplacement latéral permanent important et de grandes fissures. En moyenne, 3% des bâtiments complètement endommagés devraient s'effondrer.

### 1.7.2 Fonctions de vulnérabilité

La vulnérabilité désigne l'ampleur des pertes économiques qu'une structure peut subir lors d'un séisme (Porter, 2002). Elle est calculée à partir de la fonction de fragilité et de la valeur de la structure. En général, les courbes de vulnérabilité peuvent être dérivées des courbes de fragilité en introduisant un facteur de dommage moyen (MDF) pour estimer les pertes économiques. Ce facteur est le rapport entre le coût de réparation et le coût de remplacement du bâtiment. La courbe de vulnérabilité illustrant le MDF en fonction de l'intensité sismique peut être générée. En résumé, la courbe de fragilité illustre la probabilité d'atteindre un certain niveau de dommage, tandis que la fonction de vulnérabilité quantifie les dommages qui se produisent à un niveau donné d'intensité sismique. La figure 1.8, tirée de Abo El.Ezz (2013), met en évidence la différence entre les deux courbes de dommages : la figure 1.8 (a) illustre la probabilité de dépasser différents états de dommages en fonction de l'accélération spectrale  $S_a$ ,

tandis que la figure 1.8 (b) présente le facteur de dommage moyen, qui représente le rapport entre le coût de réparation prévu et le coût de remplacement.

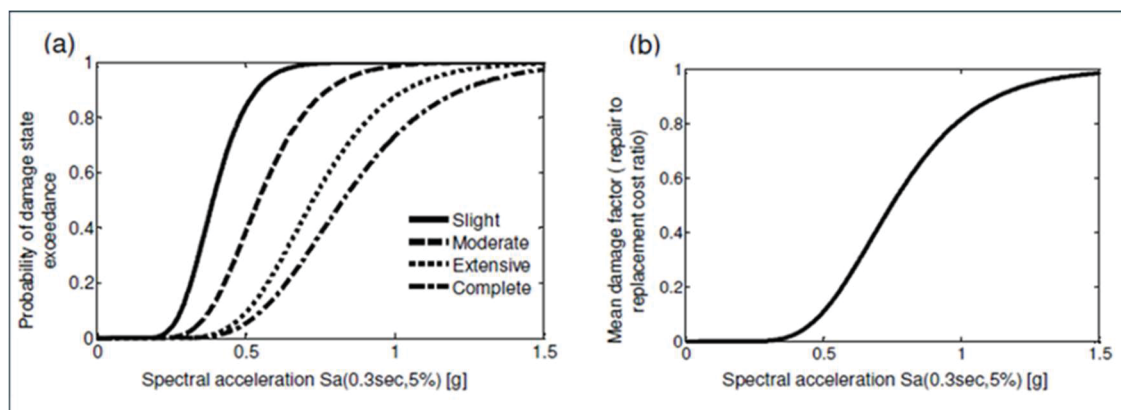


Figure 1.8 (a) Courbes de fragilité ; (b) Courbe de vulnérabilité  
Tirée de Abo El.Ezz (2013)

## 1.8 HAZUS

Hazus est un outil principal utilisé pour l'estimation des pertes sismiques à l'échelle régionale, spécialement conçu pour estimer l'impact des tremblements de terre sur de vastes zones, à l'aide d'un ensemble de modèles précalibrés basés sur les risques sismiques aux États-Unis afin d'évaluer l'impact des tremblements de terre.

### 1.8.1 Classification des types d'habitations dans Hazus

HAZUS (Hazards U.S.) est un outil basé sur un système d'information géographique (GIS) conçu pour l'analyse des risques naturels et l'évaluation des risques. Développé et distribué par l'Agence fédérale de gestion des urgences (FEMA). La FEMA a publié en 1997 la première édition de son logiciel d'évaluation des pertes et des risques basés sur la technologie des systèmes d'information géographique (SIG). Ce logiciel s'appelait HAZUS97. Au fil des ans, le logiciel a été amélioré et développé, et plusieurs versions ont été publiées. La version actuelle est Hazus 6.1 et a été publiée en novembre 2023 (FEMA, 2025). Hazus est un outil important pour la planification et la réponse aux catastrophes. Il aide à identifier les zones à

haut risque de tremblements de terre, d'ouragans, d'inondations et tsunamis. En estimant les dommages et les pertes, il fournit des informations précieuses pour améliorer la préparation et réduire les risques.

L'une des principales caractéristiques de Hazus est sa capacité à évaluer le risque sismique pour 36 types de bâtiments différents. Ces bâtiments sont classés selon la norme FEMA 178, NEHRP Handbook for the Seismic Evaluation of Existing Buildings (FEMA, 1992), puis divisés en six catégories principales en fonction de leurs matériaux de construction : bois, acier, béton, maçonnerie (renforcée ou non), béton préfabriqué et maisons mobiles. Au sein de chacune de ces catégories, les bâtiments sont classés en fonction de leur système structurel, afin de mieux déterminer comment chaque type de bâtiment pourrait réagir à des événements sismiques.

Hazus fournit des données qui permettent d'élaborer des courbes de capacité et des courbes de fragilité pour chaque type de bâtiment. Les données sismiques utilisées pour cette analyse comprennent l'accélération spectrale et le déplacement spectral, qui sont essentiels pour évaluer la performance des bâtiments lors de séismes, et tiennent compte de quatre niveaux de conception sismique : code élevé, code modéré, code faible et pré-code. En outre, Hazus décrit quatre niveaux de dommages : légers, modérés, graves et perte totale, et calcule les valeurs seuils des paramètres de capacité du bâtiment qui entraînent l'apparition de dommages à chaque niveau de conception sismique. Ces paramètres comprennent la dérive inter-étages et les déplacements spectraux, qui sont essentiels pour évaluer la façon dont les bâtiments se déforment et résistent aux dommages lors d'un séisme. Dans le cadre de cette étude, cette classification aide à développer et à analyser la vulnérabilité sismique des maisons en bois à un et deux étages. Elle permet d'utiliser des paramètres initiaux, tels que le rapport de déviation entre étages, pour développer diverses courbes de fragilité. En outre, elle facilite la comparaison entre la méthodologie développée dans cette étude et les résultats fournis par Hazus, contribuant ainsi à mettre en évidence les améliorations potentielles des approches d'évaluation de la vulnérabilité.

### **1.8.2 Méthodologie d'évaluation des risques sismiques Hazus**

La méthodologie de risque sismique de Hazus est un processus complet conçu pour évaluer les impacts potentiels des séismes sur les bâtiments, les infrastructures et les populations. Elle implique l'intégration de plusieurs composantes, telles que l'analyse de l'aléa sismique, les données d'inventaire des bâtiments et les modèles de vulnérabilité, afin de produire une estimation des pertes liées aux séismes. La méthodologie se compose de quatre étapes (Hazus 5.1, 2022) :

1. Évaluation des risques sismiques : Cette étape évalue l'intensité des secousses sismiques afin de quantifier les risques sismiques associés à une zone donnée.
2. Analyse de la vulnérabilité des bâtiments : Hazus applique des courbes de fragilité pour évaluer la vulnérabilité de différents types de bâtiments. Ces courbes prédisent les dommages attendus en fonction des caractéristiques des bâtiments et des méthodes de construction pour 36 types de bâtiments spécifiques.
3. Estimation des dommages et des pertes économiques : La méthodologie calcule les dommages potentiels aux bâtiments, aux systèmes de transport, aux services publics et à d'autres infrastructures essentielles, et estime les pertes économiques qui en résulteraient.
4. Estimation de l'impact social : Enfin, cette étape évalue les impacts sociaux, tels que les blessures, les décès et les déplacements de ménages, qui pourraient résulter du séisme.

En intégrant ces composantes, Hazus fournit une compréhension globale des risques sismiques, facilitant la planification des stratégies d'atténuation des risques.

## **1.9 FEMA P-807 (FEMA, 2012)**

### **1.9.1 Définition de la méthodologie simplifiée de la norme FEMA P-807 (FEMA, 2012)**

La norme FEMA P-807 (FEMA, 2012) est une ligne directrice élaborée par l'Agence fédérale de gestion des urgences (FEMA) et le Conseil des technologies appliquées (ATC), qui propose

une approche simple mais efficace pour l'évaluation sismique et la modernisation des bâtiments existants à ossature en bois. Cette ligne directrice vise à simplifier le processus d'évaluation et de renforcement des bâtiments susceptibles de subir des dommages sismiques. En offrant une alternative structurée et adaptable aux codes existants, la norme FEMA P-807 facilite l'atténuation efficace et adaptable des risques sismiques pour les maisons en bois (FEMA, 2012). La méthode d'analyse simplifiée proposée par la norme FEMA P-807 (FEMA, 2012) a été utilisée pour élaborer les courbes de poussée, qui ont ensuite été converties en courbes de capacité. La méthodologie repose sur une procédure étape par étape qui comprend : l'évaluation de la géométrie des murs à chaque étage, telle que les ouvertures des portes et des fenêtres, la caractérisation de la composition des murs en termes de matériaux de construction, ainsi que les combinaisons de matériaux utilisés, le calcul de la résistance latérale de chaque mur sous la forme d'une capacité latérale en fonction du déplacement, sur la base d'une base de données de résultats expérimentaux, et enfin, le calcul de la capacité latérale totale de chaque étage comme la somme de la résistance de tous les murs pour chaque orientation du bâtiment. Cette méthode s'appuie sur une base de données de résultats expérimentaux en laboratoire issus d'essais statiques cycliques sur divers murs à ossature bois (FEMA, 2012).

### **1.9.2 Méthodologie d'élaboration des courbes charge-déplacement dans les assemblages muraux à revêtements multiples à l'aide de la norme FEMA P807 (FEMA, 2012)**

Lors de l'utilisation de FEMA P807 (FEMA, 2012) pour élaborer la courbe charge-déplacement d'un étage, plusieurs critères doivent être pris en compte. Tout d'abord, les segments de mur de chaque étage sont regroupés en lignes de murs, et une courbe charge-déplacement est créée pour chaque ligne de mur. Cette courbe prend en compte la combinaison des matériaux de revêtement, les ouvertures, ainsi que la hauteur de la ligne de mur.

Étant donné que la résistance au renversement des bâtiments anciens est incertaine, un facteur d'ajustement pour le renversement ( $Q_{ot}$ ) doit être pris en compte dans le calcul. Dans les cas où les segments d'un mur ont des hauteurs différentes, le rapport charge-dérive doit être modifié pour les murs les plus courts. De plus, la présence d'ouvertures dans les murs doit être



prise en compte afin de refléter avec précision leur impact sur le comportement structurel. La courbe de dérive de charge d'un mur est donnée par l'équation (1.3) :

$$f_w(\delta_j) = [V_w(\delta_j)] * L_w * Q_{open} * Q_{ot} \quad (1.3)$$

Où  $f_w(\delta_j)$  est : La courbe de déformation sous charge pour la ligne de mur considéré.

$V_w(\delta_j)$  : Courbe de charge-dérive unitaire pour la combinaison de matériaux de revêtement de la paroi à l'incrément de dérive,  $\delta_j$ , en utilisant les données de charge-dérive par défaut fournies dans la Section 4.4 du FEMA P807 (FEMA, 2012).

$L_w$  : longueur de la ligne de mur, d'extrémité à extrémité, incluant les ouvertures à l'intérieur.

$Q_{open}$  : facteur d'ajustement pour les ouvertures.

$Q_{ot}$  : facteur d'ajustement pour le renversement.

Dans le cas où des panneaux structuraux en bois sont inclus dans les matériaux de revêtement, la résistance totale est inférieure à la somme des résistances individuelles des couches en raison des différences de comportement des matériaux. Pour tenir compte de cela, deux courbes de charge-déplacement composites sont établies : l'une utilisant 50 % de la résistance du panneau structural en bois et 100 % des autres matériaux, et l'autre utilisant 100 % de la résistance du panneau structural en bois et 50 % des autres matériaux. La courbe de charge-déplacement finale pour l'assemblage mural est celle qui présente la résistance maximale la plus élevée, garantissant ainsi une représentation précise des performances de l'assemblage (FEMA, 2012). La Figure 1.9 illustre un mur construit à partir de deux matériaux différents, l'un étant du contreplaqué et l'autre des plaques de plâtre. La Figure 1.10 montre les courbes charge-déplacement correspondantes utilisées pour déterminer l'assemblage mural présentant la résistance maximale en considérant deux combinaisons : la Figure 1.10 (a) correspond à 100 % bois et 50 % plaques de plâtre, et la Figure 1.10 (b) correspond à la combinaison de 50 % de plaques de plâtre et 100 % bois. La figure montre que, dans ce cas, la combinaison 1, avec 100 % de bois, fournit la résistance maximale. Cette combinaison doit donc être prise en compte pour l'élaboration de la courbe charge-déplacement du mur.

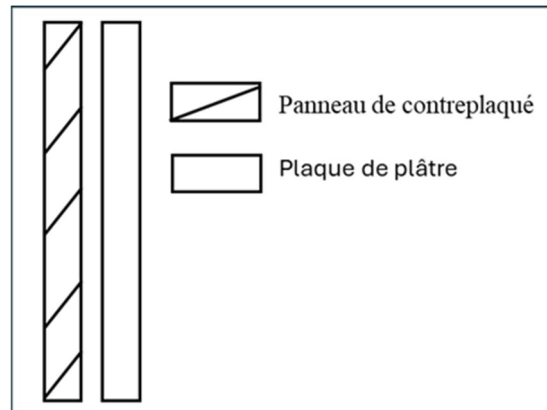


Figure 1.9 Composition d'un mur avec contreplaqué et plaque de plâtre

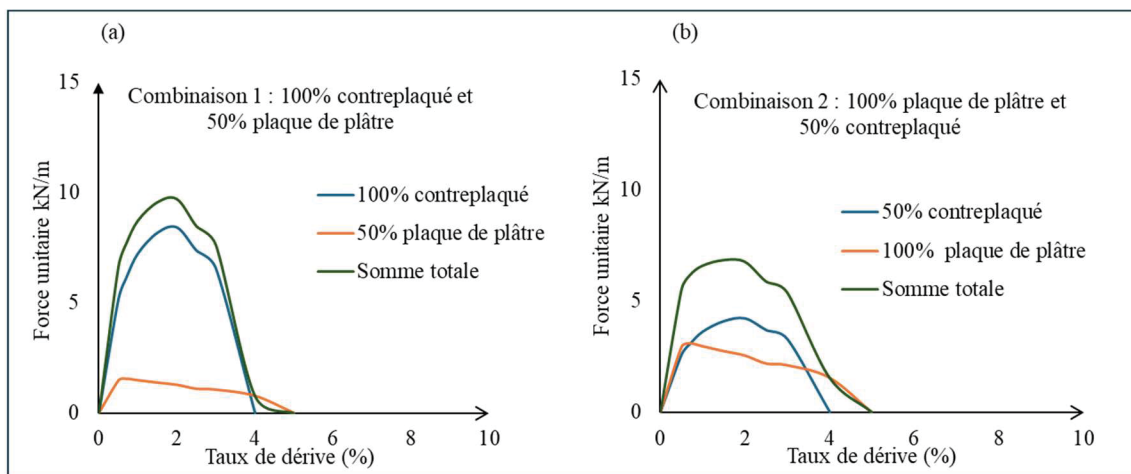


Figure 1.10 Courbes charge-déplacement pour deux combinaisons : (a) 100% contreplaqué et 50% plaque de plâtre ; (b) 50% contreplaqué et 100% plaque de plâtre

Pour développer la courbe de dérive de charge d'un étage, il est nécessaire de créer au préalable la courbe de charge-déplacement de chaque mur, la somme totale de ces courbes correspond à la courbe charge-déplacement de l'étage considéré. Comme le montre la Figure 1.11, la courbe de dérive de charge dans la direction x est obtenue en additionnant les courbes de dérive de charge du mur 1 sur les faces nord et sud, ainsi que la courbe de dérive de charge du mur 2.

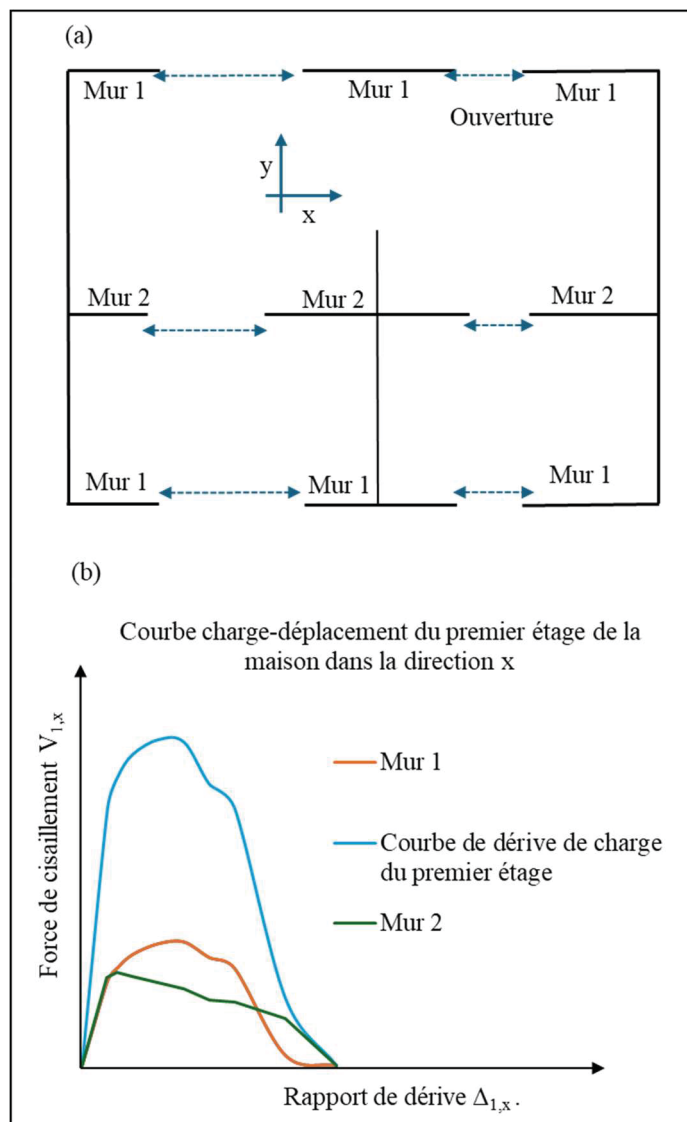


Figure 1.11 (a) Exemple de plan du premier étage d'une maison ; (b) Courbe de charge – déplacement du premier étage de maison

## 1.10 Analyse des dommages et des pertes

Pour comprendre les conséquences possibles d'un séisme, il est essentiel d'estimer les dommages que les habitations pourraient subir lors d'événements sismiques réels. Ce processus permet d'améliorer la préparation et d'élaborer des stratégies d'atténuation. Il existe différents outils pour estimer les pertes économiques dues aux tremblements de terre. L'un d'entre eux

est HAZUS, développé par l'Agence fédérale américaine de gestion des urgences (FEMA) (Hazus 5.1, 2022). Hazus est conçu pour estimer les pertes et atténuer les effets des tremblements de terre aux États-Unis (Kircher et al., 2006). Par défaut, il comprend des données structurelles collectées au niveau fédéral et fournit un inventaire des différents types de bâtiments, classés en fonction de leur occupation, des matériaux de construction et des niveaux de conception sismique. Abo El Ezz et al. (2019) ont développé un outil en ligne pour l'évaluation rapide des risques sismiques urbains. Il calcule les secousses sismiques, tient compte des types de bâtiments et utilise des courbes de fragilité précalculées pour prédire les dommages. L'outil fournit des résultats rapides sur les dommages structurels et non structurels, les pertes économiques et les victimes, avec des résultats graphiques ou cartographiés.

Pour cette étude, l'estimation des pertes est réalisée en tenant compte de différents scénarios et en utilisant la fonctionnalité AEBM de Hazus, qui permet de définir des fonctions de dommages et de pertes spécifiques à chaque bâtiment, ce qui permet des évaluations plus précises pour les structures présentant des caractéristiques uniques.

### **1.10.1 Approche AEBM pour l'évaluation du risque sismique**

Le module AEBM (Advanced Engineering Building Module) est une fonctionnalité de Hazus qui permet aux utilisateurs de développer des fonctions de dommages et de pertes plus spécifiques en fonction des caractéristiques individuelles d'un bâtiment. Contrairement aux types de bâtiments génériques de Hazus, qui sont utilisés pour prédire les effets d'un séisme sur un grand groupe de bâtiments, l'AEBM permet d'estimer les pertes pour un bâtiment spécifique ou un groupe de bâtiments similaires. Cette méthode est particulièrement utile pour évaluer les bâtiments présentant des caractéristiques spécifiques qui ne sont pas prises en compte dans les types de bâtiments standard de Hazus, telles que les maisons à ossature légère en bois à un ou deux étages étudiés dans le cadre de ce projet. Pour obtenir des résultats précis avec l'AEBM, il est essentiel de fournir et de définir clairement toutes les caractéristiques pertinentes du bâtiment. L'AEBM permet aux utilisateurs de saisir des propriétés structurelles détaillées, telles que les caractéristiques de capacité des bâtiments et les courbes de fragilité,

ainsi que les conditions de risque spécifiques au site. Cette capacité le rend particulièrement utile pour évaluer les bâtiments de conception unique ou les structures anciennes qui ne s'intègrent pas bien dans le système de modélisation standard Hazus.

### **1.10.2 Estimation des pertes sismiques selon différents scénarios**

Hazus propose trois méthodes pour déterminer les exigences en matière de secousses sismiques dans un scénario de tremblement de terre. La première est une méthode déterministe qui utilise les données ShakeMap de l'USGS pour fournir des informations en temps réel sur les secousses sismiques. La deuxième est une méthode probabiliste, où les niveaux de risque sismique sont estimés selon la méthodologie Hazus. La troisième option, les cartes fournies par l'utilisateur, permet à l'utilisateur de saisir ses propres données sur les risques sismiques afin d'obtenir une analyse personnalisée.

Lorsque les cartes de secousses ne sont pas disponibles, il est nécessaire d'utiliser des équations de prédiction des mouvements du sol (GMPE) pour prédire l'intensité des secousses du sol en fonction de facteurs tels que la magnitude, la distance et les conditions locales du site. Les équations de prédiction des mouvements du sol (GMPE) sont des modèles qui estiment les secousses sismiques en prédisant les valeurs médianes des paramètres de mouvement du sol tels que l'accélération maximale du sol (PGA), l'accélération spectrale ( $S_a$ ) et la vitesse maximale du sol (PGV), en fonction de la magnitude et de la distance par rapport à l'épicentre du séisme. Ces équations sont dérivées de données sismiques collectées dans différentes régions. Il est plus facile de développer des GMPE dans les régions à forte activité sismique en raison du grand nombre de séismes enregistrés, tandis qu'elles sont plus difficiles à générer dans les zones à faible activité sismique où les données sont limitées.

Hazus fournit deux ensembles d'équations de prédiction des mouvements du sol en fonction de la localisation géographique : l'Ouest des États-Unis (WUS) et le Centre-Est des États-Unis (CEUS). En raison des similitudes géologiques entre l'Est du Canada et la région CEUS, les équations CEUS sont utilisées pour estimer les pertes des maisons en bois existantes dans l'Est

du Canada sous divers scénarios de secousses sismiques. La Figure 1.12 montre la limite entre les deux régions WUS et CEUS telle que définie dans Hazus.

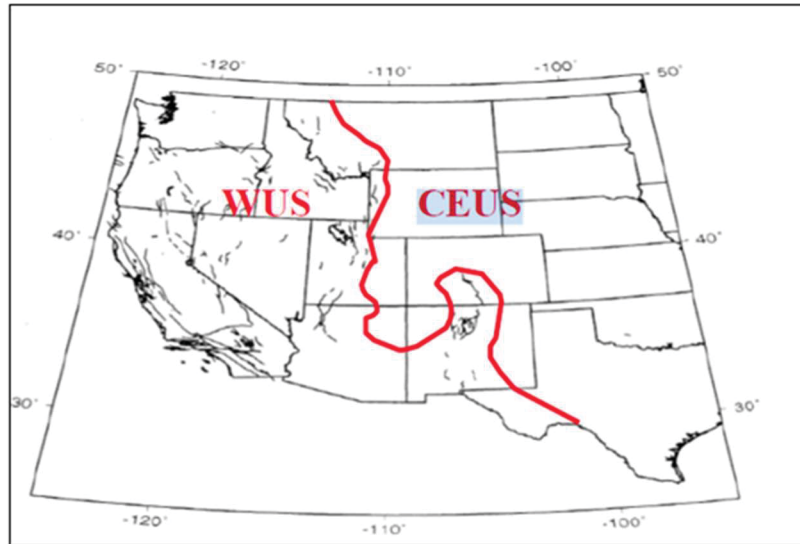


Figure 1.12 Frontière entre les deux régions  
WUS et CEUS  
Tirée de Hazus 5.1 (2022)

Les GMPE utilisées pour la région CEUS comprennent une combinaison pondérée de sept GMPE : Toro et al. (1997), Fränkel (1996), Campbell (2003), Atkinson & Boore (2006), Tavakoli & Pezeshk (2005), Silva et al. (2002) et Somerville (2002) (Hazus 5.1, 2022). Hazus combine plusieurs GMPE afin de réduire l'incertitude. Chaque GMPE contribue à l'estimation finale du mouvement du sol avec un poids spécifique exprimé en pourcentage. Cette combinaison pondérée est appliquée lors de la sélection du scénario déterministe dans l'AEBM et du choix des équations CEUS. Lors de la sélection de l'équation de prédiction des mouvements du sol (GMPE) CEUS dans HAZUS, il est nécessaire de préciser la magnitude du séisme, car celle-ci influence directement l'intensité des secousses, ainsi que la localisation de l'épicentre, la distance entre la source du séisme et le site affecté déterminant le niveau d'énergie sismique qui atteint les structures. En outre, le type de sol du site doit être pris en compte, car les différentes conditions du sol ont une incidence significative sur l'amplification des mouvements du sol. Le tableau 1.2 présente les quatre catégories de types de sol prises en compte dans ce projet, telles que définies par Hazus.

Tableau 1.2 Description des classes de site

Type de sol	Profil du sol
A	Roche dure qui amplifie légèrement plus que la roche dure
B	La roche amplifie légèrement plus que la roche dure
C	Le sol très dense peut amplifier les ondes sismiques et augmenter les secousses du sol
D	Le sol consistant entraîne l'amplification la plus forte

Pour estimer les pertes totales des maisons à ossature bois à un et deux étages au Québec, la fonctionnalité AEBM de Hazus a été utilisée. Au total, 60 scénarios ont été élaborés en tenant compte de trois magnitudes sismiques différentes : 6,0, 6,5 et 7,0. Ces scénarios ont été analysés pour différents types de sols (A, B, C et D) tout en ajustant la distance épacentrale de 10 à 40 km par incréments. Cette approche a permis de déterminer divers niveaux de secousses sismiques et d'élaborer des courbes d'estimation des pertes pour les deux types de maisons.

### 1.10.3 Outil d'aléa sismique du Code national du bâtiment du Canada (CNBC)

Les scénarios élaborés comprenaient un large éventail d'intensités sismiques, certains présentant des intensités de mouvement du sol élevées qui pourraient conduire à une surestimation des pertes sismiques. Afin d'affiner l'étude et de se concentrer sur des scénarios qui reflètent mieux les événements potentiels au Québec, il a été nécessaire de calculer l'intensité sismique à différents endroits de la région. Pour ce calcul, l'outil d'évaluation des risques sismiques du Code national du bâtiment 2020 (CNB) a été utilisé (CNB, 2020). Cet outil est basé sur une évaluation probabiliste des risques sismiques et fournit des valeurs de conception sismique pour différents endroits au Canada, en tenant compte de diverses probabilités de dépassement sur une période de 50 ans, telles que 2 %, 5 % et 10 %. Ces valeurs sont dérivées du modèle de risque sismique de sixième génération du Canada, qui intègre des données géologiques, sismologiques et géophysiques afin d'estimer la probabilité de différents niveaux de secousses sismiques. L'outil permet de saisir des conditions spécifiques au site,

telles que les valeurs  $V_{s30}$  ou les classes de site  $S_c$  (A à E), afin de générer des données personnalisées sur les risques sismiques. Pour le calcul, la classe de site C et une probabilité de dépassement de 2 % sur une période de 50 ans ont été sélectionnées pour cette étude, et la moyenne des valeurs PGA les plus élevées a été prise en compte pour l'analyse de l'estimation des pertes.

### **1.11 Conclusion**

L'analyse de la littérature montre que les données existantes ne font pas de distinction entre les maisons à un étage et celles à deux étages en ce qui concerne leur capacité structurelle et leur réponse en termes de fragilité.

Il est donc nécessaire d'élaborer des courbes de capacité sismique et de fragilité pour ces bâtiments en fonction de leurs caractéristiques spécifiques afin de quantifier correctement leur risque sismique. Cette étude classe les maisons à ossature bois en deux types distincts, en fonction des similitudes de leur système structurel, de leur hauteur et des matériaux de construction utilisés. Des recherches antérieures ont exploré diverses méthodes pour évaluer la performance des bâtiments résidentiels lors de séismes. Dans cette étude, une approche simplifiée est développée pour générer des courbes de capacité à l'aide d'une analyse par poussée (pushover) et pour développer des courbes de fragilité correspondantes pour les deux catégories de maisons à ossature bois. En outre, une estimation des pertes est réalisée dans le cadre de différents scénarios sismiques, ce qui permet d'élaborer des courbes d'estimation des pertes spécifiques à chaque type de maison.

Les chapitres suivants traiteront ces questions de recherche de manière plus détaillée.



## **CHAPITRE 2**

### **DÉVELOPPEMENT DES COURBES DE CAPACITÉ ET DE FRAGILITÉ BASÉES SUR LA CARACTÉRISATION DES BÂTIMENTS**

Ce chapitre évalue la performance sismique des maisons à ossature bois existantes. Les maisons sont classées en deux groupes en fonction du nombre d'étages (un et deux étages), tout en partageant les mêmes matériaux de construction et le même type de façade. Le chapitre explore la méthodologie permettant de générer des courbes de capacité, en mettant en évidence les aspects clés qui influencent la performance sismique. En outre, il présente l'élaboration de courbes de fragilité pour les maisons à un et deux étages en fonction de leurs caractéristiques. Enfin, les courbes de capacité affinées sont comparées à celles obtenues à partir du modèle Hazus afin d'identifier et de discuter les divergences et les observations clés.

#### **2.1 Caractérisation des bâtiments à ossature bois**

Cette section présente la caractérisation des maisons analysées dans cette étude. La classification est basée sur des paramètres critiques, notamment les caractéristiques géométriques, les matériaux de construction, le type de façade et le nombre d'étages (un ou deux). La construction à ossature bois est le type de structure prédominant pour les maisons individuelles et les immeubles collectifs de faible hauteur en Amérique du Nord, représentant environ 90 % de l'ensemble des logements résidentiels, comme le soulignent Fischer et al. (2001), en raison de leur légèreté et de leur facilité de construction, qui repose sur des directives conventionnelles fondées sur des règles empiriques développées au fil des années plutôt que sur des calculs et des méthodes d'ingénierie détaillés. Aux États-Unis, les exigences réglementaires sont décrites dans la section 2308 du Code international du bâtiment (IBC, 2003). Au Canada, ces directives sont énoncées dans la partie 9 du Code national du bâtiment du Canada (CNB, 1995). Certaines de ces maisons existantes ont été construites depuis 1945, selon la méthode de construction conventionnelle. Par conséquent, ces structures non conçues par des ingénieurs peuvent ne pas être bien préparées pour résister aux séismes, ce qui les rend potentiellement vulnérables aux dommages sismiques. En conséquence, la première étape de

cette étude a consisté à classer les maisons à ossature en bois en deux groupes distincts en fonction de leur nombre d'étages afin d'évaluer l'influence de la hauteur sur leur performance sismique. Pour ce faire, des configurations à ossature d'un étage et de deux étages ont été analysées.

Afin de préparer la base de données pour l'étude, les plans des maisons ont été recueillis à partir de rapports en ligne publiés par la Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL, 1974). Par conséquent, trois prototypes ont été étudiés pour chaque type de maison afin de garantir une analyse complète de la performance sismique. Chaque prototype se caractérise par des caractéristiques géométriques distinctes, notamment des variations de largeur et d'agencement. En outre, il comprend des ouvertures spécifiques pour les fenêtres et les portes, car ces éléments ont un impact significatif sur la résistance latérale des murs. En analysant une gamme de géométries structurelles et de dispositions des ouvertures murales, l'étude vise à mettre en évidence l'impact de ces facteurs sur la vulnérabilité globale des maisons. Les figures 2.1 et 2.2 montrent des exemples de plans de maisons à un étage et à deux étages pour les prototypes, tous deux créés dans AutoCAD dans le cadre du projet (Guerrier, 2024). Les annexes I et II présentent tous les prototypes pris en considération.

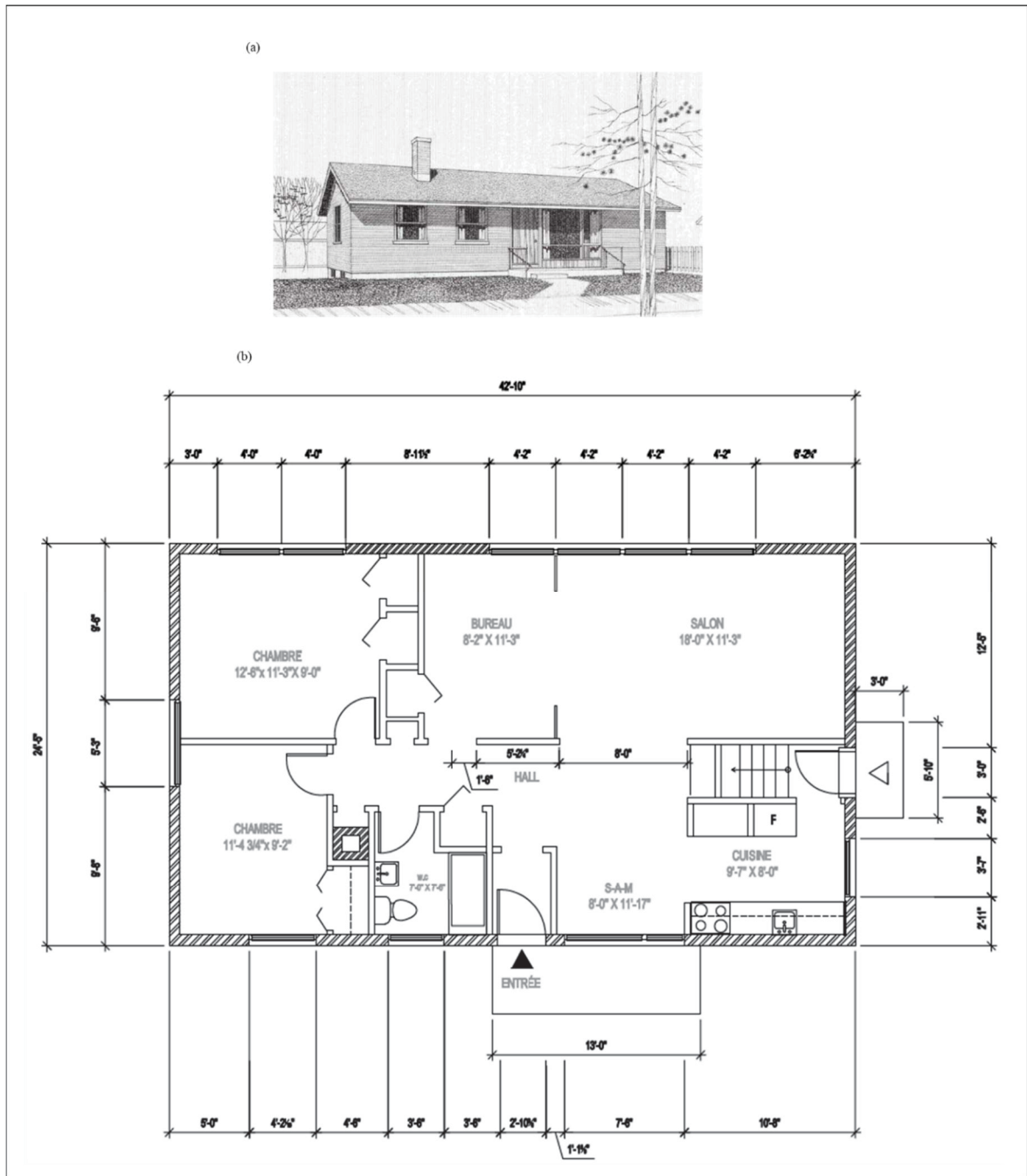


Figure 2.1 Illustration d'un exemple de maison avec un étage développé à partir des rapports du SCHL (1974) : (a) Vue 3D ; (b) plan du prototype d'une maison

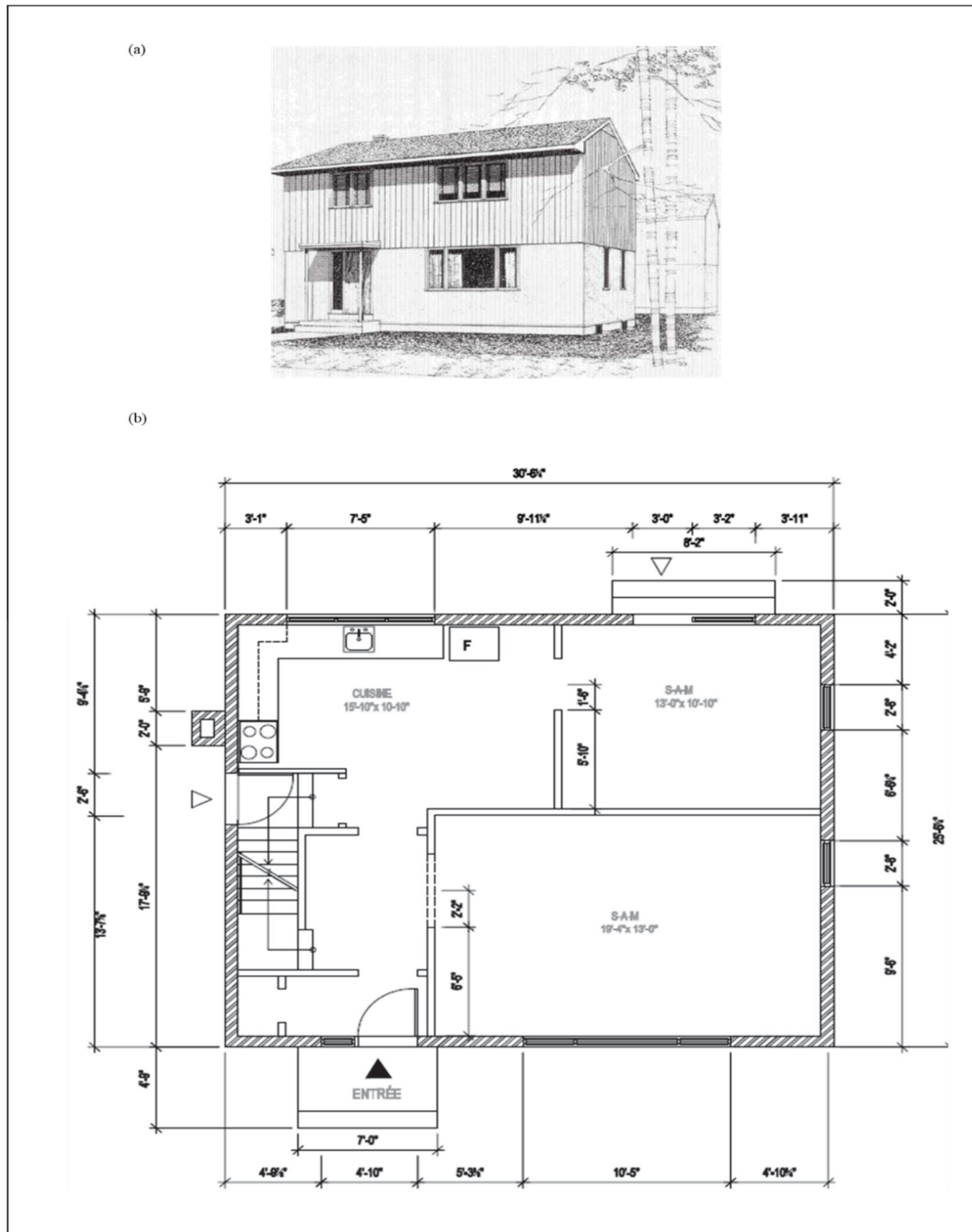


Figure 2.2 Illustration d'un exemple de maison avec deux étages développés à partir des rapports du SCHL (1974) : (a) Vue 3D ; (b) plan du prototype d'une maison

Les tableaux 2.1 et 2.2 regroupent les caractéristiques géométriques des deux types de maisons.

Tableau 2.1 Dimensions du type de maison avec un étage : Longueur, largeur et hauteur

Un étage	Longueur (m)	Largeur (m)	Hauteur (m)	Poids (kN)
Prototype 1	13	7.4	2.7	329
Prototype 2	14	8.6	2.7	462
Prototype 3	12.8	8.4	2.7	340

Tableau 2.2 Dimensions du type de maison avec deux étages : Longueur, largeur et hauteur

Deux étages	Longueur (m)	Largeur (m)	Hauteur (m)	Poids (kN)
Prototype 1	7.8	9.3	5.4	560
Prototype 2	8.2	11.3	5.4	663
Prototype 3	11.4	8.2	5.4	779

En plus des caractéristiques géométriques, le choix des matériaux a un impact important sur le comportement structurel lors des événements sismiques et peut influencer la performance globale ainsi que la vulnérabilité de la structure. Il était donc crucial d'évaluer l'impact des matériaux de construction utilisés à la fois dans les murs et sur la façade des maisons. Une analyse des données fournies par la ville de Montréal concernant les bâtiments résidentiels montre que plus de 80 % des maisons possèdent une façade en brique (Figure 2.3) ; ce matériau doit donc être pris en compte comme paroi extérieure dans l'analyse.

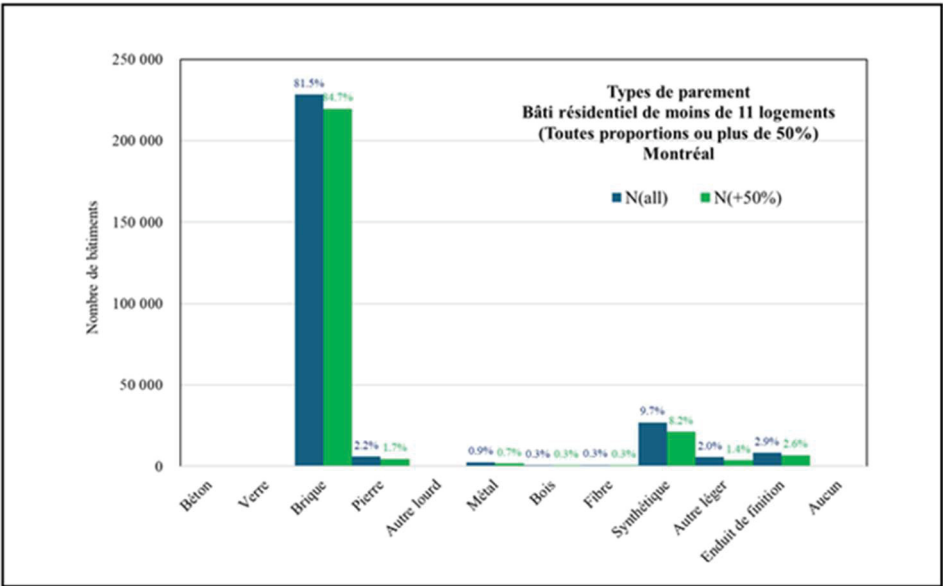


Figure 2.3 Distribution du type de parements pour les habitations de moins de 11 logements de l’île de Montréal

Par conséquent, les façades extérieures ont été composées de trois couches : briques, contreplaqué et plaques de plâtre, tandis que les murs intérieurs ont été composés de deux couches de plaques de plâtre. Les figures 2.4(a) et 2.4 (b) montrent les détails des types de matériaux utilisés dans l'étude prototype pour les murs extérieurs et intérieurs respectivement.

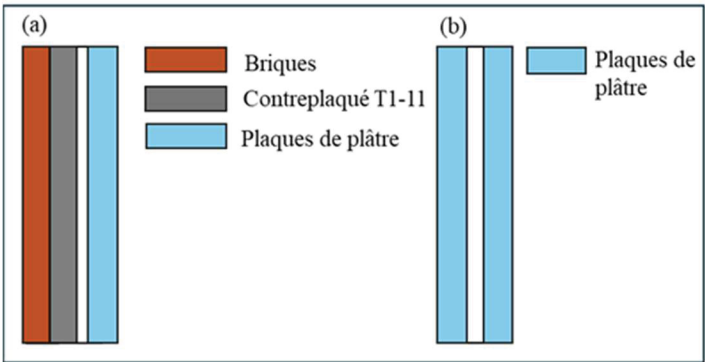


Figure 2.4 Illustration des types de matériaux de construction utilisée :  
(a) pour les murs extérieurs ; (b) les murs intérieurs

## **2.2 Présentation des courbes de poussée selon FEMA P-807 (FEMA, 2012)**

La première étape de l'évaluation de la vulnérabilité sismique d'une structure existante consiste à comprendre son état actuel et sa performance sous l'effet des forces sismiques. Par conséquent, l'élaboration d'une courbe de poussée, qui représente la relation entre le cisaillement à la base du bâtiment et le déplacement du toit, est essentielle pour réaliser cette évaluation. Pour élaborer les courbes de poussée utilisées dans cette étude, la norme FEMA P-807 (FEMA, 2012) a été sélectionnée en raison de sa précision et de son fondement empirique. La méthodologie repose sur une vaste base de données d'essais cycliques statiques expérimentaux réalisés sur des murs de cisaillement à ossature en bois, en tenant compte d'un large éventail de configurations de murs et de matériaux de revêtement. Ces essais fournissent les courbes de base et les paramètres de performance nécessaires pour comprendre le comportement des murs sous charge sismique. Une partie importante de ces données expérimentales provient du projet CUREE-Caltech Wood frame (CUREE, 2002), qui a largement contribué à la compréhension des performances des murs de cisaillement cycliques et a joué un rôle clé dans l'élaboration des modèles empiriques adoptés dans la norme FEMA P-807 (FEMA, 2012).

Le chapitre 4 du document FEMA P-807 (FEMA, 2012) fournit des lignes directrices pour le développement de courbes de poussée, en commençant par une analyse approfondi des caractéristiques géométriques du bâtiment, cela implique une analyse détaillée de ses éléments structurels, notamment les longueurs des murs, les ouvertures telles que les fenêtres et les portes, la hauteur des murs, les matériaux de construction utilisés pour les murs intérieurs et extérieurs, ainsi que les combinaisons de matériaux utilisées. Ensuite, la résistance latérale de chaque mur doit être calculée à partir d'une base de données de résultats expérimentaux, comme indiqué dans le tableau 2.3 de FEMA P-807. Ce tableau indique la capacité de charge latérale (en livres par pied linéaire) des différents matériaux de parement, pour des rapports de déformation inter-étage ( $\delta$ , en %) spécifiques. Ces valeurs permettent de mieux comprendre la performance de chaque matériau sous différentes conditions de déformation.

Enfin, la capacité latérale totale est obtenue en additionnant les résistances de tous les murs dans chaque direction du bâtiment, en tenant compte de la combinaison des matériaux de revêtement.

Tableau 2.3 Données de courbe charge-déplacement pour  
le matériau de contreventement  
Tiré de FEMA P-807 (2012)

Données de la courbe Charge-Déplacement pour les matériaux de contreventement [livre/pied linéaire]									
Matériau de contreventement	Taux de dérive inter-étages $\delta$ (%)								
	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0
Revêtement en panneaux de contreplaqué (T1-11)	354	420	496	549	565	505	449	0	0
Plaque de plâtre	202	213	204	185	172	151	145	107	0

La norme FEMA P-807 (FEMA, 2012) met en évidence plusieurs facteurs géométriques qui influent sur la capacité des matériaux de revêtement en introduisant des facteurs d'ajustement, tels que  $Q_{open}$ ,  $Q_{ot}$  et  $\delta_{jh}$ . Afin d'obtenir la courbe charge-déplacement pour chaque étage et chaque direction, les segments de mur d'un étage sont regroupés en lignes de mur, et une courbe de charge-déplacement est générée pour chaque ligne de mur. La Figure 2.5 illustre les paramètres et l'équation nécessaires pour élaborer la courbe de poussée.



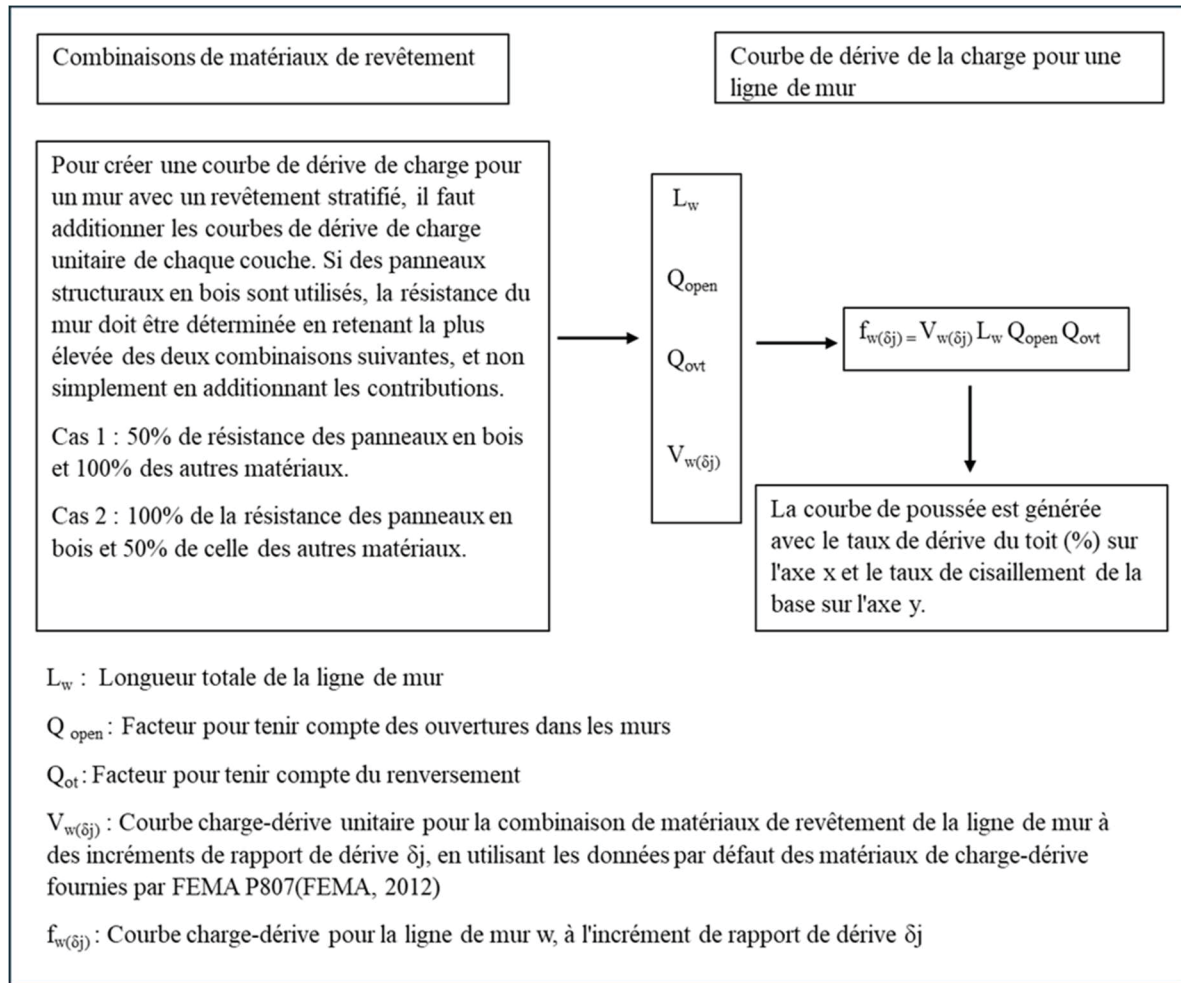


Figure 2.5 Paramètres clés pour la construction de la courbe de poussée selon la méthode FEMA P-807

Les courbes de poussée des six prototypes analysés dans cette étude ont été élaborées à l'aide de la méthodologie décrite. Bien que ces courbes aient été initialement obtenues à partir de (Guerrier, 2024), il a été nécessaire de les adapter et de les convertir en courbes de capacité afin de les adapter aux exigences de l'évaluation de la vulnérabilité sismique dans le cadre de ce projet. La Figure 2.6 présente la courbe de poussée d'un prototype de maison à un étage, tandis que la Figure 2.7 montre la courbe de poussée d'un prototype de maison à deux étages. Une comparaison de ces deux courbes indique que la maison à deux étages est plus flexible, avec un coefficient sismique de 0,27, par rapport à la maison à un étage, qui a un coefficient sismique de 0,55, pour le même taux de déplacement du toit de 1,5 %. Ces résultats ont été

validés par l'élaboration de courbes de capacité pour tous les prototypes des deux types de maisons. L'annexe III présente un exemple de calcul pour l'application de la méthode FEMA pour développer une courbe de poussée. Les courbes de poussée pour tous les prototypes sont présentées à l'annexe IV.

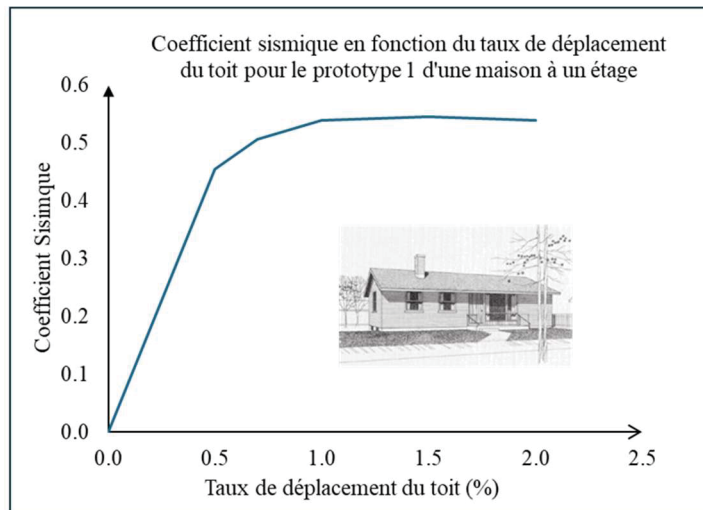


Figure 2.6 Courbe de poussée pour prototype 1 d'une maison à un étage

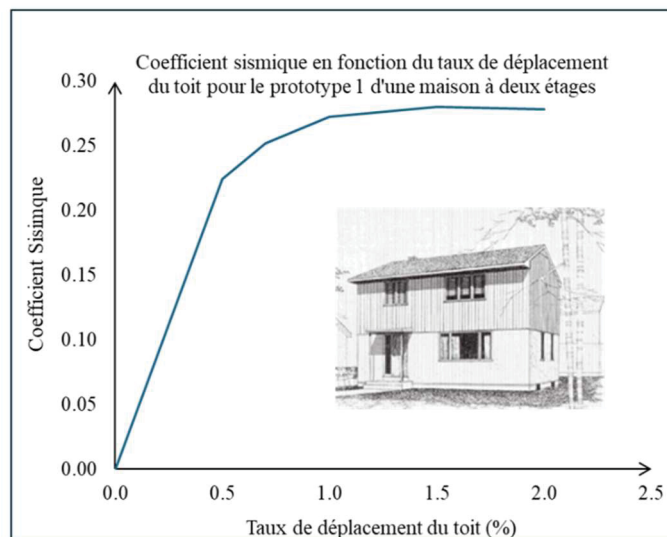


Figure 2.7 Courbe de poussée pour prototype 1 d'une maison à deux étages

### 2.3 Dérivation et interprétation des courbes de capacité à partir de l'analyse par poussée

Pour évaluer la performance sismique des maisons, il est essentiel de créer des courbes de capacité en termes de déplacement spectral ( $S_d$ ) et d'accélération spectrale ( $S_a$ ) afin de fournir des données essentielles sur la réponse structurelle d'un bâtiment aux forces sismiques. Par conséquent, la conversion de la force de cisaillement à la base en accélération spectrale ( $S_a$ ) et du déplacement du toit en déplacement spectral ( $S_d$ ) est essentielle pour obtenir un format compatible avec le spectre de demande sismique. Cette transformation permet de comparer directement la capacité de la structure et la demande sismique, ce qui permet une évaluation complète de sa performance sismique dans le spectre de capacité et d'identifier les niveaux de déplacement et d'accélération attendus que la structure subira lors d'un séisme spécifique. Dans cette étude, les courbes de capacité des différents prototypes ont été dérivées des courbes de poussée à l'aide d'une méthodologie simplifiée suivant les directives NEHRP et ATC-40, qui sont conformes au format Hazus. Bien que la méthodologie soit simple et peu compliquée, elle comporte de nombreuses étapes, chacune traitant de paramètres et de facteurs spécifiques afin de garantir l'exactitude des résultats. Il est tout d'abord nécessaire de sélectionner le déplacement du toit de la maison étudiée et la normalisation du cisaillement à la base, ce qui nécessite un calcul minutieux de la structure du poids. La normalisation du cisaillement à la base est un élément clé pour garantir que les résultats sont indépendants de la taille et de la masse de la structure, ce qui permet une analyse plus cohérente et comparative de la performance sismique. En outre, il est nécessaire d'utiliser les facteurs de mode de poussée  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$ , qui sont respectivement la fraction du poids du bâtiment efficace en mode de poussée et la fraction de la hauteur du bâtiment à l'élévation où le déplacement en mode de poussée est égal au déplacement spectral.

Le point original de la courbe de poussée ( $D_p$ ,  $A_p$ ) est converti en point de la courbe de capacité ( $D_c$ ,  $A_c$ ) à l'aide des équations (2.1) et (2.2). La Figure 2.8 illustre la méthodologie de transformation d'une courbe de poussée en une courbe de capacité selon la FEMA (2004).

$$Dc = \alpha_2 * Dp \quad (2.1)$$

$$Ac = Ap / \alpha_1 \quad (2.2)$$

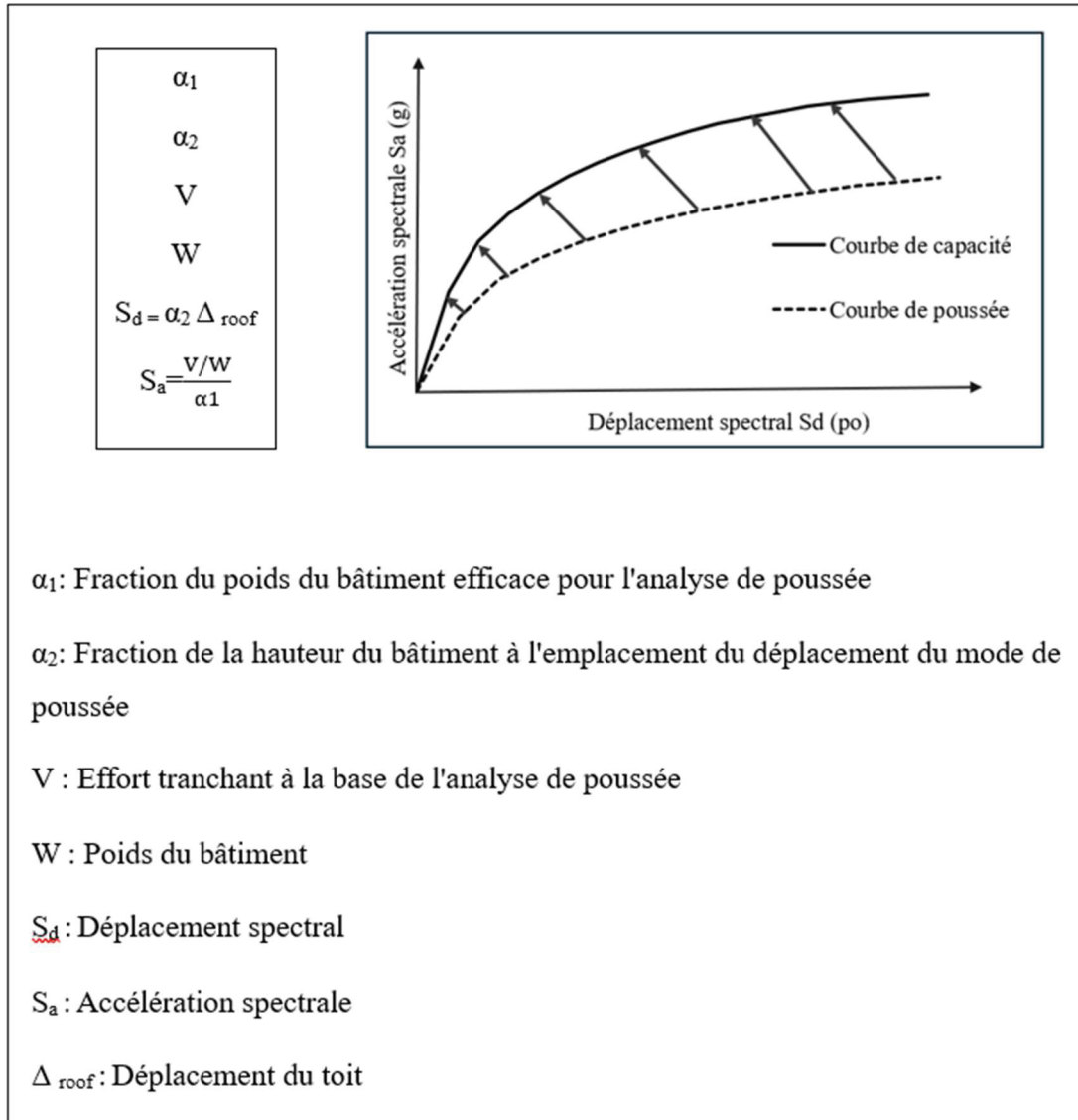


Figure 2.8 Méthodologie de transformation d'une courbe de poussée en courbe de capacité

Selon Heresi et Miranda (2022), lors de l'analyse de maisons à deux étages, on suppose que la majeure partie de la déformation inélastique du bâtiment se produit au premier étage. La résistance totale au cisaillement de la base du bâtiment dans chaque direction est égale à la

somme des résistances au cisaillement des murs du premier étage dans cette direction. Les facteurs modaux  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  ont été considérés comme étant de 0,75 pour les maisons légères en bois à un et deux étages, ce qui correspond à la valeur donnée pour la norme W1 dans Hazus (Hazus 5.1, 2002).

### **2.3.1 Forme de la courbe de capacité et facteurs de dégradation dans la méthodologie Hazus**

Les courbes de capacité obtenues à partir de l'analyse des courbes de poussée peuvent varier en forme et présenter certaines irrégularités selon le manuel technique Hazus AEBM (FEMA, 2002). Pour certaines structures, les courbes peuvent présenter un effet en dents de scie reflétant les défaillances séquentielles des composants, tandis que les courbes de capacité fragile illustrent une structure présentant une perte brutale de résistance après le pic, indiquant un mécanisme de rupture soudaine. À l'inverse, la courbe de capacité ductile montre une réponse plus progressive, permettant une résistance supplémentaire au-delà de l'état entièrement plastique. Cependant, il est nécessaire de simplifier ces comportements en courbes curvilignes compatibles avec Hazus pour une utilisation et une analyse pratique. Les Figures 2.9(a), 2.9(b) et 2.9(c) illustrent les trois exemples de courbes de capacité et leur idéalisation sous des formes compatibles avec Hazus, comme indiqué dans le manuel technique et d'utilisation de Hazus-MH AEBM (FEMA, 2002). Les courbes de capacité compatibles avec Hazus présentent un aplatissement après avoir atteint le point de capacité ultime. Cet aplatissement représente l'hypothèse selon laquelle, après des cycles répétés de demande sismique post-rendement, la rigidité du bâtiment dans les états élastique et ultime se dégrade. Pour tenir compte de cette dégradation, Hazus définit un facteur de dégradation  $\kappa$  (facteur Kappa), qui reflète l'affaiblissement de la structure et la diminution de sa capacité à résister aux forces sismiques à mesure qu'elle subit des dommages croissants. L'application de ce facteur de dégradation dans la méthodologie Hazus explique le plateau observé dans la courbe de capacité une fois le point ultime atteint.

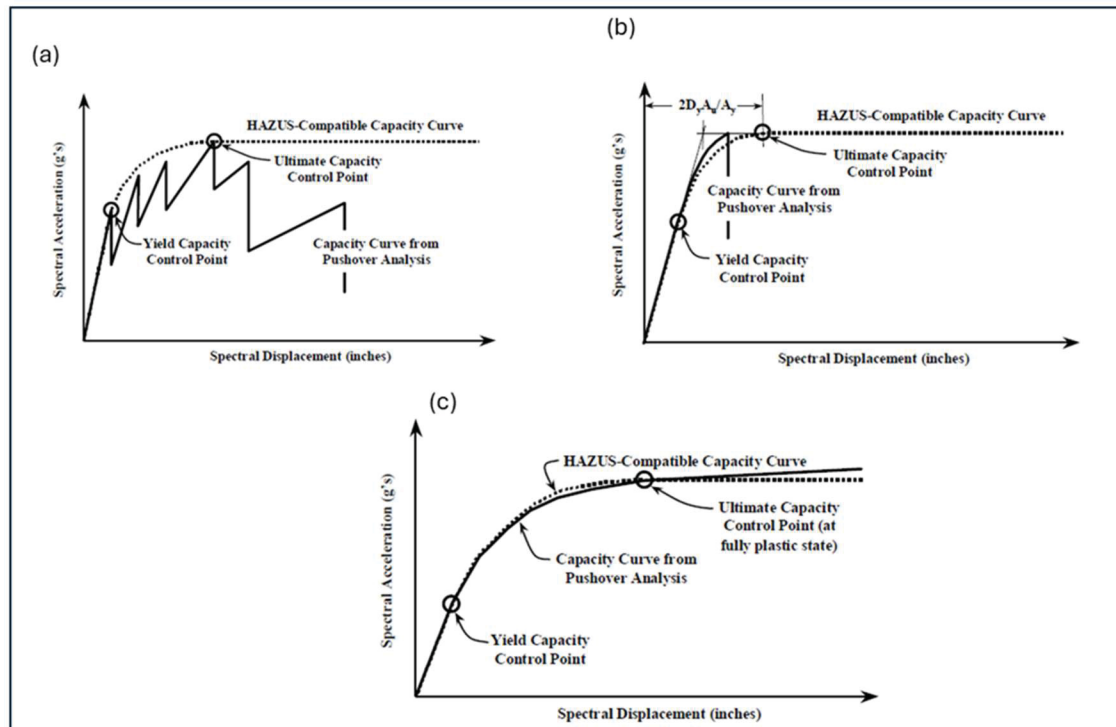


Figure 2.9 (a) Courbe de capacité en cisaillement avec défaillance séquentielle et enveloppe HAZUS; (b) Courbe de capacité pour le comportement fragile avec enveloppe HAZUS; (c) Courbe de capacité ductile avec résistance supplémentaire au-delà de l'état plastique  
Tirée de HAZUS-MH (2002)

Les courbes de capacité sont définies par trois phases (Hazard 5.1, 2022). La Figure 2.10 illustre les trois phases des courbes de capacité :

Phase un : Il s'agit de la phase initiale de la courbe de capacité, au cours de laquelle la structure se comporte de manière élastique. De zéro déplacement jusqu'à la limite d'élasticité, le déplacement est directement proportionnel à la force latérale appliquée, la courbe a une forme linéaire qui représente le comportement élastique.

Phase deux : après avoir atteint la limite d'élasticité la structure commence à subir une déformation plastique. La courbe devient non linéaire et la structure commence à subir une déformation inélastique. Cette phase correspond à l'entrée de la structure dans la plage plastique, où le bâtiment absorbe plus d'énergie mais subit également une déformation permanente croissante. Le point de limite d'élasticité marque le début de cette phase, qui se situe entre le point de limite d'élasticité et la capacité ultime.

Phase trois : au-delà de la capacité ultime, la courbe s'aplatit sans résistance supplémentaire. La méthode HAZUS suppose que la courbe de capacité est entièrement plastique (c'est-à-dire que la résistance est constante). La structure entre dans la phase de plateau, où elle subit peu ou pas de résistance supplémentaire à la charge appliquée.

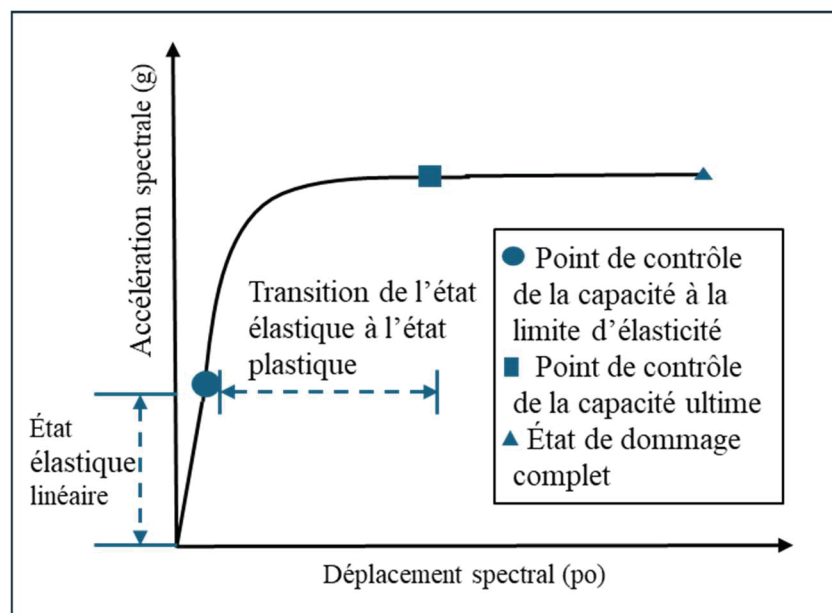


Figure 2.10 Illustration d'une courbe de capacité compatible avec la méthodologie Hazus

Dans cette étude, et afin de faciliter la comparaison des courbes de capacité des maisons à un et deux étages avec la norme W1 de Hazus, les courbes sont supposées s'aplatir après avoir atteint le point de capacité maximale.

## 2.4 Courbes de capacité développées pour les maisons à ossature légère en bois à un et deux étages

Les courbes de capacité des six prototypes ont été élaborées à l'aide de la méthodologie simplifiée décrite à la section 2.3. Afin de faciliter la comparaison avec les données existantes et les études précédentes, la courbe de capacité moyenne pour chaque hauteur d'étage (un étage et deux étages) a été calculée à partir des trois prototypes correspondants. La Figure 2.11 présente les courbes de capacité obtenues pour les trois prototypes de maisons à un étage, ainsi

que la moyenne des trois courbes. De même, la Figure 2.12 présente ces courbes pour les maisons à deux étages, avec la courbe moyenne correspondante. Les courbes de capacité développées pour les différents prototypes présentent une phase élastique initiale jusqu'au point de limite d'élasticité à  $S_{dy} = 0,4$  po, suivie d'une augmentation jusqu'à atteindre la capacité ultime à  $S_{dy} = 1,2$  po.

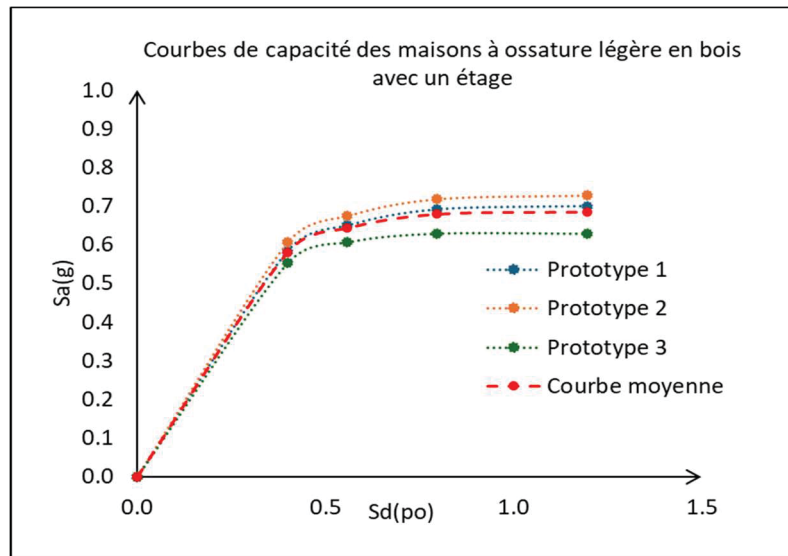


Figure 2.11 Courbes de capacité des différents prototypes de maisons à ossature légère en bois d'un étage et courbe moyenne correspondante



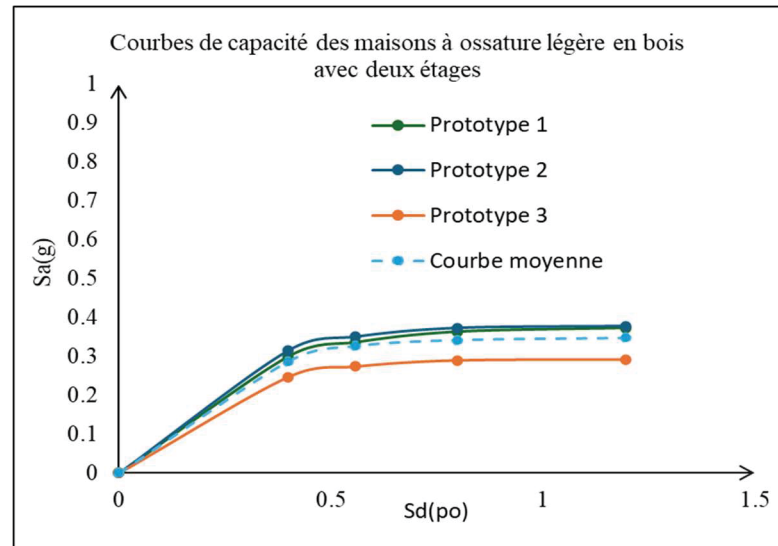


Figure 2.12 Courbes de capacité des différents prototypes de maisons à ossature légère en bois à deux étages et courbe moyenne correspondante

La Figure 2.13 présente une comparaison entre les courbes de capacité moyenne établies pour les maisons à un étage et les maisons à deux étages. L'analyse de cette figure a démontré une relation claire entre la hauteur d'une structure et sa vulnérabilité sismique, soulignant l'influence critique de la hauteur d'un bâtiment sur sa performance sismique. Pour un déplacement spectral ( $S_d$ ) identique de 1,2 pouce, les maisons à un étage présentent une accélération spectrale ultime ( $S_a$ ) de 0,69 g, contre 0,35 g pour les maisons à deux étages, soit deux fois plus que ces dernières. Ce résultat reflète la plus grande rigidité et la capacité de résistance aux forces latérales plus élevée des maisons à un étage, qui leur permettent de mieux résister aux charges sismiques sans subir de déformation excessive. À l'inverse, la rigidité réduite et la masse accrue des maisons à deux étages les rendent plus vulnérables aux dommages lors d'événements sismiques. Cette différence de comportement correspond aux rapports d'ingénierie post-sismique, où les observations montrent systématiquement que les maisons à deux étages subissent des dommages plus importants, en particulier selon les conclusions de Heresi et Miranda (2022). À l'inverse, la rigidité réduite et la masse accrue des maisons à deux étages les rendent plus vulnérables aux dommages lors d'événements sismiques. Cette différence de comportement correspond aux rapports d'ingénierie post-

sismique, qui montrent systématiquement que les maisons à deux étages subissent des dommages plus importants.

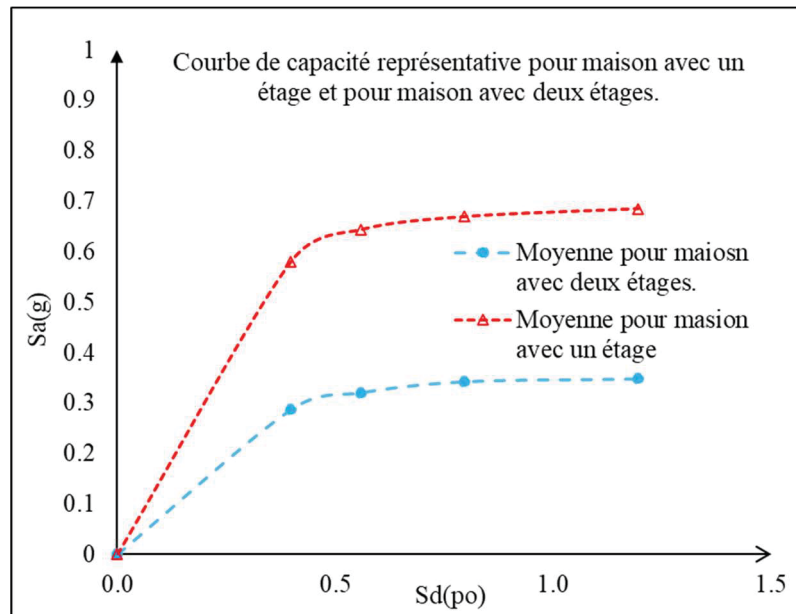


Figure 2.13 Illustration pour courbe de capacité moyenne pour une maison avec un étage et maison avec deux étages

Ces résultats soulignent l'importance de distinguer les structures à un étage et celles à deux étages dans le contexte de la conception et de l'évaluation sismiques. La hauteur de la structure est un paramètre important qui amplifie la réponse sismique des bâtiments, car les structures plus hautes, telles que les maisons à deux étages, ont tendance à présenter une plus grande flexibilité, ce qui les rend plus vulnérables aux dommages causés par les forces sismiques. La séparation de l'analyse des maisons à un étage et à deux étages permet de mieux comprendre leurs vulnérabilités distinctes et de développer des techniques de rénovation adaptées à chaque configuration structurelle.

## 2.5 Analyse comparative des courbes de capacité dérivées et des courbes Hazus

Les courbes de capacité pour les deux types de maisons obtenues à la section 2.4 ont été examinées en comparaison avec celles générées par Hazus pour la catégorie W1. La catégorie

W1 comprend toutes les maisons unifamiliales ou multifamiliales légères à ossature en bois d'une superficie maximale de 5 000 pieds carrés. Hazus ne fait pas de distinction entre les maisons à ossature en bois légère à un ou deux étages, les regroupant toutes dans la catégorie W1. Pour élaborer la courbe de capacité W1, la directive FEMA P-154 (FEMA, 2002) a été utilisée, ainsi que les paramètres clés (rendement et capacité ultime) spécifiés dans le manuel technique Hazus (Hazus 5.1, 2022). L'annexe V fournit un exemple de la manière dont la courbe de capacité pour Hazus a été élaborée à l'aide des directives FEMA P-154. Selon Hazus, les bâtiments sont classés en différents groupes en fonction de facteurs tels que les matériaux de construction, les niveaux de code de conception sismique et les systèmes structurels. Les niveaux de code de conception sismique dans Hazus comprennent les niveaux pré-code, faible code, code modéré et code élevé. Ces catégories sont utilisées pour représenter différents niveaux de conception sismique et de pratiques de construction. Pour cette étude, une comparaison est présentée spécifiquement pour les niveaux de conception parasismique pré-code et faible code. Cette focalisation est particulièrement pertinente car les maisons étudiées sont des structures existantes qui ont été construites selon les directives de construction conventionnelles, telles que décrites dans la partie 9 du Code national du bâtiment du Canada (CNB), et ne sont pas conformes aux normes modernes actuelles de conception parasismique. La Figure 2.14 présente la comparaison des courbes de capacité obtenues à partir de la méthodologie simplifiée pour les maisons à un et deux étages avec la courbe W1 de Hazus. Afin de permettre une comparaison pertinente avec la courbe Hazus, les courbes de capacité obtenues seront prolongées au-delà du point de capacité ultime et aplaties jusqu'à ce qu'elles atteignent l'état de dommage complet.

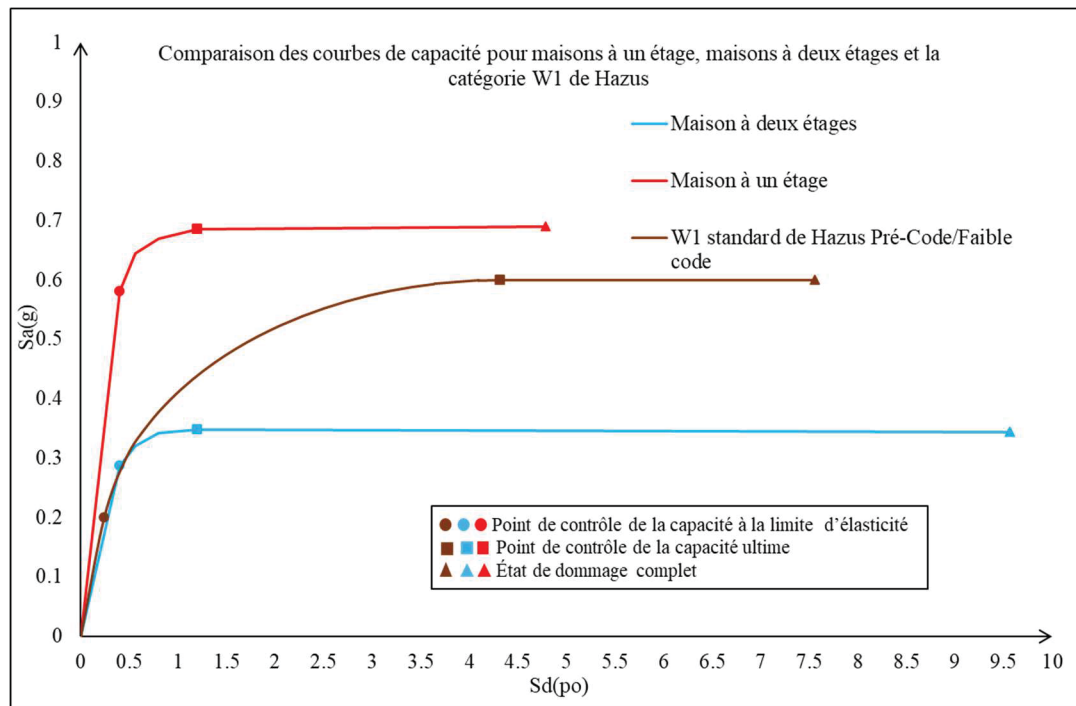


Figure 2.14 Illustration des courbes de capacité obtenues avec la méthodologie simplifiée de FEMA P-807 pour maison à un étage et deux étages, ainsi que pour la catégorie W1 de Hazus

La Figure 2.14 montre que pour la maison à un étage, l'accélération de seuil ( $S_{ay} = 0,59 \text{ g}$ ) et l'accélération ultime ( $S_{au} = 0,69 \text{ g}$ ) obtenues sont supérieures à celles de la catégorie W1 de Hazus ( $S_{ay} = 0,2 \text{ g}$  et  $S_{au} = 0,6 \text{ g}$ ). À l'inverse, la maison à deux étages présente une accélération de seuil légèrement inférieure ( $S_{ay} = 0,29 \text{ g}$ ) et une accélération ultime réduite ( $S_{au} = 0,35 \text{ g}$ ) par rapport aux valeurs W1 de Hazus. D'autre part, le déplacement ultime pour les deux types de maisons ( $S_{du} = 1,2 \text{ pouce}$ ) calculé à l'aide de la méthode simplifiée est inférieur à la valeur correspondante de Hazus ( $S_{du} = 4,316 \text{ pouces}$ ).

Ces résultats s'expliquent par les différences entre les données d'inventaire et les méthodologies utilisées. Hazus utilise des modèles et des paramètres généralisés pour un large éventail de bâtiments qui s'appuient sur le parc immobilier national, ce qui se traduit par des hypothèses moyennes sur les caractéristiques sismiques de différents types de bâtiments. Si cette méthode est efficace pour les analyses à grande échelle, elle tend toutefois à généraliser et à impliquer des simplifications qui peuvent ne pas refléter pleinement les spécificités de chaque type de

bâtiment. En revanche, la méthodologie simplifiée se concentre sur des évaluations et des analyses détaillées spécifiques à chaque type de bâtiment. En tenant compte des caractéristiques structurelles et architecturales uniques, des propriétés des matériaux et des configurations de conception de chaque bâtiment, cette approche fournit des estimations plus précises de la performance sismique.

Par conséquent, pour les bâtiments présentant des caractéristiques similaires, la méthodologie simplifiée offre une représentation précise de la manière dont ces structures réagissent aux événements sismiques. La norme W1 de Hazus ne permet toutefois pas de refléter séparément les performances des maisons à ossature légère en bois d'un ou deux étages, car les résultats montrent que la capacité de la catégorie Hazus W1 se situe entre celle des maisons à un étage et celle des maisons à deux étages.

## **2.6 Caractéristiques de fragilité des cas étudiés**

Les courbes de fragilité décrivent la probabilité qu'une structure d'une classe particulière atteigne ou dépasse un certain niveau de dommage selon Hazus (aucun, léger, modéré, étendu ou complet), sur la base d'une estimation déterministe de l'accélération spectrale ou du déplacement spectral. Pour évaluer la vulnérabilité sismique et les dommages aux habitations, tous les dommages aux composants structurels des habitations (les systèmes résistants à la gravité et aux charges latérales), les dommages aux composants non structurels sensibles à la dérive (par exemple, les cloisons, les plafonds) et les dommages aux composants sensibles à l'accélération (par exemple, les équipements mécaniques, les canalisations) doivent être pris en compte et traités (Hazus 5.1, 2022).

### **2.6.1 Paramètres des courbes de fragilité structurelle et des courbes de fragilité des éléments non structurels sensibles à la dérive**

Les courbes de fragilité des dommages structurels des bâtiments sont décrites par des valeurs médianes de dérive qui définissent les seuils des états de dommages légers, modérés, étendu et complets. Le déplacement spectral est le paramètre de risque sismique utilisé pour évaluer les

dommages structurels et les dommages aux composants non structurels sensibles aux mouvements (HAZUS 5.1, 2022). Afin de déterminer les médianes de l'état de dommage pour les paramètres de la courbe de fragilité structurelle et les paramètres de la courbe de fragilité non structurelle sensible à la dérive, le rapport moyen de dérive entre étages au seuil de l'état de dommage doit être converti en déplacement spectral à l'aide de l'équation (2.3) qui tient compte de la géométrie du bâtiment et des effets modaux. Le manuel technique de Hazus 5.1 fournit des valeurs pour le rapport moyen de dérive entre étages au seuil de l'état de dommage pour les paramètres de fragilité structurelle et non structurelle. Ces valeurs varient en fonction du type de maison et du niveau du code de conception. Pour l'étude des maisons à un et deux étages, les valeurs correspondant à la norme W1 du pré-code Hazus ont été sélectionnées, car elles reflètent mieux les caractéristiques des maisons en bois existantes construites selon des méthodes conventionnelles, sans respecter les codes de conception modernes.

$$Sd,ds = \Delta ds * HR * \alpha_2 \quad (2.3)$$

Où  $Sd,ds$  : Valeur médiane du déplacement spectral de l'état de dommage,  $ds$  (en pouces).

$\Delta ds$  : Rapport moyen de déplacement inter étage au seuil de l'état de dommage, tel que indiqué dans le tableau 5-11 pour les paramètres structurels et dans le tableau 5-16 pour les paramètres non structurels du manuel technique Hazus (HAZUS 5.1, 2022).

$HR$  : hauteur du bâtiment au niveau du toit (en pouces).

$\alpha_2$  : facteur modal de poussée (tel qu'indiqué dans le tableau 5-5 du manuel technique Hazus).

La hauteur du prototype est de 2,7 mètres pour la maison à un étage et de 5,4 mètres pour les maisons à deux étages. Les Tableaux 2.4 et 2.5 indiquent les paramètres requis pour développer les paramètres de fragilité structurelle et les paramètres de la courbe de fragilité sensible à la dérive non structurelle pour les maisons à un étage et à deux étages respectivement.

Tableau 2.4 Données requises pour développer les courbes de fragilité des composants structurelle d'une maison à un étage

Type de maison	Hauteur (pouces)	Facteur modal de poussée $\alpha_2$	Taux moyen de dérive inter-étages au seuil de l'état de dommage $\Delta_{ds}$ pour les paramètres structurels :			
			Léger	Modéré	Étendu	Complet
Un étage	106	0.75	0.003	0.008	0.025	0.06
Deux étages	212	0.75				

Tableau 2.5 Données requises pour développer les courbes de fragilité des composants non structurels sensibles au déplacement relatif

Type de maison	Hauteur (pouces)	Facteur modal de poussée $\alpha_2$	Taux moyen de dérive inter-étages au seuil de l'état de dommage $\Delta_{ds}$ pour les paramètres non structurels :			
			Léger	Modéré	Étendu	Complet
Un étage	106	0.75	0.004	0.008	0.025	0.05
Deux étages	212	0.75				

En plus de la médiane, un autre paramètre essentiel à prendre en compte lors de l'étude des courbes de fragilité est l'écart type log-normal ( $\beta$ ), qui quantifie la variabilité totale de la courbe de fragilité et décrit la dispersion de la capacité sismique, tout en tenant compte des incertitudes. Dans cette étude, afin d'estimer les pertes sismiques pour les deux types de maisons, les valeurs  $\beta$  ont été adoptées telles que spécifiées et définies dans le manuel technique Hazus (Hazus 5.1, 2022). Ces valeurs fournissent une base normalisée pour modéliser les caractéristiques de fragilité et évaluer la vulnérabilité sismique des types de maisons étudiés.

Les Tableaux 2.6 et 2.7 présentent les caractéristiques de fragilité structurelle et non structurelle sensibles à la dérive, y compris les valeurs médianes et les valeurs  $\beta$ , pour les deux

types de maisons. Les Figures 2.15 et 2.16 montrent les courbes de fragilité structurelle élaborées pour les maisons à un étage et les maisons à deux étages en termes de  $S_d(po)$ .

Tableau 2.6 Courbes de fragilité structurelle, incluant les valeurs médianes et les valeurs  $\beta$ , pour les deux types de maisons

Type de maison	Déplacement spectral médian et écart type logarithmique (Beta)							
	Léger		Modéré		Étendu		Complet	
	Médiane (po)	Beta	Médiane (po)	Beta	Médiane (po)	Beta	Médiane (po)	Beta
Un étage	0.23	1.01	0.63	1.05	2.0	1.07	4.78	1.05
Deux étages	0.48	1.01	1.28	1.05	3.99	1.07	9.57	1.05

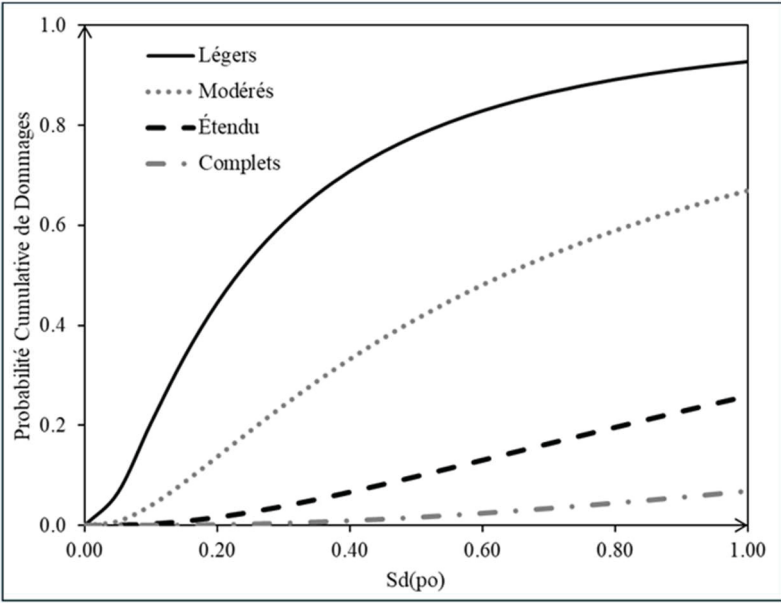


Figure 2.15 Courbes de fragilité pour les maisons à un étage basées sur les paramètres de fragilité structurelle



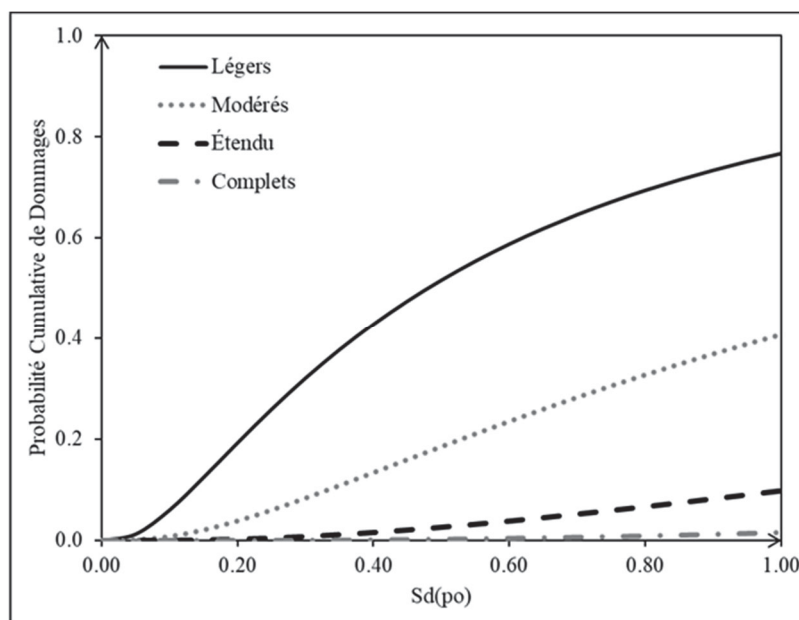


Figure 2.16 Courbes de fragilité pour les maisons à deux étages basées sur les paramètres de fragilité structurelle

Tableau 2.7 Paramètres des courbes de fragilité sensibles au déplacement des éléments non structurels, incluant les valeurs médianes et les valeurs  $\beta$ , pour les deux types de maisons

Type de maison	Déplacement spectral médian et écart type logarithmique (Beta)							
	Léger		Modéré		Étendu		Complet	
	Médiane (po)	Beta	Médiane (po)	Beta	Médiane (po)	Beta	Médiane (po)	Beta
Un étage	0.32	1.07	0.64	1.11	1.99	1.11	3.98	1.15
Deux étages	0.64	1.07	1.27	1.11	3.98	1.11	7.95	1.15

## 2.6.2 Paramètres d'accélération des éléments non structurels

L'accélération spectrale est le paramètre de risque sismique utilisé pour estimer les dommages non structurels causés aux composants sensibles à l'accélération. Les médianes de l'état des dommages pour ces composants sont déterminées en fonction de l'accélération maximale du

plancher (PFA). En général,  $S_a$  est supposé être égal à PFA, en supposant que la demande sur les étages supérieurs est représentée par l'accélération au point où le bâtiment commence à bouger (déplacement en mode push-over). Ces valeurs d'accélération sont cohérentes pour tous les types de bâtiments, mais varient en fonction du niveau de conception sismique de la maison. Dans le cadre de cette étude, le niveau pré-code est utilisé, car il représente mieux les maisons construites avec des techniques conventionnelles, avant l'introduction des codes de conception sismique modernes. Le Tableau 2.8 présente l'accélération spectrale médiane et les valeurs bêta fournies dans la littérature (Hazus 5.1, 2022).

Tableau 2.8 Paramètres des courbes de fragilité pour les composants non structurels sensibles à l'accélération, incluant les valeurs médianes et les valeurs  $\beta$ , pour les deux types de maisons

Type de maison	Accélération spectrale médiane (g) et écart type logarithmique (Beta)							
	Léger		Modéré		Étendu		Complet	
	Médiane (g)	Beta	Médiane (g)	Beta	Médiane (g)	Beta	Médiane (g)	Beta
Un étage	0.2	0.72	0.4	0.7	0.8	0.66	1.6	0.66
Deux étages	0.2	0.72	0.4	0.7	0.8	0.66	1.6	0.66

La Figure 2.17 présente les courbes de fragilité développées pour les maisons à un étage et à deux étages en termes de  $S_a(g)$ , ce qui reflète plus précisément la probabilité de dépassement lorsque l'on considère les paramètres d'accélération non structurels. Pour élaborer ces courbes de fragilité, les valeurs des médianes et de  $\beta$  obtenues dans le Tableau 2.8 ont été utilisées.

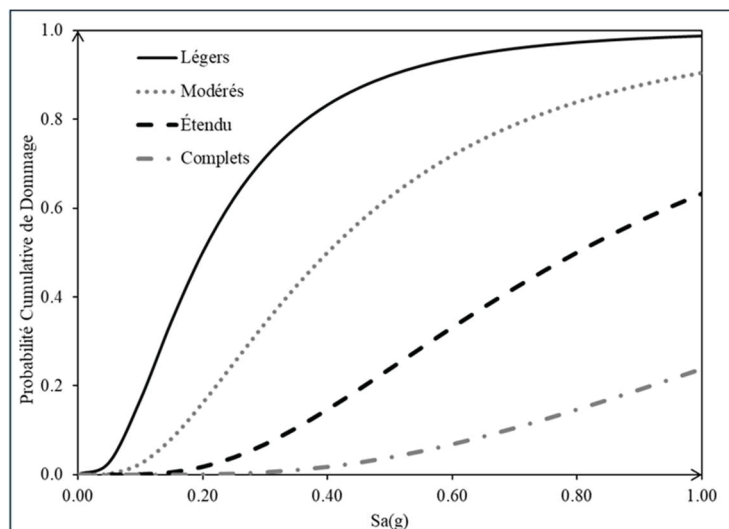


Figure 2.17 Courbes de fragilité en fonction de l'accélération pour les maisons à un et deux étages

## 2.7 Conclusion

L'élaboration de courbes de capacité et de fragilité basées sur les caractéristiques spécifiques de la structure est une étape fondamentale dans l'évaluation de la vulnérabilité sismique et de la performance des bâtiments. La méthodologie présentée offre une approche simple et directe pour convertir les courbes de poussée en courbes de capacité tout en respectant les caractéristiques géométriques et structurelles des maisons. Ces caractéristiques comprennent le nombre d'étages, les matériaux de construction, les dimensions des murs, ainsi que la taille et l'emplacement des ouvertures. Une fois les courbes de capacité obtenues, elles peuvent être comparées à la demande spectrale afin d'évaluer la vulnérabilité sismique d'une maison. Les résultats démontrent l'importance de distinguer les maisons à un étage de celles à deux étages, car leur regroupement peut conduire à des conclusions inexactes. Les maisons à deux étages s'avèrent plus vulnérables aux événements sismiques que les maisons à un étage. En comparant les résultats de cette méthodologie avec les données disponibles, telles que Hazus, il apparaît clairement que l'approche basée sur la norme FEMA P807 (FEMA, 2012) offre une plus grande précision. Cette méthode garantit l'élaboration précise de courbes de capacité adaptées aux caractéristiques spécifiques de chaque type de maison, offrant ainsi plus de précision et d'exactitude.



## **CHAPITRE 3**

### **ESTIMATION DES PERTES**

Après avoir développé les courbes de capacité et de fragilité des deux nouveaux types de maisons, il est très utile d'estimer les dommages que ces maisons subiraient lors de séismes réels. Ce processus aide à comprendre les conséquences possibles d'un séisme, ce qui permet de mieux se préparer, d'élaborer des stratégies d'atténuation et d'allouer les ressources de manière plus efficace. Dans cette étude, l'estimation des pertes est réalisée en tenant compte de différents scénarios et en utilisant l'outil d'analyse AEBM, qui est une extension de la méthodologie Hazus permettant d'analyser un bâtiment spécifique en tenant compte de ses caractéristiques particulières, plutôt que d'utiliser des types de bâtiments génériques. L'AEBM permet une évaluation personnalisée en tenant compte des éléments structurels et non structurels de la structure.

#### **3.1 Méthodologie d'estimation des pertes sismiques**

##### **3.1.1 Outils d'analyse et paramètres d'entrée**

Comme indiqué à la section 1.10 de la revue de la littérature, la méthode d'estimation des pertes appliquée dans cette étude repose sur la fonctionnalité AEBM de Hazus. La première étape de l'analyse consiste à définir les données d'inventaire, pour définir les données d'inventaire dans l'AEBM, il est nécessaire de saisir un ensemble d'informations décrivant chaque maison individuelle. Les données peuvent être saisies manuellement en ajoutant des enregistrements correspondant à chaque structure spécifique. Cela permet de s'assurer que chaque structure est décrite en détail. Ces données comprennent la localisation géographique de chaque maison, y compris la latitude, la longitude et les conditions du site (type de sol A, B, C, D). Une fois les données d'inventaire saisies, l'étape suivante consiste à illustrer la modification des données par défaut dans les profils AEBM en définissant les caractéristiques spécifiques des bâtiments. Cela implique de fournir des informations détaillées sur le niveau de conception sismique, les

résultats des analyses des courbes de capacité et tous les paramètres des courbes de fragilité, tels que les courbes de fragilité structurelle, de dérive non structurelle et d'accélération non structurelle, en plus du facteur de durée et de l'amortissement élastique. Les paramètres de fragilité développés à la section 2.6 du présent rapport ont été intégrés dans les paramètres AEBM pour chaque type de maison et le facteur de dégradation ( $k$ ) a été pris en compte comme recommandé dans le tableau 5-33 du manuel technique Hazus (Hazus 5.1, 2022). Afin de faciliter la comparaison avec la maison à ossature légère standard définie par Hazus (W1), les performances de la maison W1 ont également été étudiées dans le cadre des scénarios développés. Cela a permis de comparer les résultats entre la maison standard et le nouveau type de maison défini. L'annexe VI fournit une description détaillée des étapes nécessaires à l'utilisation du logiciel AEBM.

### **3.1.2 Modélisation de scénarios basés sur la CEUS pour l'estimation des pertes sismiques**

Pour calculer les secousses sismiques dans les régions où la couverture ShakeMap de l'USGS est limitée, il est essentiel de sélectionner une relation d'atténuation appropriée fournie par le logiciel. Les relations d'atténuation disponibles dans Hazus sont déterminées en fonction de la situation géographique de la région étudiée, par exemple l'ouest des États-Unis (WUS) ou le centre et l'est des États-Unis (CEUS). Pour cette étude, les équations de prédiction des mouvements du sol CEUS, spécialement développées pour l'analyse sismique dans le centre et l'est des États-Unis, sont utilisées pour estimer les pertes au Québec. Ce choix est étayé par des études antérieures, telles que celles d'Atkinson et Adams (2013), qui recommandent d'utiliser différents types d'équations de prédiction des mouvements du sol (GMPE) pour l'est de l'Amérique du Nord (ENA). La combinaison recommandée comprend les GMPE développées par Atkinson et Boore (2006), Pezeshk et al. (2005) et Silva et al. (2002), qui sont déjà intégrées dans les équations d'atténuation CEUS.

Lors de la sélection de l'événement arbitraire déterministe dans l'AEBM et du choix des équations d'atténuation CEUS, l'objectif est de prédire l'intensité des secousses (telles que l'accélération maximale du sol PGA et l'accélération spectrale ( $S_a$ ) pour différents scénarios.

Cela repose sur des paramètres tels que la magnitude du séisme, la localisation géographique définie par les coordonnées de l'épicentre, la distance épicentrale et les conditions spécifiques au site. Les étapes de définition de nouveaux scénarios dans le logiciel AEBM sont expliquées en détail à l'annexe VI.

Pour chaque type de maison, soixante simulations ont été réalisées en faisant varier la magnitude du séisme entre  $M_w=6$ ,  $M_w=6,5$  et  $M_w=7$ , la distance à l'épicentre (Répi) entre 10 km et 40 km à partir des coordonnées fixes de la maison étudiée, et la classification des sols parmi les types A, B, C et D. Chaque combinaison de ces paramètres a été analysée afin d'évaluer son influence sur la performance structurelle. Le Tableau 3.1 présente les coordonnées fixes de la maison, tandis que le tableau 3.2 indique les emplacements des épicentres pris en compte dans cette étude.

Tableau 3.1 Coordonnées de la maison étudiée

Maison étudiée	Latitude (°) / Longitude (°)	
	45.512	-75.605

Tableau 3.2 Distance entre l'épicentre et les maisons étudiées (Répi)

Localisation de l'épicentre par rapport à la maison	Latitude (°) / Longitude (°)	
10 km	45.6021	-75.605
15 km	45.6471	-75.605
20 km	45.6922	-75.605
25 km	45.7372	-75.605
30 km	45.7823	-75.605
35 km	45.8273	-75.605
40 km	45.8724	-75.605

Le tableau 3.3 présente les résultats obtenus à partir du modèle AEBM pour une maison à ossature bois d'un étage. Cinq scénarios de même magnitude ( $M_w = 6$ ) et de même type de sol (C) sont pris en compte, tandis que la distance entre l'épicentre et la maison Répi est variable. Les résultats montrent clairement comment la distance entre l'épicentre et la maison influence l'intensité sismique (PGA et  $S_a$ ) et, par conséquent, les dommages causés par le séisme (ratio de perte totale). Tout d'abord, plus la distance entre l'épicentre et la maison (Répi) augmente, plus l'intensité sismique, mesurée par les valeurs PGA et  $S_a$ , diminue. Cela indique que les sites plus proches de l'épicentre subissent des secousses plus fortes, tandis que ceux plus éloignés subissent des secousses plus faibles. Par conséquent, le taux de perte total diminue à mesure que la distance par rapport à l'épicentre augmente. À 10 km de l'épicentre, le taux de perte total est de 16 % et il diminue à 1,93 % à 30 km.

Tableau 3.3 Intensités sismiques et taux de perte total (LR) pour une maison d'un étage à différentes distances de l'épicentre ( $M_w = 6$ , type de sol C), générés avec l'AEBM

$M_w$	Répi(km)	Type de sol	Pga(g)	$S_a(0.3s)$ (g)	$S_a(1s)$ (g)	LR (%)
6	10	C	0.82	1.05	0.63	16%
6	15	C	0.46	0.7	0.4	8.4 %
6	20	C	0.28	0.48	0.28	4.48%
6	25	C	0.21	0.38	0.22	2.89%
6	30	C	0.17	0.3	0.18	1.93%

Une autre comparaison entre différentes magnitudes a été effectuée afin d'évaluer l'impact de la magnitude sur l'intensité sismique et les pertes totales. Le tableau 3.4 présente les résultats obtenus à partir du modèle AEBM pour une maison à ossature bois d'un étage. Trois scénarios avec différentes magnitudes ( $M_w = 6$ ,  $M_w = 6,5$  et  $M_w = 7$ ) ont été pris en compte. Le type de sol est resté le même pour les trois cas, fixé au type C, et la distance entre l'épicentre et la maison (Répi) a été fixée à 20 km. Comme prévu, lorsque la magnitude du séisme passe de 6 à 7, les intensités sismiques (Pga et  $S_a$ ) augmentent de Pga=0,28 g à 0,57 g. Par conséquent, le



ratio de perte totale LR (%) a augmenté de 4,48 % à 12,35 %, soulignant la relation directe entre l'intensité des secousses et les pertes potentielles.

Tableau 3.4 Intensités sismiques et taux de perte total LR (%)  
pour une maison d'un étage selon différentes magnitudes sismiques,  
générés avec l'AEBM

M <sub>w</sub>	R <sub>épi</sub> (km)	Type de sol	Pga(g)	Sa(0.3s) (g)	Sa(1s) (g)	LR (%)
6	20	C	0.28	0.48	0.28	4.48%
6.5	20	C	0.41	0.70	0.46	8.10 %
7	20	C	0.57	0.93	0.69	12.35%

En plus des deux comparaisons effectuées précédemment, une autre comparaison a été réalisée afin de mettre en évidence l'impact du type de sol. Pour une magnitude sismique identique ( $M_w = 6,5$ ), le type de sol variait de A à D tout en conservant le même Répi. Le choix de ces types de sols était basé sur le fait que la majorité des conditions de site des grands centres urbains du Québec se trouvent dans ces classes de sols (Nastev et al., 2016). Le tableau 3.5 présente les résultats obtenus à partir du modèle AEBM pour la maison à ossature bois d'un étage. Les résultats ont révélé que le type de sol a un impact important sur les résultats sismiques en amplifiant les ondes sismiques. Les sols plus denses (tels que les types C et D) ont tendance à amplifier davantage les secousses du sol que les sols plus durs (types A et B). En conséquence, les maisons construites sur des sols plus denses subissent des intensités sismiques plus élevées, ce qui entraîne des pertes potentielles plus importantes. Par exemple, le taux de perte pour le type de sol D est de 8,82 %, contre 3,9 % pour le type de sol A. Par conséquent, lorsque le type de sol passe de A à D, on s'attend à une augmentation à la fois des intensités sismiques et des pertes potentielles.

Tableau 3.5 Intensités sismiques et taux de perte total LR (%) pour une maison d'un étage selon différents types de sol, générés avec l'AEBM

M <sub>w</sub>	R <sub>épi</sub> (km)	Type de sol	Pga(g)	Sa(0.3s) (g)	Sa(1s) (g)	LR (%)
6.5	20	A	0.27	0.44	0.25	3.90%
6.5	20	B	0.31	0.50	0.25	4.75%
6.5	20	C	0.41	0.7	0.46	8.10%
6.5	20	D	0.43	0.75	0.64	8.80%

Après avoir effectué trois comparaisons, l'une où le M<sub>w</sub> et le type de sol étaient fixes tandis que le R<sub>épi</sub> variait, une deuxième où le M<sub>w</sub> variait tandis que le type de sol et le R<sub>épi</sub> restaient constants, et une troisième où le type de sol variait tandis que les autres facteurs restaient constants, les résultats soulignent l'importance de prendre en compte ces trois facteurs lors de l'évaluation du risque sismique et des dommages potentiels, car chacun d'entre eux a une incidence significative sur l'intensité sismique et les pertes potentielles.

### 3.2 Résultats de l'estimation des pertes et analyse de régression détaillée des courbes de pertes

Après avoir exécuté les scénarios développés à l'aide de l'AEBM, les résultats ont été classés en fonction du type de maison. Les scénarios comprenaient un large éventail d'intensités sismiques, et certains présentaient des intensités de mouvement du sol élevées qui pouvaient conduire à une surestimation des pertes sismiques. Afin d'affiner l'analyse, un processus de sélection a été mis en place pour filtrer les cas extrêmes et garantir la fiabilité de l'analyse. Sur cette base, 35 scénarios ont été retenus pour une analyse plus approfondie. Le principal critère de sélection était de limiter la valeur PGA à un maximum de 0,49 g. Cette limite a été dérivée d'une étude empirique de l'intensité sismique à travers le Québec, où la moyenne des valeurs PGA les plus élevées des séismes passés et des évaluations des risques a été prise en compte. Pour calculer l'intensité sismique à travers le Québec, l'outil d'évaluation des risques sismiques du Code national du bâtiment 2020 (CNB) a été utilisé, et les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 3.7. Pour ce calcul, la classe de site C et une probabilité de dépassement de 2%

sur une période de 50 ans ont été sélectionnées, cette probabilité de 2% étant recommandée par le CNB 2020.

Tableau 3.6 Intensités sismiques pour différentes localités au Québec fournies par l'outil en ligne de Séisme Canada selon le CNB 2020, avec une probabilité de dépassement de 2 % sur une période de 50 ans et une classe de site C

Localités	Pga (g)	Sa(0.3s) (g)	Sa(1s) (g)	PGV
Charlevoix	1.07	1.54	0.64	0.84
Gatineau	0.35	0.53	0.21	0.27
Saguenay	0.59	0.87	0.34	0.45
Montreal	0.46	0.66	0.26	0.33
Sherbrooke	0.17	0.35	0.15	0.18
Trois rivières	0.31	0.49	0.20	0.25
Valeur moyenne	0.49	0.74	0.3	0.38

Afin d'améliorer les courbes d'estimation des pertes, une analyse de régression simple a été appliquée aux données. Cette méthode permet d'identifier la relation entre l'intensité sismique et les pertes. Les graphiques obtenus présenteront trois éléments essentiels : (1) les données observées, représentant les résultats réels, (2) la ligne de régression ajustée, indiquant les valeurs de perte prévues obtenues à partir de l'équation de régression linéaire, et (3) l'intervalle de prédiction, illustrant la fourchette des résultats possibles. Les intervalles de prédiction ont été calculés en intégrant la marge d'erreur et l'écart type, qui tiennent compte respectivement de la variabilité des données et de l'incertitude du modèle. Cette approche garantit que les prévisions de pertes couvrent l'ensemble des résultats potentiels, ce qui renforce la fiabilité des estimations. L'équation (3.1) a été utilisée pour calculer les points ajustés.

$$LR = a + b * IM \quad (3.1)$$

où a et b sont les coefficients de régression, a représente la valeur d'interception, tandis que b est la pente de l'équation, indiquant comment la perte estimée varie lorsque l'intensité sismique augmente d'une unité. IM représente la mesure de l'intensité sismique. L'équation peut ensuite être linéarisée à l'aide d'une transformation logarithmique comme suit :

$$\ln(LR) = a + b * \ln(IM) \quad (3.2)$$

Cette transformation permet d'exprimer la relation sous forme logarithmique, ce qui peut être utile pour saisir les tendances non linéaires dans les données. Afin de tenir compte de l'incertitude liée aux estimations individuelles des pertes, un intervalle de prédiction de 95 % a été calculé. Cet intervalle fournit une plage dans laquelle la valeur des pertes devrait se situer avec un niveau de confiance de 95 %, compte tenu à la fois de la variabilité des estimations du modèle et du caractère aléatoire inhérent aux observations. Afin de tenir compte de l'incertitude des prédictions, l'écart type et l'erreur type sont utilisés. L'écart type mesure la dispersion des points de données, tandis que l'erreur type, dérivée de l'erreur quadratique moyenne (MSE), indique dans quelle mesure les valeurs prédites sont susceptibles de différer des valeurs réelles. Les résultats sont ensuite présentés en termes exponentiels, afin d'interpréter les valeurs dans leur échelle d'origine. L'annexe VII présente un exemple d'analyse de régression.

Les Figures 3.1 (a), 3.1 (b) et 3.1 (c) présentent respectivement l'estimation des pertes pour la nouvelle catégorie de maisons à un étage, en fonction de différentes caractéristiques sismiques PGA,  $S_a(0,3s)$  et  $S_a(1s)$ . Les Figures 3.2 (a), 3.2 (b) et 3.2 (c) présentent l'estimation des pertes pour la nouvelle catégorie de maisons à deux étages, en fonction de différentes caractéristiques sismiques PGA,  $S_a(0,3s)$  et  $S_a(1s)$ . Les Figures 3.3 (a), 3.3(b) et 3.3 (c) montrent l'estimation des pertes pour le type standard W1 (pré-code) de Hazus. À la suite de l'analyse de régression des taux de perte sous différentes caractéristiques sismiques, les équations présentées dans les Tableaux 3.7 à 3.9 ont été établies afin de faciliter le calcul rapide des taux de perte pour les maisons à un et deux étages. Ces équations s'appliquent dans des limites définies en fonction de différents paramètres sismiques : PGA,  $S_a(0,3s)$  et  $S_a(1s)$ , comme spécifié dans les tableaux et sur la base des scénarios étudiés.

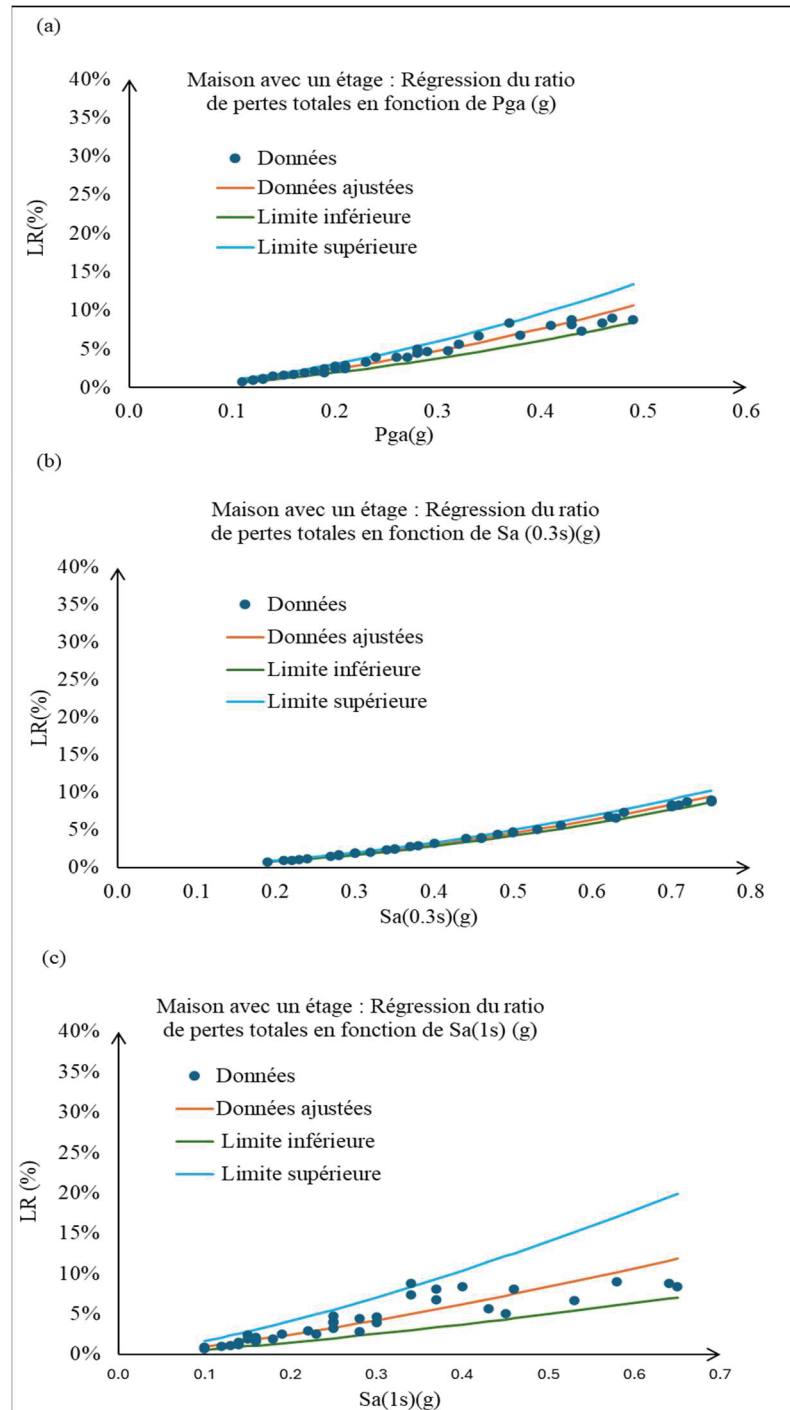


Figure 3.1 Régression du LR(%) maison à un étage en fonction du (a) PGA ; (b) de  $S_a(0,3s)$  ; (c) de  $S_a(1s)$  développées à partir des résultats obtenus de l'AEBM

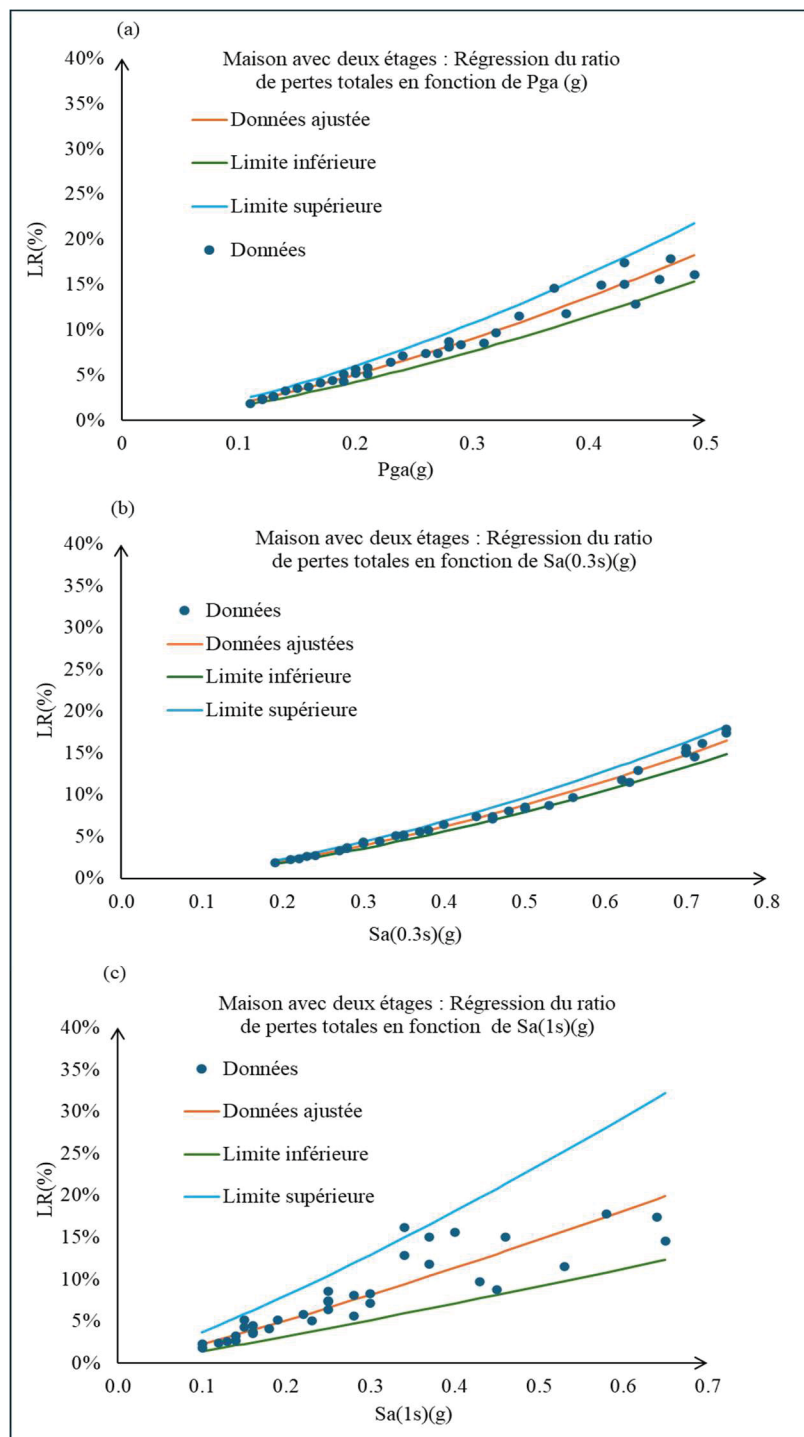


Figure 3.2 Régression du  $LR(\%)$  pour maison à deux étages en fonction du (a)  $PGA$  ; (b) de  $Sa(0,3s)$  ; (c) de  $Sa(1s)$  développées à partir des résultats obtenus de l'AEEM

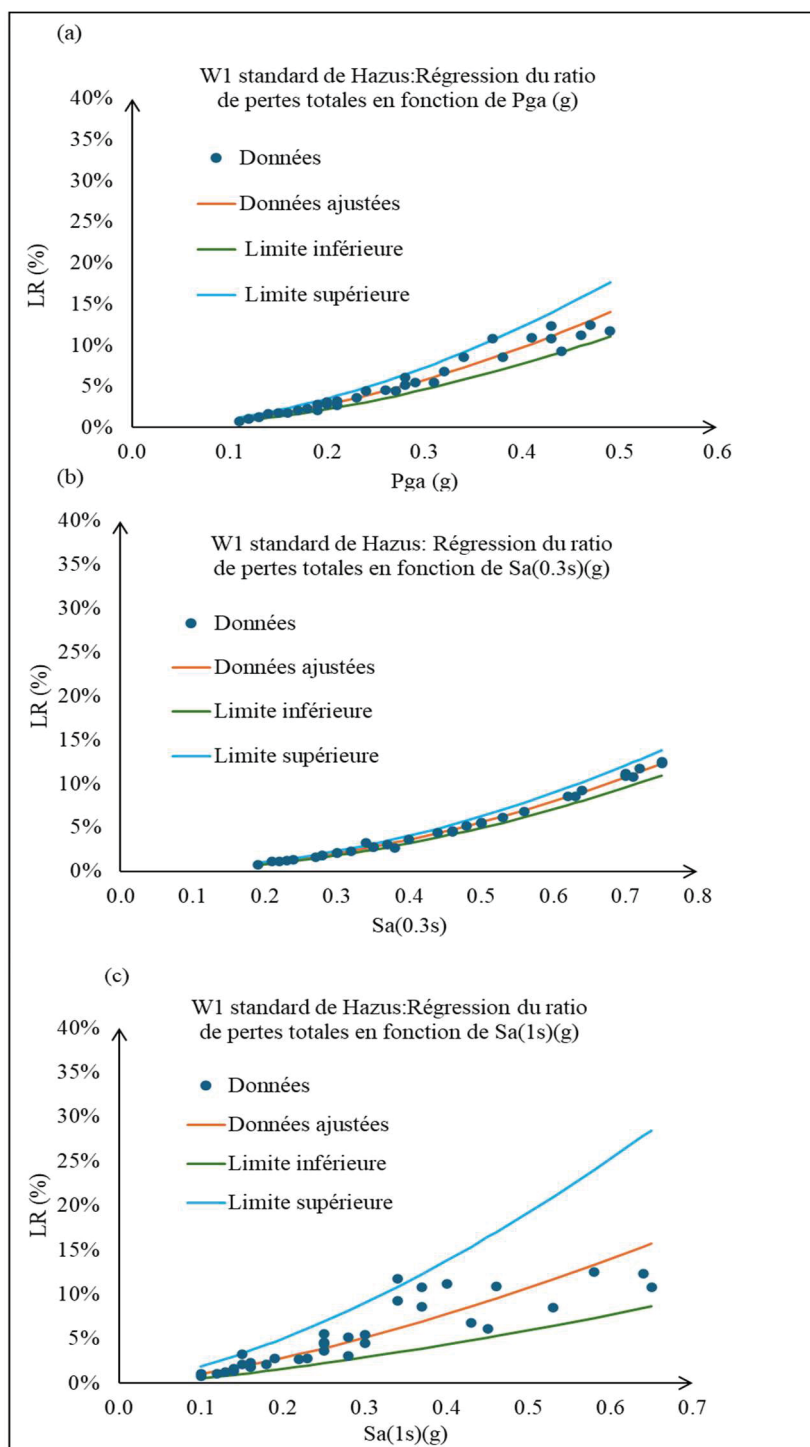


Figure 3.3 Régression du LR(%) pour W1 Hazus en fonction du (a) PGA ; (b) de  $Sa(0,3s)$  ; (c) de  $Sa(1s)$  développées à partir des résultats obtenus de l'AEEM

Tableau 3.7 Équations pour le calcul de taux de perte total LR(%)  
des maisons à un et deux étages en fonction de Pga (g)

Type de Maison	Limites de Pga (g)	Equation pour calculer le LR(%)
Un étage	$0 < Pga < 0.5$	$\ln(LR \%) = -1.075 + 1.63 \times \ln PGA$
Deux étages	$0 < Pga < 0.5$	$\ln(LR \%) = -0.679 + 1.43 \times \ln PGA$
W1 standard de Hazus	$0 < Pga < 0.5$	$\ln(LR \%) = -0.68 + 1.792 \times \ln PGA$

Tableau 3.8 Équations pour le calcul de taux de perte total LR(%)  
des maisons à un et deux étages en fonction de Sa (0.3s) (g)

Type de Maison	Limite de Sa(0.3s) (g)	Equation pour calculer LR (%)
Un étage	$0 < Sa(0.3s) < 0.75$	$\ln(LR \%) = -1.84 + 1.781 \times \ln Sa(0.3s)$
Deux étages	$0 < Sa(0.3s) < 0.75$	$\ln(LR \%) = -1.36 + 1.553 \times \ln Sa(0.3s)$
W1 standard de Hazus	$0 < Sa(0.3s) < 0.75$	$\ln(LR \%) = -1.53 + 1.948 \times \ln Sa(0.3s)$

Tableau 3.9 Équations pour le calcul de taux de perte total LR(%)  
des maisons à un et deux étages en fonction de Sa (1s) (g)

Type de Maison	Limite de Sa(1s) (g)	Equation pour calculer LR (%)
Un étage	$0 < Sa(1s) < 0.65$	$\ln(LR \%) = -1.56 + 1.328 \times \ln Sa(1s)$
Deux étages	$0 < Sa(1s) < 0.65$	$\ln(LR \%) = -1.115 + 1.154 \times \ln Sa(1s)$
W1 standard de Hazus	$0 < Sa(1s) < 0.65$	$\ln(LR \%) = -1.228 + 1.449 \times \ln Sa(1s)$

### 3.3 Discussion des résultats

#### 3.3.1 Comparaison entre la classes standard Hazus W1 et les classes affinées

La comparaison des représentations graphiques des ratios d'estimation des pertes en fonction de différentes intensités sismiques telles que Pga(g), Sa(0,3s) et Sa(1s) pour les trois types de maisons révèle que Sa(0,3s) présente une corrélation nettement plus forte avec les pertes estimées. Le modèle de régression utilisant Sa(0,3s) s'ajuste mieux aux données, ce qui indique une prévision des pertes plus précise et plus fiable que PGA et Sa(1s). Cela peut s'expliquer



par la corrélation avec la période fondamentale de vibration des bâtiments de faible hauteur en ossature de bois, généralement proche de 0,3 s (FEMA, 2020). En revanche, le  $S_a(1s)$  est davantage corrélé aux bâtiments de hauteur moyenne et élevée ; c'est pourquoi une dispersion plus importante des résultats est observée en fonction du  $S_a(1s)$  pour les maisons d'un ou deux étages. Pour ce qui est du PGA, la dispersion demeure modérée puisqu'il peut être associé à la réponse de structures plus rigides, caractérisées par des périodes de vibration plus courtes. Les Figures 3.5(b), 3.6(b) et 3.7(b) montrent qu'à une intensité sismique de  $S_a(0,3s) = 0,75g$ , les ratios de pertes suivants ont été observés : une maison à un étage a présenté un ratio de perte de 9 %, une maison à deux étages un ratio de perte de 17,83 % et la norme Hazus W1 un ratio de perte de 12,49 %. Les résultats indiquent que la maison à un étage présente le ratio de perte le plus faible, tandis que la maison à deux étages affiche systématiquement le ratio de perte le plus élevé. La norme W1 de Hazus se situe entre les deux nouvelles classes en termes de ratio de perte. Il existe une corrélation directe entre les résultats de l'estimation des pertes et les conclusions relatives à la vulnérabilité présentées au chapitre 2, qui révèlent que les maisons à deux étages étaient plus susceptibles d'être endommagées.

La classe des maisons à un étage présente le ratio de perte total le plus faible, tandis que les maisons à deux étages ont le ratio de perte total le plus élevé parmi les trois classes étudiées. La norme W1 (norme Hazus) présente un ratio de perte plus élevé que les maisons à un étage, et cette différence augmente avec la valeur de  $S_a(0,3s)$ , comme le montre le graphique de la Figure 3.4.

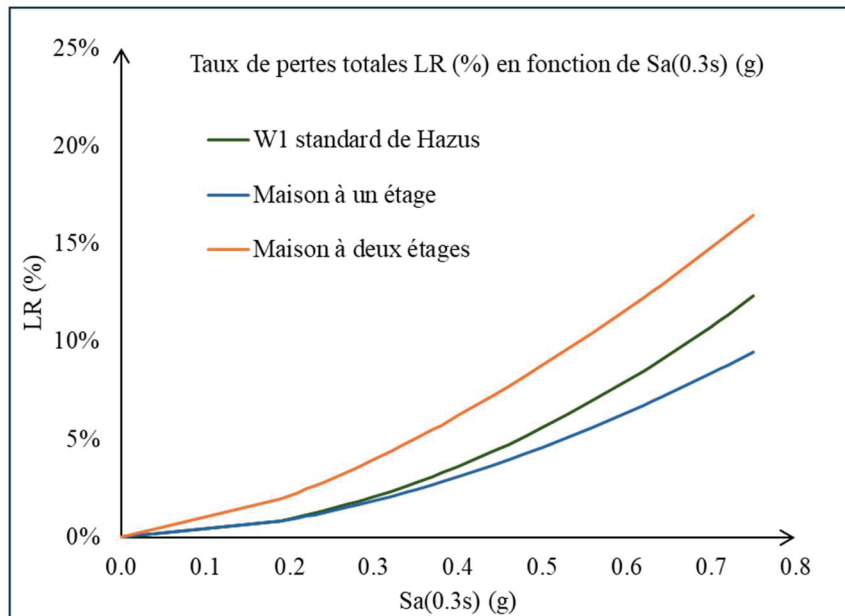


Figure 3.4 Courbes moyennes de régression du LR (%) en fonction de  $S_a(0,3s)$  pour les deux nouvelles classes maison à un étage, et deux étages et la classe W1 standard de Hazus

### 3.3.2 Comparaison avec une étude précédente d'estimation des pertes

Une comparaison est effectuée avec des recherches antérieures, en particulier l'étude de Wesson et al. (2004), qui fournit une évaluation détaillée des dommages et des pertes subis par les maisons individuelles à ossature bois à la suite du séisme de Northridge en 1994. Wesson et al. (2004) ont modélisé les pertes sismiques à l'aide d'une approche statistique basée sur l'ajustement d'une distribution gamma afin d'observer les données sur les dommages causés par le séisme de Northridge en 1994. Cette méthode a permis de générer des courbes d'estimation des pertes basées sur les paramètres du mouvement du sol, offrant ainsi une référence pour évaluer les tendances en matière de dommages dans des types de bâtiments similaires. La Figure 3.5 illustre les courbes d'estimation des pertes développées par Wesson pour les maisons à ossature bois (Wesson, 2004), ainsi que celles générées dans cette étude pour les bâtiments à un et deux étages, ainsi que les courbes standard W1 fournies dans Hazus. Cette comparaison facilite l'évaluation de la cohérence des tendances des pertes et met en

évidence les effets de l'intensité sismique, des caractéristiques de construction et des différences méthodologiques sur les estimations des dommages.

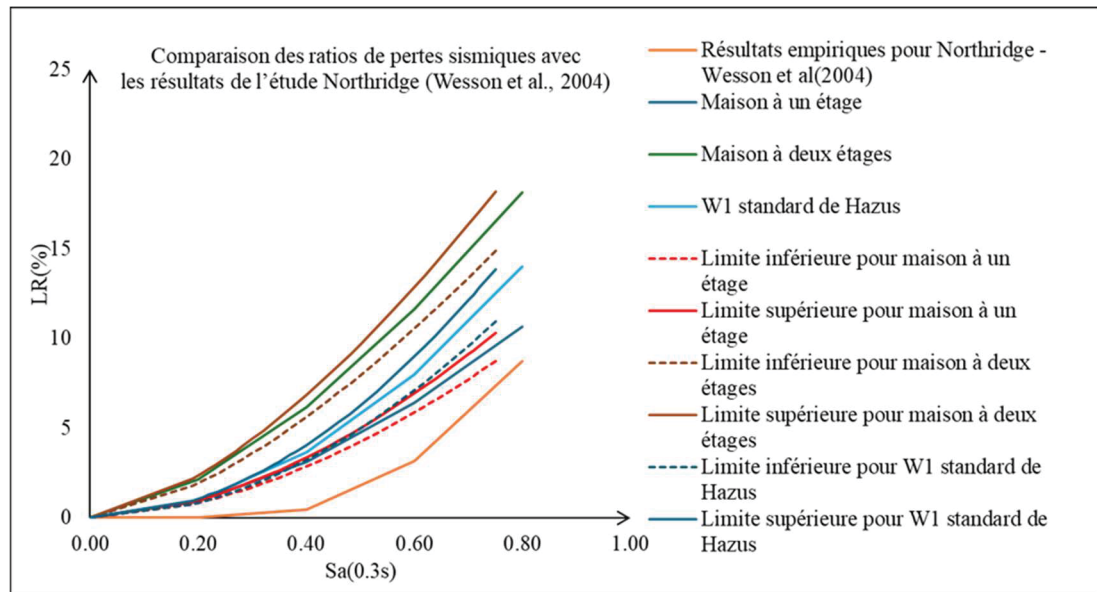


Figure 3.5 Comparaison des ratios de pertes sismiques avec les résultats de l'étude Northridge

La comparaison des ratios de pertes entre l'étude menée par Wesson et les résultats obtenus dans la présente étude révèle certaines différences. Pour l'accélération spectrale à 0,3 seconde ( $S_a(0.3s)$ ), Wesson a rapporté un taux de sinistralité de 3,18 %, tandis que la présente étude a donné une valeur de 6,39 % pour les maisons à un étage. Les différences observées entre les taux de perte calculés dans cette étude et ceux rapportés par Wesson et al. (2004) sont principalement dues à l'approche de modélisation. Les estimations de Wesson étaient basées sur des observations empiriques du tremblement de terre de Northridge en 1994, calibrées pour un événement et une région spécifique. En revanche, cette étude utilise des simulations basées sur des scénarios réalisées à l'aide du logiciel AEBM, qui intègre des estimations des mouvements du sol issues des équations de prédiction des mouvements du sol (GMPE). Les GMPE estiment l'intensité sismique en fonction de facteurs tels que la magnitude, la distance et les conditions du site, ce qui peut entraîner des niveaux de secousse différents de ceux observés dans le passé. Ces différences de méthodologie et de données d'entrée expliquent la

variation des ratios de pertes estimé. En outre, les mouvements sismiques diffèrent significativement entre l'Est et l'Ouest de l'Amérique du Nord, tant en termes de caractéristiques que d'intensité. En Californie et dans l'Ouest des États-Unis, l'activité sismique est dominée par des séismes entraînant des secousses fortes. C'est pour cette raison que la qualité et les pratiques de construction varient également entre l'Ouest des États-Unis et l'Est du Canada. La Californie dispose de normes parasismiques strictes, accompagnées d'une application rigoureuse, en raison de son risque sismique élevé, ce qui se traduit par des structures bien conçues pour résister aux séismes. À l'inverse, dans l'Est du Canada, de nombreux bâtiments anciens ainsi que de nombreuses constructions basses en ossature de bois sont réalisés selon des méthodes conventionnelles, sans détails spécifiques pour la résistance sismique, ce qui conduit à des profils de vulnérabilité très différents. Cette comparaison souligne la nécessité de développer des courbes de pertes spécifiques au site, qui tiennent compte non seulement de la sismicité régionale mais aussi des pratiques locales de construction et des vulnérabilités des bâtiments pour une évaluation précise du risque sismique et pour la planification des mesures d'atténuation.

### **3.4 Application des courbes d'estimation des pertes aux grandes villes du Québec**

Dans la section 3.3, les courbes de pertes élaborées fournissent une estimation des pertes potentielles à divers endroits au Québec, en fonction des caractéristiques sismiques locales. Les grands centres urbains tels que Montréal, Québec, Gatineau et Sherbrooke sont présentés comme études de cas pour illustrer les résultats. Pour estimer les pertes sismiques dans ces différentes villes, les intensités sismiques ont été calculées à l'aide de l'outil d'évaluation des risques fourni par le Code national du bâtiment du Canada (CNB) 2020. Ces calculs ont été effectués pour deux scénarios différents : une probabilité de dépassement de 2 % sur une période de 50 ans et une probabilité de dépassement de 10 % sur la même période. Les résultats de l'outil d'évaluation des risques sismiques sont résumés dans les Tableaux 3.10 et 3.11, qui indiquent les intensités sismiques pour chacune des probabilités de dépassement spécifiées. Pour ce calcul, le type de sol a été supposé être de type C, conformément aux classifications des lignes directrices du NBCC 2020, où le sol de type C est caractérisé par un sol rigide, qui

a un effet modéré sur les ondes sismiques par rapport à d'autres types de sol, tels que le type A (roche dure) ou le type D (sol consistant).

Tableau 3.10 Intensité sismique pour différentes grandes villes, fournie par l'outil en ligne de Séisme Canada selon le CNB 2020, avec une probabilité de dépassement de 2 % sur une période de 50 ans et une classification de site de type C

Localités	Probabilité (%) de dépassement sur 50 ans	Pga(g)	Sa(0.3s) (g)	Sa(1s) (g)	PGV (m/s)
Gatineau	2	0.35	0.53	0.21	0.27
Montréal	2	0.46	0.664	0.257	0.337
Sherbrooke	2	0.177	0.354	0.158	0.185
Ville de Québec	2	0.41	0.627	0.25	0.319

Tableau 3.11 Intensité sismique pour différentes grandes villes, fournie par l'outil en ligne de Séisme Canada selon le CNB 2020, avec une probabilité de dépassement de 10 % sur une période de 50 ans et une classification de site de type C

Localités	Probabilité (%) de dépassement sur 50 ans	Pga(g)	Sa(0.3s) (g)	Sa(1s) (g)	PGV (m/s)
Gatineau	10	0.13	0.201	0.0714	0.088
Montréal	10	0.168	0.246	0.0851	0.109
Sherbrooke	10	0.075	0.151	0.064	0.07
Ville de Québec	10	0.163	0.255	0.0916	0.114

L'objectif principal de cette analyse est de comparer les pertes sismiques estimées pour différents types de maisons, notamment les maisons à un et deux étages, ainsi que la norme W1 de Hazus. Afin de comparer le taux de perte, la caractéristique sismique  $S_a(0,3 \text{ s})$  sera prise en compte, car elle offre une bonne représentation pour l'estimation des pertes dans les zones sismiques faibles à modérées. Les tableaux 3.12 et 3.13 présentent les ratios de perte

totale pour un risque sismique avec une probabilité de dépassement de 2 % et 10 % sur une période de 50 ans dans les différentes villes respectivement. Le ratio de perte totale LR représente la proportion des pertes structurelles et non structurelles par rapport à la valeur totale des maisons.

Tableau 3.12 Comparaison des taux de perte totaux entre les deux nouvelles classes et la norme W1 de Hazus pour un aléa sismique avec une probabilité de dépassement de 2 % sur une période de 50 ans dans différentes villes du Québec

Localités	Type de maison	Sa(0.3s)(g)	LR(%)
Gatineau	Un étage	0.53	5,1%
	Deux étages	0.53	9,6%
	W1 de Hazus	0.53	6,2%
Montréal	Un étage	0.66	7,5%
	Deux étages	0.66	13,5%
	W1 de Hazus	0.66	9,6%
Sherbrooke	Un étage	0.354	2,5%
	Deux étages	0.354	5,13%
	W1 de Hazus	0.354	2,9%
Ville de Québec	Un étage	0.627	6,94%
	Deux étages	0.627	12,4%
	W1 de Hazus	0.627	8,7%

Pour une intensité sismique donnée, le ratio de perte totale varie en fonction du type de maison à ossature légère en bois. Parmi les trois catégories de maisons analysées, la maison à un étage présente le ratio de perte totale le plus faible, tandis que la maison à deux étages affiche le ratio le plus élevé. La norme W1 de Hazus se situe entre les deux, mais présente tout de même des pertes plus élevées que la maison à un étage. Par exemple, dans la ville de Montréal, où  $Sa(0,3s) = 0,66$  g, les ratios de perte totale estimés sont de 7,5 % pour les maisons à un étage, de 13,5 % pour les maisons à deux étages et de 9,6 % pour la norme W1 Hazus.

Tableau 3.13 Comparaison des taux de perte totaux entre les deux nouvelles classes et la norme W1 de Hazus pour un aléa sismique avec une probabilité de dépassement de 10 % sur une période de 50 ans dans différentes villes du Québec

Localités	Type de maison	Sa(0.3s)(g)	LR(%)
Gatineau	W1-1story	0.201	0.9%
	W1-2story	0.201	2.1%
	W1 de Hazus	0.201	1%
Montréal	W1-1story	0.246	1.3%
	W1-2story	0.246	2.9%
	W1 de Hazus	0.246	1,4%
Sherbrooke	W1-1story	0.151	0.5%
	W1-2story	0.151	1,36%
	W1 de Hazus	0.151	0,5%
Ville de Québec	W1-1story	0.255	1,4%
	W1-2story	0.255	3%
	W1 de Hazus	0.255	1,5%

### 3.5 Conclusion

Les résultats de l'étude d'estimation des pertes révèlent des différences significatives dans la vulnérabilité des maisons à ossature bois à un et deux étages en fonction de facteurs sismiques tels que la PGA, la Sa(0,3s) et la Sa(1s). Ces résultats indiquent que l'estimation des pertes est influencée par de multiples facteurs, notamment la magnitude du séisme, la localisation de l'épicentre, le type de sol, et la capacité à résister aux charges sismiques. Pour une PGA de 0,49g, les taux de perte variaient considérablement selon le type de maison : pour les maisons à un étage, le taux de perte était de 9 %, tandis que pour les maisons à deux étages, il était beaucoup plus élevé, à 16,15 %, alors que la norme W1 de Hazus indiquait un taux de perte de 12 % pour des conditions similaires. Ces résultats soulignent l'importance de prendre soigneusement en compte le type de bâtiment et les conditions sismiques locales lors de

l'estimation des pertes sismiques. Une autre conclusion importante de ce chapitre est que l'accélération spectrale à courte durée  $S_a(0,3s)$  fournit généralement une tendance plus fiable pour l'estimation des pertes dans les zones sismiques faibles à modérées. En outre, des équations ont été établies pour faciliter le calcul rapide des taux de perte pour les maisons à un et deux étages.



## CONCLUSION

L'objectif de ce projet était d'étudier et d'évaluer la vulnérabilité sismique des maisons à ossature légère existantes dans les zones urbaines. Comme ces maisons ont été construites selon des méthodes conventionnelles sans respecter les codes de construction modernes, leur vulnérabilité doit être évaluée à l'aide d'une approche spécifique. Par conséquent, la norme FEMA P-807 et la méthodologie Hazus ont été utilisées pour élaborer des courbes de capacité et de fragilité à l'aide d'une approche simplifiée qui minimise le temps de calcul et simplifie le système en réduisant le nombre de paramètres requis.

Afin d'élaborer les courbes de capacité et les courbes de fragilité des maisons à ossature en bois existantes, il a fallu distinguer les maisons à un étage de celles à deux étages. Trois prototypes ont été pris en considération pour chaque catégorie, sur la base des plans de maisons tirés de rapports publiés en ligne par la Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL, 1974). Les maisons ont été supposées avoir une façade en brique, car 80 % des maisons à Montréal, au Québec, ont une façade en brique. Les résultats ont montré une différence claire entre les vulnérabilités des maisons à un étage et celles à deux étages, pour un même matériau de construction. L'analyse a révélé que les maisons à deux étages étaient plus vulnérables aux événements sismiques. Ces résultats ont ensuite été comparés à la norme W1 de Hazus, qui regroupe les maisons à ossature légère en bois d'un et de deux étages dans une seule catégorie. La comparaison a clairement montré que la norme W1 de Hazus ne rend pas compte avec précision de la vulnérabilité variable des maisons à un et deux étages, car les maisons à un étage sont nettement moins vulnérables que les maisons à deux étages et que la norme W1 de Hazus.

Afin d'étudier les pertes potentielles de ces structures, soixante scénarios ont été élaborés, couvrant un large éventail de conditions sismiques. L'étude a pris en compte des magnitudes de 6, 6,5 et 7, avec des distances épacentrales comprises entre 10 et 40 km, et a inclus les types de sol A, B, C et D. Ces différents scénarios ont été analysés à l'aide de la fonctionnalité AEBM du logiciel Hazus, qui a nécessité la saisie de données spécifiques pour les maisons étudiées.

en termes de fragilité et de fonctions de capacité. L'équation d'atténuation CEUS, qui combine plusieurs équations d'atténuation, a été choisie pour définir les différents scénarios. La combinaison de différentes équations permet de réduire l'incertitude. Les résultats indiquent que les caractéristiques sismiques ont tendance à augmenter à mesure que la distance épacentrale diminue et que la magnitude du séisme augmente. En outre, le type de sol a joué un rôle important dans les résultats, les sols plus denses (tels que les types C et D) ayant tendance à amplifier les secousses plus que les sols plus durs (types A et B).

Une analyse de régression a été effectuée afin d'examiner la relation entre le taux de sinistralité et diverses caractéristiques sismiques, notamment la PGA, la  $S_a(0,3\text{ s})$  et la  $S_a(1\text{ s})$ . L'objectif était de déterminer les prédicteurs les plus précis pour l'estimation des pertes. Les résultats indiquent que pour des valeurs sismiques modérées, les modèles  $S_a(0,3\text{ s})$  ont montré une forte corrélation avec le taux de sinistralité pour différents types de maisons, quel que soit le nombre d'étages.

Dans l'ensemble, ce projet contribue à l'évaluation de la vulnérabilité sismique des maisons à ossature légère en bois de un et deux étages à l'aide d'une méthodologie simplifiée qui tient compte de leurs caractéristiques structurelles et géométriques spécifiques. Cette approche simplifie l'élaboration de courbes de capacité et de fragilité, réduisant ainsi la complexité tout en garantissant des prévisions précises de la performance structurelle lors de séismes. L'étude d'estimation des pertes potentielles met en évidence les différents facteurs qui influent sur les résultats et souligne l'importance de prendre en compte différents paramètres sismiques dans les études d'estimation des pertes, en fonction de l'intensité de l'événement. Sur la base d'une analyse de régression de plusieurs scénarios, des équations ont été élaborées pour calculer le taux de perte total (LR) des maisons à ossature bois en fonction de la PGA (0,3 s) et de  $S_a(1,0\text{ s})$ . Ces équations fournissent un modèle permettant d'estimer le taux de perte dans diverses conditions sismiques.

## RECOMMANDATIONS

Les résultats et conclusions de ce projet de recherche ont donné lieu aux recommandations suivantes :

- Améliorer la base de données en y intégrant des caractéristiques structurelles supplémentaires susceptibles d'influencer la vulnérabilité sismique des maisons, telles que la qualité des connexions entre les différents éléments (toit, murs, planchers).
- Élargir l'étude en augmentant la taille de l'échantillon et en incluant un plus grand nombre de prototypes, en particulier des maisons dont les matériaux de façade sont diversifiés et couramment utilisés à l'extérieur du Québec. Cela permettrait de mieux comprendre comment les différents matériaux et conceptions influent sur la vulnérabilité sismique et de tirer des conclusions plus générales pouvant s'appliquer à d'autres régions que le Québec.
- Mener une étude sur les maisons à trois étages tels que des triplex et des immeubles d'appartements, afin d'évaluer leur vulnérabilité sismique et leur performance lors de séismes. Se concentrer en particulier sur les maisons construites selon les directives du Code national de construction du Canada (CNC) à l'aide de méthodes conventionnelles. Cette étude permettrait d'évaluer le comportement des bâtiments à plusieurs étages lors de séismes à l'aide de la même méthodologie que celle développée dans la présente étude.
- Mener des études futures visant à prendre en compte les effets de proximité de faille sur le mouvement du sol, ainsi qu'à évaluer l'influence des classes de sites caractérisés par des sols meubles (sol E).
- Mener des études de risque à l'échelle régionale en tenant compte des révisions de la classification des structures à ossature bois ainsi que des nouvelles courbes de pertes développées récemment.



## **ANNEXE I**

### **PLANS DES MAISONS PROTOTYPES À UN ÉTAGE**

Cette annexe présente les plans des maisons des prototypes développés et utilisés pour créer les courbes de capacité moyenne des maisons à un étage. Ces plans ont été collectés à partir des rapports de la SCHL (1974) et générés dans AutoCAD dans le cadre du projet du (Guerrier, 2024) pour l'évaluation de la résistance sismique des bâtiments résidentiels à ossature en bois.

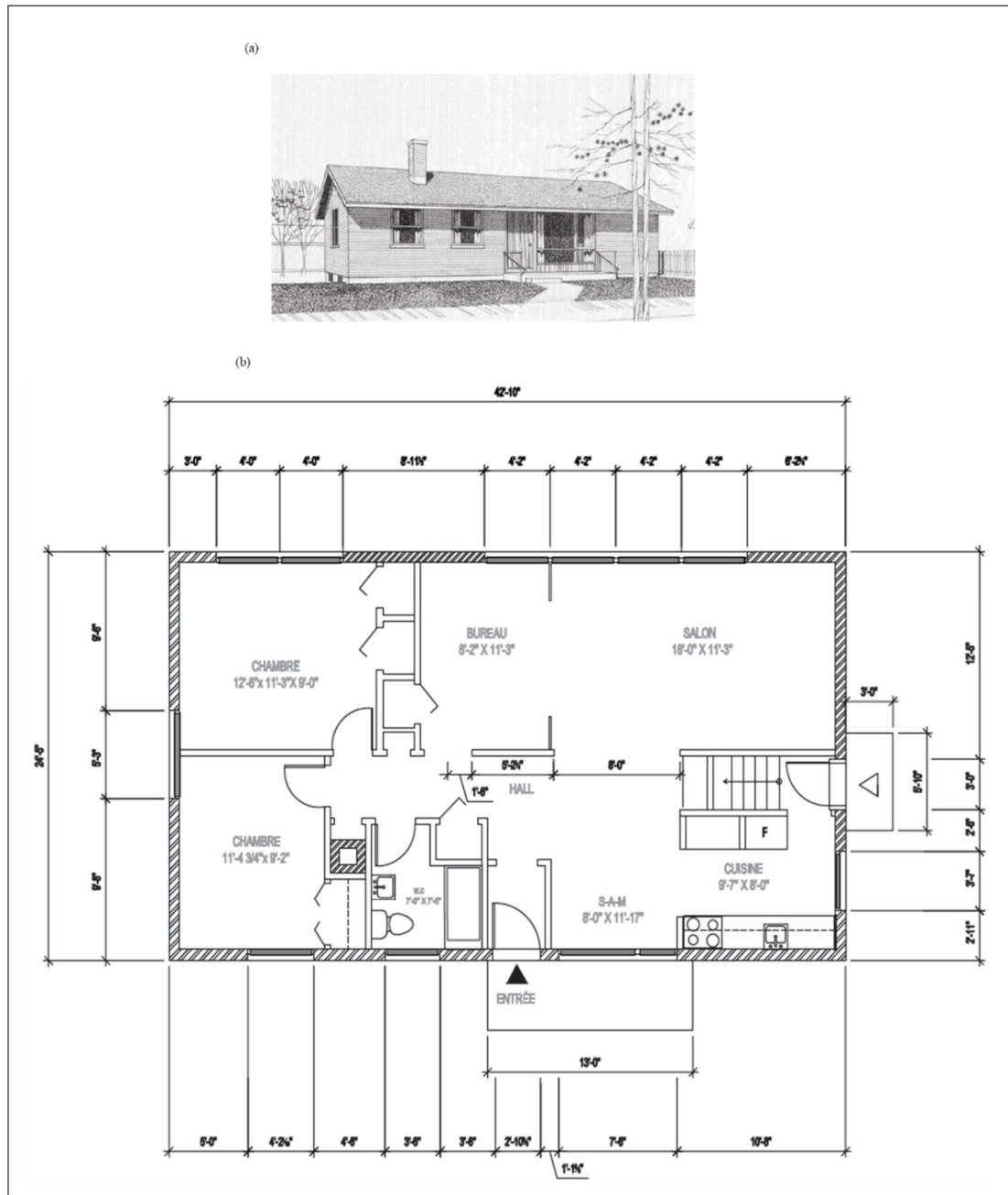


Figure A I.1 Illustration d'un exemple de maison avec un étage développé à partir des rapports du SCHL (1974) : (a) Vue 3D ; (b) Plan du prototype 1

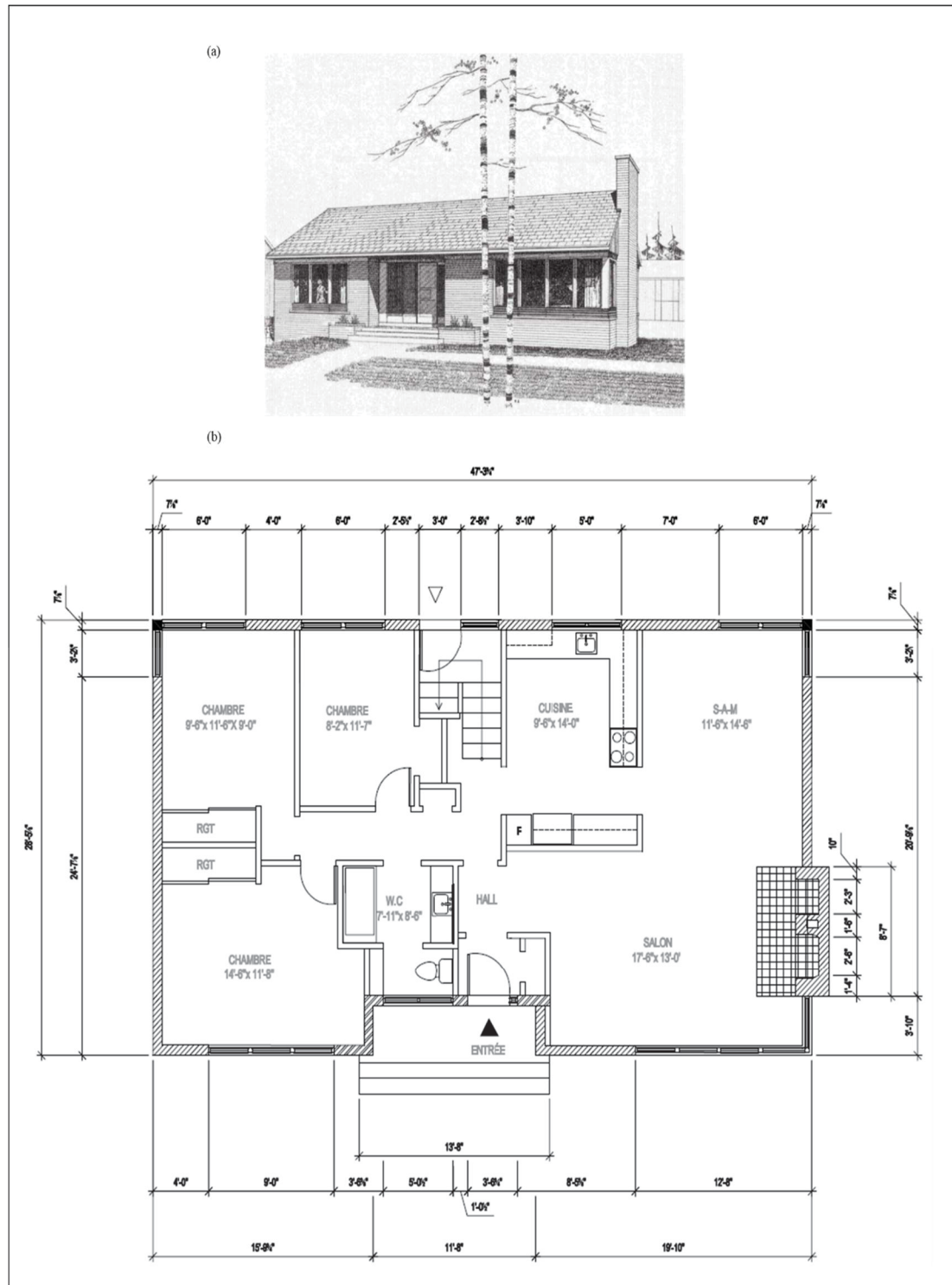


Figure A I.2 Illustration d'un exemple de maison avec un étage développé à partir des rapports du SCHL (1974) : (a) Vue 3D ; (b) Plan du prototype 2

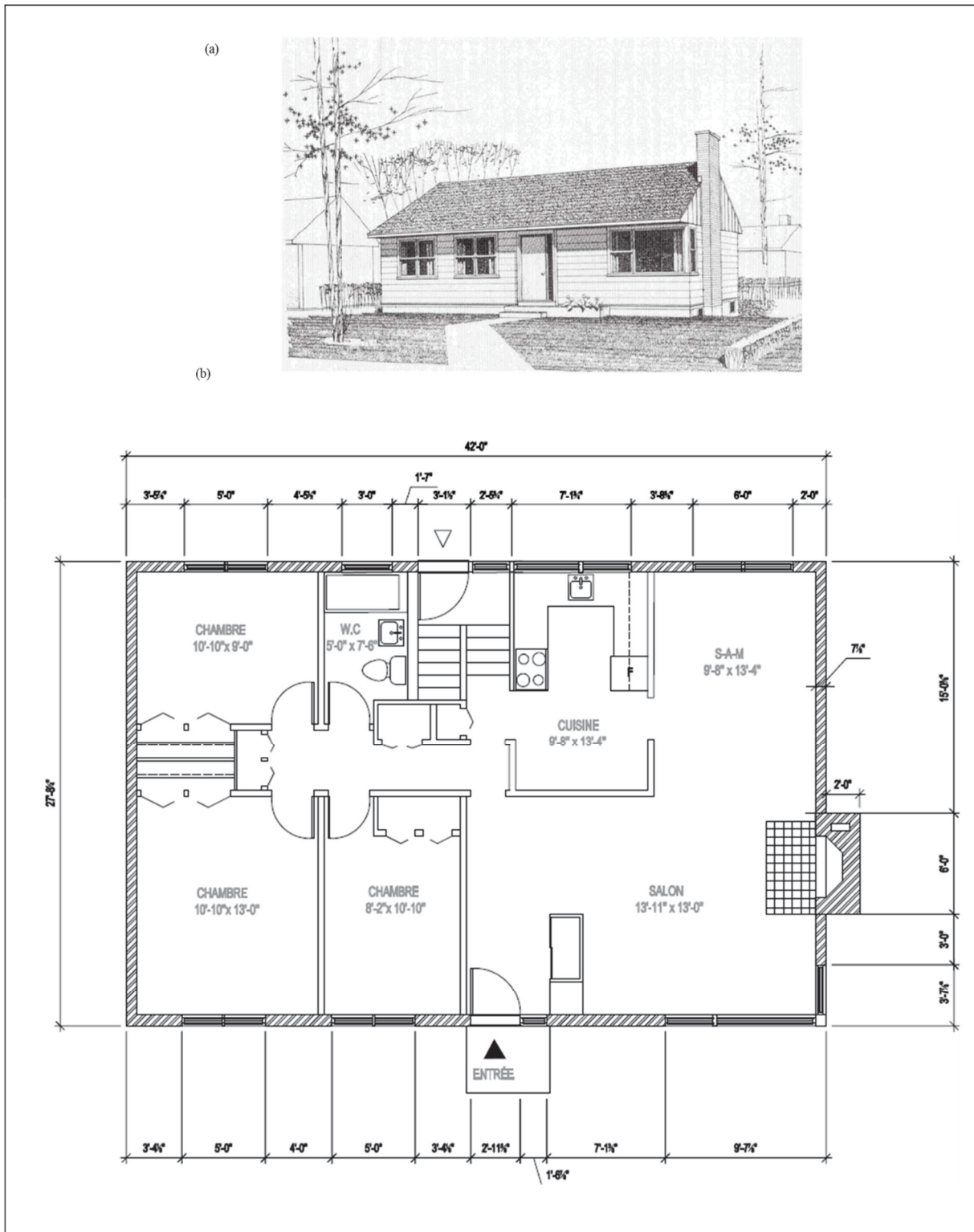


Figure A I. 3 Illustration d'un exemple de maison avec un étage développé à partir des rapports du SCHL (1974) : (a) Vue 3D ; (b) Plan du prototype



## **ANNEXE II**

### **PLANS DES MAISONS PROTOTYPES À DEUX ÉTAGES**

Cette annexe présente les plans des maisons des prototypes développés et utilisés pour créer les courbes de capacité moyenne des maisons à deux étages. Ces plans ont été collectés à partir des rapports de la SCHL (1974) et générés dans AutoCAD dans le cadre du projet du (Guerrier, 2024) pour l'évaluation de la résistance sismique des bâtiments résidentiels à ossature en bois.

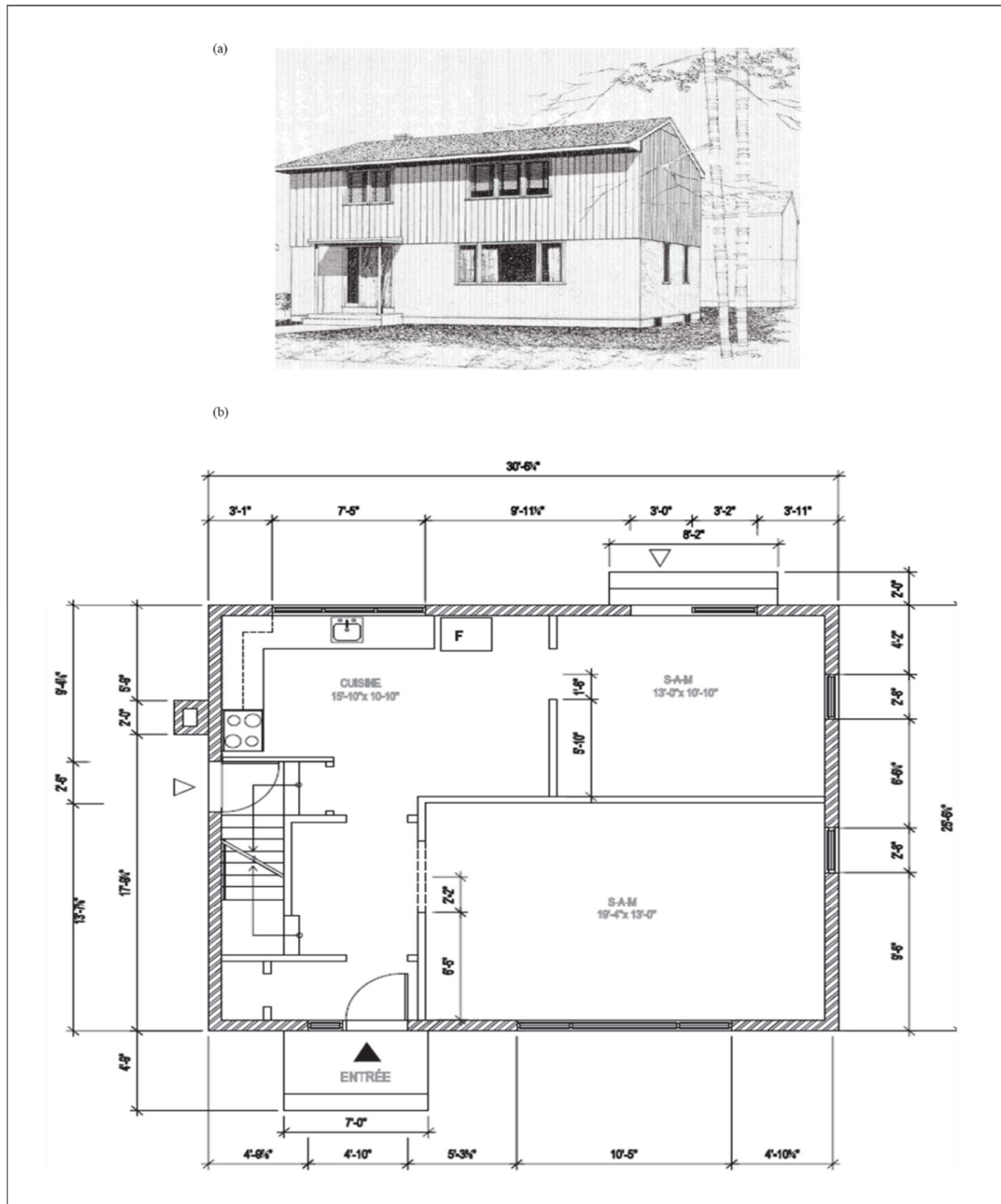
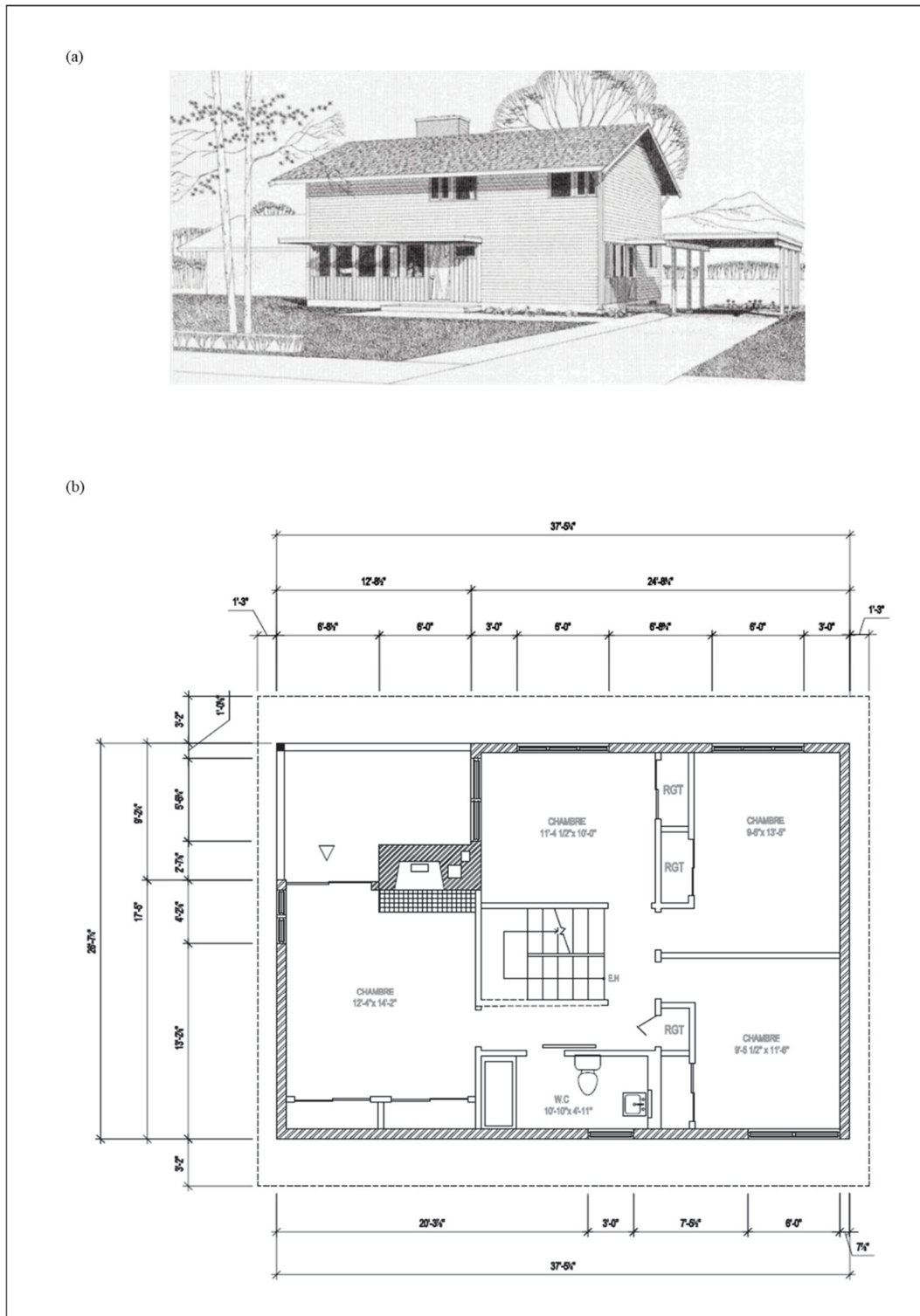


Figure A II.1 Illustration d'un exemple de maison avec deux étages développé à partir des rapports du SCHL (1974) : (a) Vue 3D ;  
(b) plan du prototype 1





### **ANNEXE III**

#### **EXEMPLE D'APPLICATION DE LA MÉTHODE FEMA P807 (FEMA, 2012) À UNE MAISON D'UN ÉTAGE**

Cette annexe présente un exemple de développement de la courbe de poussée pour un prototype de maison d'un étage, en utilisant la méthodologie de la FEMA P-807 (FEMA, 2012). La première étape consiste à identifier la composition des murs et à vérifier les capacités latérales de chaque matériau de revêtement, telles que fournies dans la FEMA P-807. Ensuite, il faut déterminer la longueur de chaque mur, en tenant compte des ouvertures (portes, fenêtres). La longueur effective des murs est alors calculée selon la méthode définie dans cette même norme. Deux combinaisons doivent être envisagées pour les murs extérieurs, car la composition des murs comprend des panneaux en bois contreplaqué : l'une utilisant 50 % de la résistance des panneaux en bois et 100 % de celle de gypse et l'autre utilisant 100 % de la résistance des panneaux en bois et 50 % de celle de gypse.

La courbe charge-déplacement finale retenue pour l'ensemble du mur est celle dont la résistance maximale est la plus élevée. Dans ce cas, c'est la combinaison avec 100 % de contreplaqué et 50 % de gypse qui conduit à la valeur maximale. Les deux directions (X et Y) sont étudiées. Dans le cas de ce prototype, la direction Y étant la plus défavorable, c'est elle qui a été considérée. La figure A III.1 présente un exemple de ce calcul pour le prototype 1, ce calcul a été adapté de (Guerrier, 2024), puis ajusté et vérifié pour les conditions du prototype.

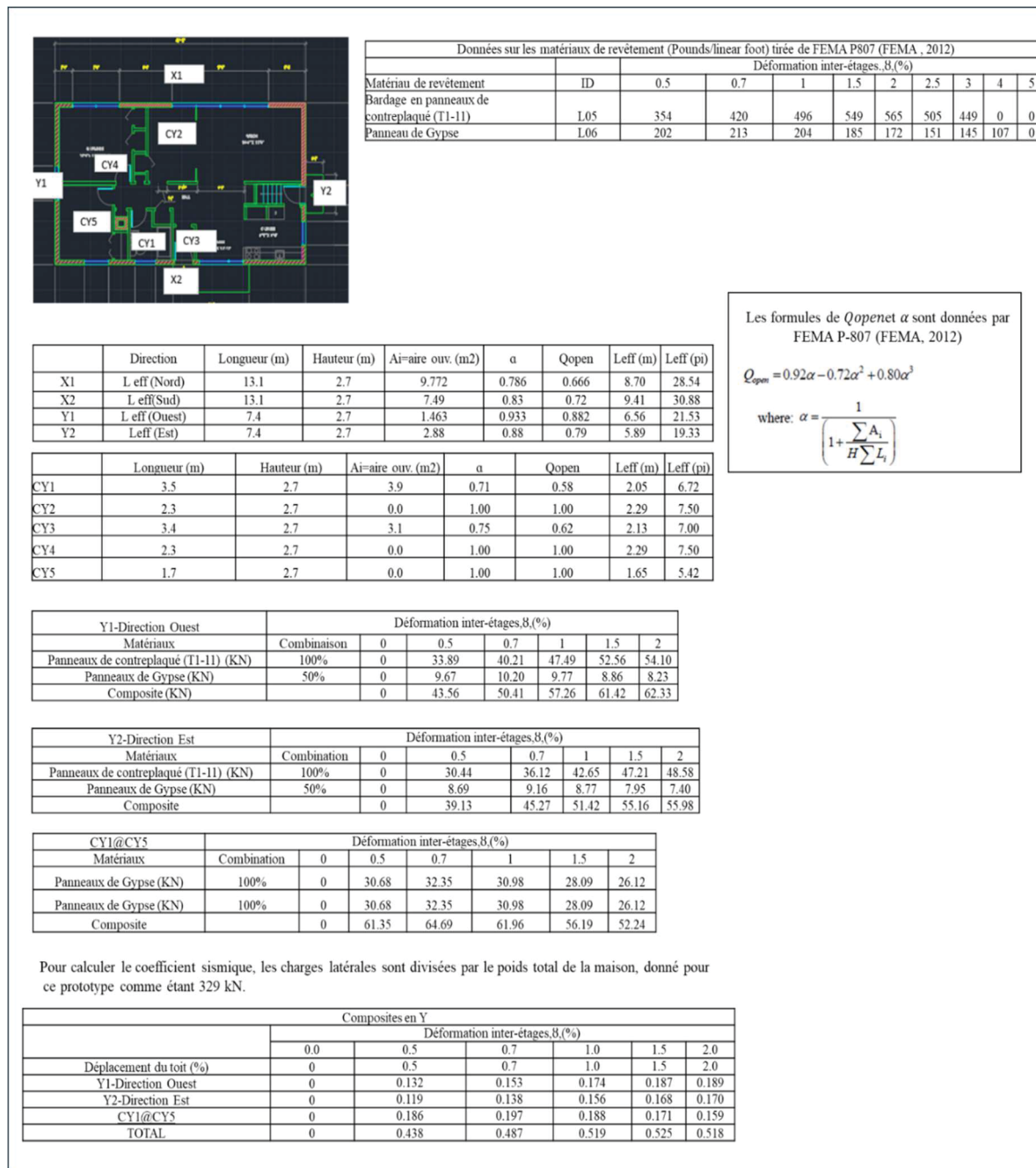


Figure A III.1 Exemple d'application de la méthode FEMA P-807 à une maison d'un étage

## ANNEXE IV

### COURBES DE POUSSÉE POUR LES SIX PROTOTYPES

Cette annexe présente les différentes courbes de poussée développées pour les six prototypes distincts tirée de Guerrier (2024).

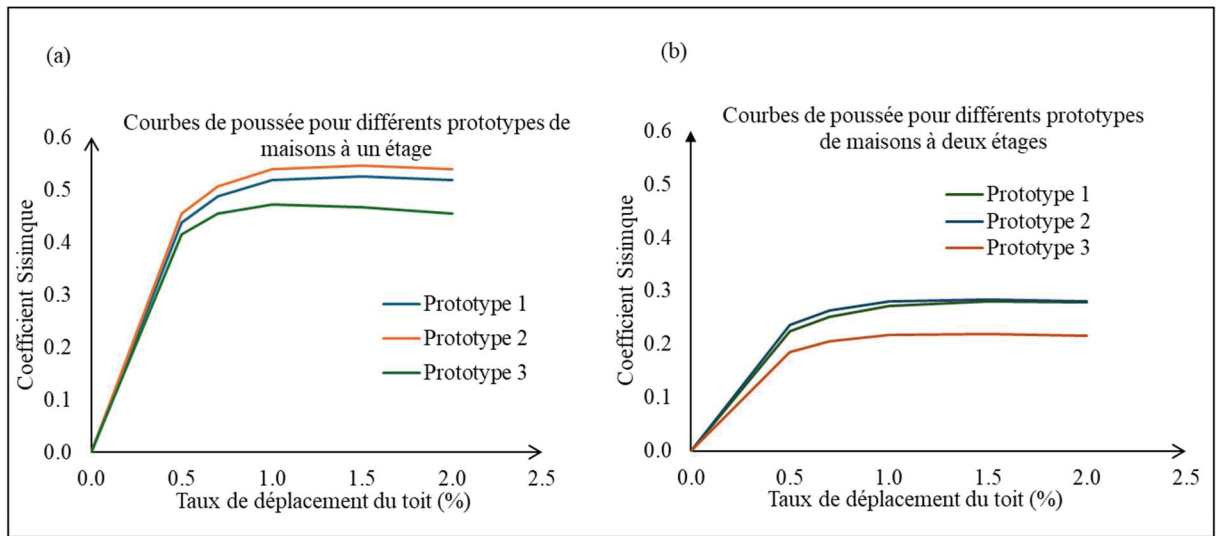


Figure A IV.1 Courbes de poussées pour les différents prototypes de maison :  
(a) à un étage ; (b) à deux étages tirés de (Guerrier, 2024)





## ANNEXE V

### DÉVELOPPEMENT DE LA COURBE DE CAPACITÉ DE LA CLASSE W1 STANDARD DE HAZUS

Cette annexe présente l'élaboration de la courbe de capacité pour la classe standard W1 du modèle Hazus. La classe W1 comprend des maisons légères à ossature en bois d'un ou deux étages. Pour élaborer la courbe de capacité pour la classe W1 de Hazus, les lignes directrices énoncées dans le document FEMA P-155 (FEMA, 2015), qui sont conformes à la méthodologie Hazus, sont suivies. Conformément à ces lignes directrices, la courbe de capacité latérale des bâtiments peut être développée en utilisant le point de limite d'élasticité ( $D_y$ ,  $A_y$ ) et le point ultime ( $D_u$ ,  $A_u$ ), avec une transition elliptique entre ces deux points. L'équation suivante représente la forme elliptique de la courbe entre les phases élastique et plastique.

$$\frac{(D - Du)^2}{a^2} + \frac{(A - k)^2}{b^2} = 1 \quad (AV.1)$$

La figure A V-1 est un exemple de courbe de capacité d'un bâtiment développé selon le document FEMA P-155, dans laquelle les valeurs elliptiques  $a$ ,  $b$ ,  $k$ ,  $\lambda$ ,  $\mu$  sont données par les équations suivantes, telles que définies dans le FEMA P-155 (FEMA, 2015).

$$= \sqrt{\frac{Dy * b^2 * (Du - Dy)}{Ay * (Ay - k)}} \quad (AV.2)$$

$$b = Au - k \quad (AV.3)$$

$$k=\frac{Au^2-Ay^2+\frac{Ay^2}{Dy}(Dy-Du)}{2(Au-Ay)+\frac{Ay}{Dy}(Dy-Du)}$$

(AV.4)

$\lambda$  est le facteur de surrésistance reliant la résistance ultime à la résistance au seuil d'élasticité.  
 $\mu$  est la ductilité.

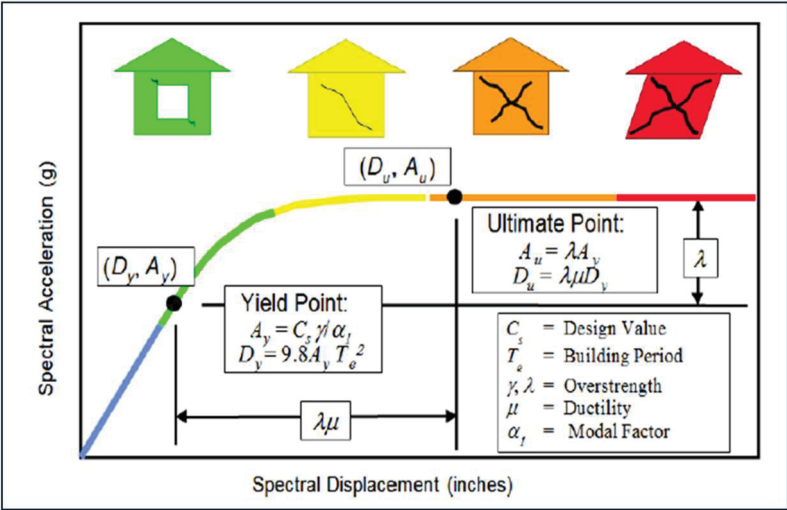


Figure A V.1 Courbe de capacite selon la méthodologie  
FEMA P-155 et Hazus

Les valeurs de  $D_u$ ,  $D_y$ ,  $A_u$ ,  $A_y$ ,  $\lambda$  et  $\mu$  sont toutes fournies pour la classe de bâtiment W1 dans le manuel technique de Hazus. Les valeurs issues de Hazus sont présentées dans le tableau A V.1.

Tableau A V.1 Paramètres structurels pour la classe de maison  
W1 du manuel technique Hazus

Type de bâtiment	Point de capacité à la limite d'élasticité		Point de capacité ultime		$\lambda$	$\mu$
	$D_y(\text{po})$	$A_y(\text{g})$	$D_u(\text{po})$	$A_u(\text{g})$		
W1	0.24	0.2	4.316	0.6	3	6

La figure AV.2 présente les courbes de capacité de la classe W1 du modèle Hazus, élaborées selon les lignes directrices et les équations du document FEMA P-155.

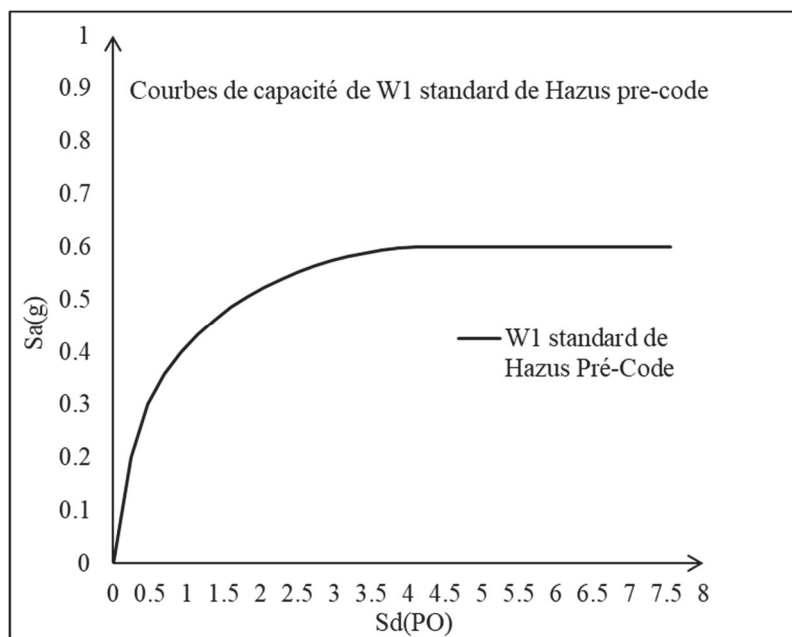


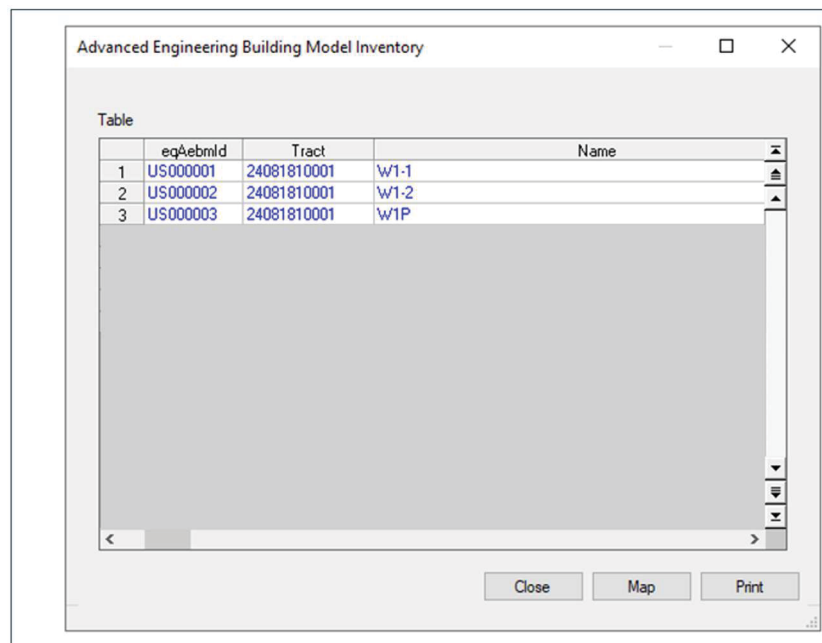
Figure A V. 2 Courbe de capacité de W1 standard de Hazus pré-code



## ANNEXE VI

### GUIDE D'UTILISATION DU LOGICIEL AEBM

Cette annexe présente un guide étape par étape sur l'utilisation du logiciel AEBM pour calculer le taux de perte total LR. La figure A VI.1 présente l'inventaire AEBM, où les types de maisons sont définis. Les maisons présentées dans la figure A VI.1 sont désignées par W1-1 pour les maisons à un étage, W1-2 pour les maisons à deux étages et W1P pour la norme Hazus W1. La figure A VI.2 montre les profils AEBM, où les caractéristiques spécifiques de chaque type de maison sont détaillées, telles que les caractéristiques de capacité et de fragilité.



The screenshot shows a software window titled "Advanced Engineering Building Model Inventory". Inside, there is a table with the following data:

	eqAebmId	Tract	Name
1	US000001	24081810001	W1-1
2	US000002	24081810001	W1-2
3	US000003	24081810001	W1P

Below the table, there are three buttons: "Close", "Map", and "Print".

Figure A VI.1 Inventaire AEBM et types de maisons

AEBM Profiles

Select the profile set to view/edit: Building characteristics

Table:

	Profile Name	Building Type	Design Level	Spectral Disp.@Yield	Spectral Acc.@Yield
21389	W1-1	W1	PC	0.400000005960464	0.590000
21390	W1-2	W1	PC	0.400000005960464	0.290000
21391	W1P	W1	PC	0.239999994635582	0.200000

Close

Print...

Figure A VI.2 Profils AEBM et caractéristiques des maisons

Le tableau A VI.1 présente les paramètres spécifiques saisis dans le logiciel AEBM pour analyser l’estimation des pertes pour les maisons à un étage et à deux étages.

Tableau A VI.1 Paramètres utilisés dans le logiciel AEBM pour l'analyse de l'estimation des pertes des maisons à un étage et à deux étages

Paramètres	Type de maison	
	Un étage	Deux étages
Niveau de conception	Pré-code	Pré-code
$S_{d_y}$ (po)	0,4	0,4
$S_{a_y}$ (g)	0,59	0,29
$S_{d_u}$ (po)	1,2	1,2
$S_{a_u}$ (g)	0,69	0,35
Facteur de dégradation : séisme de courte durée	0,5	0,5
Facteur de dégradation : séisme de durée modérée	0,3	0,3
Facteur de dégradation : séisme de longue durée	0,1	0,1
Amortissement élastique (%)	10	10

En plus de ces paramètres, les paramètres de fragilité développés dans la section 2.6 de ce rapport ont été intégrés aux paramètres AEBM pour chaque type de maison. De plus, le facteur de dégradation ( $k$ ) a été pris en compte conformément aux recommandations du tableau 5-33 du manuel technique de Hazus (Hazus 5.1, 2022).





## **ANNEXE VII**

### **EXEMPLE D'ANALYSE DE RÉGRESSION**

Cette annexe présente les analyses de régression du ratio de pertes (LR %) en fonction de différentes caractéristiques sismiques : PGA,  $S_a(0,3\text{ s})$  et  $S_a(1\text{ s})$ . Le Tableau A VII.1 illustre les 35 scénarios pris en compte pour développer la régression simple pour la maison à un étage, en utilisant des scénarios avec des magnitudes variant entre 6, 6,5 et 7, avec différentes conditions de site et distances épacentrales. Pour élaborer la régression simple de la maison à un étage, les scénarios sont limités aux cas générant des valeurs de PGA inférieures ou égales à 0,5 g afin de représenter des conditions sismiques modérées.

Tableau A VII.1 Les scénarios considérés pour développer  
la régression simple de la maison à un étage

Scénario	Type de sol	PGA(g)	Sa(0.3s)	Sa(1s)	LR (%)
CEUSM6.5E15	B	0.49	0.72	0.34	8.77%
CEUSM6E15	D	0.47	0.75	0.58	9.04%
CEUSM6E15	C	0.46	0.70	0.40	8.40%
CEUSM6.5E15	A	0.44	0.64	0.34	7.34%
CEUSM6.5E20	D	0.43	0.75	0.64	8.82%
CEUSM7E20	B	0.43	0.70	0.37	8.14%
CEUSM6.5E20	C	0.41	0.70	0.46	8.10%
CEUSM7E20	A	0.38	0.62	0.37	6.81%
CEUSM7E30	D	0.37	0.71	0.65	8.35%
CEUSM6.5E25	D	0.34	0.63	0.53	6.65%
CEUSM6E20	D	0.32	0.56	0.43	5.63%
CEUSM6.5E20	B	0.31	0.50	0.25	4.75%
CEUSM7E25	A	0.29	0.50	0.30	4.67%
CEUSM6.5E30	D	0.28	0.53	0.45	5.06%
CEUSM6E20	C	0.28	0.48	0.28	4.48%
CEUSM6.5E20	A	0.27	0.44	0.25	3.90%
CEUSM7E30	B	0.26	0.46	0.25	4.00%
CEUSM6.5E30	C	0.24	0.46	0.30	3.91%
CEUSM7E30	A	0.23	0.40	0.25	3.27%
CEUSM6E20	B	0.21	0.34	0.15	2.42%
CEUSM6E25	C	0.21	0.38	0.22	2.89%
CEUSM6E30	D	0.20	0.37	0.28	2.80%
CEUSM6.5E25	A	0.20	0.35	0.19	2.50%
CEUSM6.5E40	C	0.19	0.35	0.23	2.5%
CEUSM6E20	A	0.19	0.30	0.15	1.96%
CEUSM6.5E30	B	0.18	0.32	0.16	2.10%
CEUSM6E30	C	0.17	0.30	0.18	1.93%
CEUSM6.5E30	A	0.16	0.28	0.16	1.68%
CEUSM7E50	B	0.15	0.28	0.16	1.64%
CEUSM6.5E35	B	0.14	0.27	0.14	1.50%
CEUSM6.5E35	A	0.13	0.24	0.14	1.19%
CEUSM6E40	C	0.13	0.23	0.13	1.12%
CEUSM6.5E40	A	0.12	0.22	0.12	1.01%
CEUSM6E30	B	0.12	0.21	0.10	0.95%
CEUSM6E30	A	0.11	0.19	0.10	0.75%

Le tableau A VII.2 illustre un exemple de calcul effectué pour une analyse de régression simple pour des scénarios représentant des valeurs sismiques modérées. La forme logarithmique est utilisée, ce qui peut être utile pour saisir les tendances non linéaires dans les données. La formule de l'équation (A VII.1) est utilisée pour définir les limites supérieures et inférieures des pertes possibles à une intensité sismique donnée.

$$y^h \pm t_{(1-\alpha/2, n-2)} * \sqrt{MSE \times \left(1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{\sum(x_h - \bar{x})^2}\right)} \quad (\text{AVII.1})$$

Où:

- $y^h$  est la valeur prédite de la réponse lorsque le prédicteur est  $x_h$  (intensité sismique).
- $t_{(1-\alpha/2, n-2)}$  est le multiplicateur  $t$  qui tient compte de la variabilité des prédictions due à l'utilisation d'un échantillon de taille finie.
- $\sqrt{MSE \times \left(1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{\sum(x_h - \bar{x})^2}\right)}$  est l'erreur standard de la prédiction et tient compte de l'erreur moyenne dans les prédictions.

Dans le tableau A VII-2,  $t_{(1-\alpha/2, n-2)} * \sqrt{MSE \times \left(1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{\sum(x_h - \bar{x})^2}\right)}$  est présenté par marge d'erreur.

La valeur prédite  $y^h$  est donnée par l'équation (A VII-2) (A VII-2)

$$\ln(LR) = a + b \ln(IM) \quad (\text{AVII.2})$$

Où  $a$  et  $b$  sont les coefficients de régression.

Tableau A VII.2 Exemple d'analyse de régression logarithmique pour les taux de perte LR en fonction de PGA pour une maison à un étage

PGA(g)	LR (%)	ln PGA	ln(LR)	Marge d'erreur	Valeur prédite de ln (LR)	Ln limite inférieure	Ln limite supérieure
0.49	8.77%	-0.71	-2.43	0.23	-2.24	-2.47	-2.01
0.47	9.04%	-0.76	-2.40	0.23	-2.31	-2.54	-2.08
0.46	8.40%	-0.78	-2.48	0.23	-2.34	-2.58	-2.11
0.44	7.34%	-0.82	-2.61	0.23	-2.42	-2.65	-2.19
0.43	8.82%	-0.84	-2.43	0.23	-2.45	-2.68	-2.23
0.43	8.14%	-0.84	-2.51	0.23	-2.45	-2.68	-2.23
0.41	8.10%	-0.89	-2.51	0.23	-2.53	-2.76	-2.30
0.38	6.81%	-0.97	-2.69	0.23	-2.66	-2.88	-2.43
0.37	8.35%	-0.99	-2.48	0.23	-2.70	-2.93	-2.47
0.34	6.65%	-1.08	-2.71	0.23	-2.84	-3.06	-2.61
0.32	5.63%	-1.14	-2.88	0.23	-2.94	-3.16	-2.71
0.31	4.75%	-1.17	-3.05	0.23	-2.99	-3.21	-2.76
0.29	4.67%	-1.24	-3.06	0.22	-3.10	-3.32	-2.87
0.28	5.06%	-1.27	-2.98	0.22	-3.16	-3.38	-2.93
0.28	4.48%	-1.27	-3.11	0.22	-3.16	-3.38	-2.93
0.27	3.90%	-1.31	-3.24	0.22	-3.22	-3.44	-2.99
0.26	4.00%	-1.35	-3.22	0.22	-3.28	-3.50	-3.05
0.24	3.91%	-1.43	-3.24	0.22	-3.41	-3.63	-3.18
0.23	3.27%	-1.47	-3.42	0.22	-3.48	-3.70	-3.25
0.21	2.42%	-1.56	-3.72	0.22	-3.63	-3.85	-3.40
0.21	2.89%	-1.56	-3.54	0.22	-3.63	-3.85	-3.40
0.20	2.80%	-1.61	-3.58	0.22	-3.71	-3.93	-3.48
0.20	2.50%	-1.61	-3.69	0.22	-3.71	-3.93	-3.48
0.19	2.5%	-1.66	-3.68	0.23	-3.79	-4.01	-3.56
0.19	1.96%	-1.66	-3.93	0.23	-3.79	-4.01	-3.56
0.18	2.10%	-1.71	-3.86	0.23	-3.88	-4.10	-3.65
0.17	1.93%	-1.77	-3.95	0.23	-3.97	-4.20	-3.75
0.16	1.68%	-1.83	-4.09	0.23	-4.07	-4.30	-3.84
0.15	1.64%	-1.90	-4.11	0.23	-4.18	-4.40	-3.95
0.14	1.50%	-1.97	-4.20	0.23	-4.29	-4.52	-4.06
0.13	1.19%	-2.04	-4.43	0.23	-4.41	-4.64	-4.18
0.13	1.12%	-2.04	-4.49	0.23	-4.41	-4.64	-4.18
0.12	1.01%	-2.12	-4.60	0.23	-4.54	-4.77	-4.31
0.12	0.95%	-2.12	-4.66	0.23	-4.54	-4.77	-4.31
0.11	0.75%	-2.21	-4.89	0.23	-4.68	-4.92	-4.45

Tableau A VII.3 Exemple d'analyse de régression exponentielle pour LR (%)  
en fonction de PGA pour une maison à un étage,  
obtenu à partir de la forme logarithmique

PGA(g)	LR(%)	Valeur prédite (LR%)	Limite inférieure	Limite supérieure
0.49	8.77%	10.63%	8.43%	13.41%
0.47	9.04%	9.93%	7.88%	12.52%
0.46	8.40%	9.59%	7.61%	12.08%
0.44	7.34%	8.92%	7.09%	11.22%
0.43	8.82%	8.59%	6.83%	10.80%
0.43	8.14%	8.59%	6.83%	10.80%
0.41	8.10%	7.95%	6.32%	9.99%
0.38	6.81%	7.02%	5.59%	8.81%
0.37	8.35%	6.72%	5.35%	8.43%
0.34	6.65%	5.85%	4.67%	7.34%
0.32	5.63%	5.30%	4.23%	6.64%
0.31	4.75%	5.03%	4.02%	6.30%
0.29	4.67%	4.51%	3.60%	5.65%
0.28	5.06%	4.26%	3.40%	5.33%
0.28	4.48%	4.26%	3.40%	5.33%
0.27	3.90%	4.01%	3.21%	5.02%
0.26	4.00%	3.77%	3.02%	4.72%
0.24	3.91%	3.31%	2.65%	4.14%
0.23	3.27%	3.09%	2.47%	3.87%
0.21	2.42%	2.66%	2.13%	3.33%
0.21	2.89%	2.66%	2.13%	3.33%
0.20	2.80%	2.46%	1.96%	3.08%
0.20	2.50%	2.46%	1.96%	3.08%
0.19	2.5%	2.26%	1.80%	2.83%
0.19	1.96%	2.26%	1.80%	2.83%
0.18	2.10%	2.07%	1.65%	2.59%
0.17	1.93%	1.88%	1.50%	2.36%
0.16	1.68%	1.71%	1.36%	2.14%
0.15	1.64%	1.54%	1.22%	1.93%
0.14	1.50%	1.37%	1.09%	1.73%
0.13	1.19%	1.22%	0.97%	1.53%
0.13	1.12%	1.22%	0.97%	1.53%
0.12	1.01%	1.07%	0.85%	1.34%
0.12	0.95%	1.07%	0.85%	1.34%
0.11	0.75%	0.93%	0.73%	1.17%



## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abo El Ezz, A. (2013). *Probabilistic seismic vulnerability and risk assessment of stone masonry structures* (Thèse de doctorat, École de technologie supérieure, Montréal, QC). Repéré à [http://espace.etsmtl.ca/1168/1/ABO\\_EL\\_EZZ\\_Ahmad.pdf](http://espace.etsmtl.ca/1168/1/ABO_EL_EZZ_Ahmad.pdf)
- Abo El Ezz, A., Smirnoff, A., Nastev, M., Nollet, M.-J., & McGrath, H. (2019). ER2-Earthquake: Interactive web-application for urban seismic risk assessment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 34, 326–336. doi: 10.1016/j.ijdrr.2018.12.022  
Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212420918312275>
- Adams, J., Allen, T., Halchuk, S., & Kolaj, M. (2020). *Canada's 6th Generation Seismic Hazard Model, as prepared for the 2020 National Building Code of Canada*. Natural Resources Canada.
- Adams, J., Halchuk, S., Weichert, D., & Basham, P. (2002). *Case studies of seismic hazard assessment issues in Canada using the 4th generation seismic hazard maps*. Geological Survey of Canada. Repéré à [https://www.earthquakescanada.nrcan.gc.ca/hazard-alea/2002/7USNCEE2002\\_Adams\\_etal.pdf](https://www.earthquakescanada.nrcan.gc.ca/hazard-alea/2002/7USNCEE2002_Adams_etal.pdf)
- Applied Technology Council. (1996). *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings* (Rep. No. ATC-40). Redwood City, CA : Applied Technology Council. *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings (ATC-40)*.
- ASCE. (2006b). *Seismic rehabilitation of existing buildings (ASCE/SEI 41-06)*. Reston, VA : American Society of Civil Engineers.
- Atkinson, G. M., & Adams, J. (2013). Ground motion prediction equations for application to the 2015 Canadian national seismic hazard maps. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(10), 988-998. doi: 10.1139/cjce-2012-0544. Repéré à <https://cdnsiencepub.com/doi/abs/10.1139/cjce-2012-0544>
- Buchanan, A. H., Dhakal, R. P., MacRae, G. A., & Palermo, A. (2011). *Performance of houses during the Christchurch earthquake of 22 February 2011*. Repéré à [https://www.researchgate.net/publication/264846579\\_Performance\\_of\\_houses\\_during\\_the\\_Christchurch](https://www.researchgate.net/publication/264846579_Performance_of_houses_during_the_Christchurch)
- Chouinard, R., & Rosset, P. (2007, juin). Seismic site effects and seismic risk in the Montreal area: The influence of marine clays. Proceedings of *the Ninth Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Ottawa, ON, Canada (p. 512-521). Repéré à <https://www.researchgate.net/publication/237790690>

- Federal Emergency Management Agency. (1992). *NEHRP handbook for the seismic evaluation of existing buildings (FEMA 178)*. Washington, DC: Building Seismic Safety Council.
- Federal Emergency Management Agency. (2002). *FEMA P-154: Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards (FEMA Publication No. P-154)*. U.S. Department of Homeland Security.
- Federal Emergency Management Agency. (2012). *FEMA P-807: Seismic evaluation and retrofit of multi-unit wood-frame buildings with weak first stories*. U.S. Department of Homeland Security. Repéré à <https://www.fema.gov/media-library/assets/documents/32691>
- Federal Emergency Management Agency. (2015). *FEMA P-155: Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: Supporting documentation* (3rd ed.). U.S. Department of Homeland Security. Repéré à <https://www.fema.gov>
- Federal Emergency Management Agency. (2020). *Short-Period Building Collapse Performance and Recommendations for Improving Seismic Design, Volume 2 – Study of One-to-Four Story Wood Light-Frame Buildings (FEMA P-2139-2)*. Applied Technology Council.
- Federal Emergency Management Agency. (2023). *HAZUS 6.1: Risk assessment software for natural hazards*. U.S. Department of Homeland Security. Repéré à <https://www.fema.gov/about>
- Fischer, D., Filiatrault, A., Folz, B., Uang, C.-M., & Seible, F. (2001). *Shake table tests of a two-story wood-frame house* (CUREE Publication No. W-06). Department of Structural Engineering, University of California, San Diego.
- Filiatrault, A. (1996). *Éléments de génie parasismique et de calcul dynamique des structures*. Montréal, QC : Presses inter Polytechnique.
- Guerrier, M. (2024). *Évaluation de la résistance sismique des bâtiments résidentiels à ossature en bois* (Rapport de projet de maîtrise 15 crédits, École de technologie supérieure, Montréal, QC).
- Heresi, P., & Miranda, E. (2020, October). Fragility curves for chimney damage and wall damage in wood-frame dwellings. *Proceedings of 17th World Conference on Earthquake Engineering*, Sendai, Japon.



- Heresi, P., & Miranda, E. (2022). Evaluation of relative seismic performance between one- and two-story houses. *Journal of Earthquake Engineering*, 26(2), 857-886. doi: [10.1080/13632469.2019.1693447](https://doi.org/10.1080/13632469.2019.1693447)
- ICC. (2009b). *International Existing Building Code*. International Code Council, Washington, DC.
- IBC. (2003). *International Building Code*. International Code Council, Falls Church, VA.
- Kircher, C. A., Whitman, R. V., & Holmes, W. T. (2006). HAZUS earthquake loss estimation methods. *Natural Hazards Review*, 7(2), 45-59.
- McClure, F. E. (1973). Performance of single-family dwellings in the San Fernando earthquake of February 9, 1971. NOAA, U.S. *Dept. of Commerce*, May.
- Mitchell, D., Paultre, P., Tinawi, R., & Saatcioglu, M. (2010). Evolution of seismic design provisions in the National building code of Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37(9), 1157-1170. doi: 10.1139/L10-054. Repéré à <https://www.researchgate.net/publication/233654410>
- Mitchell, D., Tinawi, R., & Law, T. (1990). Damage caused by the November 25, 1988, Saguenay earthquake. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 17(3), 338-365.
- Nastev, M., Duchesne, M. J., & Ghofrani, H. (2016). Regional VS30 model for the St. Lawrence Lowlands, Eastern Canada. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 10(3), 1-13. Repéré à <https://doi.org/10.1080/17499518.2016.1149869>
- NBCC. (1995). *National Building Code of Canada*. National Research Council of Canada, Ottawa, ON.
- National Research Council of Canada. (2020). *National Building Code of Canada (NBCC): Seismic hazard tool*. Repéré à <https://www.earthquakescanada.nrcan.gc.ca/hazard-alea/interpolat/nbc2020-cnb2020-en.php>
- Natural Resources Canada. (2025). *Earthquakes Canada*. Repéré à <https://earthquakescanada.nrcan.gc.ca>
- NEHRP. (2022). *National Earthquake Hazards Reduction Program*. Federal Emergency Management Agency.
- NRC. (2019). *Carte simplifiée de l'aléa sismique du Canada, les provinces et les territoires*. Repéré à <https://www.seismescanada.nrcan.gc.ca/zones/eastcan-fr.php>

- Paultre, P., Lefebvre, G., Devic, J.-P., & Côté, G. (1993). Statistical analyses of damages to buildings in the 1988 Saguenay earthquake. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 20(6), 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.
- Porter, K. A. (2002). Seismic vulnerability. Dans W. F. Chen & C. R. Scawthorn (Eds.), *Handbook of earthquake engineering* (chap. 21). CRC Press, Boca Raton, FL.
- Rainer, J. H., & Karacabeyli, E. (2000). Performance of wood-frame construction in earthquakes. *Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand.
- Rainer, J. H., Lepper, P., & Karacabeyli, E. (2004, août). Seismic performance of conventional wood-frame buildings. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, BC, Canada.
- Rossetto, T., & Elnashai, A. (2005). A new analytical procedure for the derivation of displacement-based vulnerability curves for populations of RC structures. *Engineering Structures*, 27(3), 397-409.
- Société centrale d'hypothèques et de logement (SCHL). (1974). *House designs / prepared by Canadian architects for Central Mortgage and Housing Corporation = Modèles de maisons / préparés par des architectes canadiens pour la Société centrale d'hypothèques et de logement*.
- White, T. W., & Ventura, C. E. (2007, Juin). Seismic behaviour of residential wood-frame construction in British Columbia: Part II – Performance requirements. *Proceedings of the 9th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Ottawa, ON, Canada.
- Wen, Y. K., Ellingwood, B. R., & Bracci, J. (2004). *Vulnerability function framework for consequence-based engineering*. (Project DS-4 Report). Mid-America Earthquake Center, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL.