TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 ÉVOLUTION DU CADRE LÉGAL ET REVUE DE LA PERFORMANCE DES HOPITAUX LORS DE SÉISMES PASSÉS.....13
1.1 Évolution des mesures parasismiques.....13
1.2 Période 1971-1994 : dommages enregistrés et évolution des normes parasismiques spécifiques aux hôpitaux en Californie.....14
1.2.1 La loi de 1972 *« The Hospital Safety Act of 1972 – Senate Bill 519 »*..... 16
1.2.2 *The Milestone 4 Report*, (Building Safety Board, 1990) 18
1.2.3 *The Senate Bill 1953* 19
1.3 Période post 1994 : conception basée sur la performance 21
1.3.1 Approche SEAOC 1995..... 21
1.3.2 Approches NEHRP - FEMA..... 22
1.3.3 Données empiriques et développement de méthodes d'évaluation de la fonctionnalité post-sismique 25
1.4 Dommages enregistrés et évolution des normes parasismiques canadiennes.....28
1.4.1 Dommages enregistrés et vulnérabilité sismique des bâtiments hospitaliers existants au Québec 29
1.4.2 Prescriptions actuelles du Code national du bâtiment (CNB 2010) 31
1.4.3 Considérations sismiques pour les composants non-structuraux, Norme CAN/CSA-S832-14 36
1.5 Synthèse de la revue de littérature – Objectif 1 : établir les objectifs de performance d'un centre hospitalier 37

CHAPITRE 2 GÉNÉRALISATION DES OBSERVATIONS SUR LES DOMMAGES ET PRINCIPES D'ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ SISMIQUE DES BÂTIMENTS EXISTANTS.....41
2.1 Généralisation des dommages et comportement des composants durant un séisme.....41
2.2 Courbes de capacité de la structure.....45
2.3 Courbes de fragilité.....49
2.3.1 Courbes de fragilité – (Abo El Ezz 2013)..... 50
2.3.2 Courbes de fragilité - HAZUS (FEMA 2012) 51
2.3.3 Courbes de fragilité – (Porter et al. 2010)..... 52
2.3.4 Courbes de fragilité basées sur des études expérimentales..... 54
2.3.5 Discussion..... 55
2.4 Méthodes d'évaluation sismique des bâtiments et des composants non-structuraux 55
2.4.1 Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments existants et des composants non-structuraux 56

2.4.2 Détermination de la période naturelle des structures et mesures de vibrations ambiantes 61
2.4.3 Incertitudes dans l'utilisation des mesures de vibrations ambiantes 63
2.5 Synthèse de la revue de littérature – Objectif 2 : identifier les relations entre la vulnérabilité des composants 65

CHAPITRE 3 ANALYSE DES SYSTÈMES CRITIQUES – ÉTAT DES CONNAISSANCES ET SYNTHÈSE CRITIQUE 67
3.1 L'hôpital défini comme un système complexe et interactif.....67
3.2 La méthode d'analyse par arbres de défaillance (AdD).....71
3.3 Application à l'évaluation de la fonctionnalité post-sismique des hôpitaux existants.....73
3.3.1 Évaluation de la fiabilité sismique des installations critiques 73
3.3.2 Amélioration de la durabilité sismique des infrastructures critiques à partir d'analyse de système (Chaudhuri et Shinozuka 2009; 2010)..... 76
3.3.3 Méthodologies en cours de développement (Pinto et al. 2011a; 2011b; Pitilakis et al. 2005)..... 78
3.4 Récapitulatif.....80
3.5 Identification et analyse des interdépendances entre les systèmes critiques 81
3.5.1 Le système de protection incendie..... 82
3.5.2 L'évacuation sécuritaire des occupants 86
3.5.3 Les systèmes CVCA 88
3.5.4 Les systèmes des gaz médicaux..... 90
3.5.5 Les services d'infrastructures essentielles et leur interface avec les bâtiments..... 92
3.6 Synthèse de la revue de littérature – Objectif 3 : identifier et analyser les interdépendances entre les systèmes.....95

CHAPITRE 4 CADRE D'ÉVALUATION DE LA FONCTIONNALITÉ POST-SISMIQUE DES HÔPITAUX DE MONTRÉAL.....97
4.1 Problématique spécifique à Montréal 97
4.1.1 Portrait des infrastructures hospitalières..... 97
4.1.2 Sismicité et effets de sites à Montréal..... 99
4.2 Méthodologie détaillée de la recherche 102
4.3 Étape 1 : Collecte de données des hôpitaux-témoins.....103
4.4 Étape 2 : Modélisation des systèmes reliés aux niveaux de performance des hôpitaux 104
4.5 Étape 3 : Calcul d'un indice de priorité de risque IPR 107
4.5.1 Détermination de l'indice SRI 109
4.5.2 Détermination de la probabilité de dommage P..... 111
4.6 Étape 4 : Calcul d'un indice de fonctionnalité post-sismique (IFP) 114
4.7 Les analyses statistiques et paramétriques.....115

CHAPITRE 5 BASE DE DONNÉES SUR LES BÂTIMENTS TÉMOINS 117
5.1 Hôpital général de Montréal 118
5.1.1 Évaluation générale..... 120

5.1.2 Conceptualisation des systèmes critiques 121
5.2 Hôpital Rivière-des-Prairies.....127
5.2.1 Évaluation générale..... 127
5.2.2 Conceptualisation des systèmes critiques 129
5.3 Mesures de vibrations ambiantes et procédures d'extraction 135
5.3.1 Dispositif expérimental..... 135
5.3.2 Procédures d'extraction et d'analyse 137
5.3.3 Résultats expérimentaux 139
5.4 Évaluation de la vulnérabilité sismique de la structure ou SRI structural 141
5.5 Évaluation du risque sismique des composants fonctionnels et opérationnels ou SRI non-structural.....143
5.6 Conclusion 147

CHAPITRE 6 DÉVELOPPEMENT DE LA MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DE LA FONCTIONNALITÉ POST-SISMIQUE DES HÔPITAUX DE MONTRÉAL 149
6.1 Spectre cible de Montréal 150
6.2 Gamme de valeurs de l'indice SRI 150
6.2.1 SRI structural – Récapitulatifs des résultats 151
6.2.2 SRI non-structural – Récapitulatifs des résultats..... 153
6.2.3 Classement relatif des composants et discussion..... 155
6.3 Développement des valeurs de P 156
6.3.1 Calcul de la demande sismique..... 156
6.3.2 Développement des courbes de fragilité..... 157
6.4 Indice de fonctionnalité post-sismique et critères d'interprétation.....161
6.4.1 Valeurs désagrégées de l'indice IFP 161
6.4.2 Critères d'interprétation de l'IFP 169
6.5 Discussion et conclusion.....172

CHAPITRE 7 VALIDATION ET ÉTUDES DE CAS 177
7.1 Modèles analysés et paramètres du processus de validation 177
7.1.1 Modélisation 178
7.1.2 Sélection et transformation des accélérogrammes représentatifs 179
7.1.3 Modélisation des sites pour les différentes catégories d'emplacement..... 180
7.1.4 Analyse dynamique..... 183
7.1.5 Comparaison des données d'IPR et de probabilité de dommage..... 186
7.2 Études de cas – Application de la méthodologie 189
7.2.1 Propriétés des oscillateurs multiples linéaires 189
7.2.2 Détermination de la demande sismique à partir des extrants des mesures de vibrations ambiantes 191
7.2.3 Études de cas..... 192
7.3 Discussion.....197

CONCLUSION.....199

RECOMMANDATIONS 205

ANNEXE I VALEURS NUMÉRIQUES POUR LE CALCUL DE L'INDICE DE CONFORMITÉ POUR LES BÂTIMENTS CLASSÉS PRÉ-CODE 207

ANNEXE II ÉVOLUTION DES NORMES PARASISMIQUES CANADIENNES 209

ANNEXE III COMPORTEMENT DES HÔPITAUX LORS DE SÉISMES MAJEURS 211

ANNEXE IV DIAGRAMMES DE SYSTÈMES MÉCANIQUES 217

ANNEXE V ARBRES DE DÉFAILLANCE DE SYSTÈMES DE L'HÔPITAL GÉNÉRAL DE MONTRÉAL 219

ANNEXE VI ARBRES DE DÉFAILLANCE DE SYSTÈMES DE L'HÔPITAL RIVIÈRE-DES-PRAIRIES 231

ANNEXE VII SPÉCIFICATIONS DES APPAREILS UTILISÉS POUR LES MESURES DE VIBRATIONS AMBIANTES 237

ANNEXE VIII ÉTAPES D'ANALYSE DES SIGNAUX DE MESURES DE VIBRATIONS AMBIANTES 239

ANNEXE IX EXEMPLE DE CALCULS DES INDICES SRI POUR LES CFO 243

ANNEXE X DÉTAILS DE CALCUL DE LA PROBABILITÉ DE DOMMAGES ...251

ANNEXE XI DÉTAILS DE CALCUL DE L'IFP 257

ANNEXE XII DONNÉES POUR LA TRANSFORMATION DES SIGNAUX 261

ANNEXE XIII DONNÉES ISSUES DES ANALYSES 263

ANNEXE XIV RÉSULTATS DES ANALYSES TEMPORELLES - MDOF 269

ANNEXE XV RÉSULTATS DÉTAILLÉS DES ÉTUDES DE CAS 273

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....283

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 1.1 Comportement des hôpitaux californiens lors des trois séismes considérés 15

Tableau 1.2 Sommaire des résultats de l'inventaire ATC 23 19

Tableau 1.3 Comportement des hôpitaux lors du séisme de Saguenay 1988 29

Tableau 1.4 Priorisation des CFO et des services d'infrastructures essentielles en fonction de la performance attendue 37

Tableau 2.1 Comportement des hôpitaux lors de séismes majeurs (2009-2010) 42

Tableau 2.2 Comparaison des valeurs d'accélération causant le dommage selon les conditions d'attache 45

Tableau 2.3 Sensibilité des paramètres de calcul de l'indice de risque 60

Tableau 3.1 Interdépendances des infrastructures 70

Tableau 3.2 Identification des fonctions et des composants principaux des systèmes CVCA 89

Tableau 4.1 Séismes historiques majeurs ressentis à Montréal 99

Tableau 4.2 Récapitulatif des paramètres d'analyse du risque associé aux composants 103

Tableau 5.1 Spécificités des bâtiments principaux de l'HGM 119

Tableau 5.2 Répartition des CFO inspectés de l'HGM 121

Tableau 5.3 Spécificités des bâtiments de l'HRDP 128

Tableau 5.4 Répartition des CFO inspectés de l'HRDP 129

Tableau 5.5 Détails des mesures de vibrations ambiantes 136

Tableau 5.6 Paramètres modaux des bâtiments 140

Tableau 5.7 SRI des bâtiments témoins 143

Tableau 5.8 CFO à risque élevé et détails du calcul du risque sismique pour l'HGM 145

Tableau 5.9 Variation des paramètres RG et RB entrant dans le calcul de l'indice R pour un aléa de 2% en 50 ans 145

Tableau 6.1 Seuils de risque relatif conformément aux méthodes d'évaluation retenues 151

Tableau 6.2 Récapitulatif des classes de niveaux de risque 155

Tableau 6.3 Résultats de l'analyse spectrale pour les occurrences de 10% et 2% en 50 ans 157

Tableau 6.4 Récapitulatif du calcul de l'IFP pour le système CVCA central 164

Tableau 7.1 Caractéristiques des accélérogrammes 180

Tableau 7.2 Modèles stratigraphiques utilisés pour l'étude 182

Tableau 7.3 Résultats des analyses dynamiques temporelles 185

Tableau 7.4 Comparaison des valeurs de probabilité de dommage.....188

Tableau 7.5 Détermination de la demande sismique pour une occurrence de 2% en 50 ans 192

Tableau 7.6 Synthèse des résultats de l'IFP pour l'Hôpital général de Montréal 195

Tableau 7.7 Synthèse des résultats de l'IFP pour l'Hôpital Rivière-des-Prairies.....196

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 1.1 Relation entre l'indice de risque et la période de mise en conformité 17

Figure 1.2 Classification des 2662 hôpitaux répertoriés selon la vulnérabilité de: a) leur structure (SPC) et b) leur composants non-structuraux 20

Figure 1.3 Principales cibles du Senate Bill 1953 20

Figure 1.4 Objectifs de performance sismique pour les bâtiments 22

Figure 1.5 Matrice de contrôle du dommage et niveau de performance des bâtiments 24

Figure 1.6 Niveaux de performance sismique proposés pour les hôpitaux 26

Figure 1.7 Niveaux de performance atteints lors du séisme de Northridge: a) bâtiment pré-code, b) bâtiments construits après 1970 27

Figure 1.8 Matrice des niveaux de performance attendus des hôpitaux de Montréal 32

Figure 1.9 Calcul du cisaillement à la base VE 33

Figure 2.1 Répartition des coûts d'investissement de bâtiments à usage divers 43

Figure 2.2 Comportement des CFO durant un séisme 44

Figure 2.3 Procédures d'estimation des forces et déformations inélastiques pour une accélération donnée 46

Figure 2.4 Méthode du spectre de capacité 47

Figure 2.5 Critères typiques de performance, niveaux de dommages et comportements correspondants 48

Figure 2.6 Conversion du bâtiment réel en modèle mécanique simplifié pour l'étude des niveaux de dommages 51

Figure 2.7 Probabilité de dommage de deux composants en fonction de l'accélération de plancher : a) batteries sur support, b) échangeur-refroidisseur (CVCA) 53

Figure 2.8 Courbes de fragilité pour des fenêtres de 1.5m*1.5m 54

Rapport-Gratuit.com

Figure 2.9 Comparaison des formules du CNB 2005 avec la période fondamentale obtenue par MVA par analyse de régression 63

Figure 3.1 Composants et sous-systèmes fonctionnels d'un hôpital 68

Figure 3.2 Exemple d'arbre de défaillances.....72

Figure 3.3 Modélisation du système de protection incendie et calcul du pointage.....74

Figure 3.4 Arbre de défaillance du système électrique 77

Figure 3.5 Réponse médicale d'urgence en situation post-séisme.....80

Figure 3.6 Installation des conduits de ventilation.....84

Figure 3.7 Détails d'un système courant de gicleurs à eau.....85

Figure 3.8 Processus d'évacuation horizontale (a) et verticale (b) selon les conditions de propagation de l'incendie 87

Figure 3.9 Schéma d'une centrale d'alimentation en oxygène médical avec concentrateur.....91

Figure 3.10 Intégration des interfaces avec les services d'infrastructures dans le système de sécurité des occupants (a) et de protection incendie (b).....94

Figure 3.11 Cohabitation des systèmes d'ingénierie desservant un hôpital.....95

Figure 4.1 Répartition des centres hospitaliers sur l'île de Montréal et identification des hôpitaux-témoins.....98

Figure 4.2 Cartes de Montréal: a) carte simplifiée des dépôts géologiques et b) amplification relative des ondes sismiques en fonction de la fréquence dominante des sols 101

Figure 4.3 Méthodologie détaillée de la recherche 102

Figure 4.4 Arbre de défaillance pour un niveau de performance « sécurité des occupants » et « occupation immédiate » 105

Figure 4.5 Arbre de défaillance pour un niveau de performance « fonctionnalité » 106

Figure 4.6 Comparaison des processus d'établissement des indices de criticité de l'AMDEC (a) et de l'IPR pour les composants (b) 108

Figure 4.7 Procédures des analyses dynamiques et résultats attendus.....113

Figure 5.1 Plan principal et vue de la façade sur la rue des Pins (ailes A et B) de l'HGM 118

Figure 5.2 Partie du système CVCA des salles mécaniques L4 et C8 de l'HGM.....123

Figure 5.3 Partie du système CVCA – Tour de refroidissement de l'HGM 124

Figure 5.4 Système CVCA à boucle fermée de l'HGM.....124

Figure 5.5 Système de gaz médicaux - salle mécanique Aile C, HGM 125

Figure 5.6 Plan principal et vue de la façade du bâtiment administratif (Aile A) de l'HRDP 127

Figure 5.7 Bâtiment administratif et localisation des équipements d'urgence de l'HRDP 131

Figure 5.8 Arbre de défaillance du système de protection incendie – branche Système détection et alarme de l'HRDP.....133

Figure 5.9 Arbre de défaillance du système de protection incendie – branche Système de réponse de l'HRDP 134

Figure 5.10 Exemple de montage capteurs et radios.....135

Figure 5.11 Densité spectrale de puissance pour l'identification des fréquences naturelles de vibration du bâtiment.....138

Figure 5.12 Processus de validation - graphes de complexité.....139

Figure 5.13 Vue aérienne de l'HGM avec identification du bâtiment C et de ses connexions avec les autres bâtiments et exemple de positionnement des capteurs 141

Figure 5.14 Comparaison de la répartition du risque sismique des CFO selon les éditions de 2005 et 2010 du CNB pour les données d'inspection.....143

Figure 5.15 Double histogramme des valeurs de R calculées selon les éditions CNB 2005 et 2010 pour un système CVCA 144

Figure 5.16 Exemples de CFO élancés et conditions de fixation.....146

Figure 5.17 Composition des systèmes critiques en fonction de la sensibilité des CFO 147

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Figure 6.1 Spectres de réponse de la ville de Montréal en fonction de la catégorie d'emplacement pour une occurrence de : a) 2% en 50 ans et b) 10% en 50 ans 150

Figure 6.2 Répartition des valeurs d'IS pour l'échantillon de structures fictives constitué à l'aide d'un graphique à moustaches 152

Figure 6.3 Valeurs significatives d'IS selon la catégorie d'emplacement 152

Figure 6.4 Répartition des valeurs de R pour l'échantillon de CFO constituée à l'aide d'un graphique à moustaches....153

Figure 6.5 Effet de la variation de la période fondamentale et de la catégorie d'emplacement sur l'indice R pour un système CVCA....154

Figure 6.6 Fragilité des structures de hauteur faible à élevée (S1L, S1M et S1H) 158

Figure 6.7 Fragilité des CFO sensibles au déplacement 159

Figure 6.8 Fragilité des CFO sensibles à l'accélération....160

Figure 6.9 Processus ascendant de calcul de l'IFP d'un sous-système de chauffage pour un niveau de dommage faible 162

Figure 6.10 Processus ascendant de calcul de l'IFP d'un sous-système de conditionnement d'air pour un niveau de dommage faible 163

Figure 6.11 Variations de l'indice IFP pour la structure : IFP=SRI structure*P....166

Figure 6.12 Variations de l'indice IFP pour le système "CVCA central" 167

Figure 6.13 Variations de l'indice IFP pour le système "Maintien des fonctions vitales"....168

Figure 6.14 Variations de l'indice IFP pour le système "Évacuation sécuritaire"....169

Figure 6.15 Matrice d'analyse de risque 170

Figure 6.16 Extraits du chiffrier de calcul relié aux étapes 1 et 2 (pour l'HGM) 174

Figure 6.17 Extraits du chiffrier de calcul reliés aux étapes 3 et 4 175

Figure 7.1 Caractéristiques des modèles de bâtiments analysés 179

Figure 7.2 Spectres correspondant des accélérogrammes en fonction de la catégorie d'emplacement....183

Figure 7.3 Accélération spectrale et déplacement mesurés sur les différents étages Cas du modèle 1 (3 étages) 184

Figure 7.4 Courbes de fragilité de composants non-structuraux de bâtiments d'hôpitaux 186

Figure 7.5 Courbes de fragilité de CFO de système CVCA 187

Figure 7.6 Calculs des indices SRI pour les études de cas.....193

Figure 7.7 Détermination de la probabilité de dommage P des structures.....193

Figure 7.8 Courbes de fragilité des CFO sensibles à l'accélération des bâtiments-témoins de l'HRDP et de l'HGM et variation de la probabilité de dommages pour 2% en 50ans 194

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AdD	Arbre de défaillance
ASCE	American Society of Civil Engineers
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc.
ASSS	Agence de santé et de services sociaux de Montréal
ATC	Applied Technology Council
BFI	Indice de fonctionnalité du bâtiment (Building Functionality Index)
BSH	Basic Structural Hazard
CFO	Composants fonctionnels et opérationnels
CHUM	Centre hospitalier universitaire de l'université de Montréal
CNB	Code national du bâtiment du Canada
CNRC/NRC	Conseil national de recherches du Canada
CAN/CSA	Association canadienne de normalisation
CCQ	Code de construction du Québec
COMAC	Coordinate Modal Assurance Criterion
CUSM	Centre universitaire de santé de l'université McGill
CVCA	Système de chauffage, ventilation et conditionnement d'air
DDL	Degré de liberté dynamique
DSP	Densité spectrale de puissance
EERI	Earthquake Engineering Research Institute
EFDD	Enhanced Frequency Domain decomposition
F	Exigence de fonctionnalité

FEMA	Federal Emergency Management Agency
FDD	Frequency Domain decomposition
GT1 à GT6	Identification des systèmes dans un arbre de défaillance
HAZUS	Hazard US (logiciel)
HBSB	Hospital Building Safety Board
HGM	Hôpital général de Montréal
HRDP	Hôpital Rivière-des-Prairies
HSSA	Alfred E. Alquist Hospital Seismic Safety Act
IE	Infrastructures essentielles
INS	Indice non-structural de la méthode NRC92
IPS	Indice de priorité sismique de la méthode NRC92
IS	Indice structural de la méthode NRC92
ISE	Infrastructure de services essentiels
L1 à L4	Niveaux de performance de l'infrastructure de services essentiels
MAC	Modal Assurance Criterion
MCEER	Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research
MCS	Mouvement de calcul de sol
MNA	Maçonnerie non armée
MVA	Mesures de vibration ambiante
NEHRP	National Earthquake Hazards Reduction Program
NFPA	National Fire Protection Association
OSHA	Occupational Safety & Health Administration
OSHPD	Office of Statewide Health Planning and Development

PAHO	Pan American Health Organization
PHFA	Accélération horizontale maximale de plancher
PEER	Pacific Earthquake Engineering Research
SEAOC	Structural Engineers Association of California
SIE	Service d'infrastructures essentielles
SO	Exigence de sécurité des occupants
SFRS	Seismic Force Resisting System / Système de résistance aux forces sismiques (tel qu'utilisé dans la version française du CNB 2010)
SVD	Décomposition en valeurs singulières
UIC	Exigence d'usage immédiat/continu
ULC	Laboratoires des assureurs du Canada
UPS	Systèmes d'alimentation sans coupure
VB	Indice de vulnérabilité de la structure
VC	Indice de vulnérabilité des composants fonctionnels et opérationnels
VLI	Indice de vulnérabilité des interfaces des services d'infrastructure essentielles
WHO	World Health Organization

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Alphabet grec minuscule

γ	Poids d'une unité de sol, kg/m^{3}poids spécifique est en N
ρ	Densité du sol, kg/m^3
ω	Pulsation naturelle, rad/s

Alphabet grec majuscule

β	Taux d'amortissement critique (sol)
β_{DS}	Écart-type de la fonction logarithmique normale
β_C	Incertitude associée au modèle de capacité de la structure
β_D	Incertitude associée à la demande sismique ou l'aléa sismique considéré
β_C	Incertitude associée à l'indicateur d'endommagement choisi
Λ	Matrice spectrale
Φ	Fonction de distribution cumulative standard
Φ	Vecteur de déformée modale
Φ^T	Transpose du vecteur de déformée modale

Alphabet romain minuscule

f	Fréquence, Hz
g	Accélération gravitationnelle, 9,81m/s^2
h	Hauteur de couche de sol, m
h_n	Hauteur d'un bâtiment, m
k	Coefficient de rigidité, kN/m
$\tilde{k}$	Rigidité généralisée unitaire, kN/m

Rapport-Gratuit.com

m	Masse, kNs^2/m (1 tonne)
$\tilde{m}$	Masse généralisée unitaire, kNs^2/m

Alphabet romain majuscule

A	Aire, m^2
A à F	Classes de survivance (selon *Milestone 4 Report*)
A à F	Paramètres de calcul des indices de vulnérabilité du bâtiment (selon NRC)
DS_i	Niveau de dommage
D	Indice de déficience structurale (selon le projet de loi 519)
.ET.	Opérateur booléen
E	Exposition au danger (selon le projet de loi 519)
F	Pointage d'un système
F_a, F_v	Coefficients d'emplacement variant selon la période
G	Module de cisaillement pour la couche de sol (kN/m^2)
G_{max}	Module de cisaillement maximum pour la couche de sol (kN/m^2)
H_g	Accélération horizontale, g
HTC	Hospital Treatment Capacity index
HTD	Hospital Treatment Demand index
I_E	Facteur d'importance sismique du bâtiment
I(MMI)	Échelle d'intensité sismique Mercali Modifiée
IPR	Indice de priorité de risque
IFP	Indice de fonctionnalité post-sismique
$\tilde{K}$	Rigidité généralisée, kN/m

M_v	Facteur multiplicateur représentant l'effet des modes supérieurs
M_w	Magnitude du moment sismique
M_{eff}	Masse effective
$\widetilde{M}$	Masse généralisée, kN/m
NPC-1 à 5	Classes de performance de composants non-structuraux
NS1 à NS4	Niveaux de performance des composants non-structuraux, Yavari et al.
.OU.	Opérateur booléen
P	Paramètre indiquant la probabilité de dommages
P	Compliance Priority Rate (selon le projet de loi 519)
P1 à P4	Niveaux de disponibilité du personnel, Yavari et al.
PGA	Accélération maximale au sol, g
P[DS]	Probabilité de dommages
R_d	Coefficient de ductilité
R_0	Coefficient de sur-résistance
RB	Facteur relié au SFRS d'un bâtiment
RE	Facteur relié aux caractéristiques d'un CFO et de ses conditions de retenue
RG	Facteur d'aléa et d'effets de site
RWB	Logiciel Reliability Workbench
RB	Facteur relié au SFRS d'un bâtiment
RS	Facteur relié à la performance du CFO
SRI	Indice de risque sismique
S_a	Accélération spectrale, m/s^2
S_d	Déplacement spectral, m ou po

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

$\bar{S}_{d,DS}$	Valeur médiane de la demande sismique à laquelle le bâtiment atteint le seuil d'endommagement
$S(T_a)$	Accélération spectrale correspondant à la période naturelle T_a
$S_a(T)$	Accélération spectrale de réponse pour une période T, g ou m/s^2
S1 à S4	Niveaux de performance de la structure, Yavari et al.
SPC-1 à 5	Classes de performance de la structure
T	Période du bâtiment, s
T_a ou T_1	Période naturelle du bâtiment, s
V_E	Cisaillement élastique à la base, kN
V_g	Accélération verticale, g
V_s	Vitesse des ondes de cisaillement, m/s
W	Poids du bâtiment analysé, kN
Y	Période maximale de conformité (selon le projet de loi 519), années

INTRODUCTION

Le risque sismique d'un bâtiment est défini comme le produit de l'aléa sismique (ou danger sismique), de la vulnérabilité du bâti et des conséquences des dommages sur les activités humaines. Pour mieux gérer les risques, les gestionnaires d'infrastructures critiques, dont font partie les hôpitaux, tendent à intégrer la question des réactions en chaine dans la planification de leurs activités quotidiennes et des mesures d'urgence (Perrow 1984; Robert et Morabito 2011). La réaction en chaine est une interaction entre les différents éléments constitutifs d'un système ou entre le système et son environnement, selon des règles qui leur sont propres. En outre, ces systèmes sont pour la plupart de nature complexe et leur dépendance fonctionnelle à de nombreux sous-systèmes physiques ou organisationnels augmente leur vulnérabilité au risque externe, dont le risque sismique rattaché au sujet de la recherche. Le défi est alors d'identifier et de mesurer les conséquences directes d'une probable défaillance d'un ou de plusieurs sous-systèmes qui transforme le danger en perturbation du fonctionnement. À Montréal, les études les plus récentes touchent la gestion des risques majeurs de catastrophe, des grands sinistres ou des grandes crises dans le but de réduire la vulnérabilité des populations et des organisations et d'augmenter la résilience organisationnelle (Boudreault 2013; De Serres 2013; Roberts et Morabito 2013). En ce qui concerne les risques de séismes, les travaux de Boudreault (2013) présentent une approche actuarielle de gestion et de modélisation des risques.

La présente recherche s'intègre dans un programme qui vise à élargir les connaissances et développer des outils pour l'évaluation de la fonctionnalité post-sismique de bâtiments de catégorie protection civile, comme les écoles et les centres hospitaliers, dans l'est du Canada. La fonctionnalité post-sismique est définie comme la capacité de ces installations à assurer la continuité des opérations courantes, à jouer leur rôle dans la réponse aux urgences tout en garantissant la sécurité des occupants pendant et après un séisme.

Cette recherche se concentre sur l'évaluation de la fonctionnalité post-sismique des hôpitaux de Montréal. Il s'agit de manière spécifique d'adapter la notion théorique du risque sismique

à l'étude de l'interdépendance physique et fonctionnelle entre les différents composants des bâtiments d'hôpitaux et de quantifier les conséquences des défaillances possibles sur les services de soins aux blessés.

L'île de Montréal, malgré un aléa sismique modéré pour l'Amérique du Nord, arrive au deuxième rang des villes canadiennes les plus exposées au risque sismique. Cette vulnérabilité s'explique par la forte densité de population et la concentration de nombreux bâtiments construits avant l'application de normes parasismiques strictes (Adams et al. 2002). Par ailleurs, de nombreux travaux comme ceux de Mitchell et al. (1990a) et de Lamontagne (2008) confirment que la présence de formations alluvionnaires dans le sous-sol de Montréal augmente les effets d'amplification des ondes sismiques et le risque de liquéfaction des sols. Par conséquent, des séismes de magnitude M_w 6,0 peuvent provoquer des dommages potentiellement importants, comme constatés lors du séisme de Saguenay (25 novembre 1988, M_w5,9) (Chouinard et Rosset 2007; Rosset et Chouinard 2009).

Problématique

Selon la version 2010 du Code national du bâtiment du Canada (CNB), tout processus de conception parasismique vise à garantir la sécurité des vies, la limitation des dommages aux structures et l'occupation immédiate des bâtiments de sécurité civile. On associe ainsi des objectifs de comportement à un niveau d'aléa sismique : la fonctionnalité pour un séisme occasionnel (soit 10% en 50 ans) et l'occupation immédiate pour un séisme rare avec une occurrence de 2% en 50 ans. Dans les deux cas, le bâtiment doit avoir une capacité à résister sans effondrement local ou global. Désormais, la performance sismique exigée d'une structure est liée à sa fonction et aux conséquences sociales, économiques et opérationnelles d'une mauvaise performance (ATC 1997; Bozorgnia et Bertero 2004; Gupta et Krawinkler 1999). Certains auteurs parlent alors d'effet domino, de défaillance technologique ou de perte de fonctionnalité. Ces différents concepts, qui ont comme point commun l'analyse de la chaine de conséquences d'une rupture ou d'une défaillance aléatoire de composants des infrastructures critiques, sont relativement récents du point de vue du génie parasismique.

Il a fallu les expériences des séismes de Northridge (17 janvier 1994, M_w6,7), Kobe (16 janvier 1995, M_w6,9), Kocaeli (17 août 1999, M_w7,6) et Chi-Chi (20 octobre 1999, M_w7,6) pour constater qu'une bonne performance sismique de la structure se révèle insuffisante pour garantir la fonctionnalité post-sismique des hôpitaux (Myrtle et al. 2005). Celle-ci dépend largement du contrôle des dommages aux composants non-structuraux et aux équipements ou plus spécifiquement, des composants fonctionnels et opérationnels (CFO) Ces derniers regroupent l'ensemble des composants architecturaux et de l'infrastructure de services essentiels à la fonctionnalité du bâtiment et aux opérations liées à son usage et le contenu (CAN/CSA C2011; FEMA 1994).

Lors de chacune de ces catastrophes, de nombreux hôpitaux sont devenus dysfonctionnels à cause des dégâts d'eau (éclatement de la tuyauterie, des gicleurs, des réservoirs d'eau du toit), des pannes du réseau électrique, des systèmes de ventilation et de protection incendie, et de la destruction d'équipements insuffisamment ancrés à la charpente (Davidovici 2007; EERI 2009; 2010; Myrtle et al. 2005; NCREE 2010). Les conséquences économiques sont aussi importantes puisque, la valeur économique des CFO représente plus de 80 % des investissements dans les hôpitaux américains (Miranda 2003). Toutefois, la compréhension de leur comportement individuel ainsi que des conséquences de leur défaillance sur l'ensemble reste très limitée. À ce propos, Myrtle et al. (2005) soulignent que durant les années d'évolution des codes de conception parasismique, des années 1970 à la fin du siècle dernier, seule la conception structurale avait fait l'objet de recherches, soit un seul maillon de la chaine de conséquences.

La situation tend à se renverser avec au niveau de la communauté scientifique: 1) le relevé systématique des dommages aux CFO, 2) le développement de bases de données sur leur vulnérabilité sismique, particulièrement dans les régions de forte sismicité, et 3) le développement de méthodes empiriques d'évaluation de la fonctionnalité post-sismique des bâtiments basées sur ces données. À cet égard, l'état de la Californie reste un des mieux outillés à cause de la récurrence de séismes dévastateurs qui ont eu lieu entre 1970 et 1994 et

des leçons tirées de l'observation des dommages. Ce sont toutefois des méthodes spécifiques difficilement applicables dans des contextes différents et du fait de leur empirisme, ne représentent pas un outil d'évaluation prospective de la fonctionnalité post-sismique.

Puisque la fonctionnalité de chaque infrastructure/composant ne peut être évaluée que dans la globalité du système qui l'accueille et non de manière isolée, l'approche d'évaluation idéale est celle d'une analyse de fiabilité qui tient compte de la complexité inhérente des systèmes critiques. Dans le cas d'un hôpital, ces systèmes critiques sont, en premier lieu, les systèmes d'alimentation électrique et de gaz médicaux, compte tenu du rôle qu'ils jouent dans la continuité des opérations et le maintien des fonctions vitales des patients, puis les systèmes de protection d'incendie ou de chauffage, de ventilation et de conditionnement d'air (CVCA). C'est cette approche qui a été favorisée dans la thèse étant donné qu'elle permet d'analyser la fonctionnalité post-sismique d'un hôpital sur la base de celle de ses systèmes critiques.

Cette approche par système est souvent utilisée pour estimer les conséquences sur la sécurité des vies et l'opérationnalité des systèmes de la rupture de composants ou encore pour évaluer les pertes économiques reliées à des dommages simultanés (Johnson et al. 1999; Porter et al. 2002a; 2002b; 2006). La présente thèse part de cette prémisse et développe, autour d'une approche rigoureuse, une méthodologie adaptée au contexte québécois. L'application de cette approche présente plusieurs défis, particulièrement dans les régions de sismicité modérée caractérisée par un faible retour d'expérience sur des séismes dévastateurs, et constitue la première tentative au Québec d'évaluer systématiquement la fonctionnalité post-sismique des hôpitaux.

Objectifs de la recherche

L'objectif général de cette thèse est de développer une méthodologie d'évaluation indicielle de la fonctionnalité post-sismique d'hôpitaux individuels de Montréal considérant à la fois la vulnérabilité des composants structuraux, des CFO et des interfaces et l'infrastructure des

services essentiels des bâtiments. L'indice global est un indice de fonctionnalité post-sismique IFP (*Voir* Figure 0.1), qui pourra être présenté de manière plus détaillée selon différents objectifs de performance. Les objectifs spécifiques sont:

1. D'établir les objectifs de performance d'un centre hospitalier;
2. D'identifier les relations entre la performance des éléments structuraux, celle des CFO et des interfaces avec l'infrastructure des services essentiels;
3. D'identifier et analyser les interdépendances entre les systèmes;
4. De développer une méthode d'évaluation des vulnérabilités des sous-systèmes;
5. D'établir des indices de fonctionnalité intégrant les vulnérabilités des sous-systèmes en rapport aux objectifs de performance;
6. De proposer des critères pour l'interprétation des indices de fonctionnalité;
7. D'élaborer un outil d'application pour l'évaluation de la fonctionnalité post-sismique des hôpitaux.

La Figure 0.1 illustre la démarche systémique d'analyse de la vulnérabilité des structures, des CFO et des interfaces avec l'infrastructure des services essentiels (ISE), tels que les divers réseaux d'alimentation en eau, gaz, électricité et de gestion des déchets. Ces vulnérabilités combinées aux caractéristiques de l'aléa sismique local définissent le risque de perte de fonctionnalité. On se limite ici aux interdépendances physiques internes des installations hospitalières en intégrant l'ensemble des facteurs de vulnérabilité sismique de la structure et des CFO.

Le processus d'évaluation du risque sismique des composants non-structuraux, tel que recommandé par la norme CAN/CSA-S832-14, est considéré comme l'étape fondamentale dans le développement de la méthode d'évaluation de la fonctionnalité. Les informations nécessaires à cette évaluation touchent tant les conditions sismiques locales que les caractéristiques *in situ* des composants et leurs conditions d'attache au bâtiment.

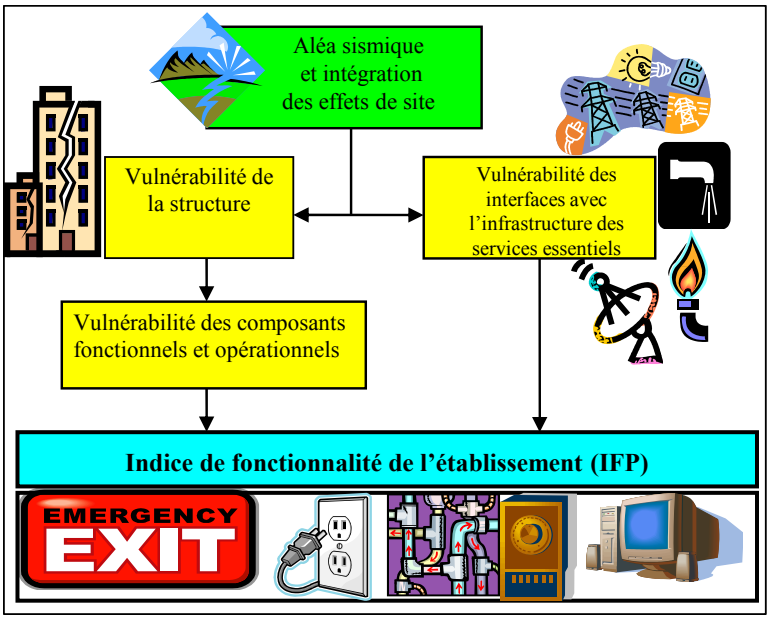


Figure 0.1 Approche systémique d'évaluation de la fonctionnalité post-sismique des bâtiments de protection civile

Méthodologie

Deux hôpitaux-témoins ont été retenus dans le cadre de cette recherche. Ce sont des établissements très différents en termes de services rendus. Ainsi, plus d'une quinzaine de départements de l'Hôpital général de Montréal (HGM) ont été comparés à l'offre de service de pédopsychiatrie de pointe de l'Hôpital Rivière-des-Prairies. La complexité des objectifs de performance et selon les besoins, celle des systèmes critiques, sont modélisées sous forme d'arbre de défaillance (AdD) afin de procéder à leur évaluation. La recherche suit une démarche itérative comprenant deux étapes d'analyse, qui est illustrée à la Figure 0.2.

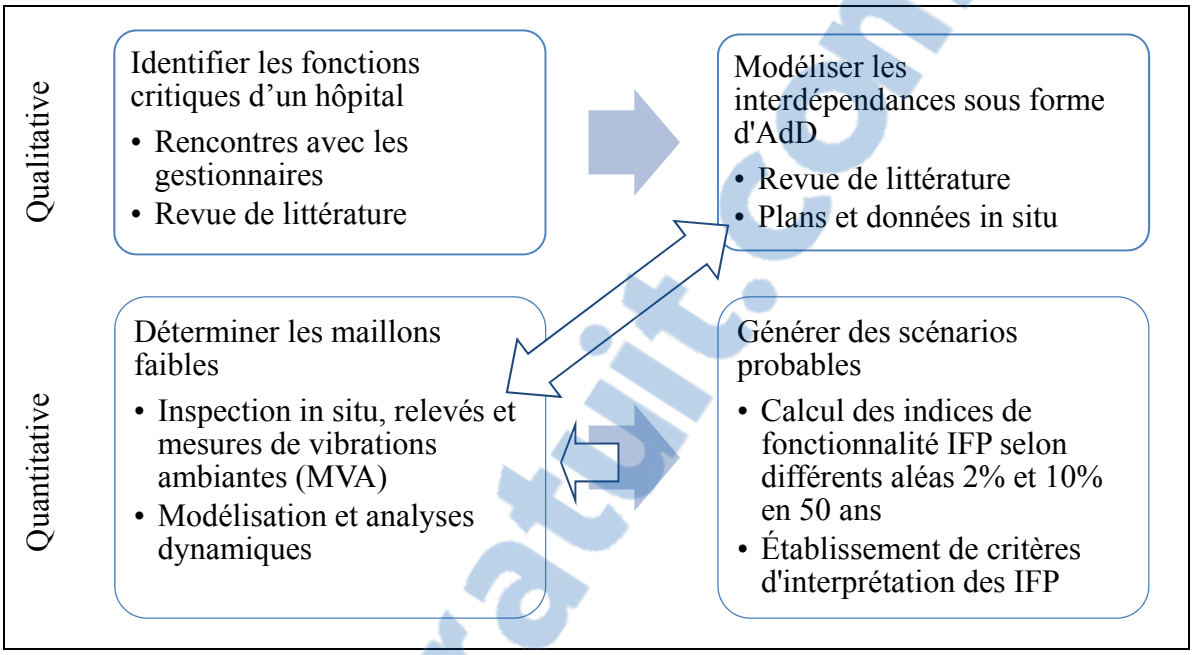


Figure 0.2 Méthodologie de la recherche
Adaptée de Ezell et al. (2000, p. 115)

1. La première phase qualitative vise à : a) identifier les fonctions critiques (CFO et systèmes) de chacun des hôpitaux avec l'aide des gestionnaires et b) modéliser les interdépendances reliant la fonctionnalité post-sismique de l'hôpital ou l'opérationnalité des systèmes critiques aux dommages potentiels sur la base d'une revue exhaustive de la littérature. L'extrant principal de cette phase est un ensemble d'arbres de défaillance représentant différentes fonctions critiques des hôpitaux de Montréal. Les objectifs spécifiques 1 à 3 sont atteints par cette phase.

2. La seconde phase, quantitative, comprend la détermination des défaillances probables de la structure et des CFO et le calcul d'un indice de fonctionnalité post-sismique en faisant varier les paramètres de vulnérabilité sismique afin d'optimiser les résultats et d'évaluer la performance probable des bâtiments analysés. Ces facteurs sont : 1) les caractéristiques structurales, 2) le niveau de dommage, 3) la catégorie d'emplacement (type de sol) et 4) l'aléa sismique (2% et 10% en 50 ans). Les deux derniers paramètres tiennent compte respectivement de l'importance des phénomènes d'amplification dans l'étude du risque sismique associé à l'île de Montréal et de la performance attendue des bâtiments de

Rapport-Gratuit.com

protection civile selon les spécifications du CNB. La constitution d'une base de données sur la vulnérabilité sismique et la fragilité de la structure et de chacun des CFO permet de procéder à l'évaluation de la fonctionnalité post-sismique. Un cadre d'interprétation des indices de fonctionnalité complète l'approche proposée. Le cadre méthodologique complet est présenté au Chapitre 4. On atteint avec cette phase les objectifs spécifiques 4 à 7.

Contributions originales des travaux

Cette thèse présente plusieurs contributions originales tant au niveau de la problématique abordée que dans le développement d'une méthodologie d'évaluation de la fonctionnalité post-sismique des hôpitaux de Montréal. Afin d'assurer la viabilité des recommandations faites, les travaux se basent sur des outils d'analyse et de calcul qui ont déjà fait leur preuve dans l'évaluation de la fiabilité des systèmes et de la vulnérabilité sismique des composants, tels que les arbres de défaillance, les mesures de vibration ambiantes (MVA), les courbes de fragilité et les analyses des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC).

La présente recherche se base sur le concept de performance avec, comme point de départ, les données sur l'état réel des bâtiments et des composants à l'étude. Les systèmes critiques des hôpitaux sont modélisés sous forme d'arbres de défaillance, décrivant la complexité de ces systèmes ou l'effet de l'interaction/interdépendance entre leurs sous-systèmes. De manière spécifique, cette recherche intègre les facteurs de vulnérabilité sismique des bâtiments hospitaliers par une démarche systémique d'analyse. À notre connaissance, il s'agit de la première recherche prenant en compte tant le comportement des structures, des CFO et des interfaces, que les paramètres reliés à l'aléa local et aux effets de site pour les hôpitaux.

L'originalité de cette recherche réside également dans le potentiel d'application future des résultats, par exemple le développement d'un plan d'intervention pour garantir la

fonctionnalité post-sismique des hôpitaux à l'échelle de l'île de Montréal ou à d'autres types d'installations sur des territoires différents. Un chiffrier développé sur MS Excel permet de colliger l'information pour les bâtiments existants et ainsi prioriser les composants les plus vulnérables et d'appliquer les mesures de mitigation adéquates. Il constitue un outil facile d'utilisation pour les gestionnaires d'hôpitaux.

Bien que cette étude vise des bâtiments existants, la réduction du risque sismique associé aux systèmes critiques de CFO des hôpitaux est similaire pour les bâtiments en construction. Dans ces cas, on peut s'attendre à ce que la réponse d'une structure corresponde aux objectifs de performance du CNB 2010 si elle est conçue selon les exigences parasismiques en vigueur avec un choix de site et une configuration structurale et architecturale optimaux. La méthodologie ici présentée peut donc efficacement s'appliquer à l'ensemble des bâtiments hospitaliers. Ce travail sort un peu des sentiers battus en ce sens que la problématique exige d'aller au-delà des problématiques structurales habituellement traitées.

Les travaux réalisés ont donné lieu à la présentation d'articles dans plusieurs conférences internationales : à la XVe conférence mondiale de génie parasismique (Youance et al. 2012), aux conférences annuelles de la Société Canadienne de Génie Civil (Youance et al. 2013; 2014) et à la préparation d'un article soumis pour publication à la Revue canadienne de génie civil (Youance et al. 2015). .

Limites de la thèse

Il est extrêmement difficile de considérer l'ensemble des situations pouvant mener au dysfonctionnement d'un hôpital. Le choix est fait d'évaluer la fonctionnalité post-sismique de l'hôpital en considérant principalement les caractéristiques physiques des bâtiments et des systèmes critiques internes. Dans ce contexte, des facteurs de variation aléatoire ou temporelle comme la simulation de la propagation d'un incendie, la réparation des dommages, la variation du nombre d'occupants ou la considération d'itérations tenant compte d'un état d'endommagement donné ne sont pas considérés. Par ailleurs, les

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

paramètres humains comme le flux et les réactions des patients, et l'indisponibilité du personnel en raison de décès ou de l'impossibilité d'accéder à l'hôpital lors du désastre ne sont pas pris en compte. Toutefois, l'auteure tient à souligner l'importance d'une gestion adéquate des situations d'urgence. Comme le recommande le CNB, c'est un facteur primordial dans la réponse du personnel sur place et la garantie de la sécurité des occupants.

Organisation et contenu de la thèse

Les trois premiers chapitres de la thèse sont consacrés à une revue critique de la littérature portant sur les connaissances nécessaires au développement de la méthodologie d'évaluation, et correspondent aux trois premiers objectifs spécifiques de la recherche. De manière détaillée :

- Le Chapitre 1 présente l'évolution du cadre normatif relatif aux hôpitaux en Californie et au Canada. Dans le premier cas, la revue de littérature porte sur les liens entre l'observation des dommages significatifs sur une période de près de 30 ans et l'évolution simultanée des normes parasismiques. Par contre, pour le Canada on se base essentiellement sur les leçons apprises et les prescriptions récentes du CNB.
- Le Chapitre 2 complète l'information sur l'évaluation sismique du bâti et présente les principales méthodes disponibles pour ce niveau d'évaluation. L'accent est porté sur la démonstration des relations entre la vulnérabilité et la performance de la structure et des CFO, ce qui permet d'introduire les notions de systèmes.
- Le Chapitre 3 aborde les concepts d'interdépendance des systèmes critiques et leur modélisation sous forme d'AdD. Les systèmes critiques sont identifiés et analysés sur la base des recommandations des normes canadiennes.

Au Chapitre 4, l'atteinte des trois premiers objectifs permet de définir en détail le cadre méthodologique d'évaluation de la fonctionnalité post-sismique des hôpitaux. La problématique spécifique de Montréal ainsi que les procédures de collecte de données et d'analyse y sont présentées.

Le développement de la base de données sur les hôpitaux-témoins de la recherche fait pour sa part l'objet du Chapitre 5. On y présente le processus d'inspection, de collecte de données et d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments et des CFO des hôpitaux-témoins sélectionnés pour l'étude:

- la prise de mesures de vibrations ambiantes dans le but de caractériser les bâtiments à l'étude à partir des paramètres modaux (période, mode de vibration et amortissement),
- l'évaluation de la vulnérabilité sismique de la structure,
- le processus d'évaluation du risque sismique des composants non-structuraux, tel que recommandé par la norme CAN/CSA-S832-14, est considéré comme l'étape fondamentale dans le développement de la méthode d'évaluation de la fonctionnalité. Les informations nécessaires à cette évaluation touchent tant les conditions sismiques locales que les caractéristiques *in situ* des composants et leurs conditions d'attache au bâtiment.

Le Chapitre 6 est consacré au développement de la méthodologie d'évaluation sous la forme d'une étude paramétrique et d'un outil d'évaluation. La formulation du risque sismique est développée sous forme du calcul des indices de fonctionnalité pour chacun des systèmes critiques analysés. Les résultats sont présentés de manière désagrégée et donnent une appréciation de la performance probable ou de l'atteinte des objectifs de fonctionnalité post-sismique. Le Chapitre 7 complète la thèse avec un processus de validation en comparant les indices calculés par la méthode proposée avec des données développées ailleurs dans le monde. Ce chapitre présente également des études de cas d'évaluation de systèmes critiques des hôpitaux-témoins avec pour objectif d'optimiser l'interprétation des indices et de faire des recommandations spécifiques aux gestionnaires.

Enfin, une conclusion et des recommandations permettent d'évaluer le processus global de la recherche, l'atteinte son objectif principal d'évaluation de la fonctionnalité post-sismique des hôpitaux de Montréal et d'identifier de futurs axes de recherche.

CHAPITRE 1

ÉVOLUTION DU CADRE LÉGAL ET REVUE DE LA PERFORMANCE DES HOPITAUX LORS DE SÉISMES PASSÉS

L'objectif de ce chapitre est de présenter parallèlement aux dommages observés et à la performance des hôpitaux lors de séismes passés, l'évolution des codes et normes régissant la construction ou la réhabilitation des hôpitaux en Californie et au Canada. Ce choix ciblé permet de porter l'accent sur : 1) les défis reliés à l'évaluation de la vulnérabilité sismique des hôpitaux existants, 2) les dispositions normatives spécifiques aux bâtiments hospitaliers à partir de 1970; cette année constituant une date de référence dans l'application des normes de construction parasismique et 3) les dispositions parasismiques qui ont influencé le cadre normatif canadien.

Nous traiterons d'abord de l'évolution des mesures parasismiques californiennes sur près de 30 ans : 1) la période 1971-1994 de sismicité active avec les dommages significatifs sur les hôpitaux et 2) la période post 1994 avec l'introduction de la notion de performance ou de critères de comportement à atteindre. Cette deuxième période marque aussi celle du développement des méthodes empiriques d'évaluation de la fonctionnalité post-sismique. La quatrième section traite pour sa part des dommages enregistrés au Québec et de l'évolution des normes parasismiques canadiennes. La dernière section offre une synthèse de la revue de littérature à partir de laquelle il est possible d'établir adéquatement les objectifs de performance d'un centre hospitalier en fonction de ces prescriptions normatives, Objectif 1 de la thèse.

1.1 Évolution des mesures parasismiques

Les considérations parasismiques intégrées dans les codes de construction actuels sont le résultat d'un long processus de mise à jour et d'une meilleure compréhension de la nature des risques. Ils répondent à un objectif principal qui est la protection des vies.

Malgré les séismes récurrents répertoriés depuis le XIVe siècle, les premiers codes de construction ne font leur apparition que près de six siècles plus tard : Japon (1924), États-Unis (1927), Nouvelle Zélande (1931), Chili (1939), Roumanie et Turquie (1940) et le Canada en 1941 (Davenport 2004; Davidovici 2007; Holmes 2002; Mitchell et al. 2010; Reitherman 2008; Sezen et al. 2000; USGS 2013). Parmi les pays à forte sismicité, la Chine et l'Iran, dont les codes ont été inscrits respectivement en 1954 et 1967, comptent le plus grand nombre de séismes à haut taux de perte en vies humaines (USGS 2013). Toutefois, les premières versions des codes de conception des bâtiments ne comportent pas nécessairement d'exigences pour la conception parasismique. Elles sont ensuite régulièrement mises à jour et les versions actuelles reflètent une meilleure compréhension de la sismicité des différents pays, du comportement des composants et des systèmes dynamiques mais surtout des leçons apprises des différents séismes (Reitherman 2008).

L'évolution du code américain en matière de risques reliés aux hôpitaux est unique en Amérique du Nord. Elle permet de comprendre les défis auxquels le Québec fait face compte tenu de la similarité des méthodes de construction. Le résumé de cette évolution, présentée à la section 1.2, est tirée en grande partie des travaux de Holmes (2002); l'information est validée par d'autres références (Davidovici 2007; Meade et Kulick 2007; Tokas 2007).

1.2 Période 1971-1994 : dommages enregistrés et évolution des normes parasismiques spécifiques aux hôpitaux en Californie

Au cours de la période 1971-1994, les normes parasismiques californiennes ont évolué de manière significative en réponse à l'ampleur des dommages enregistrés sur les hôpitaux lors de trois séismes[1] : 1) San Fernando (9 février 1971, M_w6,6), 2) Loma Prieta (18 octobre 1989, M_w6,9) et 3) Northridge (17 janvier 1994, M_w6,7). En 1971, le constat est sévère, l'agence fédérale *Occupational Safety & Health Administration* (OSHA) souligne que les

[1] Durant cette même période, 10 autres séismes de magnitude comprise entre Mw5,6 et 7,2 ont aussi frappé l'état mais causant principalement d'important phénomènes géotechniques avec les conséquences sur les infrastructures routières et les services d'infrastructures essentielles.

prescriptions des codes en vigueur se sont révélées particulièrement inadéquates dans le cas des hôpitaux (OSHA 2006). Les dommages structuraux sont importants et le cas le plus notable cité dans la littérature est celui de l'hôpital *Olive View Medical Center* construit en 1970 qui a dû être évacué lors du séisme du 9 février 1971. En 1989 et en 1994, on constate un meilleur comportement global des structures reconstruites ou réhabilitées après 1971 avec en revanche un mauvais comportement des éléments non-structuraux (Davidovici 2007; Holmes 2002). Le Tableau 1.1 résume les principaux dommages observés lors des trois séismes avec les caractéristiques : magnitude (M_w), accélération horizontale (H_g) et verticale (V_g) lorsque disponibles.

Tableau 1.1 Comportement des hôpitaux californiens lors des trois séismes considérés
Adapté de Davidovici (2007, p. 2.15)

Date Lieu	**Données sismiques : Magnitude Accélération Hg/ Vg**	**Comportement des hôpitaux**
9 février 1971 San Fernando, Los Angeles	$M_w = 6,6$ $H_g = 0,28$ g	4 hôpitaux ont été gravement endommagés et sont déclarés hors d'usage : - effondrement d'un bâtiment administratif construit avant 1933 et autres dommages; - perte d'étage faible, effondrement de 3 cages d'escaliers, poste de répartition d'énergie électrique et génératrice de secours hors usage; - évacuation de patients.
17 octobre 1989 Loma Prieta, Californie	$M_w = 6,9$	- 1 hôpital a été affecté; - aucun bâtiment hospitalier renforcé ou construit après le séisme de 1971, en appliquant des règles plus contraignantes, n'a été endommagé.
17 janvier 1994 Los Angeles, Northridge	$M_w = 6,7$ H_g: 0,91g/0,82g /2,31g V_g: 0,60g/0,34g	L'endommagement des éléments non-structuraux a entrainé la perte temporaire de la fonction hospitalière nécessitant l'évacuation et le transfert des patients : - rupture des gicleurs et des tuyauteries d'eau; - dommage aux refroidisseurs sur le toit, décrochage des luminaires, effondrement de plafonds suspendus et diffuseurs d'air climatisé; - arrêt de certains services relié au manque de carburant pour la génératrice ou capacité insuffisante de celle-ci; - endommagement important du réservoir d'oxygène.

Des réponses légales visant l'adaptation des normes existantes ont été proposées immédiatement après chacun des événements sismiques. En 1972, le projet de loi 519 appelé « *The Hospital Safety Act of 1972* » est le résultat d'une conjoncture favorable. En effet, la fin des années 1960 correspond à une période de réflexion et de mise à jour de la législation relative à la conception sismique des écoles, votée suite au séisme de Long Beach (11 mars 1933, M_w 6,4). L'objectif était alors d'en améliorer les conditions d'application. De manière générale, le contexte entre 1970 et 1994 est marqué par une remise en question des normes existantes et leur adaptation progressive grâce aux données recueillies lors des séismes successifs et des inventaires exhaustifs réalisés après chacun des séismes. Les principales dispositions légales sont présentées dans les paragraphes suivants ainsi que les défis reliés à leur application.

1.2.1 La loi de 1972 *« The Hospital Safety Act of 1972 – Senate Bill 519 »*

Cette loi établit deux objectifs de performance sismique touchant tout nouveau bâtiment qui pourrait potentiellement être requis dans une situation post-désastre : la protection des vies et la continuité raisonnable des opérations. Elle renforce les niveaux de conception et de suivi avec: 1) l'obligation d'une étude géologique des sites, 2) l'introduction d'un facteur d'importance de 1,5 pour la conception des structures d'hôpitaux, 3) des spécifications pour la conception des composants non-structuraux, et 4) la revue stricte de la conception et de l'inspection lors de la construction. Des considérations particulières aux bâtiments existants classés pré-codes ont été ajoutées au début des années 80 et touchaient l'évaluation des systèmes critiques comme les services de chirurgie, le nombre de lits critiques et les composants non-structuraux.

Un indice de priorité et de conformité P (*Compliance Priority Rate*) a été établi selon l'équation (1.1) dans laquelle D représente un indice de déficience structurale et E l'exposition au danger du composant/système critique dont les gammes de valeurs sont présentées au Tableau-A I-1, ANNEXE I, p.207. L'indice P est relié à une période maximale (en années) de mise en conformité, Y selon l'équation (1.2).

$$P = D * E \tag{1.1}$$

$$Y = \sqrt{\frac{440}{P}} \tag{1.2}$$

Plus l'indice *P* est élevé, plus courte est la période de conformité accordée. Ceci permet d'éviter par exemple, que de nouvelles fonctions ou de nouveaux systèmes critiques soient ajoutés aux bâtiments non conformes; augmentant la valeur de *E* (exposition) et conséquemment l'indice *P*. La relation est montrée à la Figure 1.1.

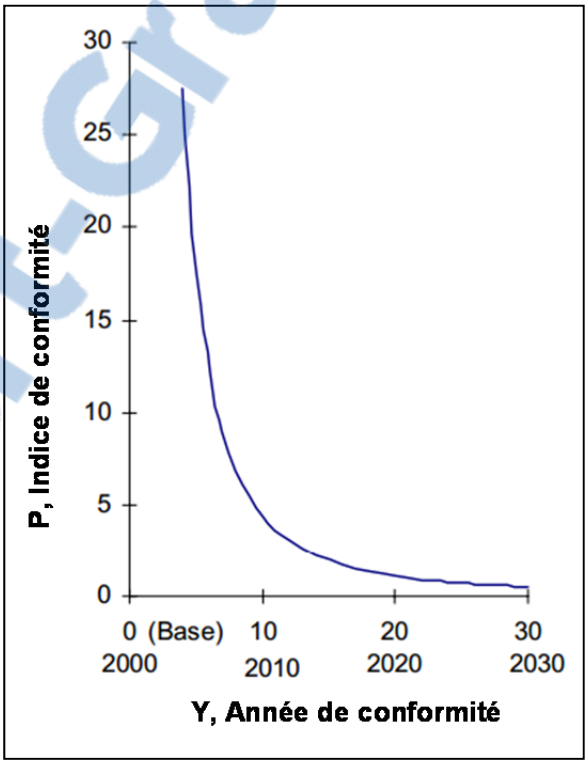


Figure 1.1 Relation entre l'indice de risque
et la période de mise en conformité
Adaptée de Holmes (2002, p. 5)

Rapport-Gratuit.com

Plus spécifiquement, la période *Y* est fixée à : 1) 10 ans pour les bâtiments dont la structure est jugée critique ou susceptible à l'effondrement, 2) 20 ans pour ceux possédant un système structural marginal et 3) 30 ans pour ceux n'atteignant pas les objectifs d'opérationnalité mais jugés adéquat du point de vue structural. Cette loi atteint rapidement ses limites avec les coûts élevés des nouvelles constructions et des difficultés à renouveler le parc des bâtiments classés pré-code. L'absence de volonté politique à l'époque et la confusion sur la responsabilité respective des différents organismes en charge n'ont pas permis de mettre en place les ressources et outils requis pour que ce projet ait force de loi. En 1983, le *Senate Bill 961* y apporte les accommodements techniques requis et les éclaircissements nécessaires sur l'autorité responsable qui devient *the California Office of Statewide Health Planning and Development* (OSHPD). Une nouvelle loi globale est alors votée sous le nom de « *Alfred E. Alquist Hospital Seismic Safety Act* (HSSA) ».

1.2.2 *The Milestone 4 Report*, (Building Safety Board, 1990)

Ce rapport tire les leçons apprises de l'application de la loi précédente et propose des recommandations jugées essentielles: 1) l'ajout d'une phase d'évaluation et de planification de 5 ans, suivie d'une phase d'implantation de 35 ans, et 2) l'offre d'incitatifs financiers adéquats aux gestionnaires d'hôpitaux. C'est aussi un document technique qui reprend les résultats des inventaires exhaustifs réalisés après le séisme de San Fernando de 1971 (ATC 23) et prescrit le renforcement des composants structuraux et non-structuraux des hôpitaux.

L'inventaire ATC 23 regroupe les hôpitaux de la Californie en cinq classes de « survivance » aux séismes définies selon les années de construction des bâtiments. Alors que les bâtiments des classes A et B ont un comportement espéré bon, le Tableau 1.2 montre que la grande majorité des hôpitaux répertoriés appartiennent aux classes C à F (68%) qui regroupent les hôpitaux conçus selon des normes pour les bâtiments d'usage normal ou classés pré-code. Lors d'un tremblement de terre, ils peuvent alors subir des dommages modérés ou représenter potentiellement un risque élevé d'effondrement. Ce classement amena la fermeture ou la désaffectation de nombreux centres hospitaliers.

Tableau 1.2 Sommaire des résultats de l'inventaire ATC 23
Adapté de Holmes (2002, p. 6)

Classe de survivance	**Inventaire des hôpitaux Nombre et %**	**Normes de conception et construction**	**Comportement espéré**
A	854 (32%)	Conformité substantielle à la loi « *Hospital Act (HSSA)*»	Bon
B	7 (< 1%)		
C	1244 (47%)	Conçu selon les normes standards pour bâtiments d'importance normale	Dommage modéré
D	297 (11%)	Idem à C mais vulnérabilité identifiée due à l'évolution des codes	Hautement variable, potentiellement à haut risque
E	125 (5%)	Construits sans considération des forces latérales (pré-code)	Potentiellement à haut risque
F	146 (5%)		
Total	2673 (100%)		

1.2.3 *The Senate Bill 1953*

Cette loi, amendement de la loi HSSA, est signée en septembre 1994 en réponse au séisme de Northridge marqué par l'évacuation des hôpitaux, principalement à cause de dommages au niveau des composants non-structuraux. Un point essentiel du projet de loi est la définition de cinq catégories de performance structurale (SPC-1 à 5) et non-structurales (NPC-1 à 5) regroupant les 2662 hôpitaux californiens existants (*Voir* Figure 1.2 a et b). Ce classement fait mieux ressortir l'obligation d'une mise en conformité des composants non-structuraux; la quasi-totalité de ces composants démontrant un niveau significatif de vulnérabilité sismique Ceux à haut risque (NPC-1) représentent près de 73% de l'inventaire alors que la classe NPC-5 en regroupe moins de quatre millièmes..

La catégorie 1 (NPC-1) regroupe les composants à risque élevé pour lesquels la mise en conformité immédiate est exigée et la catégorie 5 (NPC-5), ceux à risque faible et construits après 1988, ces derniers devraient pouvoir, de manière raisonnable, continuer à être fonctionnels. Cette cinquième catégorie doit satisfaire les normes au 1er janvier 2030.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

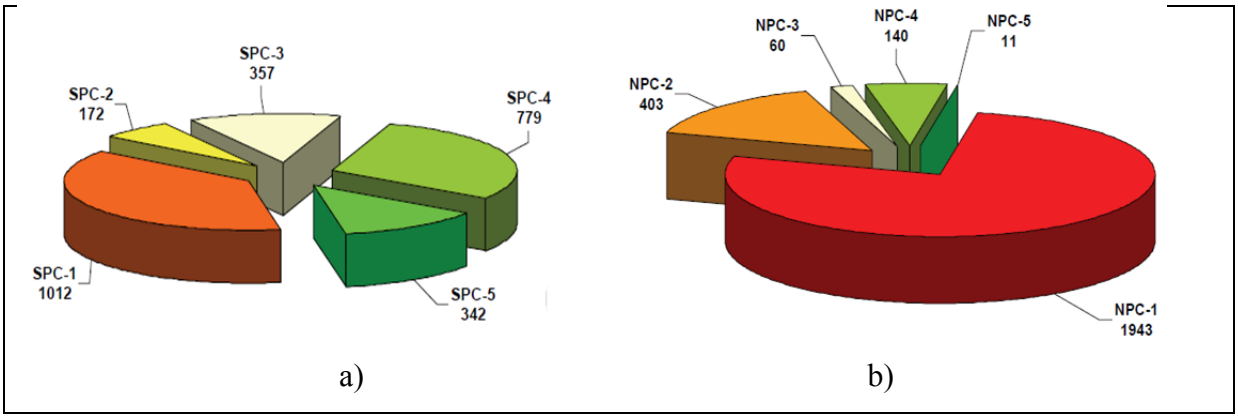


Figure 1.2 Classification des 2662 hôpitaux répertoriés selon la vulnérabilité de: a) leur structure (SPC) et b) leur composants non-structuraux
Tirée de Tokas (2007, pp. 11, 12)

La Figure 1.3 illustre les principales cibles du *Senate Bill 1953* tel qu'évalué en 2007 par Tokas (2007). On note la progression des niveaux de performance à atteindre: l'évacuation sécuritaire en 2002 (comme mesure assurant la sécurité des vies), la prévention de l'effondrement, la sécurité des vies en 2008 et la fonctionnalité complète en 2030.

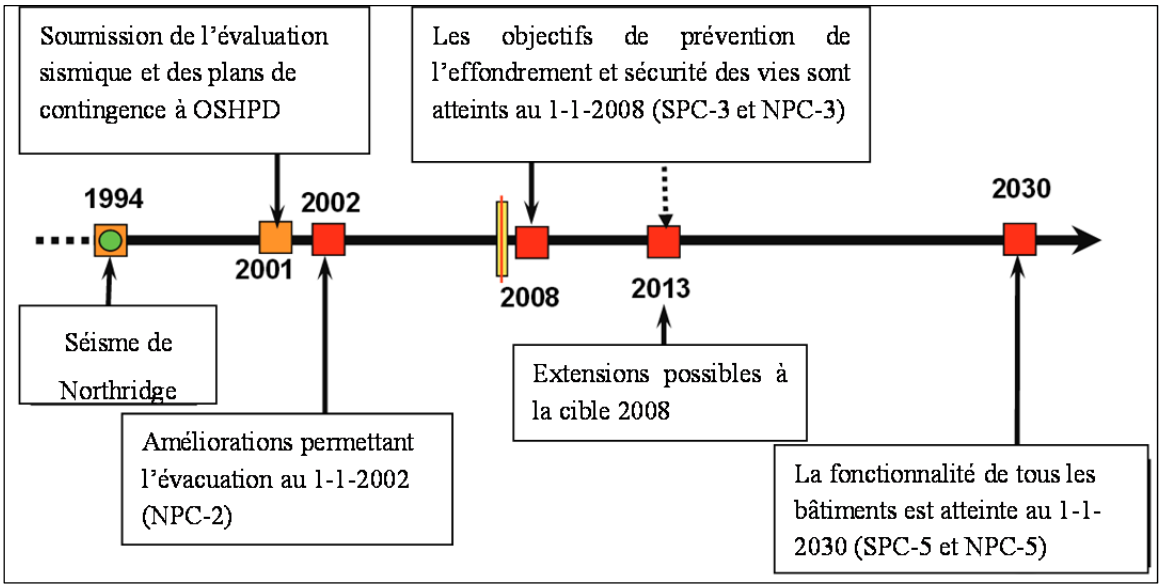


Figure 1.3 Principales cibles du *Senate Bill 1953*
Adaptée de Tokas (2007, p. 9)

Toutefois, les évaluations réalisées montrent que la classe structurale 2 (SPC-2, regroupant des bâtiments pré-code mais sans danger pour la sécurité des vies) présente une vulnérabilité sismique supérieure au niveau anticipé (Holmes 2002). En conséquence, le défi est de trouver le juste équilibre entre les coûts et les bénéfices reliés aux interventions sur les structures existantes et la construction de nouvelles installations. Dans son rapport d'évaluation, Tokas (2007) note le besoin critique de solutions innovantes afin de rendre les installations hospitalières résilientes.

1.3 Période post 1994 : conception basée sur la performance

Dans cette approche, le critère de conception parasismique exprime un objectif de performance à atteindre soit en termes de déplacement, de dommages, de déformation ou d'état d'opérationnalité. Dans ce contexte, le niveau de performance peut raisonnablement représenter le risque accepté par le gestionnaire et propriétaire de bâtiment selon les fonctions spécifiques du bâtiment considéré, ses caractéristiques techniques et les prescriptions normatives en vigueur. Une littérature exhaustive existe sur l'historique de la conception parasismique basée sur la performance (Bozorgnia et Bertero 2004; Ghobarah 2001; Guenay et Mosalam 2013; Moehle et Deierlein 2004; Naeim 2005; Porter 2003). L'application de ces principes fait consensus quand il s'agit des bâtiments hospitaliers, contrairement aux bâtiments d'usage courant. Des auteurs relient cette acceptation aux tentatives de comprendre les conséquences des dommages enregistrés lors des séismes de Northridge et de Kobe au Japon cités à l'introduction. Alors que la majorité des bâtiments inventoriés étaient conformes aux normes sismiques en vigueur, les dommages sont tels que les pertes en termes de performance des systèmes, de risque d'effondrement et de perte de fonctionnalité en plus des coûts associés étaient beaucoup trop élevés. Les paragraphes suivants présentent les principales méthodes développées depuis 1994.

1.3.1 Approche SEAOC 1995

En 1995, le comité de sismologie de la *Structural Engineers Association of California* (SEAOC), à l'origine de nombreux documents décrits au paragraphe 1.1.1, a publié Vision

2000, une méthodologie reliant quatre aléas sismiques à quatre niveaux de performance sismique (Vision 2000 Committee 1995). Le diagramme de la Figure 1.4 définit des objectifs de sécurité minimale pour les bâtiments d'usage courant, de sécurité essentielle pour les infrastructures de protection civile (hôpital, école, etc.) et de sécurité critique pour les structures dont les effets sur l'environnement externe sont significatifs (explosion, radiation, etc.). Selon cette approche, la sécurité des occupants est primordiale en tout temps alors que les hôpitaux devraient rester opérationnels en cas de séismes rares (avec un temps de retour de 1/475 ans) et totalement opérationnels pour les événements occasionnels ou avec un temps de retour de 1/72 ans). Il faut souligner, par ailleurs, que les deux derniers niveaux de performance assurent la sécurité des occupants.

	Niveaux de performance sismique					
	Opérationnalité totale	**Occupation immédiate**	**Sécurité des occupants**	**Prévention de l'effondrement**		Légende
Fréquent (43 ans)	●	○	○	○	○	Performance inacceptable
Occasionnel (72 ans)	◆	●	○	○	●	Objectif de sécurité minimale
Rare (475 ans)	▲	◆	●	○	◆	Objectif de sécurité essentielle
Très rare (949 ans)		▲	◆	●	▲	Objectif de sécurité critique

Figure 1.4 Objectifs de performance sismique pour les bâtiments
Adaptée de Vision 2000 Committee (1995)

1.3.2 Approches NEHRP - FEMA

En 1997, le *National Earthquake Hazards Reduction Program* (NEHRP) publie le document FEMA 273 qui modifie légèrement le diagramme proposé par SEAOC. Quatre objectifs généraux de performance sont retenus: 1) l'opérationnalité, 2) l'occupation immédiate, 3) la sécurité des occupants et 4) la prévention de l'effondrement explicités en termes d'objectifs d'éléments individuels (structure et composants non-structuraux). La performance globale du bâtiment dépend d'une combinaison des déformations de la structure, des dommages enregistrés aux composants non-structuraux ainsi que des conséquences de ces dommages

sur les systèmes opérationnels des bâtiments. Le niveau de conformité est atteint lorsque l'analyse structurale ou non-structurale indique des déformations n'excédant pas les limites imposées. Pour les deux premiers niveaux (opérationnalité et occupation immédiate), le bâtiment se déforme dans le domaine élastique puisqu'aucune déformation résiduelle n'est acceptée.

La Figure 1.5 est la version améliorée présentée dans les rapports FEMA 356 et 396 (FEMA 2000; 2003) qui traitent respectivement des bâtiments à usage normal et des hôpitaux. Le changement apporté par cette version est la prise en compte d'un aléa sismique plus élevé relié à l'objectif de prévention de l'effondrement (ou objectif de sécurité de base) soit 2% en 50 ans (1/2500 ans) au lieu de 10% en 50 ans (1/475 ans) retenu dans la version de 1997. Ces objectifs s'appliquent également aux bâtiments existants. Le FEMA pose alors certaines limites dans les objectifs de réhabilitation en utilisant un aléa sismique plus faible ou un niveau de performance plus faible que pour la conception des bâtiments.

Dans le cas des hôpitaux, le manuel FEMA-396 propose, sur la base des mêmes critères de performance, une réhabilitation incrémentale afin de garantir la faisabilité financière et technique du rehaussement parasismique. L'objectif est d'identifier les espaces les plus à risque et d'échelonner les travaux en fonction de leur criticité. Le FEMA-396 fournit aux organisations de l'information et des outils nécessaires pour la prise de décisions critiques, la planification du processus de réduction des risques sismiques et la mise en œuvre incrémentale efficiente de la réhabilitation des bâtiments jugés à risque.

Le cadre établi par l'introduction des notions de performance amena le développement de méthodes empiriques basées sur les données collectées sur environ un quart de siècle. Celles-ci répondent à un besoin de simulation, de validation et d'application de nouvelles approches, mais aussi de classement des informations disponibles. Le jugement d'experts est appelé à jouer un rôle primordial.

Dommage général	Niveaux de performance cibles des bâtiments Performance supérieure Moins de perte Faible performance Plus de perte			
	Opérationnalité **Niveau (1-A)** **Très léger**	**Occupation immédiate** **Niveau (1-B)** **Léger**	**Sécurité des occupants** **Niveau (3-C)** **Modéré**	**Prévention de l'effondrement** **Niveau (5-E)** **Grave**
Général	Pas de déplacements inter-étage permanents. La structure conserve sensiblement sa résistance et sa rigidité originales. Fissuration mineure des façades, des cloisons et des plafonds ainsi que des éléments structuraux. Tous les systèmes importants pour les opérations normales sont fonctionnels.	Pas de déplacements inter-étage permanents. La structure conserve sensiblement sa résistance et sa rigidité originales. Fissuration mineure des façades, des cloisons et des plafonds ainsi que des éléments structuraux. Les ascenseurs peuvent redémarrer. Le système de protection contre les incendies est opérationnel.	Rigidité et résistance existantes au niveau des étages. Les éléments porteurs jouent leur fonction. Aucune défaillance hors-plan des murs ou de basculement de parapets. Déplacements inter-étage permanents observés. Dommages à des partitions. Les réparations peuvent être coûteuses.	Rigidité et résistance résiduelles faibles mais existence de capacité portante des colonnes et des murs. Déplacements inter-étage permanents importants. Certaines issues bloquées. Chute ou fissuration importante des remplissages et des parapets non contreventés. Le bâtiment est près de s'effondrer.
Composants non-structuraux	Des dommages négligeables surviennent. Électricité et autres utilitaires sont disponibles à partir de sources alternatives éventuellement.	Équipement et contenu généralement sûrs, mais peut-être pas fonctionnel en raison d'une panne mécanique ou d'un manque de services publics.	Risque de chute atténué, mais de nombreux systèmes architecturaux, mécaniques et électriques sont endommagés.	Dégâts considérables.
Comparaison avec les performances de bâtiments conçus en vertu des dispositions NEHRP	Beaucoup moins de dommages et risque plus faible.	Moins de dommages et risque plus faible.	Un peu plus de dommages et risque légèrement plus élevé.	Significativement plus de dégâts et de plus grands risques.

Figure 1.5 Matrice de contrôle du dommage et niveau de performance des bâtiments
Adaptée de FEMA (2003, p. B.8)

1.3.3 Données empiriques et développement de méthodes d'évaluation de la fonctionnalité post-sismique

Ce paragraphe présente brièvement deux outils prédictifs de la fonctionnalité de bâtiments hospitaliers et ou généraux sous l'angle de la performance des composants non-structuraux. Nous avons fait ressortir l'information sur le niveau de dommage qui affecte la fonctionnalité post-sismique des hôpitaux. De manière générale, il existe encore de nombreux défis sur la façon d'utiliser ces mesures dans un contexte différent notamment comme outil d'aide à la prise de décision ou le développement de stratégies de mitigation. Les lacunes des méthodes empiriques, souvent soulignées par les auteurs, touchent la difficulté de collecter des informations exhaustives mais aussi parce que celles-ci ne reflètent pas une évolution dans le temps.

A. Base de données sur les composants non-structuraux et effets sur la fonctionnalité (Taghavi et Miranda 2003)

C'est une base de données qui présente une réorganisation des informations existantes sur la performance des composants non-structuraux et constitue une mise à jour des travaux de Soong et al. (1999). Elle peut fournir une information ciblée sur un composant non-structural (de niveau 2 ou composant unique), d'un ensemble de composants (de niveau 1) et d'un système tels que définis par les auteurs; constituant ainsi une arborescence. Environ 4000 composants ont été répertoriés à partir de données collectées lors de 40 séismes.

De manière plus spécifique, la base de données contient des informations sur la fragilité sismique des composants non-structuraux, les coûts associés aux pertes et réparations et une taxonomie des composants. À cette étape de la revue de la littérature c'est ce dernier aspect qui revêt le plus d'importance. Le point de départ du classement est la définition de deux notions essentielles : le niveau de dommage qui limite le fonctionnement d'un composant et la conséquence de ce dommage mesurée sur le composant de niveau 1 et le système. Il est alors possible de suivre la progression du dommage (spécifié sur trois niveaux) dans un système et son effet sur la fonctionnalité du bâtiment. Par exemple, dans le cas d'un système

de gicleurs de protection incendie, la rupture des dispositifs de retenue constitue le dommage de niveau 1; la rupture des conduits, le dommage de niveau 2; et la perte des têtes de gicleurs, le niveau 3. Les corrélations présentées montrent que la fonctionnalité du bâtiment logeant les composants peut être affectée par des dommages de niveaux 2 et 3 selon l'importance de l'élément analysé dans le fonctionnement du bâtiment.

B. Méthode empirique (Yavari et al. 2010)

À partir de données historiques et de travaux précédents dont ceux de Holmes et Burkett (2006) et le FEMA 396, Yavari et al. (2010) développent une méthode permettant d'anticiper la fonctionnalité post-sismique des hôpitaux californiens au niveau régional. Quatre niveaux de performance sont définis et présentés à la Figure 1.6 : 1) fonctionnalité complète, 2) fonctionnalité, 3) fonctionnalité affectée et, 4) aucune fonctionnalité.

Systèmes	Niveaux de performance			
	1	2	3	4
Structural (S) Non-structural (NS) Infrastructures de services essentiels (L)	Dommage limité ou aucun dommage	Dommage mineur n'affectant pas l'exploitation des installations	Dommages affectant l'exploitation des installations	Dommages importants exigeant l'évacuation immédiate
Personnel (P)	Disponibilité totale	Peu sont disponibles	La plupart ne sont pas disponibles	Le personnel n'est pas disponible

Figure 1.6 Niveaux de performance sismique proposés pour les hôpitaux
Adaptée de Yavari et al. (2010, p. 878)

La fonctionnalité des hôpitaux dépend alors des différentes combinaisons possibles en considérant d'abord les données exhaustives relatives au comportement de la structure (S) et des composants non-structuraux (NS), puis l'effet des dommages observés sur les réseaux externes et internes d'alimentation en eau et électricité (L) et de l'indisponibilité du personnel (P). Un code (par exemple S1-NS1 + L1, P1) indique un dommage limité sur la

structure, les composants non-structuraux et les infrastructures de services essentiels (L) et la disponibilité du personnel (P). Cette combinaison reflète une fonctionnalité complète de l'hôpital.

Les dommages observés lors des cinq séismes majeurs de la Californie ont pu ainsi être réorganisés sous forme de niveau de performance atteint. L'assignation des bâtiments à chacune de ces classes est faite selon une approche empirique (corrélation des données observées lors des séismes passés à l'échelle mondiale), le jugement d'experts et les caractéristiques du bâtiment (âge, vulnérabilité). La Figure 1.7 illustre la performance des composants non-structuraux en fonction de celle de la structure de bâtiments pré (a) et post-code (b) lors du séisme de Northridge. Pour les bâtiments pré-code (a), on note les forts pourcentages de dommages de niveaux 3 et 4, particulièrement la combinaison (S4-NS4) critique en ce qui concerne la sécurité des occupants. Les bâtiments construits après 1970 (b) concentrent les dommages couplés aux trois premiers niveaux de performance, alors que la probabilité d'avoir la combinaison S1-NS4 est faible mais existe.

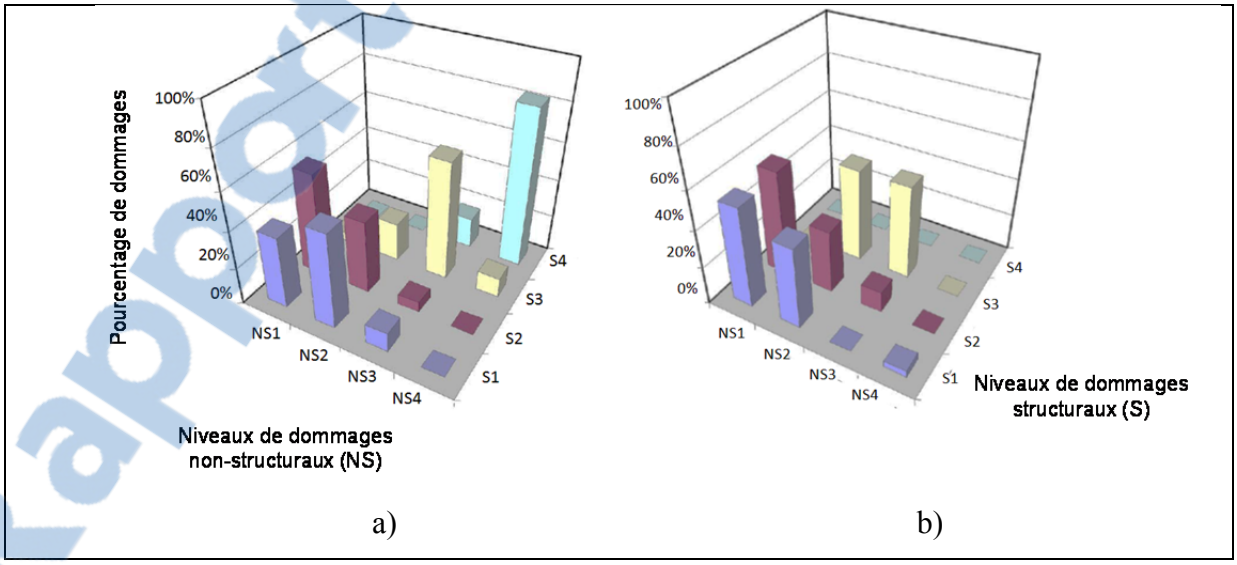


Figure 1.7 Niveaux de performance atteints lors du séisme de Northridge:
a) bâtiment pré-code, b) bâtiments construits après 1970
Adaptée de Yavari et al. (2010, pp. 883, 884)

Rapport-Gratuit.com

Par ailleurs, en considérant l'ensemble des combinaisons possibles, on constate que :

- le couple (S1 – NS2) n'affecte la fonctionnalité que lorsque combiné à des niveaux 1 et 2 pour les SIE et le personnel;
- toutes les combinaisons basées sur le couple (S1-NS3) affectent en partie ou en totalité la fonctionnalité de l'hôpital;
- toutes les combinaisons de niveau NS1, 2 et 3 associées aux dommages étendus de la structure (S4) se révèlent impossibles.

Cette méthode empirique intègre le comportement de la structure, des CFO et des ISE. Les résultats de ces données constituent une base d'information importante pour identifier les interactions entre les systèmes et développer une méthode d'évaluation rationnelle de la fonctionnalité.

1.4 Dommages enregistrés et évolution des normes parasismiques canadiennes

Malgré un aléa sismique élevé de la côte Ouest du Canada, comparable à celui de la Californie, les dommages récents sur les bâtiments d'hôpitaux sont limités à ceux observés lors du séisme de Saguenay (25 novembre 1988, M_w5,9) (Hanna 1995). On fait ici abstraction des dommages enregistrés lors de séismes historiques (les plus forts) que le pays a connu (Gouin 2001). L'évolution du code canadien s'est donc faite essentiellement sur la base de la recherche expérimentale et de l'intégration des leçons apprises des expériences californienne et mondiale (NRC-CNRC 2010). L'intégration des effets de site dans le calcul des structures construites sur les sols meubles, la considération d'un séisme de conception plus sévère et la recommandation d'un niveau de performance plus élevée pour les bâtiments de protection civile sont des exemples significatifs. Les paragraphes suivants décrivent les éléments de vulnérabilité sismique des hôpitaux existants au Québec sous les aspects des dommages enregistrés et des considérations des normes parasismiques canadiennes inscrites dans les éditions 2005 et 2010 du CNB.

1.4.1 Dommages enregistrés et vulnérabilité sismique des bâtiments hospitaliers existants au Québec

Le séisme du Saguenay de 1988 représente l'un des plus importants à survenir au cours des dernières décennies dans l'est de l'Amérique du Nord. Il a été ressenti sur près de 1000 km de l'épicentre (Cajka et Drysdale 1996). Cette importante propagation des ondes sismiques est une caractéristique fondamentale des séismes de l'Est du Canada en plus des hautes fréquences enregistrées à proximité de l'épicentre (Lamontagne 2002). Les dommages relevés sur les hôpitaux sont résumés au Tableau 1.3.

Tableau 1.3 Comportement des hôpitaux lors du séisme de Saguenay 1988
Adapté de Mitchell et al. (1990a); Paultre et al. (1993)

Date Lieu	**Données sismiques**	**Comportement des hôpitaux**
25 novembre1988 Saguenay	Magnitude $M_w = 5,9$ Accélération Hg = 0,156g Vg = 0,102g Intensité (Mercali Modifiée[2]) I (MMI) = VII	Dommages mineurs observés pour les hôpitaux dans la région épicentrale. Dommages non-structuraux significatifs pour deux hôpitaux de la ville de Québec (150 km de l'épicentre, Hg=0,05g) dus aux dépôts alluvionnaires: - Fissuration majeure des murs extérieurs en MNA parallèles à la direction faible du bâtiment - Effondrement de deux cheminées en maçonnerie - Plâtre fissuré dans les cages d'ascenseur et les corridors - Déraillement de la cage d'ascenseur (manque de rigidité des rails) - Rupture en cisaillement de la poutre en béton supportant les rails d'un ascenseur (survenue lors de la remise en marche de l'ascenseur) - Rupture en cisaillement des murs en MNA entre les ouvertures - Arrêt de radiateurs du système de chauffage - Perte de courant pendant deux heures (dysfonctionnement de la génératrice de secours)

[2] L'échelle d'intensité sismique Mercali modifiée (MMI) est fonction de la distance épicentrale et de la qualité des constructions. Elle compte 12 niveaux de dommages (I à XII) dont le sixième (VI) est associé au seuil de dommages aux réseaux d'alimentation (eau, gaz, etc) et aux composants non-structuraux comme les cheminées. Le PGA associé au niveau VI est compris entre 0,03g et 0,07g (Filiatrault et al. 2013; Lamontagne 2002).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Trente-six hôpitaux ont été affectés sur une distance de près de 350 km de l'épicentre (Paultre et al. 1993). Bien que les dommages soient limités, les conclusions des rapports des équipes de visite sont éloquentes quant à l'évaluation des « critères de performance en service » des bâtiments hospitaliers (Mitchell et al. 1990a; Paultre et al. 1993). On note : 1) la piètre performance de la maçonnerie non armée (MNA), 2) le danger relié à la présence excessive des murs en MNA, 3) la vulnérabilité des systèmes opérationnels de services essentiels (communication, conduites d'eau), 4) le potentiel accru de dommages sur les couches argileuses (jusqu'à 350km) ou alluvionnaires (jusqu'à 150km) et 5) la gestion minimale des opérations de sauvetage et d'évacuation. Lamontagne (2002) précise que 95% des dommages enregistrés lors du séisme de Saguenay sont associés à des sols déformables. Deux hôpitaux ont subi des dommages plus importants que ceux situés à proximité de l'épicentre et pour des valeurs d'accélération au sol de 0,05g comparé à un H_g=0,16g correpondant au mouvement de calcul au sol (MCS) pour une occurrence de 10% en 50 ans.

Des études plus récentes ont été réalisées sur la capacité et la réhabilitation parasismique de l'hôpital de la Malbaie qui porte encore les traces des dommages datant de 1988, et de celui de Baie Saint-Paul (Tecsult et al. 2010). Ces villes sont situées dans la zone sismique de Charlevoix-Kamouraska dont l'aléa sismique est le plus élevé du Québec. Ces études ont été complétées par une étude géotechnique qui a révélé la présence de sols potentiellement liquéfiables à la Malbaie et la présence d'épaisses couches d'argile au site de Baie-Saint-Paul.

> « … les deux édifices étudiés présentent une précarité que nous qualifions d'extrême en regard de leur capacité à survivre à un séisme majeur lorsque l'on considère les barèmes d'évaluation les plus récents. Pour les deux édifices étudiés, le comportement le plus probable face à un séisme majeur est l'effondrement de la structure. » (Tecsult et al. 2010, p. 22)

Compte tenu de l'importance des coûts associés à la réhabilitation parasismique du centre hospitalier de la Malbaie et l'incertitude du comportement de celui-ci, la firme d'étude a conclu que « le bâtiment n'est pas techniquement et économiquement réhabilitable ». Les

conclusions concernant le second centre hospitalier sont plus positives et des mesures de mise en conformité sismique ont été recommandées.

Suite au séisme de Loma Prieta, Mitchell et al. (1990b) ont commenté les dommages répertoriés du point de vue des différentes normes canadiennes existantes de l'époque : le code national du bâtiment de 1990, les standards relatifs au béton (1984) et à l'acier (1989) et ont fait ressortir une certaine inquiétude sur la vulnérabilité sismique des bâtiments en maçonnerie non armée logeant des écoles, des hôpitaux et d'autres institutions publiques importantes. Ces constats ont amené des considérations parasismiques dans le code canadien en ce qui concerne la prise en compte des phénomènes d'amplification dans le calcul des structures. L'est du Canada a connu de nombreux épisodes sismiques significatifs de magnitude comprise entre M_w5,5 et M_w7, sans dommages importants, mais le risque sismique est toutefois bien présent compte tenu de l'âge du parc immobilier et l'expansion des villes dans les bassins alluvionnaires (Lamontagne 2002).

1.4.2 Prescriptions actuelles du Code national du bâtiment (CNB 2010)

Des études menées par Chéry (2005), Foo et al. (2001) et Mitchell et al. (2010), entre autres, présentent de manière exhaustive l'évolution des prescriptions sismiques du CNB depuis sa première édition en 1941 (*Voir* Tableau-A II-1 en Annexe II, p.209). Cette section met l'accent sur les prescriptions relatives aux hôpitaux et aux bâtiments existants des éditions 2005 et 2010 (IRC-CNRC 2010a). On les retrouve disséminées dans le CNB au fil des changements apportés à la conception de bâtiments neufs[3]. Les concepts développés peuvent être utilisés pour l'évaluation des bâtiments existants, sujet de la thèse. Le recours aux modifications provinciales du Code de construction du Québec (IRC-CNRC-RBQ 2008) permet de compléter l'information sur les dispositions légales.

---

[3] Les hôpitaux font aussi l'objet d'une norme spécifique CSA Z8000-11 qui concerne la planification, la conception et la construction de nouvelles installations. Elle couvre également des aspects opérationnels : l'accessibilité, la gestion des urgences, la sécurité, la sûreté, le contrôle des infections et la pérennité des installations.

L'édition 2010 du CNB est claire sur le niveau de performance sismique attendue des bâtiments de protection civile : « l'objectif de performance attendue en est un d'occupation immédiate » lorsqu'ils sont soumis aux secousses d'un séisme de conception ou mouvement de calcul au sol (MCS). Celui-ci correspond à un aléa sismique d'occurrence de 2% en 50 ans rehaussé en 2005 et confirmé dans la version en cours. On peut alors s'attendre à une fonctionnalité complète pour des secousses faibles à modérées jusqu'à une occurrence de 10% en 50 ans puisque le CNB prescrit dans ce cas des dommages limités aux bâtiments d'importance normal. La matrice des niveaux de performance pour l'évaluation du risque peut être implicitement construite en se basant sur les objectifs minimaux requis pour les bâtiments d'importance normale (sécurité des occupants) et ceux classés protection civile (*Voir* Figure 1.8). On retient un modèle à trois niveaux couramment utilisé, en plus de correspondre au format retenu dans la norme CAN/CSA-S832-14 « *Seismic risk reduction of operational and functional components (OFCs) of buildings* » (CSA 2014). Les bâtiments de protection civile répondent à un objectif de sécurité critique contre un objectif de sécurité minimal pour les bâtiments à usage normal.

Niveaux de performance					
	Fonctionnalité	**Occupation immédiate**	**Sécurité des occupants**		Légende
Fréquent (40% en 50 ans)	●				
Occasionnel (10% en 50 ans)	▲	●		●	Objectif de sécurité minimale
Rare (2% en 50 ans)		▲	●	▲	Objectif de sécurité critique

Figure 1.8 Matrice des niveaux de performance attendus des hôpitaux de Montréal

Pour atteindre l'objectif d'occupation immédiate, le CNB 2010 recommande une démarche sur l'ensemble des composants structuraux et non-structuraux et leurs interfaces afin de tenir compte de la sécurité des personnes. Cette vue d'ensemble constitue une modification urgente du code puisque le libellé initial laissait croire que seule une action sur la structure des bâtiments de protection civile suffisait à remplir les conditions de fonctionnalité. L'édition de 2010 confirme ainsi les prescrits de sa version précédente sur la vérification de

la capacité opérationnelle des bâtiments de protection civile. Les composants non-structuraux doivent satisfaire aux conditions de l'alinéa 4.1.8.18. du code et à la norme CAN/CSA-S832-14 qui offre une démarche unique quel que soit le composant (CSA 2014).

En ce qui concerne les bâtiments de protection civile, le CNB exige que leur structure conserve la plus grande partie de sa résistance et de sa rigidité initiales. Ces restrictions sont spécifiées dans la méthode statique équivalente basée sur le calcul du cisaillement maximal à la base *V* tel qu'illustré à la Figure 1.9. Dans laquelle :

V_E : est le cisaillement élastique à la base, si la structure reste dans le domaine élastique

$S(T_a)$: l'accélération spectrale correspondant à la période naturelle T_a

M_v : un facteur multiplicateur représentant l'effet des modes supérieurs du bâtiment

W : le poids du bâtiment

I_E : le facteur d'importance sismique du bâtiment

R_d : le coefficient de ductilité

R_0 : le coefficient de sur-résistance

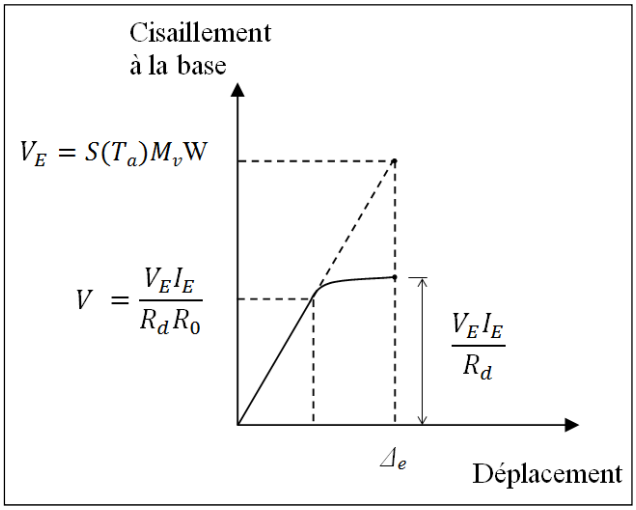


Figure 1.9 Calcul du cisaillement à la base V_E

La méthode statique équivalente repose sur le principe général que les structures peuvent subir des dommages sans s'effondrer puisqu'elles sont conçues pour un V inférieur à V_E qui permet une réponse élastique. Les valeurs attribuées aux paramètres de calcul ont évolué dans le temps afin de mieux représenter la réponse probable du bâtiment. Cette méthode peut être appliquée selon des critères précis de régularité de la structure et de sismicité locale nonobstant l'utilisation de la méthode d'analyse dynamique. Les restrictions sont les suivantes :

1. Le CNB spécifie un coefficient d'amplification des charges sismiques de I_E=1,5 dans le calcul du cisaillement à la base et maintient la limite des déplacements inter-étage à 0,01h_s imposée en 1995, contre 0,025h_s pour les autres bâtiments, h_s étant la hauteur de l'étage. Cette limite de glissement, en plus d'être comparable au niveau de performance opérationnelle prescrit par Vision 2000 Committee (1995), constitue une restriction plus sévère. En effet, le déplacement est calculé pour un aléa plus élevé et en fonction d'un facteur réducteur $R_d R_0 / I_E$ plutôt que du coefficient R lorsqu'on compare les équations de calcul du cisaillement à la base des versions 1995, équation (1.3), et 2010, équation (1.4). Les paramètres U (valeur fixe de 0,6) et K (variant entre 0,7 et 2) représentent des facteurs de comportement et S, l'accélération spectrale fonction de la période du bâtiment.

$$V = \frac{UvSKIFW}{R} \tag{1.3}$$

$$V = \frac{S(T_a)M_v I_E W}{R_d R_0} \tag{1.4}$$

2. L'alinéa 4.1.8.10 du CNB 2010 impose des restrictions au système de résistance aux forces sismiques (SFRS). Il interdit la plupart des irrégularités géométriques et structurales; la variation de la rigidité ou la présence d'étage faible étant susceptibles de favoriser des dommages permanents. Par ailleurs, le coefficient de modification reliée à la ductilité R_d doit être pris minimalement égal à 2 de manière à limiter le déplacement et

la formation de rotules plastiques. Cette valeur permet alors de considérer la limite supérieure du cisaillement à la base correspondant à l'équation (1.5) où M_v est égal à 1, pour les structures rigides (période courte).

$$V \leq \frac{{}^{2}/_{3}\, S(0{,}2) I_E W}{R_d R_0} \tag{1.5}$$

Le commentaire L, relatif aux bâtiments existants, reconnait les difficultés d'appliquer les nouvelles exigences parasismiques à ces structures. Pour les surmonter, l'évaluateur peut se référer aux Lignes directrices pour l'évaluation sismique des bâtiments existants (Rainer et al. 1992), présenté au paragraphe 2.4.1, ou encore celles de NEHRP 1997 (FEMA 273 et 274). Si ces deux méthodes permettent d'établir la priorité d'intervention, il faut toutefois se référer au CNB pour établir le niveau de rehaussement parasismique obligatoire. Dans ce contexte, on se bute à deux recommandations contradictoires dans les codes de construction en vigueur au Québec. Alors que le CNB 2010 (commentaire L) exige que les charges spécifiées dans la partie 4.1 s'appliquent dans leur globalité pour les bâtiments de protection civile; dans sa section 10, le Code de construction du Québec (CCQ) fixe le rehaussement à 60% du niveau prescrit. L'exigence de rehaussement s'applique alors à tout le bâtiment et non seulement à la partie transformée, qui peut représenter minimalement 25% des aires de plancher faisant l'objet d'un dégarnissage. La clause 10.4.1.3 du CCQ est spécifiquement la suivante :

> 1a) La transformation d'un bâtiment ne doit pas diminuer sa capacité à résister aux charges sismiques;
> 1b) La capacité à résister aux charges sismiques doit être rehaussée au minimum à 60% du niveau de protection sismique prescrit par la Partie 4 si la transformation a pour conséquence l'une des situations suivantes :
> i) dans le cas d'un bâtiment de protection civile, plus de 25% de l'ensemble des aires de plancher fait l'objet d'un dégarnissage;
> ii) le système de résistance aux charges latérales est modifié par la transformation;
> iii) la masse du bâtiment est accrue de plus de 5% (IRC-CNRC-RBQ 2008).

Le concepteur pourra juger de la pertinence du rehaussement sismique selon les caractéristiques particulières du projet de manière à respecter les lois en vigueur. Les exigences concernant l'ancrage des CFO susceptibles d'entraver la fonctionnalité du bâtiment sont par contre les mêmes.

1.4.3 Considérations sismiques pour les composants non-structuraux, Norme CAN/CSA-S832-14

La norme CAN/CSA-S832-14 couvre l'ensemble des provisions sismiques nécessaires à l'évaluation des risques associés aux CFO dans les bâtiments neufs et existants. Elle apporte une réponse concrète à : 1) la définition d'objectifs de performance : fonctionnalité, usage immédiat et continu et sécurité des occupants, 2) l'identification des CFO et des systèmes critiques selon les objectifs de performance et 3) l'évaluation du risque par une méthode paramétrique qui sera présentée au paragraphe 2.4.1.

La gestion courante des opérations hospitalières requiert le fonctionnement de certains appareils et systèmes afin de garantir le flux des patients et la continuité des soins dans un cadre sécuritaire. La norme recommande d'emblée que ceux-ci fonctionnent sans interruption en cas de séisme. Il s'agit :

- des appareils de sauvetage;
- des systèmes de maintien des fonctions vitales;
- des systèmes de ventilation dans les aires exposées aux polluants aérogènes;
- et de l'archivage des dossiers médicaux afin d'en assurer l'accès, la conservation et la confidentialité.

À ce premier niveau de criticité s'ajoute l'obligation d'évaluer d'autres CFO et systèmes critiques classés selon le niveau de performance recherché (*Voir* Tableau 1.4).

Tableau 1.4 Priorisation des CFO et des services d'infrastructures essentielles en fonction de la performance attendue
Adapté de Cappai et al. (2010)

Sécurité des occupants (SO)	**Exigence de fonctionnalité (F)**
- Contrôle des mouvements des CFO qui peuvent causer directement des blessures graves, la fuite de matières dangereuses, des explosions, ou le déclenchement d'incendies - Fonctionnalité du système de protection incendie - Dégagement des voies d'entrée et d'issue.	- Alimentation électrique de secours - Fonctionnalité du système de protection incendie (alarmes, extincteurs, gicleurs et leurs conduites d'eau) - Alimentation en gaz naturel (le cas échéant) - Alimentation en eau - Stockage et distribution des gaz médicaux - Stockage et évacuation des déchets - Systèmes informatiques - Interfaces avec les services d'infrastructures essentielles (eau, électricité, gaz naturel, télécommunications, égoûts)

La sécurité des occupants est garantie par : 1) le contrôle des mouvements des CFO qui peuvent causer des blessures graves ou limiter l'évacuation du bâtiment (ex. plafonds suspendus, ou CFO élancé, marquises), 2) le déversement de produits inflammables et 3) la réponse du système d'incendie afin de limiter les dommages éventuels à la structure en plus de permettre l'évacuation des occupants. Le fonctionnement de ce système dans sa globalité (alarme et réponse) est aussi requis pour la fonctionnalité complète. L'atteinte de ce niveau va nécessiter le fonctionnement d'un nombre plus élevé de systèmes. Il est aussi possible de considérer implicitement les mêmes systèmes critiques avec un aléa sismique plus élevé dans l'évaluation de la performance « usage immédiat et continu ».

1.5 Synthèse de la revue de littérature – Objectif 1 : établir les objectifs de performance d'un centre hospitalier

Dans ce chapitre, nous avons passé succinctement en revue les limites des normes en vigueur en ce qui concerne leur application aux bâtiments d'hôpitaux existants. En Californie, les

Rapport-Gratuit.com

prescriptions sismiques et les méthodes de conception basée sur la performance se sont développées au fil des dommages enregistrés. Il était devenu essentiel de:

- comprendre les phénomènes de perte de fonctionnalité des bâtiments hospitaliers puisqu'elle est reliée à des dommages limités de la structure;
- compiler les données disponibles en identifiant les relations entre la vulnérabilité sismique des CFO et de la structure lorsque qu'il est possible de le faire;
- bâtir un cadre qui facilite le développement de méthodes analytiques. Celles-ci sont caractérisées par des échelles différentes de dommages et basées principalement sur les observations;
- développer un cadre normatif strict et adapté aux bâtiments d'hôpitaux.

Au Canada, c'est une évolution significative des exigences de conception parasismique qui est enclenchée depuis 2005, avec notamment la prise les nouvelles mesures concernant la structure et les CFO :

1. Au niveau structural, on note la prise en compte dans le calcul du cisaillement à la base des facteurs de ductilité et de sur-résistance R_d et R_0 qui préviennent toute rupture fragile. La dégradation de la résistance et de la rigidité représentées par les facteurs de force a des effets importants sur la fonctionnalité des bâtiments. Ces effets sont reliés à l'allongement de la période et de l'amortissement de la structure du bâtiment augmentant ainsi le risque d'endommagement des composants architecturaux;
2. La norme CAN/CSA-S832-14 représente un guide opérationnel pour les personnes impliquées dans l'évaluation des CFO. Il leur incombe d'apprécier si la norme répond à leurs besoins spécifiques puisqu'on constate des développements technologiques continus et la production de nouveaux appareils.

Avec la définition de la performance attendue de la structure et des CFO, on peut conclure que les normes actuelles donnent un bon point de départ et assez de flexibilité pour développer des méthodes d'évaluation du risque sismique. Celle-ci nécessite une analyse

approfondie de bâtiments individuels. Il est alors essentiel de bien comprendre le comportement des structures existantes potentiellement plus vulnérables et celui des CFO afin de développer les méthodes appropriées d'évaluation du risque sismique et de la fonctionnalité post-sismique.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

CHAPITRE 2

GÉNÉRALISATION DES OBSERVATIONS SUR LES DOMMAGES ET PRINCIPES D'ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ SISMIQUE DES BÂTIMENTS EXISTANTS

Le Chapitre 2 complète l'information sur l'évaluation sismique du bâti et présente les principales méthodes disponibles pour ce niveau d'évaluation. L'accent est porté sur la démonstration des relations entre la performance de la structure et des CFO, ce qui permet d'introduire les notions de systèmes.

Le comportement des structures et des composants non-structuraux des hôpitaux est décrit à partir d'une généralisation des dommages typiques observés et enregistrés sur plus d'un siècle. On verra dans les pages qui suivent que la réponse sismique globale d'une structure implique une grande dépendance au critère de déplacement latéral inter-étage utilisé dans les codes de construction parasismique. Il est alors possible de vérifier la capacité d'une structure existante à résister aux forces sismiques et de déterminer des niveaux de dommage, un fondement de la conception basée sur la performance retenue pour cette thèse.

D'abord, nous traiterons du comportement des composants durant un séisme et dans un second temps des relations entre la performance de la structure et celle des CFO, avec les courbes de capacité et de fragilité. Par la suite, nous traiterons des méthodes d'évaluation sismique des bâtiments et des CFO. Le chapitre se conclut sur une synthèse de la revue de littérature qui permet à terme de compléter l'Objectif 2, à savoir identifier les relations entre la performance des composants.

2.1 Généralisation des dommages et comportement des composants durant un séisme

Des données de dommages compilées depuis près d'un siècle montrent l'importance d'avoir une compatibilité entre les niveaux de performance sismique de la structure et des CFO

quand il s'agit d'évaluer ou de garantir la fonctionnalité post-sismique (*Voir* Tableau 2.1 et Tableau II-A ANNEXE III, p.211).

Tableau 2.1 Comportement des hôpitaux lors de séismes majeurs (2009-2010)
Adapté de EERI (2009; 2010) et NCREE (2010)

Date Lieu	**Données sismiques : Magnitude Accélération Hg/ Vg**	**Comportement des hôpitaux**
30 septembre 2009 Padang, Sumatra occidental	$M_w = 7,5$	Constats faits sur 4 des 9 hôpitaux de la région: Dommages significatifs sur 3 des 4 hôpitaux : - Perte de 60% de la fonctionnalité - Effondrement partiel - Rupture d'étages inférieurs - Rupture de colonnes due aux irrégularités horizontales et verticales - Rupture des joints entre bâtiments
27 février 2010 Chili (région de Bio-Bio)	$M_w = 8,8$ - Hg : 0.14g à 0.65 g - Vg : 0.05g à 0.58g	Normes parasismiques en usage comparables aux normes américaines avec faible application de celles concernant les composants non-structuraux. - 62% des 130 hôpitaux des zones affectées ont subi des dommages non-structuraux nécessitant des réparations - Parmi eux 83% des hôpitaux fermés n'ont subi aucun dommage structural - 4 hôpitaux sont considérés inhabitables, 12 ont perdu 75% de leur fonctionnalité et 8 sont partiellement fonctionnels - Réparations évaluées à 2,8 milliards de dollars US. Les dommages non-structuraux touchent : - les systèmes de communication, d'alimentation en eau et électricité - les ascenseurs - les archives (perte de dossiers des patients) - les plafonds suspendus De faibles dommages structuraux sont relevés sur les bâtiments d'un seul hôpital alors que les hôpitaux d'un étage construits depuis le séisme de 1960 et ceux munis d'isolateurs sismiques ont très bien performés.
4 mars 2010 Taiwan	$M_w = 6,3$	- aucun dommage structural ou dommage mineur - dommages non-structuraux touchant différents systèmes d'alimentation et les gicleurs, court-circuit dans les panneaux électriques causant l'arrêt des ascenseurs, perte de plafonds suspendus.

Au Tableau 2.1, ce sont des cas récents de perte de fonctionnalité en raison de dommages aux composants non-structuraux, au Chili en 2010, alors qu'à Sumatra, les dommages sont principalement structuraux. Dans le deuxième cas, ce sont des bâtiments probablement conçus et construits conformément aux codes antérieurs, pour lesquels on ne s'attend pas à une performance équivalente aux bâtiments neufs.

Les pertes économiques sont également très élevées. Il ressort des travaux de Taghavi et Miranda (2003) que la valeur économique des CFO et le contenu, dans les hôpitaux, constitue 92% des investissements contre des valeurs respectives de 82% et 87% pour les bureaux et hôtels (*Voir* Figure 2.1).

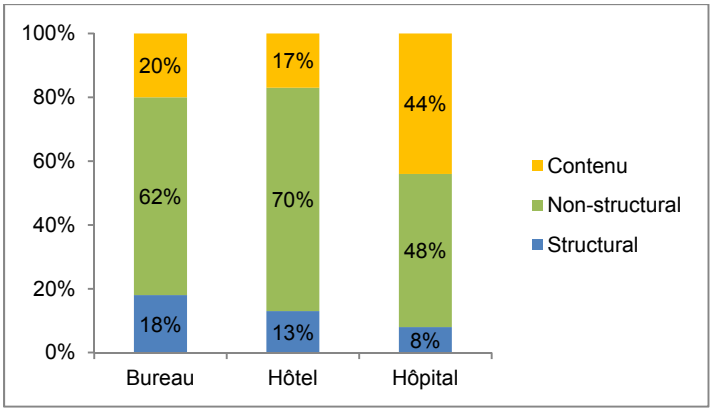


Figure 2.1 Répartition des coûts d'investissement de bâtiments à usage divers
Adaptée de Taghavi et Miranda (2003, p. 64)

De manière générale, les dommages causés aux CFO résultent directement des déplacements relatifs entre les étages causés par les secousses ou encore de l'accélération de la masse des planchers. Tel qu'illustré à la Figure 2.2, on remarque la vulnérabilité des composants architecturaux (a), le comportement de CFO selon la faiblesse de leurs modes de retenue à la charpente (b), et les problèmes d'interface (c) dus au cognement entre bâtiments adjacents par exemple, ou aux mouvements relatifs imposés à des interconnexions rigides. D'où la classification des CFO selon leur sensibilité : à la force ou l'accélération, au déplacement et

déplacement inter-étage. Par conséquent, les dommages courants résultant des séismes consistent :

- au déplacement ou au renversement d'équipements lourds ou de composants élancés insuffisamment attachés, ils peuvent dans ce sens affecter d'autres composants critiques ou encore la structure par effet de martelage;
- en un dommage complet du CFO qui est rendu inopérant;
- au renversement de contenu;
- au balancement et à la chute de composants légers dont : 1) les conduits des systèmes de chauffage, ventilation et conditionnement d'air (CVCA), 2) les luminaires et 3) les panneaux de plafonds suspendus et conséquemment à la rupture de tête de gicleurs libérant de grande quantité d'eau;
- à la rupture des systèmes d'alimentation en eau, électricité et gaz, pouvant causer dans les deux derniers cas des incendies;
- à la fissuration ou à l'effondrement de murs en maçonnerie non armée et le bris de panneaux de verre (dommages dus principalement au mouvement dans le plan).

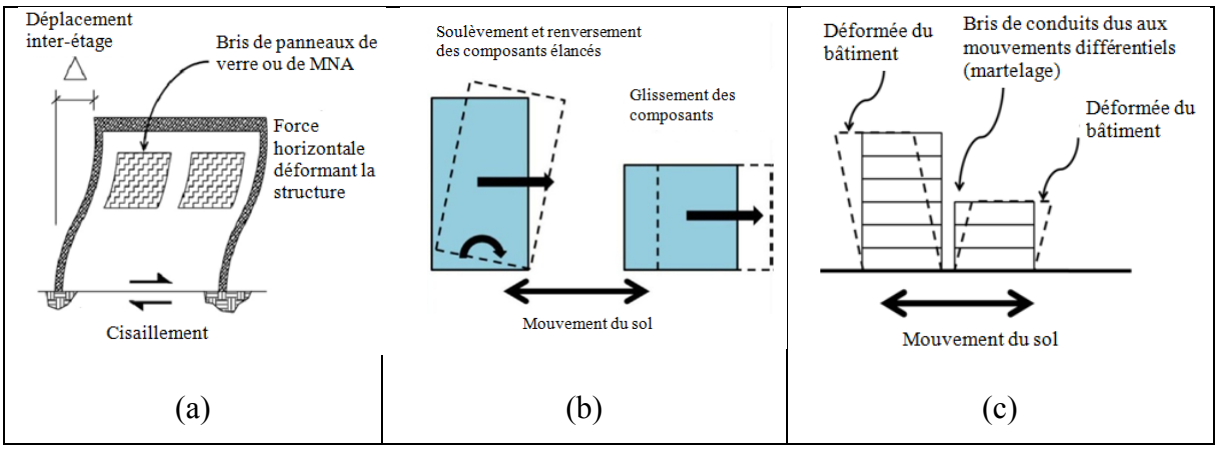


Figure 2.2 Comportement des CFO durant un séisme
Adaptée de FEMA (2011, pp. 2-7 à 2-10)

La performance du CFO et le degré de dommage enregistré vont être fonction des conditions d'attaches du CFO. Comme le montre le Tableau 2.2, on voit l'accroissement de la valeur de

l'accélération à la base du CFO, pouvant causer, dans ce cas, un dommage équivalent à 50% de l'inventaire (Eidinger 2009). Ces valeurs représentent des données d'entrée de fragilité, c'est-à-dire la probabilité pour un CFO d'être endommagé pour une valeur d'accélération critique. Les travaux de McGavin (1981) présentent également un inventaire des CFO et une estimation de la gamme de dommages potentiels compte tenu de l'inadéquation de la protection parasismique ainsi que les conséquences qui y sont reliées. Le concept de fragilité est de plus en plus utilisé en analyse de vulnérabilité sismique et est l'objet de nombreux travaux expérimentaux qui tentent de caractériser les CFO, en particulier ceux retrouvés dans les bâtiments de protection civile (*Voir* Paragraphe 2.3).

Tableau 2.2 Comparaison des valeurs d'accélération causant le dommage selon les conditions d'attache
Adapté de Eidinger (2009)

Composants	**Conditions d'attache/ancrage Accélération à la base du composant (g)**		
Ascenseur	Aucune conformité	Condition générale	Conformité sismique
Accélération critique	0,35	0,40	0,90
Support de communication	Aucun ancrage	Ancrage flexible	Bien ancré
Accélération critique	0,20	1,00	1,50
Équipements mécaniques	Aucun ancrage	Ancrage léger	Bien ancré
Accélération critique	0,60	0,70	2,00

2.2 Courbes de capacité de la structure

L'utilisation à grande échelle des notions de performance dans la conception de nouvelles structures et l'évaluation des structures existantes a bénéficié de l'évolution des procédures d'analyse statique non-linéaire ou analyse *push-over*. Le document FEMA-440 (FEMA 2005) est l'une des principales références en ce qui a trait aux procédures relatives à l'analyse *push-over*. Ces dernières permettent en effet de déterminer les différentes étapes de dégradation d'une structure ou niveaux de dommages en régime post-élastique statique. La charge est monotone et croit progressivement en cohérence avec le comportement modal

dominant de la structure, jusqu'à la rupture. Ce type d'analyse sert à produire les courbes dites de « capacité ».

La Figure 2.3 schématise le processus d'estimation des forces et des déformations inélastiques pour une accélération donnée avec comme intrants au processus : les informations relatives à l'aléa sismique, les effets de site, et le modèle d'analyse non-linéaire. Toutefois plusieurs incertitudes peuvent découler de l'analyse *push-over*; l'accent doit donc être mis sur l'utilisation des données optimales : qualité/réalisme du modèle de la structure, robustesse numérique, caractérisation des matériaux et propriétés, et appréciation de la variabilité des résultats. La qualité des données géotechniques du site de construction est alors essentielle puisque les conditions locales peuvent modifier l'intensité et la signature des ondes sismiques.

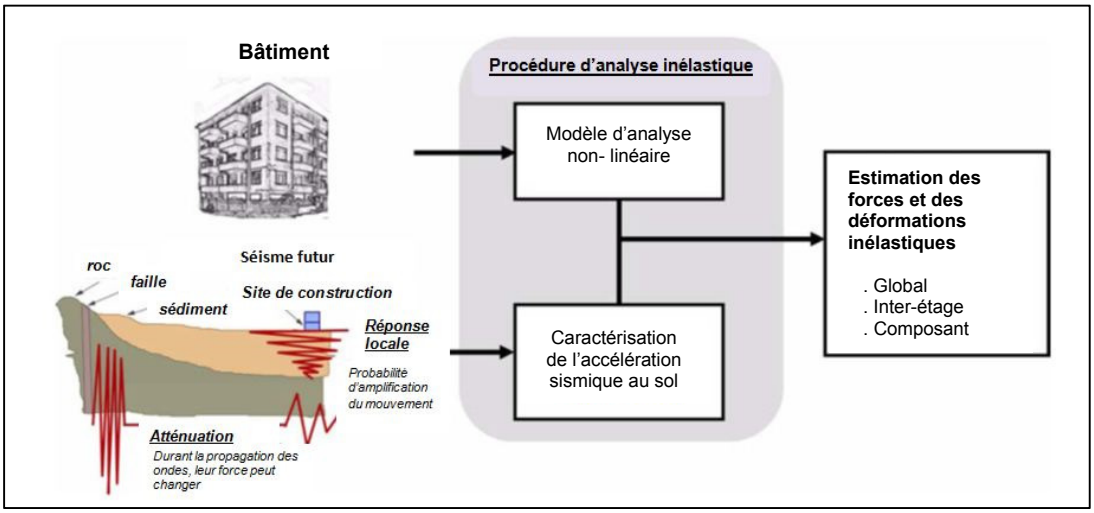


Figure 2.3 Procédures d'estimation des forces et déformations inélastiques pour une accélération donnée
Adaptée de FEMA (2005, p. 2.1)

Les résultats issus de l'analyse peuvent être tracés sous forme de spectre de réponse « accélération spectrale S_a vs déplacement spectral S_d» (ADRS) pour le mode qui domine la réponse sismique. On part alors de l'hypothèse que la déformation maximale (ou globale) d'un système non-linéaire à un DDL dynamique peut être représentée par celle d'un système

équivalent linéaire élastique (ESDOF) dont les paramètres modaux (période effective T_{eff} et amortissement visqueux) sont supérieurs à ceux du système initial. Le déplacement spectral élastique est directement relié à l'accélération spectrale (S_a) par la relation suivante :

$$S_d = \frac{T_{eff}^2}{4\pi^2} S_a \tag{2.1}$$

Le déplacement visé pour le comportement inélastique est calculé en appliquant des coefficients de réduction à l'équation (2.1). La demande sismique (calculée par analyse non-linéaire) ainsi que la courbe de capacité (obtenue par l'analyse *push-over*) de la structure sont converties en format ADRS afin de faciliter la superposition de l'ensemble des courbes comme illustré à la Figure 2.4. Le point d'intersection entre la courbe de capacité et la courbe de demande sismique (ajustée pour un amortissement visqueux équivalent) définit le point de performance du bâtiment pour une période équivalente ($T_e = T_{sécante}$) et permet de prévoir sa réponse aux secousses sismiques. C'est le point de départ de la construction des courbes de fragilité.

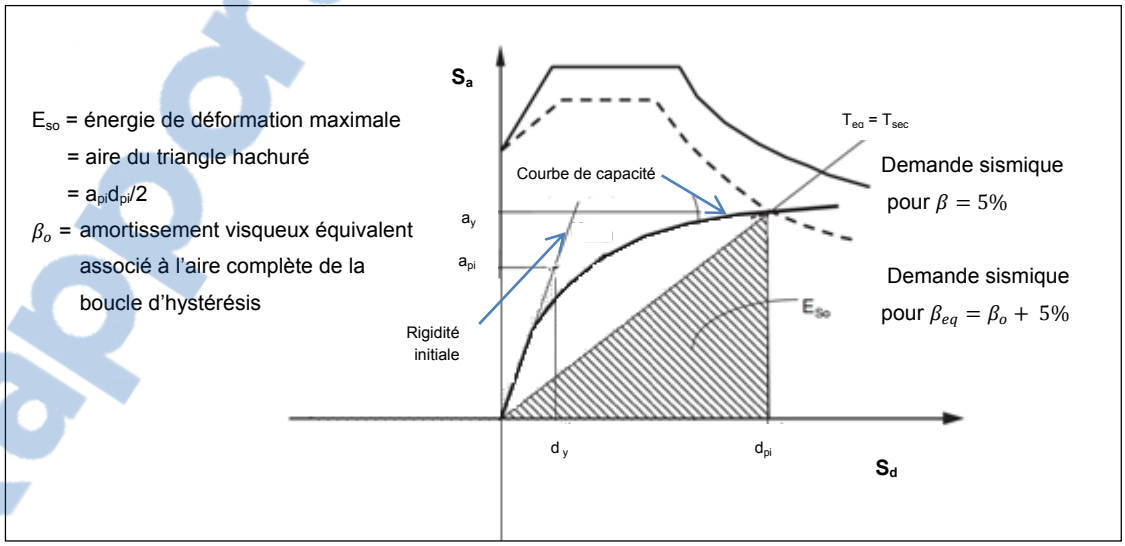


Figure 2.4 Méthode du spectre de capacité
Adaptée de FEMA (2005, p. 2.11)

Rapport-Gratuit.com

Cette procédure s'applique à l'estimation de la demande sismique de systèmes élastiques et inélastiques. Elle donne notamment une bonne estimation des déplacements globaux de la structure au sol et permet d'identifier en fonction de critères de plastification ou de déplacement les différents niveaux de dommages.

Plus spécifiquement, la relation entre les objectifs de performance présentés au chapitre précédent et les dommages est illustrée à la Figure 2.5. À l'instar des matrices de dommages, la structure doit demeurer dans le domaine élastique et ne subir que des dommages réparables pour garantir la fonctionnalité post-sismique. On remarque que des mesures devant garantir la sauvegarde des vies peuvent s'avérer nécessaires avant la fin de la phase de déformation élastique. Bien que l'intégrité structurale définie « *comme l'aptitude de la structure à résister aux défaillances locales en évitant l'effondrement complet* » (IRC-CNRC 2010b, p. A.12) soit encore garantie après la première plastification, la structure entre dans le domaine plastique où des dommages irréparables vont inévitablement diminuer la capacité de réponse des installations hospitalières, compte tenu du risque accru relié aux CFO.

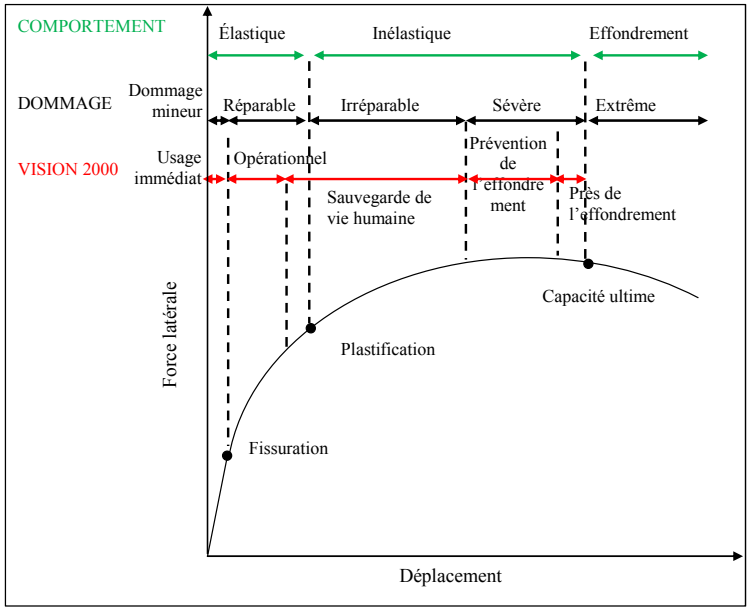


Figure 2.5 Critères typiques de performance, niveaux de dommages et comportements correspondants
Adaptée de Ghobarah (2004, p. 323)

2.3 Courbes de fragilité

De plus en plus d'outils d'évaluation et de prédiction des dommages utilisent les courbes de fragilité. Ces courbes représentent la probabilité de dépasser un état spécifique de dommage (aucun dommage, dommage faible, modéré, étendu ou complet), pour une demande sismique donnée. Cette dernière est exprimée en termes d'intensité sismique indépendante de la structure, PGA ou PGV ou de demande sismique spécifique d'une structure équivalente à la réponse de la structure, telle que l'accélération ou le déplacement spectral, S_a ou S_d, substituables pour les structures élastiques linéaires légèrement amorties (équation 2.1).

La demande sismique est par ailleurs reliée au dommage aux composants non-structuraux selon leur sensibilité (Porter et al. 2002a). L'équation générale est donnée par l'équation (2.2) ; on considère dans ce cas le déplacement spectral (Kircher et al. 1997).

$$P[\,DS\,|S_d] = \phi\left[\frac{1}{\beta_{DS}}\,ln\left(\frac{S_d}{\bar{S}_{d,DS}}\right)\right] \tag{2.2}$$

$$\text{avec} \quad \beta_{DS} = \sqrt{CONV\,(\beta_C, \beta_D)^2 + \beta_T^2}$$

Où :

ϕ : est une fonction de distribution cumulative standard,

S_d : la demande sismique exprimée par le déplacement spectral,

$\bar{S}_{d,DS}$: la valeur médiane de la demande sismique à laquelle le bâtiment atteint le seuil d'endommagement,

β_{DS} : l'écart-type de la fonction lognormale du déplacement spectral.

Les incertitudes associées à cette fonction de probabilité sont de trois ordres : 1) la qualité du modèle de capacité de la structure β_C ou du composant (modélisation, propriétés, amortissement, variation de la période, etc.), 2) la demande sismique ou l'aléa sismique considéré (β_D), et 3) l'indicateur d'endommagement choisi (β_T). Ce dernier correspond à la

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

variabilité dans la définition des seuils d'endommagement, dont le premier endommagement ou « seuil d'intégrité ». La procédure typique comprend la construction d'un modèle de capacité d'un bâtiment ou d'un ensemble de bâtiments et une analyse du risque menant à l'évaluation de la demande sismique. La convolution de ces paramètres d'incertitudes amène à la probabilité d'atteindre ou de dépasser différents niveaux de dommages (Abo El Ezz 2013; Porter et al. 2007).

Une littérature abondante couvre le développement des courbes de fragilité selon des approches empiriques, analytiques ou encore sur la base de données observées (matrices de dommages) ou de jugements d'experts (Chong et Soong 2000; FEMA 2012; Singh et al. 2006a; 2006b). L'intérêt de ces courbes est également dans la définition d'indices de comportement (Karbassi et Nollet 2008). De manière générale, les modèles analytiques, calculés dans le domaine linéaire élastique et parfaitement plastique, sont généralement préférés dans les régions de sismicité faible à modérée où peu de données de dommages sont disponibles. Leur simplicité et leur répétabilité sont les critères principaux de ce choix.

2.3.1 Courbes de fragilité – (Abo El Ezz 2013)

Abo El Ezz (2013) propose une procédure efficace pour évaluer la vulnérabilité des édifices en maçonnerie de pierre du Vieux-Québec en termes d'accélération spectrale indépendante de la structure (PGA). Les courbes de capacité des bâtiments (relation entre la force latérale et le déplacement) sont issues d'un modèle mécanique équivalant (ESDOF, ou oscillateur simple) tel qu'illustré à la Figure 2.6.

Une fonction de probabilité de dommages est également définie à partir de ce modèle, en comparant les déplacements (courbures) aux définitions des seuils d'endommagement pour une série de modèles représentant des structures aux caractéristiques variables. Les fonctions de fragilité obtenues sont entièrement définies par les paramètres Φ et β (médiane et écart-type) et peuvent ensuite être utilisées pour déterminer la probabilité d'endommagement selon

différents scénarios de risque, i.e. pour différents aléas sismiques ou niveau de demande (accélération spectrale).

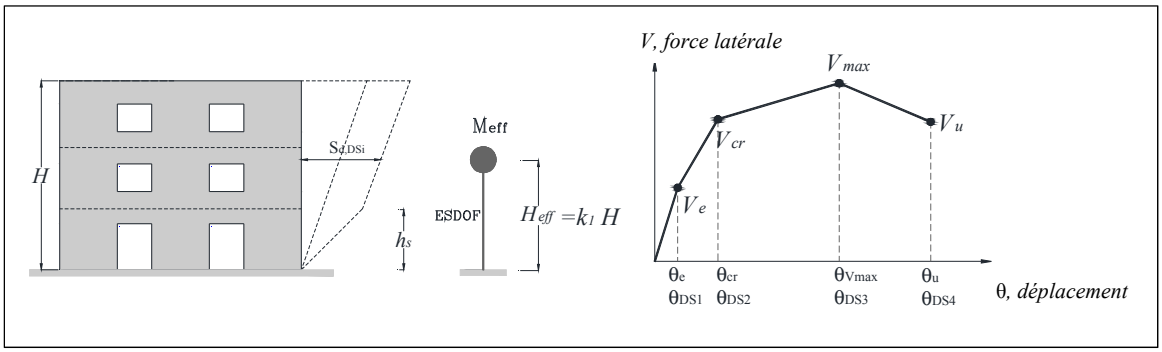


Figure 2.6 Conversion du bâtiment réel en modèle mécanique simplifié pour l'étude des niveaux de dommages
Adaptée de Abo El Ezz (2013, p. 43)

Cette méthode d'analyse de fragilité peut être facilement adaptée à d'autres typologies structurales et aux composants non-structuraux, une fois que le seuil de dommages est établi. Un des aspects spécifiques des travaux d'Abo El Ezz (2013) est l'identification des incertitudes associées à la méthodologie développée par une analyse de sensibilité. En considérant une variation jusqu'à 50% des paramètres considérés autour du modèle de base, on constate une sensibilité de la méthodologie aux paramètres de demande et de dégradation (dans le domaine plastique). L'auteur souligne que cette sensibilité peut être réduite grâce à des données plus complètes sur la structure notamment le dommage moyen et les propriétés mécaniques qui affectent la courbe de capacité.

2.3.2 Courbes de fragilité - HAZUS (FEMA 2012)

L'outil d'étude des risques multi-aléas HAZUS (FEMA 2012) propose des données de fragilité pour une large gamme de structures selon le type structural et l'usage ainsi que pour les CFO (selon leur sensibilité). Ces données peuvent être utilisées pour construire des courbes de fragilité lorsque les données régionales spécifiques sont rares et que les caractéristiques des structures et CFO à l'étude sont comparables à celles définies dans

HAZUS. Cet outil propose, en effet, des valeurs des paramètres de déplacement spectral associées à différents seuils de dommages (DS), $S_{d,DS}$ et l'écart-type associé, β_{DS}. Le seuil de dommage (ou demande sismique) est obtenu à partir d'un modèle simplifié équivalent (oscillateur simple) décrivant le comportement élastique de toute la structure. Cette approche est donc bien adaptée pour quantifier la fonctionnalité post-tremblement de terre de quelques bâtiments et d'un grand nombre d'éléments non-structuraux. Ceux-ci sont classés en deux groupes selon leur sensibilité à l'accélération et au déplacement à l'instar de nombreux travaux retrouvés dans la littérature. C'est un bon compromis puisque les CFO sensibles au déplacement inter-étage peuvent être considérés selon la sensibilité la plus défavorable selon les caractéristiques du bâtiment.

Des informations plus spécifiques sur la fragilité peuvent ensuite être utilisées pour mieux refléter ce niveau de sensibilité, lorsque requis. Malgré les incertitudes reliées aux données de fragilité d'HAZUS, notamment des données conservatrices pour des séismes de magnitude inférieure à M_w6, elles permettent d'estimer rapidement une probabilité de dommage.

2.3.3 Courbes de fragilité – (Porter et al. 2010)

Les travaux de Porter sur les composants non-structuraux sont nombreux et touchent différents aspects de leur vulnérabilité sismique et des incertitudes reliées à la détermination des paramètres des fonctions de fragilité (Porter et al. 2002b; Porter et al. 1993; Porter et al. 2007; Porter et al. 2001). La référence retenue présente des courbes de fragilité pour 15 composants mécaniques, électriques et de plomberie développées à partir d'une base de données sur les dommages observés. Ce sont près de 4000 composants qui y ont été répertoriés entre 1971 et 1993 avec toutefois une information minimale sur le comportement des bâtiments qui les logent. Les intrants au développement des fonctions de fragilité sont l'accélération au site et la performance observée (rupture ou aucun dommage). Les fonctions de fragilité obtenues sont alors définies principalement par les paramètres typiques : la demande sismique (PGA), la médiane Φ et l'écart-type β. Selon le nombre d'observations ou

l'absence de données sur le dommage des CFO, les auteurs ont adapté la méthodologie de développement des valeurs de Φ et β, en considérant par exemple des relations en fonction de la position du composant dans le bâtiment ou de valeurs enregistrées de PGA. Commentant l'utilisation des données empiriques, Eidinger (2009), souligne que les valeurs de PGA à la base du composant sont dans de nombreux cas, une valeur estimée selon la moyenne des accélérations bidirectionnelles au site. Toutefois, tenant compte de l'avancée de la recherche sur le sujet, les valeurs proposées permettent d'établir une estimation moyenne de la probabilité de dommages sur les CFO. La méthodologie constitue une révision des valeurs proposées par Johnson et al. (1999). La Figure 2.7 montre les courbes de fragilité pour les batteries sur support (a) et un échangeur-refroidisseur (b) où les cercles représentent les observations sur le dommage et la courbe la fonction cumulative de distribution lognormale ou la courbe de fragilité du composant.

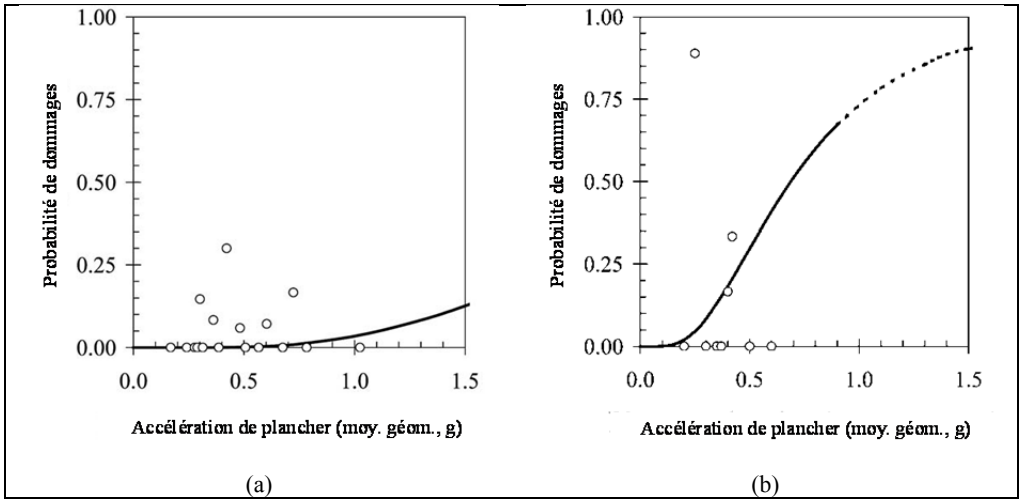


Figure 2.7 Probabilité de dommage de deux composants en fonction de l'accélération de plancher : a) batteries sur support, b) échangeur-refroidisseur (CVCA)
Adaptée de Porter et al. (2010, p. 460)

La valeur maximale de PGA considérée pour l'ensemble des CFO analysés est de 1,5g. La ligne discontinue pour un échangeur-refroidisseur indique qu'il n'est pas approprié de considérer des valeurs supérieures à 1,0g. En référence, une valeur de PGA de 0,05g est généralement considérée comme le seuil de dommage et dans la région épicentrale du séisme

de Northridge des pointes de 0,9g ont été mesurées pour ce composant (Porter et al. 2006). Toutefois, des 15 composants analysés, 11 d'entre eux ont une probabilité de dommage nulle ou inférieure à 5% pour une accélération au plancher de moins 0,5g.

2.3.4 Courbes de fragilité basées sur des études expérimentales

Depuis quelques années, une nouvelle génération de courbes de fragilité expérimentales émerge. Elles ne remplacent pas les méthodes analytiques mais tentent de développer, à partir des résultats de tests expérimentaux, des valeurs objectives indépendantes et plus généralement réutilisables que les valeurs empiriques (Davies et al. 2011; Fathali 2006; Huveners 2009; NEES 2015; Reinhorn et al. 2010). Sur la base des résultats expérimentaux de Huveners (2009), Sassun et al. (2014) ont développé les courbes de fragilité pour des fenêtres en verre sensibles aux distorsions dans leur plan. La probabilité de dommage est exprimée en fonction du pourcentage de déplacement inter-étage et représente trois niveaux de dommages, soit: faible (DS0), modéré (DS1) et étendu (DS2) (*Voir* Figure 2.8).

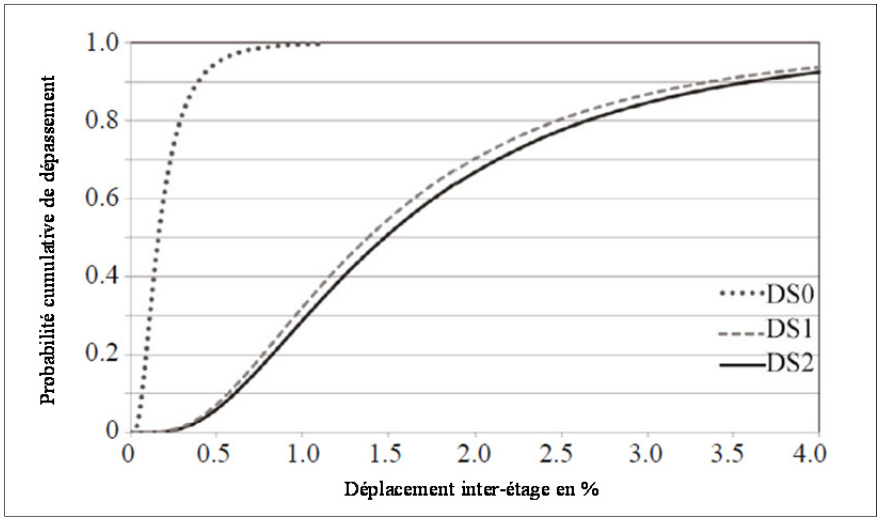


Figure 2.8 Courbes de fragilité pour des fenêtres de 1.5m*1.5m
Adaptée de Filiatrault et Sullivan (2014, p. 35)

Ce sont des travaux coûteux en plus de représenter un travail de longue haleine puisque les problèmes reliés à la mauvaise performance des CFO sont appelés à croître (ATC 2008). En

effet, avec l'arrivée de nouvelles technologies, des équipements spécialisés sont continuellement inventés et le nombre de composants installés dans les centres hospitaliers ne cesse d'augmenter. On peut citer par exemple, l'ajout de moniteurs, de téléviseurs muraux, de caméras dans les lieux publics, de registres d'archives, etc., posant à la fois des risques potentiels de sécurité et d'accroissement des pertes économiques. Ce risque touche à la fois les anciennes installations de santé et les nouvelles structures.

2.3.5 Discussion

Le développement des fonctions de fragilité analytiques et celles basées sur des données empiriques permet dans les deux cas de répondre au besoin d'évaluer la vulnérabilité sismique des CFO. Compte tenu de leur nombre important dans les bâtiments, la tendance est de les regrouper respectivement selon leur sensibilité sismique et leur fonction générique indépendamment de leur taille et des caractéristiques spécifiques (poids, matériaux, modèle d'une génératrice, etc.). Dans le cas des méthodes empiriques, la qualité des sources de références et l'exhaustivité des données de base peut changer de manière considérable les valeurs proposées par les auteurs. On observe par exemple, que Porter et al. (2010) proposent principalement une valeur de base (avant considération de la qualité des ancrages) de β égale à 0,6 pour la majorité des CFO analysés contre des valeurs respectives de 0,5 et 0,4 dans les travaux de Eidinger (2009) et Johnson et al. (1999).

2.4 Méthodes d'évaluation sismique des bâtiments et des composants non-structuraux

L'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments existants est marquée par la présence des incertitudes sur l'estimation de l'aléa ou de la demande sismique, la qualité du modèle et l'estimation du seuil de dommages. Celles-ci sont quantifiées et maîtrisées dans le processus d'élaboration des fonctions de fragilité. Il demeure néanmoins que la qualité des données d'entrée représente un aspect important dans la fiabilité des évaluations en réduisant dans ce sens les incertitudes de nature épistémique, telles que les caractéristiques de construction

(Calvi et al. 2006). Certaines procédures d'évaluation reposent sur des méthodes individuelles s'appuyant, dans certains cas, sur des données de fragilité.

Ce paragraphe examine : 1) les approches d'évaluation de la vulnérabilité sismique in situ des bâtiments (groupe et approche individuelle) et des composants non-structuraux et 2) l'utilisation des mesures de vibrations ambiantes qui permettent de déterminer les caractéristiques modales des bâtiments. Celles-ci sont considérées équivalentes à leur réponse réelle en présence de secousses sismiques.

2.4.1 Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments existants et des composants non-structuraux

A. Les familles de bâtiments

Dans le but d'évaluer ou de prédire la réponse sismique des structures existantes, différentes méthodes d'évaluation ont été proposées. Il s'agit généralement des procédures de calculs indiciels basées sur les paramètres de vulnérabilité sismique des bâtiments. Leur but est d'identifier les déficiences potentielles et d'établir la priorité d'intervention ou d'évaluation approfondie selon le cas. L'évaluation se fait généralement par l'attribution d'un pointage ou à partir de la vérification d'une liste exhaustive de paramètres typologiques représentatifs de structures ou d'une région.

Par souci de synthèse, les grandes lignes des méthodes sont brièvement présentées dans les paragraphes suivants. La procédure d'évaluation, FEMA-154 concerne exclusivement 15 familles-types de bâtiments dont les caractéristiques structurales sont connues ou dont les déficiences menant à un mauvais comportement ont pu être observées lors des séismes de Loma Prieta et de Northridge. Elle sert de base au développement des méthodes Karbassi et Nollet (2008) et Tischer (2012). L'identification d'irrégularités géométriques et structurales va représenter une part importante de ces deux méthodes puisqu'il est reconnu qu'elles augmentent le risque de dommages.

La procédure rapide d'évaluation sismique visuelle ou FEMA-154 (FEMA, 2002)

Un indice structural, le Basic Structural Hazard (BSH), est attribué aux bâtiments en fonction de l'aléa sismique régional et de la probabilité d'effondrement reliée à la qualité du SFRS. Les valeurs de cet indice découlent des courbes de fragilité définies pour différents niveaux d'endommagement pour chaque famille-type issues du logiciel Hazard US (HAZUS). À cet indice de base, sont ajoutés des facteurs de modification (positifs ou négatifs) selon les caractéristiques spécifiques du bâtiment : la hauteur, l'année de construction, la présence d'irrégularités et le type de sol. Aucune considération n'est faite des CFO des bâtiments. Un BSH élevé prédit une meilleure performance sismique de l'ossature du bâtiment uniquement, et on lui associe une probabilité d'effondrement de la structure.

Méthode de pointage du Conseil national de recherches du Canada (CNRC) - (Rainer et al. 1992; Saatcioglu et al. 2013)

Dans sa version initiale, l'indice de vulnérabilité sismique calculé par la méthode de pointage du Conseil national de recherches du Canada est basé sur une comparaison approximative entre le cisaillement à la base calculé selon le CNB 1990 et la valeur du cisaillement estimé selon le code en vigueur au moment de la construction. Cette évaluation prend aussi en compte le risque associé aux structures compte tenu de leur vocation (exception faite des bâtiments résidentiels), de leur occupation et de la présence de composants non-structuraux. Concrètement, un Indice de priorité sismique (IPS) est calculé comme la somme d'un Indice structural (IS) et d'un Indice non-structural (INS) selon l'équation (2.3)

$$\begin{aligned} IPS &= IS + INS \\ IS &= A*B*C*D*E \\ INS &= B*E*F \end{aligned} \tag{2.3}$$

Les variables représentent successivement : la sismicité (A), le type sol (B), la qualité structurale (C), la présence d'irrégularités géométriques de la structure (D), l'importance de l'édifice (E) et les dangers reliés directement aux composants non-structuraux (F).

Rapport-Gratuit.com

L'évaluation préliminaire se fait rapidement à l'aide d'un court formulaire et la priorité d'évaluation sismique de cet ouvrage est alors quantifiée. Un IPS supérieur à 30 suggère que le bâtiment évalué est à très haut risque. Pour des valeurs inférieures la priorité peut être faible (inférieur à 10), moyenne (compris entre 10 et 20) ou élevée (entre 20 et 30). On mentionne cependant que les divisions entre les niveaux sont arbitraires et dépendent des ressources et priorités locales. La mise à jour de Saatcioglu et al. (2013) permet d'inclure les provisions plus récentes du CNB 2005.

Dans le cadre des travaux de microzonage et vulnérabilité sismique de la ville de Québec, les auteurs retiennent seulement la valeurs de IS comme représentative de la vulnérabilité structurale (LeBoeuf et Nollet 2006). Les critères de classification de la vulnérabilité sismique du risque sont alors présentés à l'équation (2.4):

$$\begin{aligned} IS &\leq 2{,}0 \text{ acceptable} \\ 2{,}0 < IS &\leq 10{,}0 \text{ modéré} \\ IS &> 10{,}0 \text{ élevé} \end{aligned} \tag{2.4}$$

Les méthodes Karbassi et Nollet (2008) et Tischer (2012)

La méthode Karbassi et Nollet (2008) s'inspire du FEMA 154 avec le calcul d'un BSH représentatif de la sismicité du Québec et la définition des catégories sismiques des sites selon le CNBC 2005. Les pointages correctifs sont reliés à la géométrie du bâtiment (hauteur et les irrégularités qui affectent la réponse sismique), la qualité de la structure et les effets d'amplification locale du sol. Il est alors possible d'évaluer 15 catégories de systèmes structuraux pour des zones d'aléa sismique faible, modéré et élevé. Tischer (2012) propose une méthodologie comparable issue d'une caractérisation exhaustive d'une centaine d'écoles de petite et moyenne hauteur. Cette méthode prend en compte des critères spécifiques comme une classification des points faibles de l'échantillon considéré et les risques relisés aux effets de martelage.

B. Les bâtiments uniques

ASCE 31 (ASCE/SEI 2003)

Cette évaluation se fait en deux étapes de vérification sommaire : 1) l'identification des déficiences et 2) des calculs simples de force et de rigidité pour les composants du bâtiment. La conformité de configuration de base du bâtiment est vérifiée à partir de listes exhaustives de paramètres structuraux et non-structuraux comme la continuité et la redondance du chemin de transfert de charges, la torsion, les discontinuités verticales et horizontales, la masse effective, les effets d'entrechocs entre bâtiments connexes. Ces listes sont fonction du niveau de sismicité locale et du niveau de performance attendue du bâtiment : sécurité des occupants ou occupation immédiate. Cette méthode laisse une place importante au jugement des ingénieurs qui statuent sur les mesures à prendre et les phases successives de cette première étape.

Les analyses détaillées

Les évaluations détaillées touchent principalement l'analyse dynamique des structures en vue de déterminer leur réponse à un tremblement de terre donné. Selon les objectifs spécifiques de l'étude, les analyses dynamiques peuvent être simples, limitées à la réponse linéaire du bâtiment, ou plus complexes avec des analyses non linéaires temporelles.

C. Les composants non-structuraux

La norme canadienne CAN/CSA-S832-14 propose une méthode paramétrique simplifiée qui vise à identifier le risque associé à un CFO, sans traiter de sa fonctionnalité intrinsèque. Toutefois, l'application de la norme peut se traduire par un fonctionnement continu pour certain composants fonction de l'intensité des secousses et du dimensionnement retenu visant à limiter les dommages. Le risque sismique (R) associé aux CFO est calculé comme étant le produit de l'indice de vulnérabilité sismique (V) par l'indice de conséquences (C) selon les équations (2.5) à (2.7):

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

$$R = V * C \tag{2.5}$$

où :

$$V = RG * RB * RE/10 \tag{2.6}$$

et

$$C = \sum (RS) \tag{2.7}$$

Les différents paramètres *RG*, *RB*, *RE* et *RS* caractérisent respectivement : 1) l'emplacement, 2) le bâtiment selon le type du système de résistance aux forces sismiques (SFRS), 3) le composant selon les détails de retenue, la sensibilité au choc/martelage ou au renversement, la flexibilité et l'emplacement du CFO dans le bâtiment, et 4) la performance attendue du composant. Le Tableau 2.3 présente la sensibilité des paramètres aux caractéristiques de la structure et des conditions in situ.

Tableau 2.3 Sensibilité des paramètres de calcul de l'indice de risque

Paramètres et formules	**Sensibilité**	**Gamme de valeurs**	**Commentaires**
RG (emplacement) $\frac{F_a * S_a(0,2)}{1,25}$	Accélération spectrale $S_a(0,2s)$ et catégorie d'emplacement (F_a)		Constants pour tous les CFO d'un bâtiment donné.
RB (SFRS et nombre d'étages)	Période du bâtiment et catégorie de site	$1,0 \leq RB \leq 1,5$	
RE (élément) $RE = \sum_{i=1}^{4} RS_i$	1. Existence de retenue latérale 2. Dégagement adéquat autour du CFO 3. Ratio h/d 4. Positionnement en hauteur	4, 20 ou 40 3 ou 30 0, 2 ou 20 1, 5 ou 10	Selon la géométrie du CFO, sa position dans le bâtiment, *RE* sera élevé, les conditions de retenue deviennent primordiales.
RS (élément) $C = \sum_{i=1}^{2} RS_i$	1. Nombre d'occupants (N) 2. Fonctionnalité (niveau de performance attendue) 3. Protection de la propriété	$10 \leq RS \leq 30$	Valeur minimale de 10 pour les hôpitaux à cause du nombre important d'occupants. La protection prend en compte les pertes financières reliées au dommage.

Les différents paramètres sont commentés dans le contexte d'évaluation des CFO dans les hôpitaux où d'une part, les niveaux de performance attendus sont élevés et d'autre part les conséquences d'une dysfonction importante avec une valeur minimale de 10 comparé à 1 pour la plupart des bâtiments. On note que les indices *RG* et *RB* sont respectivement reliés aux conditions de sols et aux caractéristiques structurales (période naturelle, emplacement, typologie du SFRS). Un indice *R* inférieur à 16 indique un risque sismique faible et aucune mesure de mitigation ne s'avère nécessaire. Pour les valeurs supérieures, les priorités de mitigation vont être établies en fonction de l'importance du CFO, des projets de réhabilitation à court et à moyen terme du bâtiment et aussi sur la valeur de l'indice de conséquences C. Un indice de mise à niveau peut être calculé, permettant ainsi d'estimer l'efficacité des interventions de mitigation. Il ne peut toutefois être appliqué qu'aux CFO dont le R est inférieur à 32.

2.4.2 Détermination de la période naturelle des structures et mesures de vibrations ambiantes

La période fondamentale d'un bâtiment (fonction de sa masse et de sa rigidité) est une donnée essentielle à l'évaluation de sa vulnérabilité sismique et à la détermination de sa réponse sous l'effet d'un séisme donné. Le CNB propose de nombreuses formules empiriques pour calculer la période naturelle de vibration des bâtiments selon leur type de construction et système de résistance aux charges latérales en vue des analyses sismiques (IRC-CNRC 2010a). Pour les bâtiments existants, ces formules ne reflètent pas nécessairement les conditions en place. On a recours de plus en plus aux mesures de vibrations ambiantes parce qu'elles permettent de replacer la structure dans ses conditions de service. Le bâtiment étant excité par le vent et les charges d'exploitation, la charge d'excitation est inconnue mais possède un contenu fréquentiel égal tout au long de la mesure (stationnarité du signal). Dans le contexte où seul l'extrant est connu, le procédé est aussi connu sous le nom d'*Operational modal analysis* (OMA) ou *Output-only modal analysis*.

Les premières mesures de vibration remontent au début des années 1930; le but était de comprendre le phénomène de résonance et d'établir les premières formules de calcul des

fréquences propres des structures (Ivanovic et al. 2000; Michel 2007). Ce qui change aujourd'hui, c'est la qualité des appareils de mesure et la multiplication des essais dans le but de mieux cerner la réponse des bâtiments, d'estimer l'effet des dommages sur le comportement de la structure, ou encore d'étudier l'évolution de la structure dans le temps (*Structural Health Monitoring*). Les appareils utilisés mesurent de plus en plus les vitesses de déplacement en plus des accélérations, ce qui permet de minimiser les erreurs relatives d'estimation.

On observe une généralisation des recherches portant sur l'utilisation des mesures de vibrations ambiantes (MVA) dans l'évaluation du comportement linéaire élastique des structures (Boutin et al. 2005; Dunand 2005; Gilles 2011; Hans et al. 2005; Michel 2007; Ventura et Horyna 1997). Cette liste de références est non exhaustive, mais ces recherches démontrent l'intérêt et la pertinence de ces mesures. Dans le cadre d'autres recherches menées dans le cadre de cette thèse, les MVA ont été utilisées pour améliorer les formules empiriques du CNB, analyser la vulnérabilité des bâtiments d'écoles et faciliter la modélisation par élément finis des bâtiments d'hôpitaux (Asgarian 2012; Gilles 2011; Mestar 2014; Tischer 2012). Chacune de ces références explique en détail les processus généraux d'acquisition, de transformation, d'extraction et de validation des données en plus des nombreuses publications dans le domaine du génie civil. Les aspects spécifiques des mesures prises sur les hôpitaux et d'extraction à l'aide du logiciel ARTeMIS® sont expliqués au Chapitre 4.

Sur la Figure 2.9, Gilles (2011) compare les valeurs de la période fondamentale trouvées pour une série de 27 bâtiments dont le SFRS est constitué de mur de cisaillement en béton armé, aux valeurs calculées selon les équations recommandées par le CNB 2005. La régression linéaire montre que ces dernières proposent des valeurs significativement supérieures à celles trouvées par MVA. Ces conclusions coïncident avec celles de nombreuses recherches effectuées (Chiauzzi et al. 2012; Michel et al. 2007). L'objectif de cette démarche est aussi de développer des relations linéaires entre la hauteur des bâtiments et les périodes trouvées.

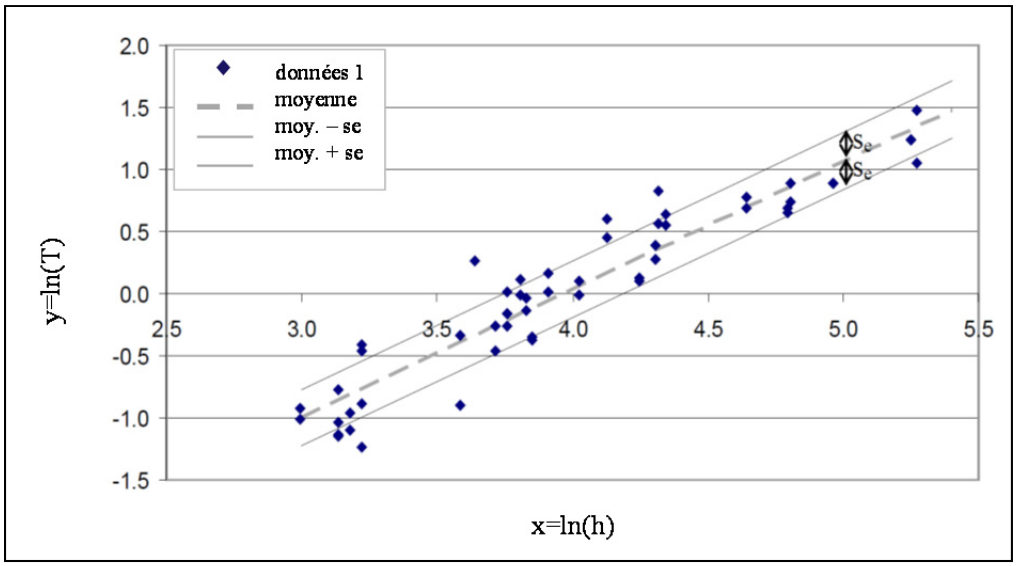


Figure 2.9 Comparaison des formules du CNB 2005 avec la période fondamentale obtenue par MVA par analyse de régression
Adaptée de Gilles (2011, p. 118)

Connaissant les principaux paramètres modaux issus des MVA: les fréquences de vibration, les déformées modales, et l'amortissement, il est possible de calibrer des modèles de bâtiments en éléments finis 3D ou plus simplement les oscillateurs simples ou multiples. La demande sismique peut alors être calculée analytiquement (Michel et al. 2007; Reinoso et Miranda 2006) ou via des logiciels d'analyse dynamique courants. C'est un apport considérable notamment dans la modélisation des bâtiments existants compte tenu des nombreuses incertitudes reliées entre autres aux charges gravitaires effectives et aux caractéristiques structurales du SFRS. Les raisons de ces difficultés sont nombreuses et touchent principalement les différences entre les plans de conception et ceux réalisés, les détails des ajustements structuraux et la contribution des éléments architecturaux à la rigidité globale.

2.4.3 Incertitudes dans l'utilisation des mesures de vibrations ambiantes

De nombreux auteurs ont soulevé les incertitudes sur les mesures extraites des MVA, notamment les fréquences naturelles et les valeurs d'amortissement. Cremona et al. (2003) identifient trois causes principales de ces incertitudes:

- l'hypothèse de stationnarité des sollicitations : les sources d'excitation introduisent des phénomènes couplés structure-excitation, particulièrement pour les structures sensibles au vent;
- le choix des procédures de traitement de signal ou d'analyse modale et l'exactitude des paramètres extraits. L'auteur souligne, toutefois l'amélioration des capacités de calculs, le développement d'algorithmes performants qui permettent de réduire ce niveau d'incertitude;
- le fait que le coefficient d'amortissement dépend directement de l'amplitude des vibrations. Plus spécifiquement on utiliserait des valeurs découlant de faibles niveaux d'excitation pour prédire la réponse sous des niveaux beaucoup plus élevés.

En comparant les caractéristiques dynamiques extraites des MVA de séquences de démolition de bâtiments à ceux du bâtiment intact, Hans et al. (2005) ont montré que les composants de façade attachés à la structure contribuent à environ 25% de la rigidité de celle-ci. Ce ratio excède la limite de 15% recommandée par le CNB 2010 pour les bâtiments de faible et de moyenne hauteur. Cette constatation constitue la principale lacune des MVA selon ces auteurs. La rupture des connexions des panneaux en maçonnerie ou autre élément préfabriqué lors de secousses sismiques importantes amène l'allongement de la période du bâtiment (réduction de la rigidité) qui résulte finalement en des déplacements beaucoup plus importants.

De manière générale, il est accepté que le comportement réel de la structure sous des charges dynamiques faibles ou modérées ne soit pas très différent des réponses suggérées par les paramètres modaux extraits des MVA. C'est le cas particulièrement des structures à comportement linéaire pour lesquelles il est possible de déduire la totalité des réponses sous charges dynamiques à partir des réponses synthétisées dans les matrices de transfert des modèles générés (Cremona et al. 2003). Néanmoins, il n'existe aucun consensus sur l'utilisation directe des valeurs des coefficients d'amortissement extraites dans l'analyse dynamique (Chopra 2001; Michel et al. 2009).

2.5 Synthèse de la revue de littérature – Objectif 2 : identifier les relations entre la vulnérabilité des composants

Dans ce chapitre, nous avons succinctement rappelé les paramètres régissant la réponse sismique du bâtiment et des composants non-structuraux tout en faisant le lien avec les notions de performance. Il est alors possible de choisir les outils d'évaluation de la vulnérabilité sismique de la structure et des CFO et d'identifier les paramètres essentiels pour bâtir la méthode d'évaluation de la fonctionnalité. Les éléments suivants ressortent de cette revue :

- les méthodes générales d'évaluation de la vulnérabilité sismique des composants reposent sur des démarches paramétriques et probabilistes inévitables en raison des nombreuses incertitudes caractérisant la réponse sismique des composants;
- les données de fragilité les plus complètes disponibles sont issues des méthodes analytiques et empiriques à l'inverse des valeurs expérimentales plus rares;
- la demande sismique d'une structure (S_a ou S_d) peut être évaluée sur la base d'une modélisation simplifiée;
- les conditions in situ, par exemple, l'insuffisance des attaches dans le cas des CFO, influencent l'apparition des dommages;
- l'évaluation de la fonctionnalité post-sismique va considérer uniquement le comportement linéaire de la structure qui peut être modélisée grâce aux données résultant de mesures de vibrations ambiantes.

Afin de garantir la fonctionnalité des hôpitaux, un accent particulier doit être mis sur la réduction des vulnérabilités associées aux interactions entre la structure et les composants non-structuraux (Whitney et al. 2001). Il s'agit d'anticiper le comportement de l'ensemble en utilisant une méthode de fiabilité des systèmes. Le Chapitre 3 va compléter la dernière phase du recensement des écrits touchant les méthodes d'analyse de la fiabilité des systèmes ou de quantification des dommages sur la fonctionnalité d'un système.

CHAPITRE 3

ANALYSE DES SYSTÈMES CRITIQUES – ÉTAT DES CONNAISSANCES ET SYNTHÈSE CRITIQUE

Ce chapitre présente un état des connaissances sur les systèmes complexes, les outils d'évaluation de leur fiabilité, en particulier l'analyse par arbre de défaillance (AdD). Nous définissons d'abord l'hôpital comme un système complexe et interactif sur la base des recommandations de la norme canadienne S-832 puis la notion d'interdépendance afin de proposer un cadre de réflexion sur la méthode d'analyse du risque dans les hôpitaux à retenir et qui tient compte des facteurs de vulnérabilité et de fragilité des différents composants. C'est une étape essentielle pour valider l'utilisation de cette approche d'analyse dans l'évaluation de la fonctionnalité post-sismique. Le défi est de modéliser un hôpital comme un système fonctionnel représentant l'ensemble des composants et la complexité des interfaces ainsi que les modes de défaillances et de quantifier les conséquences sur la fonctionnalité

La méthode d'analyse par AdD est ensuite présentée avec des exemples d'application à l'évaluation de la fonctionnalité de systèmes et d'hôpitaux, tirés de la littérature. Le chapitre se conclut sur une synthèse de la revue de littérature qui permet à terme de rencontrer l'Objectif 3.qui vise à identifier et analyser les interdépendances entre les systèmes. On y analyse entre autres, l'architecture des systèmes, leur vulnérabilité et les risques résultant du mauvais comportement des CFO.

3.1 L'hôpital défini comme un système complexe et interactif

Nous avons vu précédemment que la capacité d'un hôpital à assurer un niveau de service adéquat est assurée par la bonne performance de l'ensemble de ses composants. Cette interdépendance devenue évidente lors des séismes est représentée à la Figure 3.1.

Rapport-Gratuit.com

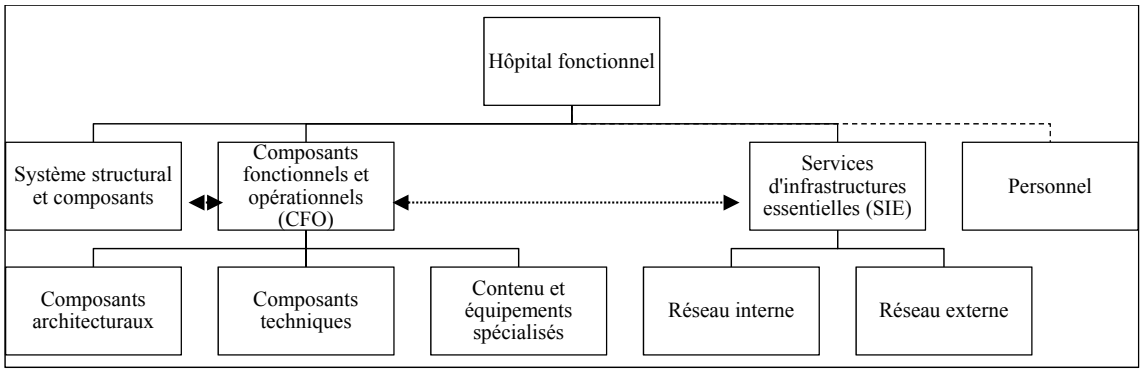


Figure 3.1 Composants et sous-systèmes fonctionnels d'un hôpital
Adaptée de CAN/CSA-S832-R11 (2014, p. 37)

L'hôpital y est décrit comme un système relativement complexe et interactif symbolisé par des flèches sur la figure. La fonctionnalité est alors déterminée, avec une importance égale, par : 1) la vulnérabilité assignée à chacun des CFO, 2) la vulnérabilité du système structural et de ses composants résistant aux forces gravitaires et latérales, 3) la vulnérabilité de l'infrastructure de services essentiels (ISE) tels les réseaux internes et externes, et de gestion des déchets et 4) le personnel.

Il existe de nombreuses définitions de l'interdépendance des systèmes, étant donné l'intérêt porté à l'analyse des systèmes critiques depuis les travaux de Perrow (1984). Avec sa théorie de l'accident normal, le sociologue suggère que l'extrême complexité inhérente des systèmes, couplant technologie et organisation, conduit inévitablement à une défaillance en cascade. Cette notion a évolué et est étendue à l'analyse de risque dans des domaines variés comme l'économie ou la sécurité nationale, compte tenu de l'omniprésence de la technologie dans le fonctionnement de la société et de ses infrastructures essentielles (Dhillon 1999). Dans cette perspective :

- Rinaldi et al., (2001) définissent l'interdépendance comme des relations bidirectionnelles entre des infrastructures ou des composants dont l'état fonctionnel de l'un dépend de celui de l'autre. En d'autres termes, la notion d'interdépendance peut s'appliquer tant aux

relations entre différentes infrastructures qu'aux relations intrinsèques d'une infrastructure donnée;

- Dueñas-Osorio (2005) utilise ces concepts pour comprendre l'apparition et l'évolution de dommages inattendus dans les réseaux urbains suite à un séisme. L'auteur propose un modèle dynamique permettant de simuler l'intégration de données internes et externes et la perte de certains sous-systèmes de manière aléatoire;
- Arboleda (2006) dresse la topologie des réseaux d'alimentation en eau, électricité et transport d'équipements médicaux et analyse leur interdépendance et les effets d'une défaillance sur le fonctionnement de l'hôpital.

Dans tous les cas, pour évaluer les scénarios de défaillance (ou fiabilité), le point de départ consiste à accepter un type de défaillance ou un état donné du composant et de déterminer l'influence de cette condition sur le reste du système. Les trois premières colonnes du Tableau 3.1 résument les principes de base développés par les auteurs en référence afin de dresser un cadre d'analyse du risque systémique des hôpitaux. Limnios (1991) aborde l'évaluation de la fiabilité des systèmes sous l'angle des problèmes à résoudre et des modèles à construire, alors que Rinaldi et al. (2001) définissent le domaine et les éléments d'interdépendance. La quatrième colonne associe à ces principes, les trois premiers objectifs de cette thèse, détaillés aux trois premiers chapitres : 1) identifier la nature du risque, 2) définir les interdépendances ou construire l'hôpital fonctionnel sous forme de système et 3) établir la problématique spécifique aux hôpitaux de Montréal. La dernière colonne identifie les différents modèles d'évaluation sur la base des outils disponibles: des modèles probabilistes ou des données d'entrées spécifiques reliées aux courbes de fragilité et aux conditions in situ des composants, discutés au Chapitre I et les arbres de défaillance dont la méthode est présentée au paragraphe suivant.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Tableau 3.1 Interdépendances des infrastructures
Adapté de Dueñas-Osorio et al. (2004), Rinaldi et al. (2001) et Limnios (1991)

(Limnios 1991)	**(Dueñas-Osorio et al. 2004; Rinaldi et al. 2001)**		**Contexte de cette recherche**	
Problèmes	**Domaine**	**Éléments d'interdépendance**	**Objectifs globaux**	**Modèles**
Quels sont les modes de défaillance des composants et du système?	Type de défaillance	Locale, simultanée, cause commune, en cascade	Analyser la nature de la perturbation et la fragilité des composants du système	Modèles probabilistes ou données d'entrées : courbes de fragilité et conditions in situ
	État des opérations	Normal, réparation/restauration, état de stress/dysfonctionnel		
Comment le système tombe-t-il en mode dysfonction?	Type d'interdépendances	Géographique, logique, cyber, physique, séquentiel ou temporel	Définir les interdépendances entre les systèmes et le degré d'agencement	Modèles algébriques: opérateurs booléens .ET., .OU. (AdD)
	Agencement et comportement	Adaptable, inflexible, serré/lâche, linéaire/complexe, parallèle/série		
Quelle est la probabilité que le système ne soit plus opérationnel?	Environnement	Social/politique, technique, légal/normatif, économique, santé/sécurité	Identifier l'infrastructure et son exposition au danger.	Modèles de représentation du système (AdD)
	Caractéristiques des infrastructures	Organisationnel, opérationnel, temporel, spatial		

3.2 La méthode d'analyse par arbres de défaillance (AdD)

Les travaux de Vesely et al. (1981) constituent le document de référence des analyses par AdD. Ils définissent le système comme une entité identifiable comprenant une série d'éléments discrets interdépendants. Cette interaction, qui peut être complexe, suggère que le système ne peut être considéré comme la somme de ces composants. L'analyse par AdD, appelée également arbre déductif d'événements ou arbre de panne, est l'une des plus utilisée dans l'évaluation des risques et l'analyse des systèmes complexes. Les données d'entrées peuvent être modélisées par des processus stochastiques (variables aléatoires) mais aussi par la combinaison de défaillances simples ainsi que de leur probabilité d'apparition (MIL-STD-1629A 1980). Les approches sont alors dynamiques ou statiques selon les approches retenues par les évaluateurs (Dahl et al. 2009; Talon 2006).

Concrètement un AdD est un graphique qui représente les relations de cause à effet ou encore un mode de défaillance d'un système découlant de celui de ses sous-systèmes. Cela sous-entend que toutes les causes de défaillance sont connues. L'AdD permet de reproduire de manière efficiente les interdépendances et la complexité des interfaces, les modes de défaillances et les pertes qui résultent de l'évènement critique de base (Vesely et al. 1981).

Dans une approche hiérarchisée de haut vers le bas, la relation entre un événement redouté et un certain nombre d'entrées est identifiée par un opérateur booléen (. ET. /. OU.). L'opérateur .ET. représente un système robuste (ou redondant) pour lequel une entrée va automatiquement suppléer à la défaillance d'au moins une autre entrée de la même rangée. La Figure 3.2 illustre un exemple théorique d'arbre de défaillance.

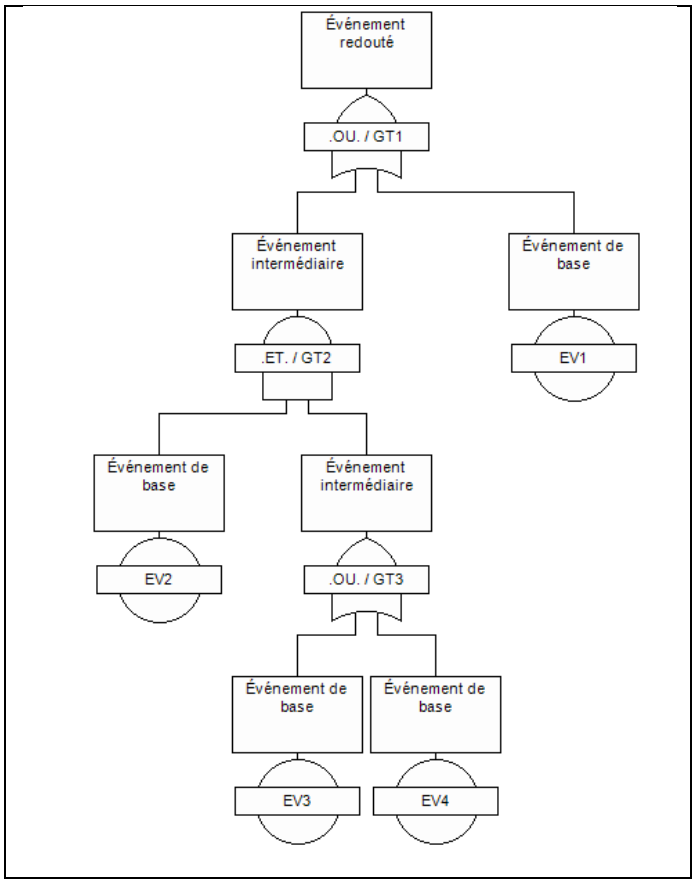


Figure 3.2 Exemple d'arbre de défaillances

Où:

- l'événement «redouté» représente le sommet de l'arbre, (GT1 ou TP);
- les événements intermédiaires (GT2, GT3);
- les événements de base indépendants l'un de l'autre : EV1, EV2, EV3, EV4 (ou entrée de base des opérateurs);
- les opérateurs .OU.;
- l'opérateur .ET.

3.3 Application à l'évaluation de la fonctionnalité post-sismique des hôpitaux existants

Les applications de l'AdD à l'analyse de la fonctionnalité post-sismique des systèmes critiques d'hôpitaux ont en commun une équipe de consultants de l'EQE[4] International dans les domaines de l'analyse de risques. Le premier rapport produit pour le compte du *Multidisciplinary center for earthquake engineering research* (MCEER) fait état de la vulnérabilité sismique des équipements et les conséquences sur les opérations de quatre infrastructures critiques : tour à bureaux, bureau central de communication, centre de traitement de données et hôpital (Porter et al. 1993). Les AdD développés dans ce document sont analysés dans différents rapports subséquents élaborés dans le cadre de travaux du centre de recherche ou par les mêmes auteurs. L'un des objectifs du MCEER[5] est d'établir des outils de gestion et de contrôle de la fonctionnalité et de la résilience post-sismique des installations hospitalières. Dans ce domaine, deux importantes composantes ressortent des publications existantes : l'exploration des concepts d'interdépendances fonctionnelles et physiques et le développement de fonctions de fragilité pour les composants non-structuraux. Les résultats des études analytiques et expérimentales amènent au développement de méthodologies intégrant à la fois les aspects du génie et les aspects socioéconomiques (Filiatrault et al. 2003).

3.3.1 Évaluation de la fiabilité sismique des installations critiques

Johnson et al. (1999) utilisent l'analyse par arbre de défaillance pour modéliser les systèmes opérationnels des hôpitaux, analyser leur fiabilité en cas de séisme par l'attribution d'indice de pointage et proposer des mesures de mitigation. La méthodologie développée procède selon les étapes suivantes :

---

[4] EQE International, now ABS Consulting, 16855 Northchase Dr. Houston, TX 77060

[5] MCEER, University at Buffalo http://www.buffalo.edu/mceer.html

1. La modélisation des systèmes par arbre de défaillance. La Figure 3.3 illustre un système de protection incendie dont la fonctionnalité est reliée à trois sous-systèmes essentiels;

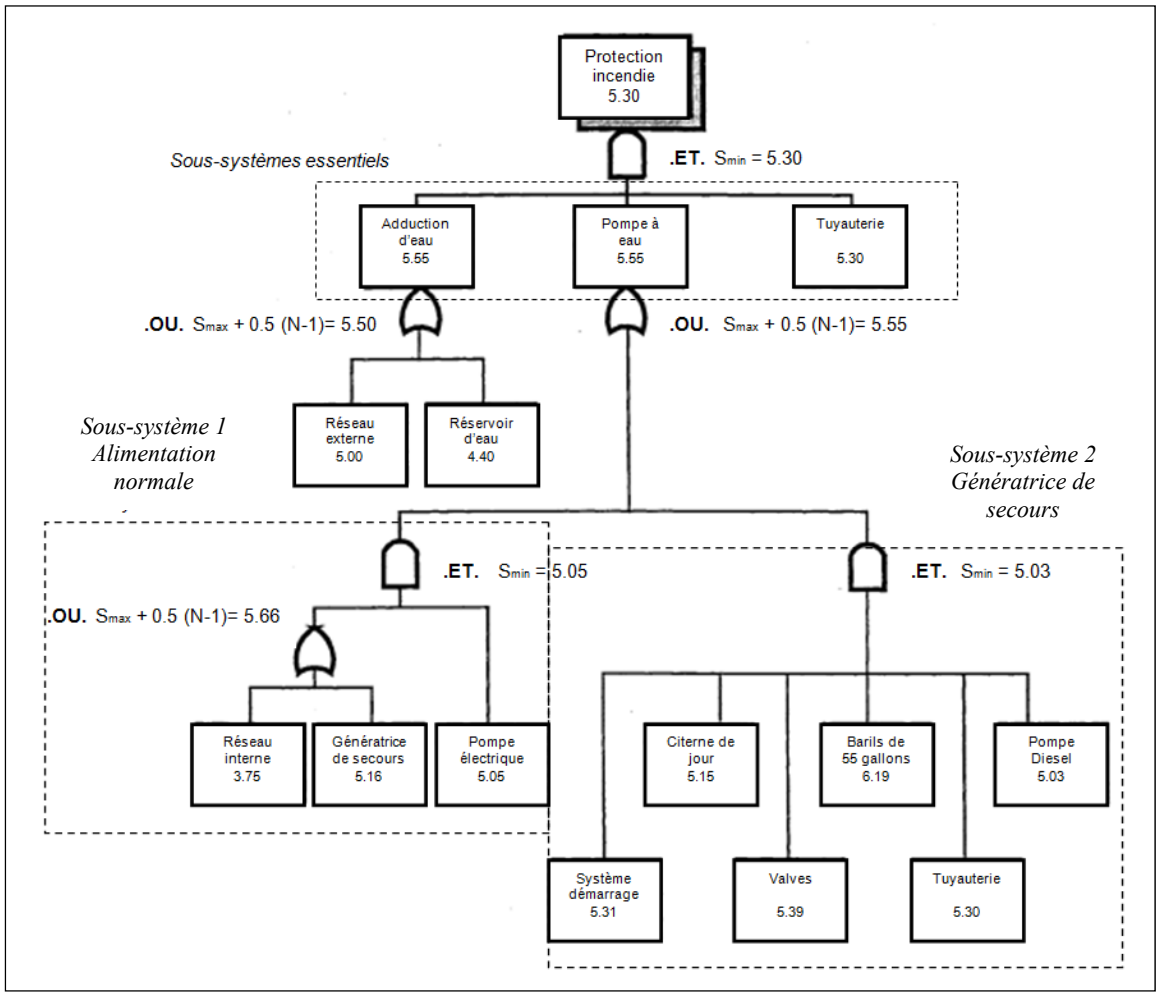


Figure 3.3 Modélisation du système de protection incendie et calcul du pointage
Adaptée de Johnson et al. (1999, p. 181)

On remarque que le fonctionnement de la pompe à eau dépend de deux autres sous-systèmes électriques d'urgence redondants : le système 1 constitué de l'alimentation normale, d'une génératrice de secours et d'une pompe électrique; le système 2 étant une génératrice de secours;

2. L'inspection des composants et l'assignation d'un pointage : des fiches de relevés in situ disponibles facilitent le travail d'inventaire des composants non-structuraux tout en les classant selon les objectifs de performance auxquels ils contribuent. Les auteurs proposent, pour chacun des composants, un pointage de base (S) représentant une probabilité annuelle relative de défaillance qui est fonction de l'emplacement du composant dans le bâtiment (positionnement en hauteur) et de la sismicité locale. La valeur de base est obtenue par convolution de données historiques sur les dommages et la vulnérabilité des composants. Ce pointage est ensuite réduit pour tenir compte des facteurs de vulnérabilité comme les conditions d'ancrage, les risques de renversement ou encore le type de matériaux de fabrication. L'usage de ces valeurs permet de prioriser un système par rapport à l'autre (une valeur plus petite montre une plus grande vulnérabilité) mais ne représente pas une estimation rigoureuse de la probabilité de défaillance du système, comme souligné par les auteurs;
3. Le calcul du pointage du système (F) illustré à titre indicatif à la Figure 3.3 : F est calculé en partant de la base (pointages établis à l'étape 2) en utilisant les Équations (3.1) et (3.2) répondant à la logique des opérateurs booléens .ET. et .OU.

$$\text{Opérateur .OU. :}\ F = S_{max} + 0{,}5\,(N-1) \tag{3.1}$$

$$\text{Opérateur .ET. :}\ F = S_{min} \tag{3.2}$$

Il faut noter que l'approche par succès est utilisée, l'opérateur booléen .OU. représente alors la redondance dans le système, le pointage de l'événement supérieur est calculé comme étant la somme du pointage maximal retrouvé aux événements inférieurs et d'un facteur de modification fonction du nombre d'entrées N (Équation 3.1). L'opérateur .ET. illustre le lien direct de la fonctionnalité du système supérieur à l'ensemble des événements inférieurs, son pointage est alors la plus petite des valeurs (Équation 3.2). Ces équations sont issues d'une analyse de sensibilité du système évaluant le poids de différents paramètres. On retrouve dans la littérature de nombreuses applications de cet outil et des études complémentaires:

1. Les travaux de Yao et Kuo (2002) sur l'inventaire des dommages aux CFO d'hôpitaux de Taiwan suite au séisme de Chi-Chi en 1999 et la quantification de la capacité des systèmes. En 2012, des valeurs de médiane et d'écart-type sont développées pour des fonctions de fragilité de plus d'une vingtaine de composants non-structuraux d'hôpitaux à partir de nouvelles données de dommages lors de séismes Taitung (1er avril 2006, M_w6,2) et Hen-Chun (12 décembre 2006, M_w7,1) (Yao et Tu 2012);
2. Shinozuka et al. (2000) développent des courbes de fragilité pour les composants du système de protection incendie basées sur des données statistiques pour un gratte-ciel de San Francisco;
3. En 2006, une importante équipe de chercheurs sous la direction de Porter (Porter et al. 2006) utilisent les AdD développés pour analyser la défaillance opérationnelle simultanée d'infrastructures critiques due à un séisme. C'est une étude sophistiquée qui utilise de très nombreux scénarios de séismes avec des accélérogrammes calibrés au contexte d'étude (direction et distance de l'épicentre, catégorie de site, intensité, PGA, etc.).

3.3.2 Amélioration de la durabilité sismique des infrastructures critiques à partir d'analyse de système (Chaudhuri et Shinozuka 2009; 2010)

Ces travaux explorent le concept d'infrastructure critique avec un centre d'intérêt sur les infrastructures essentielles. Ils s'inscrivent également dans la continuité des travaux de Johnson et al. (1999). L'analyse porte sur les systèmes d'alimentation en eau pour combattre les incendies (équivalent au système protection incendie de la Figure 3.3 et d'électricité (*Voir* Figure 3.4). On y retrouve les deux sous-systèmes minimaux de la figure précédente avec quelques légers changements comme l'ajout de deux centres de contrôle des moteurs (MCC) et les commutateurs.

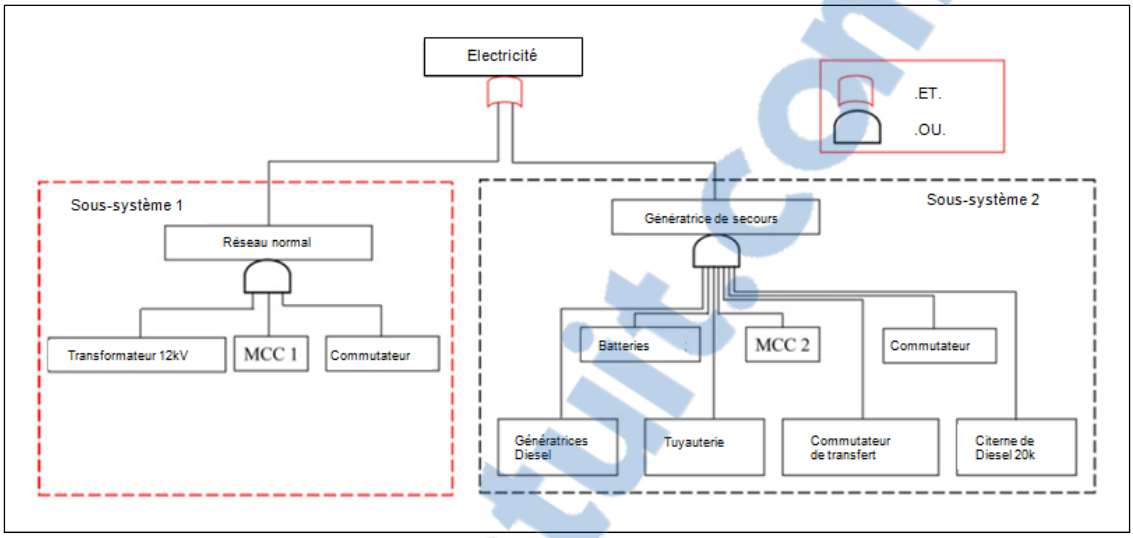


Figure 3.4 Arbre de défaillance du système électrique
Adaptée de Ray-Chaudhuri et Shinozuka, (2010, p. 239)

Les auteurs utilisent un bâtiment expérimental du MCEER et considèrent les hypothèses suivantes : le bâtiment est un cadre en acier avec dalle en béton, construit selon les prescriptions du code de 1970 et reposant sur le roc. Le modèle est soumis à des accélérogrammes représentant respectivement 2%, 10% et 50% de probabilités d'occurrence en 50 ans afin d'en extraire les données de fragilité de la structure et des composants non-structuraux. Des courbes de fragilité sont construites avec comme seuil de dommages, les limites de déplacements fixées par le FEMA 351 spécifiques aux cadres en acier, et donnent la probabilité de dommages (R) des composants de base. La fonctionnalité du système électricité (par exemple) est calculée en utilisant l'équation (3.3). La probabilité des deux événements, réseau normal et génératrice de secours, sont calculées comme le produit des probabilités des événements de base.

$$R_{SYS.\ \text{électrique}} = 1-(1-R_{\text{réseau normal}})(1-R_{\text{génératrice de secours}}) \tag{3.3}$$

Une analyse de sensibilité est menée afin de cibler les composants qui contribuent le plus à la fonctionnalité. Ils constituent alors les éléments les plus vulnérables du système. Les résultats

Rapport-Gratuit.com

sont utilisés pour développer différents scénarios de mitigation et conduire une analyse coût-bénéfice pour une gestion optimale des infrastructures.

3.3.3 Méthodologies en cours de développement (Pinto et al. 2011a; 2011b; Pitilakis et al. 2005)

Pitilakis et al. (2005) présentent les principes de base d'une méthodologie intégrée pour l'évaluation du risque sismique des hôpitaux grecs. C'est une approche qui vise l'amélioration de la capacité de gestion et l'organisation spatio-temporelle « intelligente » des hôpitaux en période de crise. L'hôpital est modélisé sous forme de diagrammes logiques avec les probabilités de dommages des composants comme données d'entrée. Le risque associé à chaque hôpital est combiné à l'importance des flux externes et des services fournis pour définir une valeur globale de l'hôpital. Cette valeur est directement reliée à des paramètres géographiques, sociaux et organisationnels à l'échelle urbaine.

Les travaux de Pinto et al. (2011a), menés sous la coordination du Professeur Pitilakis, s'intègrent dans le cadre d'un programme d'évaluation des risques à l'échelle de la communauté européenne. De manière globale, la capacité d'accommodation de l'offre de service est comparée à la progression rapide de la demande de patients nécessitant une hospitalisation après un séisme et les dommages structuraux et non-structuraux découlant de ce désastre. Les différents facteurs internes et externes influençant la réponse de l'hôpital sont analysés selon qu'ils créent une demande croissante des services ou diminuent la capacité de l'hôpital ou provoquent simultanément les deux conséquences. C'est le cas, par exemple de dommages structuraux nécessitant l'évacuation qui va, en plus, mobiliser la composante organisationnelle interne. Les systèmes physiques des hôpitaux reliés à la réponse de l'hôpital sont modélisés sous forme d'AdD afin d'évaluer leur capacité.

La performance globale de l'hôpital est calculée sous forme d'un *indice Hospital treatment capacity* (HTC) donné par l'Équation (3.4) et défini comme le nombre de patients sévèrement blessés que l'hôpital peut traiter en une heure. Les auteurs considèrent que le service de chirurgie représente le goulot d'étranglement dans la prestation des soins.

$$HTC = \alpha * \beta * \frac{\gamma_1 * \gamma_2}{t_m} \tag{3.4}$$

Où :

α est un facteur d'efficience de la composante organisationnelle établie par jugement d'experts et équivaut à zéro en cas d'absence de plan de gestion d'urgence;

β représente la composante humaine en termes de qualité des interventions et de la préparation aux situations d'urgence avec des valeurs comprises entre 0,5 et 1;

γ_1 le nombre de salles d'opérations opérationnelles après l'événement;

γ_2 un indice de « capacité de survie » égal à 1 si le système survit ou 0 dans le cas contraire. La capacité est évaluée en termes de performance des systèmes physiques à demeurer opérationnels (pour les services médicaux essentiels) et garantir la sécurité des occupants (pour les services généraux). Le niveau de performance opérationnelle est relié à l'interaction structure-CFO alors que seuls les dommages structuraux sont considérés dans l'évaluation de la sécurité des occupants. L'évaluation est faite sur la base des AdD des systèmes;

t_m le temps moyen d'une opération chirurgicale (en heure).

L'indice HTC est affecté par de nombreuses incertitudes puisqu'il est difficile de quantifier les paramètres tels que la disponibilité des ressources disponibles (services médicaux et personnel) tout comme les conditions médicales des patients. Les auteurs proposent plusieurs alternatives pour le choix des valeurs (ou indices de sévérité des hôpitaux) à retenir dont certaines sont développées dans d'autres recherches menées dans le cadre du programme ou dans d'autres contextes.

La Figure 3.5 illustre l'évolution temporelle post-désastre de la demande de services, de la réponse du système et des interventions externes complémentaires comparée à la capacité interne pré-désastre, dans laquelle :

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

1. La demande est traitée comme une fonction d'une composante environnementale (δ) reliée au nombre de décès et au contexte épidémiologique post-désastre;
2. La réponse d'urgence est reliée à trois paramètres : a) la robustesse des composants physiques du système (résultats des AdD), b) la rapidité d'intervention après l'événement (origine de l'abscisse) et c) l'efficacité du système, ces deux derniers paramètres étant reliés aux ressources physiques, organisationnelles et humaines des installations.

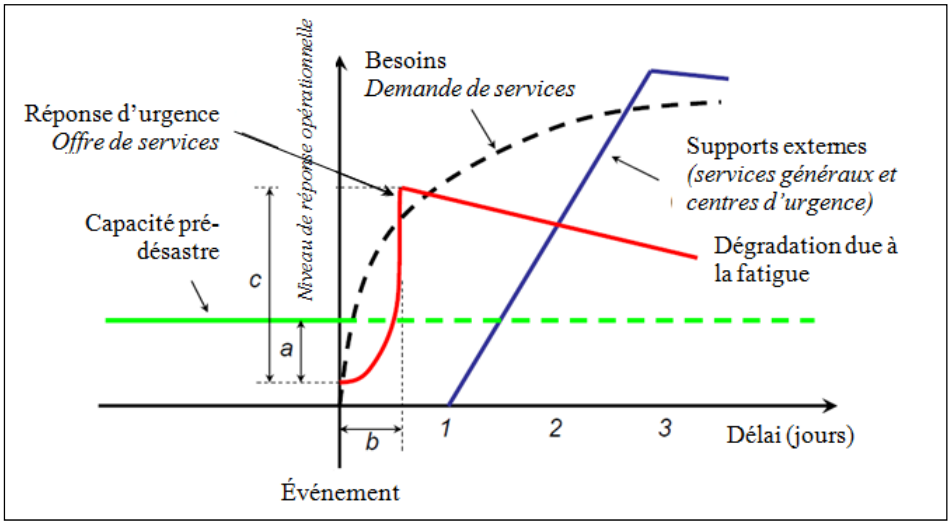


Figure 3.5 Réponse médicale d'urgence en situation post-séisme
Adaptée de Pinto et al. (2011a, p. 10)

3.4 Récapitulatif

À l'instar des méthodes présentées, les interdépendances physiques internes d'un bâtiment d'hôpital peuvent être modélisées sous forme d'AdD. Ce sont des méthodes qui se sont construites graduellement et bénéficient de données de base issues d'observations sur la vulnérabilité sismique des CFO des hôpitaux. Les applications présentées ont des objectifs multiples : évaluation de la priorité sismique, estimation des coûts des mesures de mitigation, évaluation de la capacité des hôpitaux et de la défaillance opérationnelle de services essentiels.

Elles sont, pour la plupart, une partie d'un programme global dont le but est de réduire le risque sismique au niveau des infrastructures ou des équipements critiques. Porter et al. (1993) démontrent également qu'il est possible de modéliser un niveau de performance en regroupant les systèmes les plus critiques des installations. Un grand nombre d'entre eux sont modélisés sous forme d'AdD dans les travaux de Porter et al. (1993) et Pinto et al. (2011a), constituant une bonne base de départ pour la présente recherche mais doivent être adaptés aux spécificités des systèmes analysés. Notre recherche bénéficie également des recommandations de la norme CSA-S832-14 (CSA 2014) pour l'identification des composants et systèmes critiques et des niveaux de performance minimaux spécifiques aux hôpitaux.

3.5 Identification et analyse des interdépendances entre les systèmes critiques

Cette section présente une analyse des composants et systèmes critiques identifiés dans la norme CSA-S832-14 afin de faire ressortir les éléments d'interdépendance. Les analyses portent également sur leur configuration physique et leur vulnérabilité sismique selon des évidences empiriques. Les spécifications des systèmes de CFO, leur mise en place (y compris les conduits de canalisation et les éléments de régulations), l'entretien, la vérification des composants et les tests de conformité sont régis par différentes normes dont la *National Fire Protection Association* (NFPA), les normes des Laboratoires des assureurs du Canada (ULC), les exigences particulières des normes canadiennes ou des lignes directrices de *l'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc.* (ASHRAE). Les exigences sont en fonction de l'usage du bâtiment, son occupation et la distribution des espaces. Compte tenu des interdépendances entre les différents systèmes critiques des hôpitaux, la surveillance de l'ensemble des indicateurs, à partir d'ordinateurs principaux et de panneaux de contrôle, devient une fonction prépondérante qui assure la continuité des opérations. L'identification d'un déclenchement accidentel de l'alarme d'incendie ou de la source d'incendie/fumée, la mesure d'une surtension du système électrique ou d'une baisse du taux d'humidité sont des exemples de gestion quotidienne au sein d'un hôpital. Les paragraphes suivant portent sur l'analyse des systèmes de protection

incendie, l'évacuation sécuritaire des occupants, les systèmes CVCA, les systèmes des gaz médicaux et les services d'infrastructures essentielles et leurs interfaces avec les bâtiments.

3.5.1 Le système de protection incendie

A. Généralités

Les incendies sont une conséquence courante des tremblements de terre (Botting et Buchanan 2000). Ils représentent un problème sérieux compte tenu du potentiel de propagation des foyers d'incendie et de la capacité limitée de réponse dans un environnement post-désastre. Toutefois, l'évaluation des risques associés est un domaine relativement récent. Les conflagrations qui ont détruit les villes de San Francisco et de Tokyo suite à des séismes de magnitude M_w7,8 (San Francisco, 18 avril 1906) et M_w7,9 (Kanto, 1er octobre 1923) sont les exemples les plus catastrophiques mais ont souvent été perçus d'abord comme des incendies et non comme une conséquence du séisme, les incendies étant des phénomènes courants avant la deuxième guerre mondiale (Scawthorn 2011). Par ailleurs, les normes actuelles visant la protection incendie, ont été développées pour des conditions d'exposition normale au feu, c'est-à-dire sans tenir compte de dommages aux bâtiments résultant d'un séisme (Mousavi et al. 2008). On retrouve cependant dans l'édition du CNB 2010 (commentaire C), l'obligation de concevoir les murs coupe-feu pour qu'ils résistent à une charge latérale pondérée de 0,5kPa et de garantir que le bâtiment ait une résistance au feu supérieure à celle du mur ou de manière plus générale à l'ensemble des composants des systèmes opérationnels.

La défaillance des systèmes de protection incendie, les causes et conséquences sont par contre bien documentées (Botting et Buchanan 2000; Mousavi et al. 2008; Scawthorn et al. 2005; Schultz et al. 2003; Strand 2006; Taghavi et Miranda 2003). Scawthorn et al. (2005) ont identifié trois facteurs clés pouvant causer un incendie après un tremblement de terre:

- une accélération au sol élevée provoquant le renversement de produits inflammables qui peuvent exploser ou créer des courts-circuits;
- des déformations inter-étage excessives amenant l'abrasion ou tout autre dommage au câblage électrique;
- la rupture des réseaux souterrains de transport et d'alimentation tels que les conduites de gaz naturel qui fournit alors une source d'inflammation.

B. Interdépendances du système

Trois sous-systèmes, combinés a priori à la résistance au feu des matériaux de construction, forment le système de protection incendie : 1) la détection et l'alarme, 2) le système physique de réponse (gicleurs, extincteurs portatifs généralement en redondance, pompe incendie, etc.) et 3) la ventilation et l'évacuation des fumées dans le cas des bâtiments importants. Le fonctionnement du système de protection incendie présente de nombreux défis et des conflits potentiels avec les systèmes de contrôle de l'environnement (*Voir* Figure 3.6).

On peut citer par exemple :

- la mise en place de registres coupe-feu / coupe-fumée dans le système CVCA pour prévenir la propagation des fumées; dans certains bâtiments le désenfumage peut se faire par ventilation naturelle;
- le fonctionnement du système de ventilation est prépondérant dans un processus d'évacuation sécuritaire (pressurisation des cages d'escaliers par exemple);
- la fermeture automatique des clapets d'alimentation en gaz principalement et autres services essentiels du bâtiment lorsque l'alerte est confirmée par signal d'alarme;
- l'interaction entre les conduits d'alimentation des gicleurs et autres réseaux de distribution dans les plénums: électricité, gaz, communication, etc.;
- l'interaction entre les têtes de gicleurs et les éléments de plafonds suspendus.

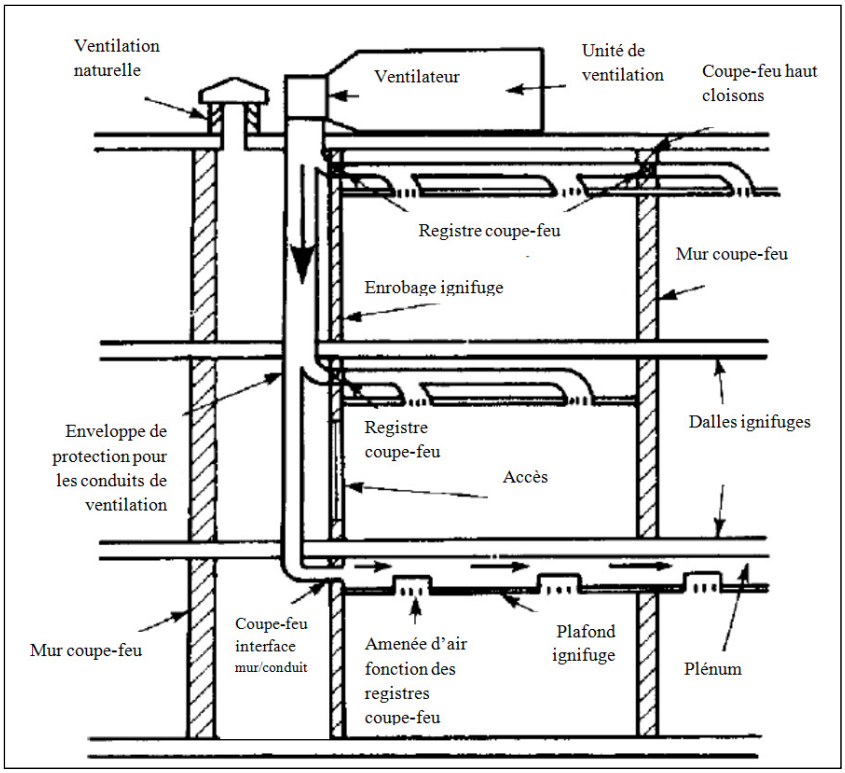


Figure 3.6 Installation des conduits de ventilation
Adaptée de Hall et Greeno (2011, p. 599)

Le système de protection incendie inclut également des aspects opérationnels : 1) l'identification des aires de refuge et des chemins d'évacuation, 2) les moyens de communication avec les occupants et les ressources externes et 3) la formation du personnel et l'élaboration d'un plan d'urgence adéquat pour une réponse rapide. Les systèmes de protection incendie visent à garantir l'intégrité de la structure, la sécurité des vies et la continuité des opérations. Toutefois, les deux derniers objectifs ne sont pas mutuellement inclusifs puisque la mise en route du système peut prévoir une notification d'évacuation rapide répondant ainsi à l'objectif de sauvegarde des vies (Merrit et Ricketts 2001). Ceci s'applique aux séismes.

C. Architecture et vulnérabilité sismique du système

Les dommages observés lors des séismes au système de protection incendie sont très répandus et touchent principalement le système de gicleurs dont les principaux composants sont présentés à la Figure 3.7. Les grandes quantités d'eau relâchées par la rupture des canalisations ou des têtes de gicleurs (remplis d'eau sous pression en permanence) ont causé des dommages directs à des hôpitaux en Californie, amenant par exemple l'évacuation de l'hôpital *Olive View* lors du séisme de Northridge en 1994. La rupture du système de gicleurs est principalement reliée à son interaction avec des systèmes structuraux et non-structuraux adjacents en particulier les plafonds suspendus alors qu'après 1971, l'accent avait été porté sur le contreventement des conduits (Eidinger 2009).

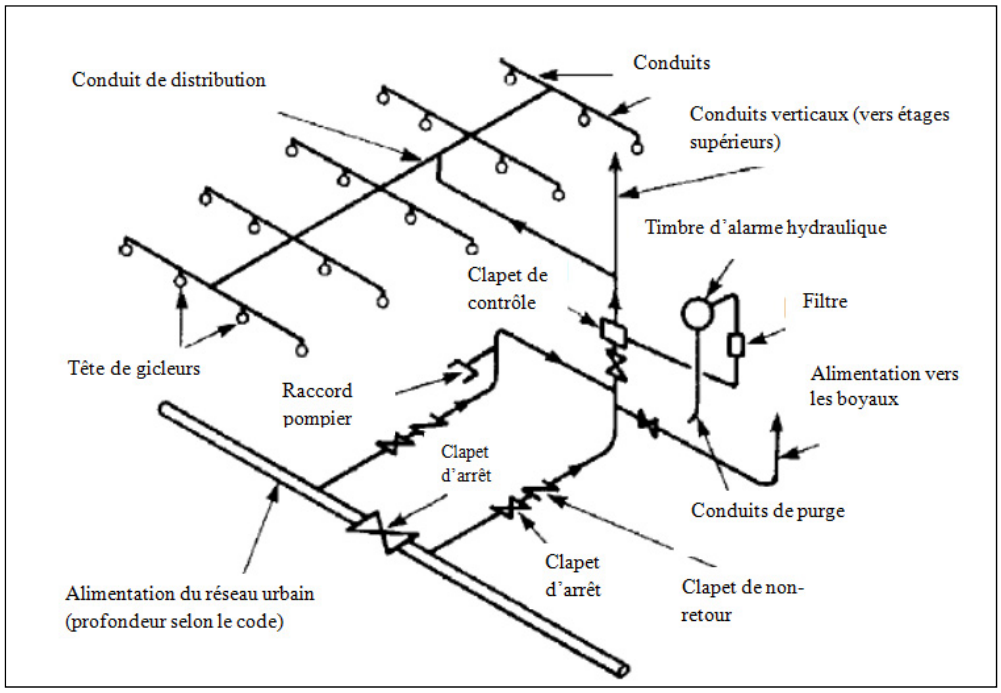


Figure 3.7 Détails d'un système courant de gicleurs à eau
Adaptée de Hall et Greeno (2011, p. 575)

Afin de limiter les dommages accidentels dans des zones nécessitant un degré de protection maximal contre les dégâts d'eau (salles de serveurs, d'archivages, de résonance magnétique, etc.) des systèmes déluge et pré-action sont ajoutés sur le réseau d'alarme et de détection. Concrètement c'est un ensemble de vannes, de manomètres, de clapets et de pressostats (interrupteurs et déclencheurs en fonction de la pression dans le système) qui assurent la régulation du système de déclenchement des gicleurs à eau et à air.

L'installation complète d'un système de gicleurs automatiques comprend par ailleurs la mise en place d'une pompe incendie pour assurer la pression dans les têtes de gicleurs et une série d'accessoires. On peut citer : des robinets normalisés, des clapets de contrôle et d'arrêt, des dispositifs anti-refoulement, d'alarme et de signalisation, des indicateurs et régulateurs de pression, des raccords de pompiers, des soupapes d'alarme, des détecteurs d'écoulement et des réservoirs d'eau. Le système incendie est généralement relié à une génératrice de secours afin d'assurer son fonctionnement à tout moment. Ce sont autant d'éléments ou d'interface avec les services d'infrastructures essentielles qui peuvent être vulnérables lors d'un tremblement de terre. On les retrouve toutefois en redondance en plus d'être soumis à des normes strictes de fabrication et de mise en place. Le risque associé au dommage à ces composants peut être faible ou dépendra principalement des risques reliés à l'environnement proche (chute d'objet ou interaction avec d'autres CFO).

3.5.2 L'évacuation sécuritaire des occupants

L'évacuation d'un hôpital en situation post-désastre est un processus majeur où la sortie ordonnée et sécuritaire des patients est la principale préoccupation. Tout doit être fait dans un environnement limité et en coordination avec les entités responsables de la gestion globale d'urgence. On y retrouve des décisions interdépendantes comme la sélection de la destination, l'ordre d'évacuation en fonction de la mobilité des patients, les moyens de transport, la planification in situ des abris ou encore le choix des zones sécuritaires pour les autres patients moins vulnérables. La complexité provient aussi de la taille des évacuations et de l'interaction entre les différentes décisions (Taaffe et al. 2005). Toutefois, les expériences

du passé ont démontré que les installations concernées ont été évacuées avec succès et que la continuité des soins aux patients a pu être assurée (Schultz et al. 2003). Commentant les exercices de secours ou d'évacuation post-sismiques en Californie, Reitherman (2000) émet des doutes sur leur viabilité en contexte post-désastre puisqu'ils sont menés sans considération de contraintes potentielles évidentes dont les dommages à la structure ou la rupture de services d'infrastructures essentielles.

La Figure 3.8 illustre les alternatives dans l'évacuation d'un bâtiment en condition d'incendie, dans un espace fermé (a) ou dans le corridor (b). Dans ce sens, elle rejoint les exigences minimales pour assurer la protection contre les incendies qui sont spécifiées dans les normes en plus des considérations de la vulnérabilité sismique des CFO: la qualité des structures secondaires (cages d'escaliers et d'ascenseurs), la vulnérabilité des composants architecturaux (plafonds suspendus, équipements d'éclairage, partitions), le dégagement des corridors et issues de secours, l'éclairage de secours, la clarté des signes et la présence de cartes d'orientation au niveau des étages par exemple.

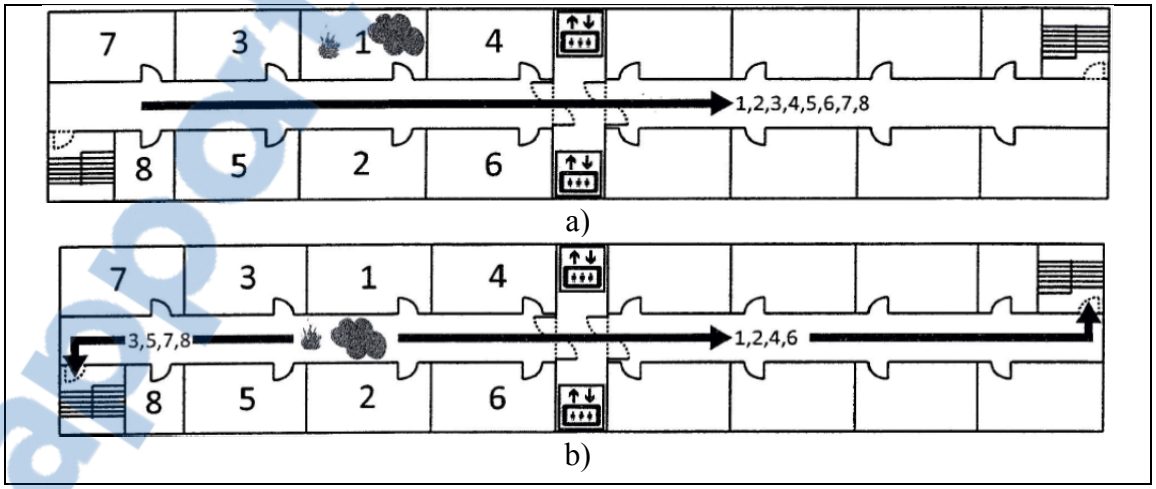


Figure 3.8 Processus d'évacuation horizontale (a) et verticale (b) selon les conditions de propagation de l'incendie
Adaptée de HRDP (2005, p. 7)

À Montréal, plusieurs sessions de simulation d'évacuation générale (désastre interne) ou de Code orange (désastre externe) ont été réalisées par des hôpitaux, en collaboration avec

Rapport-Gratuit.com

l'Agence de santé et des services sociaux de Montréal (ASSS). Le but était de mettre à l'épreuve les processus de gestion des urgences et de les évaluer, mais aussi de bonifier les compétences des intervenants face à une situation de sinistre (ASSSM 2003; 2014; CUSM 2014b).

3.5.3 Les systèmes CVCA

A. Interdépendances et architecture des systèmes

Les systèmes CVCA des hôpitaux doivent répondre à une multitude de fonctions critiques exigeant de hauts niveaux de performance. Le maintien de niveaux optimaux de qualité d'air, d'humidité et de chaleur afin d'assurer le contrôle des infections et des substances dangereuses issues des traitements médicaux implique la mise en place de systèmes d'échange d'air, de traitement et de filtration complexes. Comme mentionné précédemment, les systèmes CVCA contribuent également à la détection et au confinement des incendies ou de la fumée avec des dispositifs d'évacuation, de blocage ou de pressurisation d'espaces donnés. La conception de ces systèmes doit également considérer les conditions météorologiques afin de maintenir une gamme de conditions ambiantes, tant en été qu'en hiver (ASHRAE 2013). Cela peut se traduire dans certains cas extrêmes par l'arrêt préventif du système CVCA ou d'un de ses sous-systèmes en cas de gel.

Un système CVCA courant est constitué principalement d'un système central de chauffage caractérisé par une chaufferie et de nombreux systèmes de conditionnement d'air et d'unités de ventilation selon les spécificités des espaces desservis (corridors, salle d'opération, urgence, résonance magnétique, secteurs critiques, etc.), (*Voir* Figures-A IV-1 et IV-2, ANNEXE IV, p. 217). Par ailleurs, compte tenu de l'importance du système CVCA, on note souvent une redondance, tant au niveau des composants de base que des sources d'alimentation d'urgence en électricité, afin d'assurer le maintien des services critiques en cas de coupure du réseau municipal. Les études montrent que le système CVCA consomme entre 40 et 60 % de l'électricité alimentant un hôpital. Le Tableau 3.2 identifie les fonctions

essentielles des systèmes CVCA indifféremment des sous-systèmes, montrant ainsi les interdépendances internes et les CFO principaux.

Tableau 3.2 Identification des fonctions et des composants principaux des systèmes CVCA

Sous-systèmes	Fonctions	CFO essentiels
Chauffage	- Production de chaleur (à des fins médicales, domestiques et la préparation d'eau chaude sanitaire) - Climatisation des espaces (continue et prioritaire pour les salles d'opération, par exemple) - Ventilation appropriée : pressurisation appropriée selon l'objectif d'évacuation, de maintien des contaminants, de circulation des personnes, etc. - Circulation et renouvellement d'air - Filtration de l'air selon les espaces : besoins de 100% d'air pur dans les aires de soins critiques - Maintien du taux d'humidité adéquat (humidification et déshumidification)	- Chaudières à eau chaude et/ou à vapeur - Vase d'expansion - Modules de production d'eau chaude sanitaire - Réservoirs d'eau chaude - Pompes à eau chaude et à eau condensée
Ventilation, traitement de l'air et système de distribution		- Centrales/Unités de traitement d'air - Ventilateurs - Échangeurs d'air - Refroidisseurs - Pompes à eau - Tour de refroidissement - Groupe compresseur-condenseur ou évaporateur - Conduits et diffuseurs
Conditionnement d'air		
Contrôle	Contrôle	Ordinateurs et autres systèmes connexes

1. Le système central de chauffage inclut les CFO nécessaires à la production de chaleur, d'eau chaude sanitaire ou de vapeur pour les besoins domestiques, de stérilisation et d'humidification, complétés dans certains cas de chauffe-eau localisés;
2. Concrètement, les systèmes CVCA utilisent le conditionnement d'air pour supprimer la chaleur et la ventilation pour maintenir un environnement confortable généralement au moyen de tours de refroidissement, d'un condenseur à air utilisant un fluide frigorigène (du glycol principalement) et d'un condenseur à évaporation dans certains cas intégré à un refroidisseur;
3. Les systèmes de traitement de l'air et de distribution sont composés d'unités d'échangeur d'air, de filtres, d'équipements de réglage de l'humidité et des systèmes de canalisation;

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

4. Le système de contrôle dont la sophistication dépend de celle des nombreux sous-systèmes à surveiller.

B. Vulnérabilité sismique

Le système CVCA compte de nombreux composants lourds qui sont généralement placés au sous-sol des bâtiments. Ils sont soit rigidement ancrés au sol ou montés sur des ressorts afin de limiter la transmission de leurs vibrations au bâtiment. La préoccupation principale est que ces composants peuvent glisser, s'incliner ou se renverser avec la rupture des ancrages ou la fragilité des ressorts (non confinés) et l'absence de butées parasismiques sous l'effets des mouvements verticaux ou de cisaillement (FEMA 2011). Ces mouvements, ajoutés au balancement des équipements suspendus, peuvent alors entrainer la perte des connexions au réseau électrique ou de carburant, la rupture de différentes lignes d'alimentation ou celle des clapets et de composants architecturaux. Les CFO peuvent également cesser de fonctionner en raison d'un mauvais alignement ou de dommages internes.

3.5.4 Les systèmes des gaz médicaux

Les gaz médicaux regroupent un ensemble de gaz essentiels à différents traitements en milieu hospitalier dont « l'air médical » et les gaz de succion (ou vide médical) qui sont respectivement mélangés et fabriqués sur place. Les gaz sont stockés de deux manières distinctes : les bouteilles portatives à haute pression généralement placées dans des espaces à accès restreint pour utilisation en cas d'urgence et les centrales d'alimentation composées d'un réservoir central d'au moins deux sources d'alimentation et d'un réseau de distribution. Un agencement-type d'un réseau d'alimentation en oxygène tel que requis par les normes est présenté à la Figure 3.9.

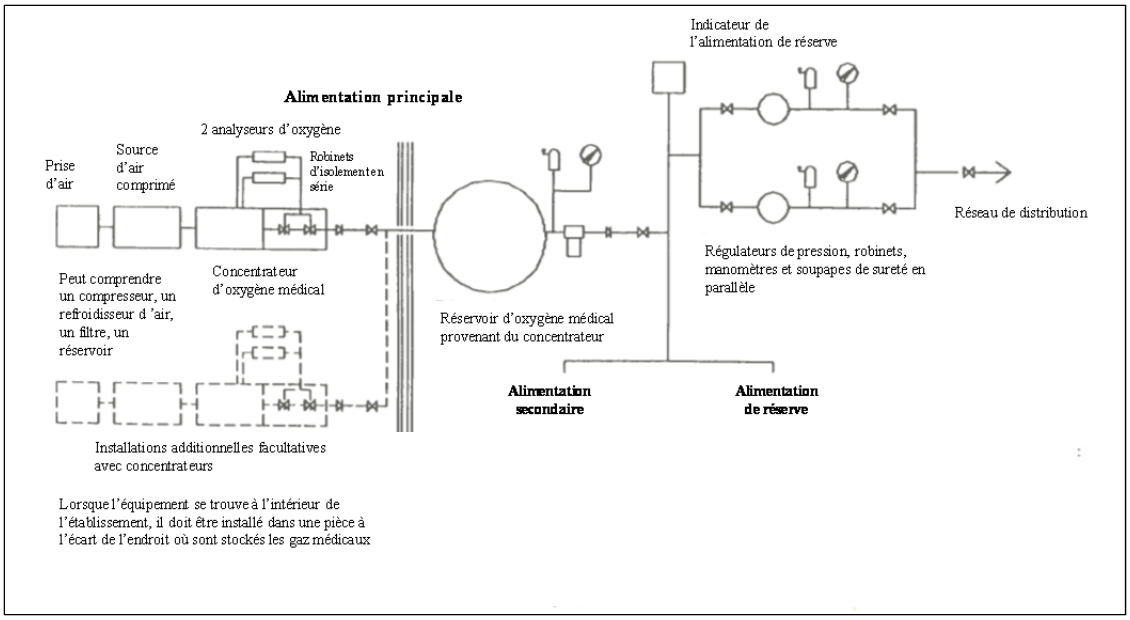


Figure 3.9 Schéma d'une centrale d'alimentation en oxygène médical avec concentrateur
Adaptée de CAN/CSA-Z305.6-92 (1993, p. 32)

Les sources d'alimentation secondaire peuvent être constituées de réservoir de liquide (oxygène) ou de bouteilles à haute pression (CAN/CSA 1993). L'alimentation principale repose sur un ensemble de CFO mais plus particulièrement sur un concentrateur pour l'oxygène et sur un compresseur centrifuge dans le cas de la production d'air médical. Les gaz de succion sont fabriqués à partir d'un système redondant de pompes à vide.

À l'extrémité du réseau de distribution, les modules d'alimentation pour gaz médicaux dans les aires de soins doivent nécessairement passer des tests de résistance aux forces dynamiques et statiques. Ces modules peuvent comprendre les appareils ou systèmes électro-médicaux, avec ou sans applications diagnostiques ou thérapeutiques et une interface de communications (CAN/CSA 2003). La vulnérabilité sismique des composants est typique de celle des systèmes mécaniques, le renversement ou le déplacement des composants lourds ou des bouteilles de gaz sous pression pouvant entrainer l'échappement de produits dangereux ou inflammables.

3.5.5 Les services d'infrastructures essentielles et leur interface avec les bâtiments

Les services d'infrastructures essentielles (SIE) alimentant un centre hospitalier couvrent une large gamme de systèmes comme les réseaux d'alimentation en eau, électricité et gaz naturel, le transport, les télécommunications. Il est évident que la défaillance des réseaux externes a un effet important sur la fonctionnalité des hôpitaux. Les exemples de pannes d'électricité majeures lors de désastres naturelles ou encore de pannes opérationnelles sont bien connus et ont mené à l'évacuation d'hôpitaux (Cole 2006). La tendance est de concentrer les services critiques des hôpitaux sur des lignes prioritaires et sur les systèmes alternatifs d'urgence qui peuvent eux aussi montrer une certaine vulnérabilité.

A. Les SIE dans une perspective globale

Certaines études visent l'analyse des échanges dynamiques de l'hôpital avec les systèmes externes d'alimentation et leur interaction. Ces analyses plus globale intègrent des séquences de réparation, d'optimisation ou des incertitudes du système (fiabilité), en ciblant dans de nombreux cas la résilience, la capacité de fournir des services aux patients, la qualité des flux de patients ou encore des aspects économiques et financiers (Arboleda 2006; Arboleda et al. 2007; Arboleda et al. 2006; 2009; Dueñas-Osorio 2005; Dueñas-Osorio et al. 2004; Ronaldo et al. 2011).

Les auteurs proposent des modèles dynamiques permettant de simuler l'intégration de données internes et externes, la perte de certains sous-systèmes de manière aléatoire, ou encore l'allocation de ressources dans un contexte d'urgence. À l'étape préliminaire, la probabilité de défaillance d'un composant est fonction de nombreux paramètres comme : l'influence de facteurs aléatoires, le facteur temps, la condition de départ (état stationnaire, panne précédente), les corrélations et interdépendances entre les composants de base, etc. Le choix de la méthode d'analyse va dépendre des hypothèses de départ, de la qualité des données disponibles. On y verra aussi l'importance d'inclure la notion de délai de récupération après sinistre.

B. Les interfaces avec les services d'infrastructures

Les services d'infrastructures essentielles peuvent également être analysés en ne considérant que les connexions avec le bâtiment. L'objectif principal est d'assurer simultanément la sécurité des vies et la continuité des opérations en limitant la propagation de dommages venant tant de l'intérieur que de l'extérieur. Les interfaces vont alors représenter une branche dans l'arborescence de différents systèmes critiques de l'hôpital analysé.

Johnson et al. (1999) considèrent la fonctionnalité de la soupape d'arrêt de gaz naturel et du système d'arrêt des ascenseurs comme essentielle à la sécurité des occupants et la fonctionnalité du clapet d'alarme essentielle au système de protection incendie. Ces inclusions reflètent les exigences des codes d'incendie qui traitent des conduits de matières dangereuses, de liquides inflammables et autres substances hautement toxiques (*Voir* Figure 3.10).

Les exigences parasismiques concernant les soupapes d'arrêt sismiques ou les clapets anti-retour varient toutefois d'une région à l'autre (FEMA 2011). La conception de ces éléments parasismiques et la mise en place de la tuyauterie d'alimentation des matières dangereuses sont des domaines d'expertise pour lesquels les références bibliographiques sont limitées, tout comme les recommandations de la norme CAN/CSA-S832. Les recherches expérimentales touchent principalement les modes d'attaches et la réponse des conduits mais demeurent limitées compte tenu de la diversité des configurations possibles et du coût élevé de la démarche. L'évaluation in situ devra tenir compte principalement des risques de dommages reliés à la chute de composants dans l'environnement immédiat des clapets et autres dispositifs. L'opérationnalité du système de contrôle devient également primordiale.

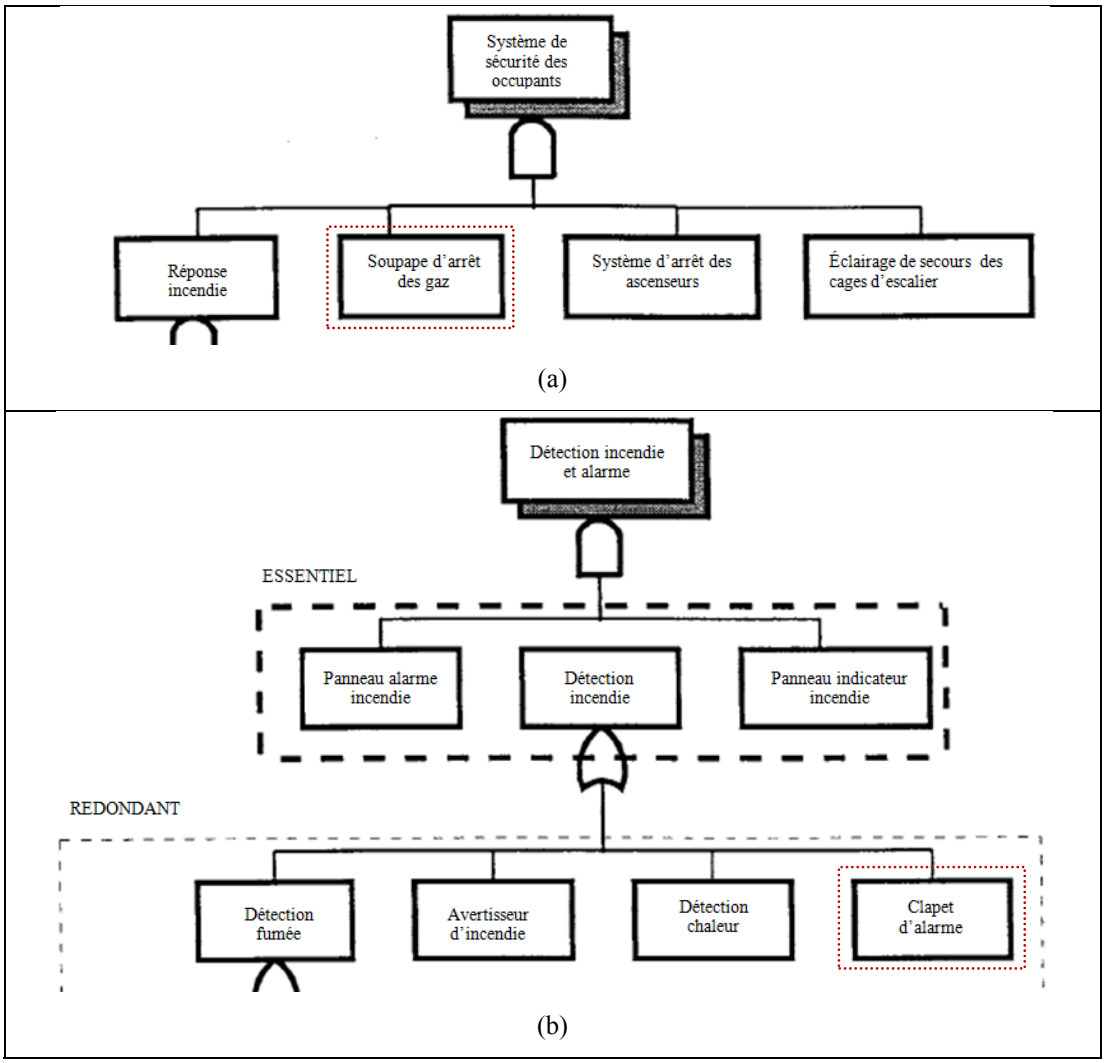


Figure 3.10 Intégration des interfaces avec les services d'infrastructures dans le système de sécurité des occupants (a) et de protection incendie (b)
Adaptée de Johnson et al. (1999, pp. 344, 345)

Pour les systèmes électriques, on considère deux éléments fondamentaux qui reçoivent le courant du réseau de distribution municipal et assurent la protection et la régulation de l'alimentation: les transformateurs et les disjoncteurs. Dans tous les cas d'interface, la vulnérabilité sismique de l'ensemble des conduits, tuyauterie d'eau potable et d'eaux usées, plateaux de câbles, etc. connectés au réseau doit aussi être évaluée pour assurer la continuité des opérations de manière générale et la reconnexion lorsque les réseaux municipaux seront rétablis après le séisme.

Indépendamment des préoccupations sismiques, on retrouve dans les codes, des exigences relatives au confinement à double paroi des conduits transportant des matières dangereuses ou l'eau froide (*Voir* Figure 3.11), la présence de dispositifs automatiques d'arrêt d'urgence, de système de suivi et de détection des fuites, la qualité des conduits, etc. (FEMA 2011). À cela s'ajoute la nécessité d'assurer un accès approprié pour l'entretien (ASHRAE 2013).

Figure 3.11 Cohabitation des systèmes d'ingénierie desservant un hôpital

La Figure 3.11 dépeint également un exemple de cohabitation de différents conduits de distribution dans des espaces restreints généralement alloués : protection-incendie, téléphone, ascenseurs, eau froide (tuyauterie double paroi), etc. On note également la vulnérabilité sismique de l'interface mur-composants due aux mouvements relatifs des différents conduits.

.

3.6 Synthèse de la revue de littérature – Objectif 3 : identifier et analyser les interdépendances entre les systèmes

Ce chapitre a traité tout d'abord des outils d'évaluation de la fiabilité des systèmes de manière générale et des méthodes développées pour l'évaluation spécifique des systèmes critiques des hôpitaux. Le but était d'identifier les interdépendances entre les différents

systèmes critiques, de comprendre la complexité inhérente des systèmes reliée à leur conception et à leur fonctionnement et de cibler des outils d'évaluation. Les systèmes critiques ont par la suite été examinés selon leur performance sismique historique et des considérations opérationnelles. Dès lors, les différents niveaux de performance attendus d'un hôpital ou d'un de ses sous-systèmes critiques, incluant la structure, peuvent être modélisés sous forme d'AdD autour duquel un consensus s'est développé. Les prérequis pour l'analyse sont les suivants :

1. Le choix des frontières entre l'hôpital ou ses systèmes et l'environnement externe est une décision importante qui doit être prise au début du projet, afin de cibler l'approche à retenir et de garantir la faisabilité de l'analyse (Vesely et al. 1981) : le choix est fait d'analyser les vulnérabilités physiques internes des bâtiments;
2. Le niveau de détail recherché et le nombre de composants à considérer dans l'analyse des systèmes : on se base sur les leçons tirées d'expériences passées qui permettent de centrer l'intérêt sur un certain nombre de composants jugés hautement vulnérables, les préoccupations des gestionnaires et la présence d'interaction claire puisque l'analyse par AdD est approche déterministe;
3. L'estimation ponctuelle d'un indice de fonctionnalité ne représente que peu d'intérêt sans un cadre global définissant des intervalles de performance probables ou de niveau de risque acceptable.

CHAPITRE 4

CADRE D'ÉVALUATION DE LA FONCTIONNALITÉ POST-SISMIQUE DES HÔPITAUX DE MONTRÉAL

La revue de littérature des chapitres 1 à 3 a permis de recenser les outils et procédures disponibles pour mener à bien la recherche. Elle a aussi permis de répondre aux trois premiers objectifs fixés pour cette recherche: 1) établir les objectifs de performance d'un centre hospitalier, 2) identifier les relations entre les vulnérabilités des composants et 3) identifier et analyser les interdépendances entre les systèmes.

Ce chapitre présente le cadre d'évaluation de la fonctionnalité post-sismique des hôpitaux en définissant la problématique spécifique à l'île de Montréal et son contexte d'application. On s'attarde sur les outils qui sont utilisés pour le développement de la procédure d'évaluation. Afin de limiter les incertitudes, on propose une approche déterministe qui s'appuie sur des grandeurs mesurables issues de procédures établies: un indice de risque (*SRI*) et une probabilité de dommages (*P*). Le premier paramètre s'inscrit dans les normes canadiennes et le deuxième est couramment utilisé dans la pratique du génie parasismique et les études de risque sismique. Quant à la prédiction de la fonctionnalité post-sismique, elle se fait sous la forme d'analyse de fiabilité de systèmes.

4.1 Problématique spécifique à Montréal

4.1.1 Portrait des infrastructures hospitalières

L'île de Montréal compte 33 centres hospitaliers de soins aigus, de santé mentale et de soins de longue durée qui, advenant un fort tremblement de terre, peuvent être réquisitionnés pour répondre à l'urgence. La majorité de ces installations hospitalières ont été construites avant l'application des normes modernes de construction instaurées autour de 1970. Des travaux de rehaussement sismique ont été effectués dans certains bâtiments mais le portrait général en termes de leur capacité à assurer la continuité des services est inconnu. La répartition des

Rapport-Gratuit.com

installations critiques sur l'île de Montréal, les statistiques sur le nombre d'étage et les années de construction ainsi que les hôpitaux-témoins de l'étude sont illustrés à la Figure 4.1. Les bâtiments construits avant 1920 sont généralement des structures en maçonnerie de pierre. Avec les projets de construction des deux nouveaux campus des centres hospitaliers universitaires de Montréal (le CUSM maintenant opérationnel et le CHUM toujours en construction), ces structures ainsi que d'autres jugées vétustes (notamment celles construites avant 1934) seront relocalisées dans de nouveaux bâtiments de conception parasismique.

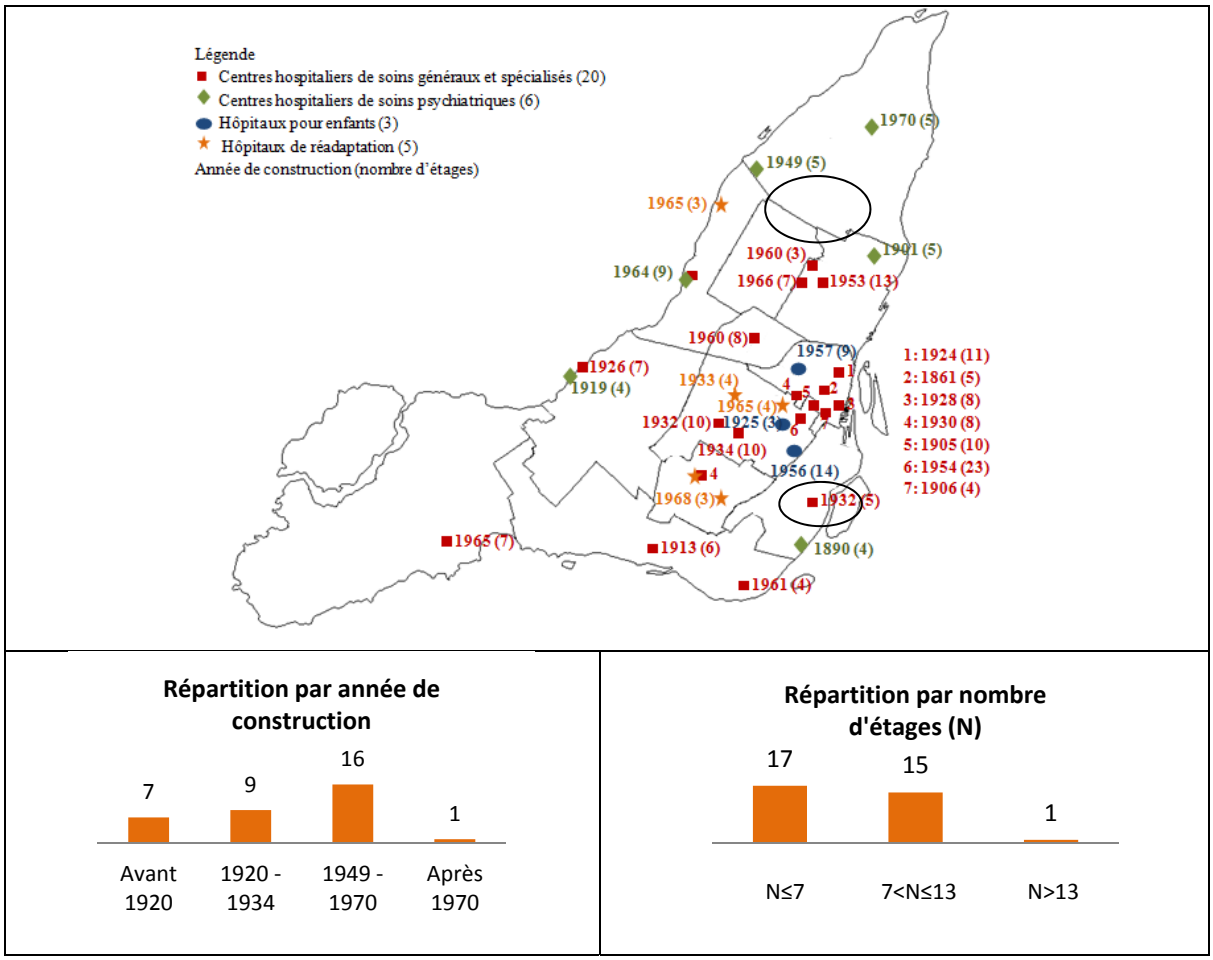


Figure 4.1 Répartition des centres hospitaliers sur l'île de Montréal et identification des hôpitaux-témoins

4.1.2 Sismicité et effets de sites à Montréal

Le processus d'établissement de critères d'évaluation du risque sismique est en grande partie basé sur l'histoire des séismes qui ont secoué une région, le mode de propagation des ondes sismiques et l'intensité des secousses auxquelles on devrait s'attendre dans le futur (Mitchell et al. 1990a). Des séismes significatifs se sont déjà produits à Montréal et peuvent encore se produire dans l'avenir (Lamontagne 2002; RNC 2013). Le Tableau 4.1 présente une compilation de dommages rapportés lors de séismes historiques majeurs.

Tableau 4.1 Séismes historiques majeurs ressentis à Montréal
Adapté de Chouinard et al. (2004), Halchuk (2002), Gouin (2001)

Date (épicentre)	**Magnitude M_L** [6]	**Intensité estimée (MMI)**	**PGA estimé (g)**	**Dommages rapportés (Gouin, 2001)**
1732-09-16 (Montréal)	5,8	VIII	0,24	- Effondrement de près de 600 cheminées, plus de 300 maisons endommagées; Réhabilité après les deux conflagrations de 1695 et 1721, « *l'Hôtel-Dieu est un des bâtiments qui ont le plus souffert* » - Épicentre dans la région des Adirondacks
1816-09-09 (Montréal)	5,7	VIII	0,21	Confirmation de l'épicentre proche de Montréal mais avec une intensité inférieure à VI, ce qui explique l'absence de dommages répertoriés.
1816-09-16 (Montréal)	5,0	VI	0,08	
1893-11-27 (23 km de Montréal)	5,7	VI	0,09	Évacuation des bâtiments du centre-ville; Secousse ressentie à l'hôpital général; Bris de vitres.
1897-03-23 (Montréal)	5,0	VI	0,08	Dommage aux murs et aux plafonds, chute/renversement d'objets, communications téléphoniques interrompues; Début d'incendie maitrisé.

[6] L'interprétation de la magnitude d'un séisme dépend de l'échelle utilisée. En Californie par exemple, magnitude de Richter (M) sera souvent associée à des séismes de magnitude inférieure à 6,5 et M_w et M_s dans le cas contraire (Filiatrault et al. 2013). En se basant sur les relations empiriques de Nuttli, M_L5,0 correspond à M_w4,6 ou M_w 4,8.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Ces séismes sont caractérisés soit avec une intensité macrosismique (MMI- échelle d'intensité Mercalli modifiée) supérieure à VI et une magnitude (M_L) supérieure à cinq. Les PGA (accélération maximum au sol) estimés sont de l'ordre de 0,085g à 0,241g; des valeurs supérieures dépassant celui d'un séisme d'occurrence de 10% en 50 ans pour Montréal dont le PGA est de 0,12g selon le CNB 2010.

Dans le cas des séismes historiques, les valeurs de magnitude, d'intensité et de PGA sont généralement déduites en confrontant les informations provenant de sources diverses comme les journaux personnels, les annales des maisons religieuses, les dossiers gouvernementaux, les articles de presse. À titre d'illustration, Gouin (2001) propose pour le séisme de 1732, un épicentre dans la région des Adirondacks (Nord-ouest de l'état de New York – 44°N, 74°O) mais une magnitude équivalente alors qu'il place les événements de 1816 en novembre.

Montréal est largement construite sur des couches non consolidées d'alluvions fluviales et marines connues pour amplifier les ondes sismiques (Chouinard et Rosset 2007; Rosset et Chouinard 2009). Selon ces auteurs, la conjonction de la vulnérabilité du bâti existant et des conditions de site peut résulter en des dommages significatifs à l'échelle de la ville dans le cas d'un séisme comparable à l'événement de 1732. Gouin (2001) y fait référence à maintes reprises dans son ouvrage et commente les dommages relevés à la qualité des constructions. En 1893, « *l'observation confirme que la partie de la ville construite sur le roc ressentit davantage la phase P du tremblement de terre, et le centre-ville, qui est construit sur un terrain non consolidé, ressentit davantage les ondes longues* » (Gouin 2001, p. 974). Plus récemment, l'exemple de la réponse de l'hôtel de ville de Montréal-Est, lors du séisme de Saguenay (25 novembre 1988, M_w5,9) est significatif des effets de site. Dans ce cas-ci, les dommages ont été enregistrés dans une zone d'intensité MMI de V et à plus de 350 km de l'épicentre. L'édifice a subi des dommages importants à son recouvrement de maçonnerie et les études ont montré qu'il reposait sur 17 mètres d'argile et le site souffrait déjà de tassements importants avant le tremblement de terre (RNC 2013).

La Figure 4.2 illustre la comparaison entre la géologie du sous-sol de l'île (a) à la répartition de la fréquence de résonance des sites extraite de tests de vibrations ambiantes (b) (Chouinard et Rosset 2007; Chouinard et al. 2004). Ces travaux ont mené au développement de cartes de microzonage et à la définition de quatre zones d'amplification sismique. La zone A correspond à une amplification faible, les zones B et D sont celles à amplification intermédiaire (1 à 2) alors que dans la zone C le coefficient d'amplification se situe entre 1 à 3, ou un niveau élevé.

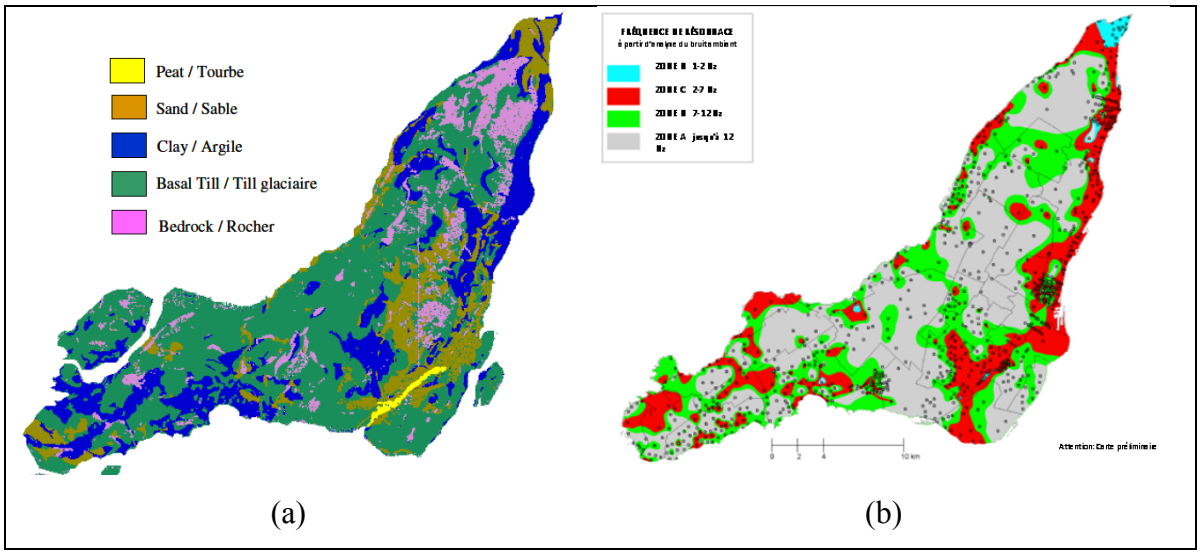


Figure 4.2 Cartes de Montréal: a) carte simplifiée des dépôts géologiques et b) amplification relative des ondes sismiques en fonction de la fréquence dominante des sols
Tirée de Chouinard et al. (2004, p. 3) et Chouinard et Rosset (2007, p. 518)

Les analyses sont faites à partir de plus de 3000 puits de forage couvrant le territoire montréalais pour lesquels les données géologiques, géotechniques et la vitesse de cisaillement (V_s) ont été précédemment établis (Chouinard et al. 2004; Madriz 2005; Rosset et al. 2003). Ces informations sur les effets de site et les conditions géotechniques vont être utilisées pour définir les sites et développer différents scénarios d'aléa sismique au chapitre 7. Contrairement aux bâtiments récents, de nombreuses structures existantes sont construites sur des sols déformables en plus d'être construits sur des semelles isolées favorisant les déplacements différentiels.

4.2 Méthodologie détaillée de la recherche

La Figure 0.2 de l'introduction présentant la méthodologie de ce travail de recherche est éclatée pour faire ressortir le contexte théorique développé dans les chapitres précédents. Les quatre étapes principales successives à l'établissement d'une méthode d'évaluation de la fonctionnalité post-sismique des hôpitaux de Montréal sont identifiées (*Voir* Figure 4.3).

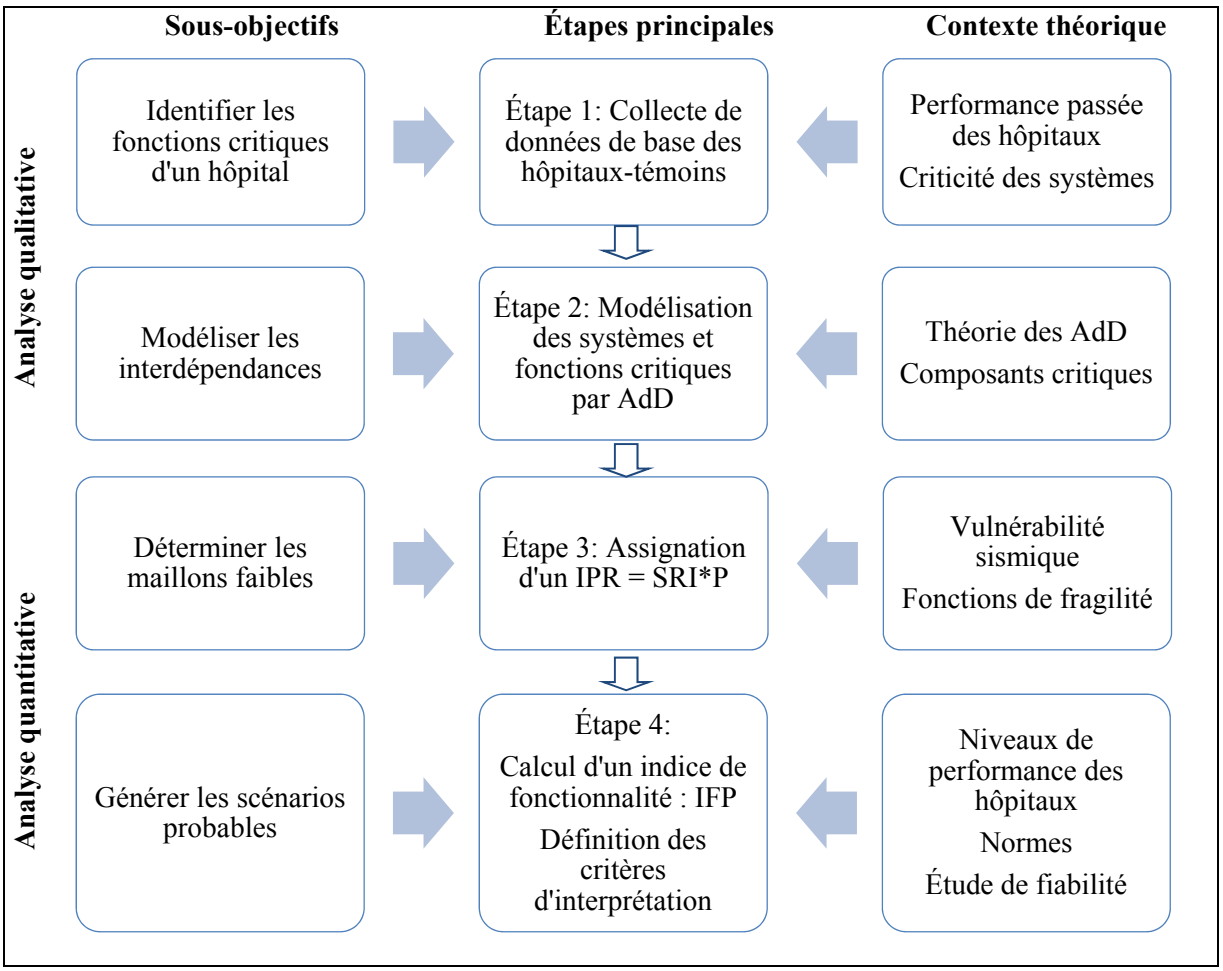


Figure 4.3 Méthodologie détaillée de la recherche

Les quatre étapes sont développées dans les paragraphes suivants, avec des compléments théoriques sur les procédures/outils qui sont utilisés. Le but est d'identifier les paramètres de l'étude et les données requises pour l'évaluation de la fonctionnalité post-sismique des

hôpitaux. Ce sont des étapes itératives qui nécessitent la validation des données tant au niveau de la littérature que sur les sites des hôpitaux-témoins.

4.3 Étape 1 : Collecte de données des hôpitaux-témoins

L'objectif de cette étape est de collecter l'information devant mener aux études de cas. Le Tableau 4.2 identifie les données requises et celles à collecter sur les sites des hôpitaux.

Tableau 4.2 Récapitulatif des paramètres d'analyse du risque associé aux composants

<table>
<tr><th rowspan="2">Étapes</th><th colspan="2">Données requises</th><th rowspan="2">Données à collecter</th></tr>
<tr><th>Structures</th><th>Composants non-structuraux</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Aléa sismique et intégration des effets de site</td><td>Demande sismique : S_d</td><td rowspan="2">RG : facteur de sismicité locale fonction de l'accélération spectrale à 0,2s au site d'étude; Sa(0,2)</td><td rowspan="2">Données d'aléa sismique au site/Montréal.</td></tr>
<tr><td>Catégorie d'emplacement</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Vulnérabilité sismique</td><td>Potentiel de défaillance</td><td rowspan="2">RE : fonction des caractéristiques de l'élément et de ses attaches à l'ossature</td><td rowspan="3">- Potentiel de défaillance et irrégularités structurales par inspection
- Caractéristiques structurales propres et SFRS (consultation des plans disponibles),
- Caractéristiques modales par MVA
-Conditions des composants (mode d'attache, environnement)
-Importance du composant dans le fonctionnement de l'hôpital
- Type de systèmes, composition et présence de redondance.</td></tr>
<tr><td>Masse et géométrie</td></tr>
<tr><td>Paramètres modaux : période fondamentale</td><td>RB : dépend de la période fondamentale du bâtiment et de la catégorie d'emplacement</td></tr>
<tr><td colspan="2">Probabilité de dommages (courbe de fragilité)</td><td>Données de déplacement et d'accélération critique pour la construction des courbes.</td></tr>
</table>

Cette collecte se fait par l'inspection des différents bâtiments et de leurs CFO, l'analyse de plans et la caractérisation structurale des bâtiments à partir des paramètres modaux (période, mode de vibration et amortissement) extraits de mesures de vibrations ambiantes. .

De manière générale, ce sont des informations qui permettent d'évaluer la vulnérabilité sismique de la structure et des CFO. Compte tenu du nombre important de CFO, la démarche consiste à identifier les systèmes critiques sur la base des conclusions des chapitres 2 et 3 et des priorités de l'hôpital et par la suite, d'inspecter les CFO et leur mode d'attache.

La base de données complète est présentée au Chapitre 5. Les AdD représentent les spécificités de chacun des systèmes et résultent de l'inventaire des composants dans les bâtiments réalisé à l'étape 1. Toutefois, certains composants sont inaccessibles et des hypothèses doivent être posées.

4.4 Étape 2 : Modélisation des systèmes reliés aux niveaux de performance des hôpitaux

Cette section présente le développement des AdD pour trois niveaux de performance : « sécurité des occupants », « occupation immédiate » et « fonctionnalité ». Cette description sert à démontrer l'approche utilisée pour construire et analyser les systèmes critiques des hôpitaux avec la multiplicité des sous-systèmes/composants en interaction. Par ailleurs, bien que l'aspect humain ne soit pas pris en compte dans cette recherche, il convient de souligner la prépondérance d'une gestion appropriée de l'urgence comme recommandé par le CNB dans son annexe 3.3.2.1. Cet alinéa stipule que la sécurité incendie dans les hôpitaux dépend de la formation du personnel à assurer les fonctions essentielles de sécurité et des mesures prises pour assurer un degré équivalent de réponse en cas d'empêchement du personnel responsable.

Les recommandations principales des codes sur le contrôle des CFO, et la performance des systèmes critiques (*Voir* Tableau 1.4) ont mené à la construction des AdD selon les niveaux de performance recommandés « sécurité des occupants » considéré comme prépondérant et

faisant partie intégrante de l'objectif d'« occupation immédiate » (*Voir* Figure 4.4) et « fonctionnalité » (*Voir* Figure 4.5).

Rappelons que l'objectif de performance du code pour un aléa de 2% en 50 ans est l'occupation immédiate et la fonctionnalité totale pour l'aléa de 10% en 50 ans. Ceci présuppose que pour l'aléa de conception (2% en 50 ans) le code admet qu'un hôpital peut ne pas être totalement fonctionnel. Six systèmes critiques sont retenus pour l'analyse, ils sont numérotés de manière identique afin de suivre la variation des composants considérés dans chacun des sous-systèmes.

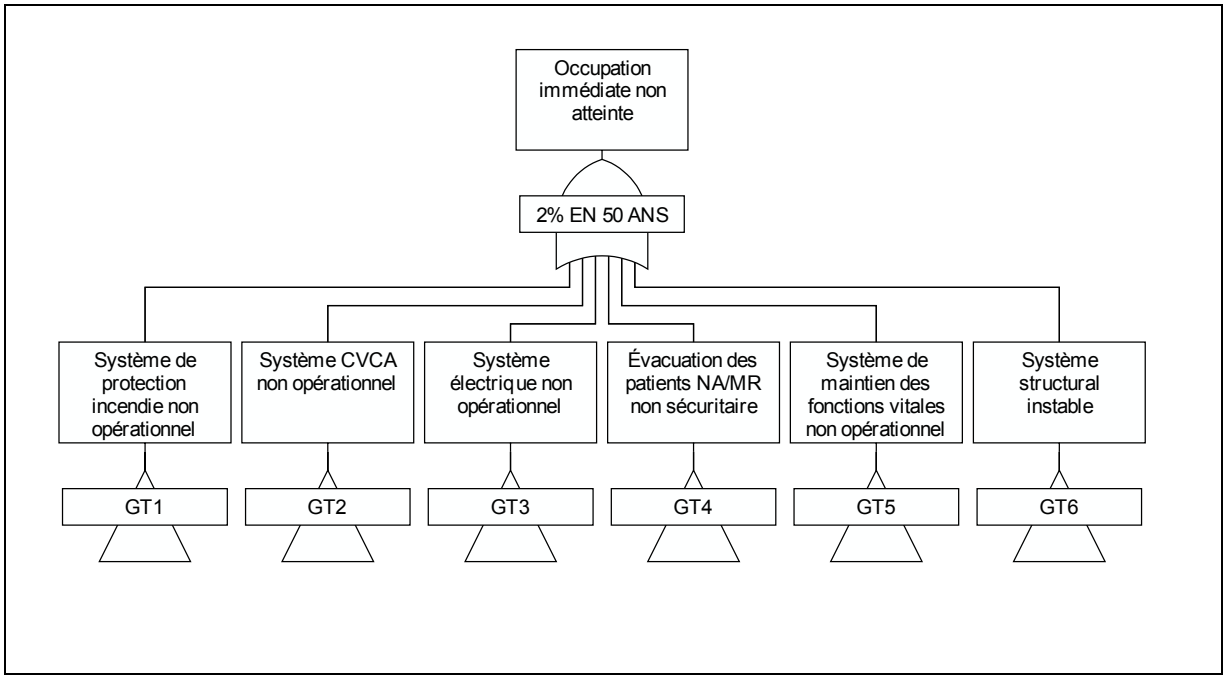


Figure 4.4 Arbre de défaillance pour un niveau de performance « sécurité des occupants » et « occupation immédiate »

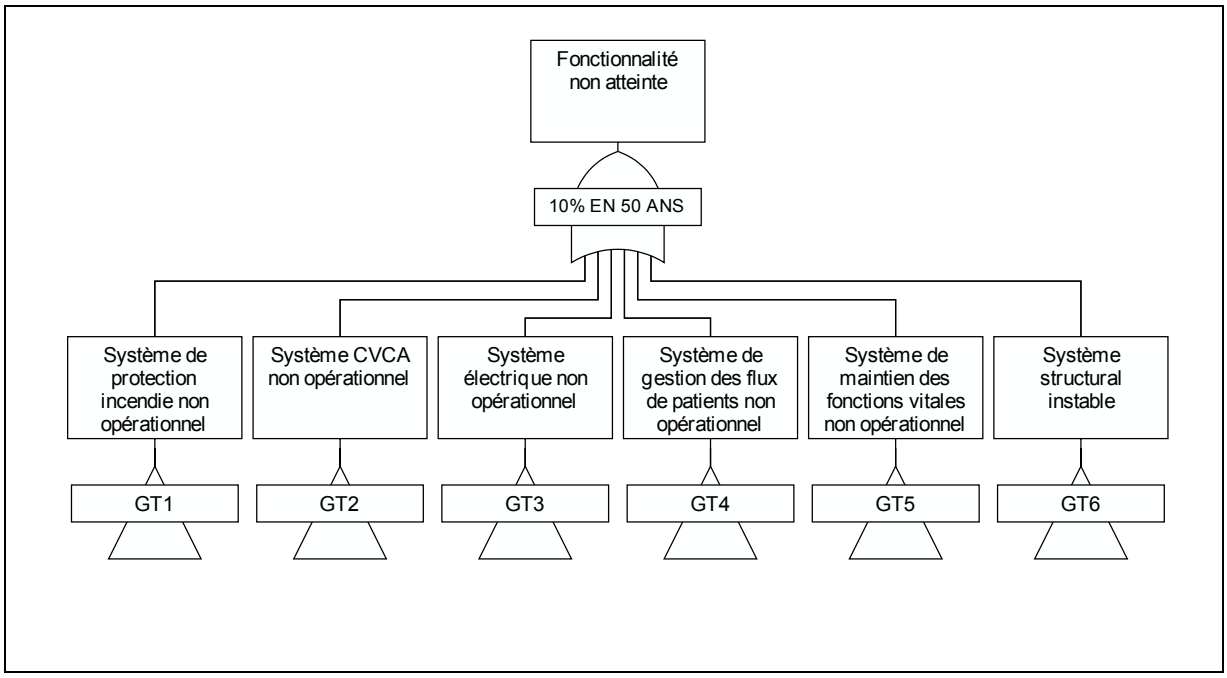


Figure 4.5 Arbre de défaillance pour un niveau de performance « fonctionnalité »

Les systèmes sont les suivants :

- le système de protection incendie (GT1);
- le système CVCA (GT2) qui aide à maintenir la qualité d'air et l'évacuation des fumées;
- le système électrique (GT3), principalement l'alimentation de secours dans le cas de l'évaluation du niveau de sécurité des occupants;
- le système (GT4) d'évacuation sécuritaire partielle ou globale des patients non autonomes ou à mobilité réduite (NA/MR) intervient de manière prépondérante pour garantir la sécurité des vies (*Voir* Figure 4.4). Il faut aussi voir ce système dans un cadre plus complexe de gestion des flux de patients incluant la fonctionnalité du système d'archivage des dossiers (*Voir* Figure 4.5);
- le système de maintien des fonctions vitales (GT5), compte tenu de la criticité d'hôpitaux spécialisés, l'opérationnalité des systèmes de soins intensifs ou de physiothérapie, les réseaux de distribution des gaz médicaux constituent des enjeux reliés à ce système;

- le système structural (GT6) qui compte un ou plusieurs bâtiments, selon la répartition des composants de la base de l'arborescence.

Les évènements intermédiaires sont par la suite développés en fonction des spécificités des études de cas ou de manière générale mais selon le même schéma arborescent pour arriver à des évènements de base. La défaillance de ces derniers est directement reliée aux secousses sismiques et le dommage contribue à la perte significative de fonctionnalité. On note que pour les composants considérés, le risque associé est différent:

- des dommages structuraux reliés à la vulnérabilité de la structure et la probabilité d'atteindre un niveau de dommages,
- des dommages non-structuraux en fonction de l'interaction entre l'ossature et les CFO (déplacement inter étage) mais aussi dû uniquement à la défaillance du CFO (insuffisance des attaches) et de ces conséquences sur d'autres CFO et sur l'environnement immédiat. L'exemple des bonbonnes de gaz, généralement en nombre important, illustre bien le risque élevé sur la sécurité des occupants, lorsque l'entreposage est inefficace.

On retrouve dans la littérature différentes listes de composants considérés comme résistants aux secousses ou *rugged equipment* qui ne sont pas à considérer dans une évaluation globale. ATC (2011) regroupe par exemple dans cette catégorie de composants, les poutres de plancher ne faisant pas partie du SFRS ou des CFO spécifiques comme certains types de valves, les cabines d'ascenseurs, par exemple. Le guide sur les mesures de protection des composants y inclut les moteurs et les dispositifs de commande électrique ou hydraulique DFCM (2013).

4.5 Étape 3 : Calcul d'un indice de priorité de risque IPR

Un indice de priorité de risque (IPR) est défini. Il découle de la combinaison des conditions in situ ou le niveau de risque sismique relié aux composants de base et de la probabilité de dommages lors d'un séisme. Concrètement, l'IPR est calculé selon l'équation (4.1).

Rapport-Gratuit.com

$$IPR = SRI * P \tag{4.1}$$

Où :

SRI : est un indice de risque sismique qui reflète les conditions in situ ou le niveau de risque sismique qui y est associé, tant pour la structure que pour les composants non-structuraux;

P : la probabilité de défaillance (P) du composant considéré.

En référence au Tableau 3.1, on définit ainsi les modes de défaillance des composants qui sont les intrants essentiels aux études de fiabilité. Le choix est validé par la méthode d'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC). Les intrants et extrants des deux processus sont comparés à la Figure 4.6.

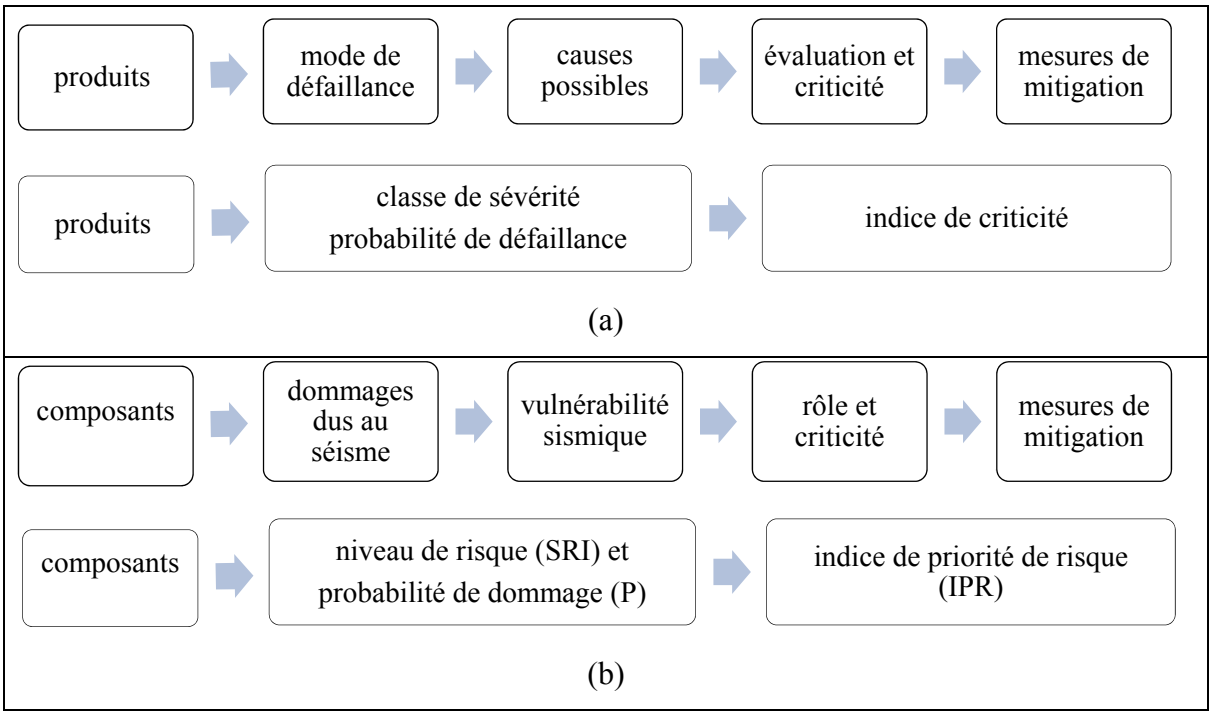


Figure 4.6 Comparaison des processus d'établissement des indices de criticité de l'AMDEC (a) et de l'IPR pour les composants (b)

L'AMDEC est née de la nécessité d'évaluer les systèmes du secteur de l'armement (NASA) et de compiler les informations sur la fiabilité des composants des chaines de production (Kélada 1998; MIL-STD-1629A 1980). Initialement le résultat est un indice de criticité calculé comme le produit de différents paramètres qui relient la classe de sévérité du produit/composant à sa probabilité de défaillance. Les nouvelles études ajoutent un troisième facteur modulateur qui indique la capacité de détection des pannes/défaillances éventuelles (Rausand 2005; Robert 2006). Cette analyse a fait ses preuves dans de nombreux domaines et est connue comme un outil de fiabilité et de sécurité en plus d'être complémentaire, entre autres, à l'analyse par AdD. C'est un processus qui peut s'avérer complexe dans le cas de l'analyse de la chaine de production dans laquelle les causes des modes de défaillances sont nombreuses. Parallèlement, l'application à la détermination de l'IPR est facilitée par l'unicité du dommage au composant (dû au séisme), l'identification de son rôle et de son importance dans la fonctionnalité de l'hôpital.

4.5.1 Détermination de l'indice SRI

Trois procédures indicielles développées ou adaptées pour le Québec peuvent être considérées pour calculer les indices de structure: 1) la méthode du Conseil national de recherches du Canada NRC-92 (Rainer et al. 1992) et sa mise à jour reflétant les dispositions sismiques du CNB 2005 (Saatcioglu et al. 2013), 2) la méthode Karbassi et Nollet (Karbassi et Nollet 2008) et 3) la méthode de Tischer (Tischer 2012). Les trois procédures prennent en compte des paramètres tels que le type de sol, la hauteur du bâtiment, les irrégularités géométriques, l'année de conception et de construction et le SFRS. Ces procédures donnent ainsi une approximation de la vulnérabilité sismique des structures. Il est alors possible, sur la base des indices calculés, de comparer différents bâtiments ou d'établir les dommages structuraux potentiels qui peuvent limiter la fonctionnalité post-sismique d'un système quelconque dans lequel la structure fait partie de l'arborescence.

Alors que le calcul de l'indice du NRC-92 s'appuie principalement sur une comparaison de la force de cisaillement à la base au moment de la conception et celle requise par le CNB 1990,

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

les indices des procédures de Tischer, Karbassi et Nollet s'appuient sur la probabilité d'effondrement des différents systèmes structuraux, à l'instar du FEMA 155. La procédure de Tischer cible les bâtiments scolaires et introduit, entre autres, un indice indépendant relié au risque d'effondrement hors-plan des murs de remplissage non armé. Les irrégularités verticales et en plan ont aussi un impact important dans le calcul du pointage. La procédure de Karbassi et Nollet incluent plusieurs usages de bâtiments et considère l'aléa sismique au niveau de la province de Québec ou du Canada, ainsi que les effets d'amplification des sites. Par ailleurs, la procédure NRC-92 considère le risque pour les occupants associé à la présence d'éléments non-structuraux sans évaluation de la fonctionnalité des CFO. Le pointage d'un bâtiment hospitalier augmente de 100% par rapport à un bâtiment d'importance normale.

La comparaison entre ces 3 procédures pourrait se faire encore sur de très nombreux points en raison des hypothèses sous-jacentes sur l'importance relative des paramètres et de leur approche méthodologique respective. Bien que toutes ces procédures peuvent être adaptées à la démarche proposée, on retient la procédure indicielle NRC, puisqu'il est possible :

- d'examiner la variation de deux facteurs précis: la catégorie d'emplacement (paramètre B) et les irrégularités géométriques du bâtiment (paramètre D), le facteur C variant selon le SFRS du bâtiment analysé;
- de garder constant le facteur de sismicité de Montréal (A);
- d'exclure l'interaction entre les dommages structuraux et non-structuraux considérée avec un risque constant (paramètres E et F) afin de limiter la redondance dans l'analyse puisque les systèmes de CFO constituent un élément de la méthodologie intégrée.

Cette méthode montre une grande sensibilité aux différents paramètres qui a comme effet de multiplier les scénarios de risques possibles et de constituer une base de données statistiquement viable. L'indice de risque SRI des CFO est déterminé selon la procédure de la norme CAN/CSA-S832-14 présentée aux paragraphes 1.4.3 et 2.4.1. Avec la variation la catégorie d'emplacement, l'aléa sismique et la période naturelle fondamentale du bâtiment, il

est possible d'aller chercher un ensemble de systèmes de CFO correspondant aux structures de la base de données.

4.5.2 Détermination de la probabilité de dommage P

La probabilité cumulative de dépasser un niveau de dommage (P) est extraite de courbes de fragilité. Pour le développement de la méthodologie, la valeur P est calculée selon les données de base (demande sismique et écart-type) de la procédure HAZUS (FEMA 2012). Compte tenu du nombre important de CFO retrouvés dans les hôpitaux, l'approche HAZUS basée sur une catégorisation selon la sensibilité au déplacement ou à l'accélération permet de couvrir l'ensemble de ces CFO. La demande sismique est calculée à partir d'un modèle simplifié équivalent (ESDOF); les CFO sont alors considérés logés à une hauteur équivalente du bâtiment dans le calcul de l'indice IPR générique.

Les données génériques de HAZUS pour les paramètres de déplacement spectral médian (Φ) et d'écart-type (β) sont intégrées à une fonction de distribution log normale standard construite sur MS Excel. Le choix de modèles simplifiés équivalant (ESDOF) aux bâtiments-témoins suivra les mêmes variables considérées dans le calcul du SRI, ceci pour des raisons de constance et d'uniformité dans les calculs des indices de fonctionnalité.

Une phase de validation des valeurs considérées de demande sismique et de la répartition de la probabilité de dommages et une étude de cas complètent le processus de développement de la méthodologie d'évaluation. Dans les deux cas, il est possible de construire des modèles élastiques des bâtiments-témoins et de les caractériser à partir des mesures de vibrations ambiantes. La démarche globale est schématisée à la Figure 4.7 et comprend deux étapes :

1. L'utilisation des valeurs maximales du spectre de réponse de Montréal pour développer la méthodologie d'évaluation et l'utilisation des courbes de fragilités construites de Hazus pour le calcul de la probabilité de dommage P;

2. La modélisation plus détaillée (modèle-cadre 2D) de quatre bâtiments pour les études de cas spécifiques. On se propose également de valider les calculs analytiques effectués. À cette étape, la valeur de P est spécifique aux CFO selon les fonctions de dommages développées dans des contextes différents par Porter et al. (2010) et Yao et Tu (2012). Les valeurs de Porter et al. (2010) vont permettre de calculer la probabilité de dommage complet alors que les travaux de Yao et Tu (2012) estiment la probabilité reliée aux niveaux de dommages faible, modéré et étendu.

Dans le cadre de cette recherche, les résultats sont obtenus sur les hypothèses suivantes :

- les bâtiments sont modélisés sous forme d'oscillateurs multiples linéaires et leur équivalent à un degré de liberté. Il est possible à partir de modèles simplifiés d'estimer rapidement et de manière raisonnable la demande sismique d'un grand nombre de bâtiments;
- le système structural est défini par la période fondamentale, il est alors aisé de l'utiliser directement pour calibrer les modèles dynamiques;
- les déplacements sont calculés pour un comportement linéaire élastique de la structure afin d'évaluer la fonctionnalité post-sismique selon les objectifs de performance de la structure définie à la Figure 1.8 p. 32;
- on s'intéresse au premier niveau de dommage, au-delà duquel le comportement des bâtiments change et les caractéristiques élastiques sont modifiées. Les modèles élaborés ne sont plus valables;
- l'amortissement visqueux est pris égal à 5%.

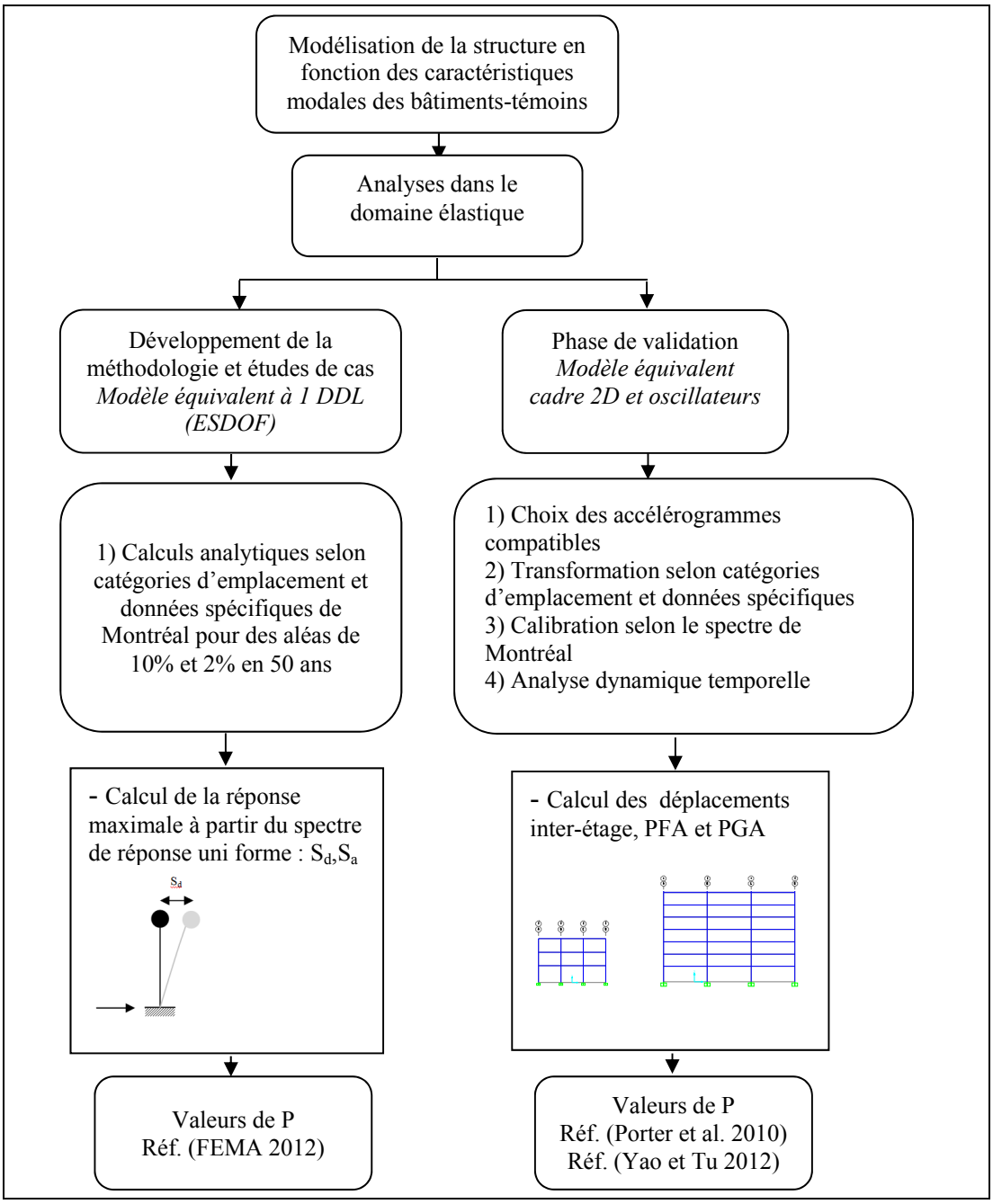


Figure 4.7 Procédures des analyses dynamiques et résultats attendus

4.6 Étape 4 : Calcul d'un indice de fonctionnalité post-sismique (IFP)

Puisque les opérateurs .OU. et .ET. décrivent un système respectivement en série (union des événements) et en parallèle (intersection des événements), il est possible de quantifier un événement de tête (Q) reliant deux entrées A et B en utilisant les formules d'algèbre booléenne (Vesely et al. 1981).

$$Opérateur\ .ET.: P(Q) = P(A) \cap P(B) = P(A) * P(B) \tag{4.2}$$

$$Opérateur\ .OU.: P(Q) = P(A) + P(B) - P(A) \cap P(B) \tag{4.3}$$

Dans le contexte de l'étude, les équations (4.2) et (4.3) prennent la forme des équations (4.4) et (4.5) pour chacun des événements intermédiaires (j=1 à n) selon l'opérateur booléen utilisé. On fait ici l'hypothèse que les événements A et B sont indépendants. L'indice de fonctionnalité post-sismique (IFP) aura ainsi une valeur optimale théorique de zéro qui correspond au cas où un système est complètement fonctionnel ou une occurrence nulle pour le système d'être dysfonctionnel (événement de tête). C'est le cas où les conditions à la base sont aussi optimales avec notamment une faible probabilité de dommage combinée à un niveau de risque faible (SRI).

$$Opérateur\ .ET.: IFP_j = IPR_1 * \ldots . * IPR_i \tag{4.4}$$

$$Opérateur\ .OU.: IFP_j = 1 - (1 - IPR_1) * (1 - IPR_2) * \ldots . (1 - IPR_i) \tag{4.5}$$

L'analyse de la sensibilité de l'IFP permet de fixer les paramètres fondamentaux et d'établir des critères d'interprétation afin d'appliquer la méthodologie à un ensemble d'hôpitaux. On pourra se référer aux paramètres identifiés au Tableau 1.4, p. 37 en plus de considérer les résultats des analyses dynamiques.

4.7 Les analyses statistiques et paramétriques

Sur la base des résultats des évaluations de la vulnérabilité sismique des bâtiments et des CFO (SRI structural et non-structural), un échantillon descriptif de l'ensemble des hôpitaux de Montréal sera développé, en faisant varier trois paramètres : la période, la catégorie d'emplacement et l'aléa sismique. Il s'agit alors d'organiser les données développées (variables continues) et de les caractériser statistiquement. L'extrant de cette analyse permet la constitution de classes de niveaux de risque des bâtiments et des CFO selon leur SRI. La deuxième étape d'analyse a comme objectifs : 1) d'évaluer la participation des composants à la base sur la performance du système et 2) de définir une matrice d'interprétation de l'indice de fonctionnalité. Un indice de fonctionnalité post-sismique (IFP) est calculé pour les différents scénarios de la première étape et les conclusions peuvent être étendues à un ensemble d'installations hospitalières.

CHAPITRE 5

BASE DE DONNÉES SUR LES BÂTIMENTS TÉMOINS

Le chapitre précédent visait à proposer la méthodologie d'évaluation de la fonctionnalité post-sismique des hôpitaux de Montréal qui repose sur une approche bâtiment par bâtiment. Les différents paramètres nécessaires à l'évaluation ont aussi été identifiés. Ce chapitre présente les données compilées sur les bâtiments-témoins de l'hôpital général de Montréal (HGM) et de l'hôpital Rivière-des-Prairies (HRDP).

Les deux installations hospitalières sont très différentes en termes de services offerts, de dimensions et des fonctions critiques. Toutefois, du point de vue architectural, ils correspondent aux caractéristiques générales des structures hospitalières construites dans les années 50 :

> « Après la Deuxième Guerre mondiale, la construction de nouveaux hôpitaux connait un essor sans précédent…Les hôpitaux construits dans les années 50 sont de grands bâtiments individuels en hauteur (…) se caractérisent par un plan uniforme des étages, des façades sans ornement, des toits plats, une circulation verticale et une aération contrôlée. Leurs masses se composent souvent de volumes rectangulaires définis qui se joignent à angle droit. » (Fondation Historica 2010)

Par ailleurs, la consultation des plans originaux des deux installations montre que l'ossature des bâtiments est constituée de cadres en acier résistant aux moments. Des cadres contreventés par des diagonales de la fondation au toit et symétriquement positionnés au périmètre des ailes complètent le système de résistance aux forces latérales en général et sismiques en particulier. Ces données sont aussi confirmées par des rapports d'évaluation préparés par des experts en structures (Decarel et al. 1998a; 1998b; HRDP 2005; 2013).

Les données collectées concernent :

Rapport-Gratuit.com

- l'identification des fonctions critiques des deux hôpitaux-témoins;
- l'inventaire des systèmes critiques typiques (sans tenir compte des débits de production ou des volumes desservis) et leur modélisation sous forme d'Arbre de défaillance (AdD) dans lesquels seuls les composants sont identifiés pour simplifier les figures. Les AdD sont construits à l'aide du logiciel *Reliability Workbench* (RWB) (Isograph Ltd. 2011);
- l'inventaire des CFO : type, localisation;
- l'évaluation du risque associé aux CFO;
- les caractéristiques dynamiques des bâtiments obtenues par MVA.

5.1 Hôpital général de Montréal

L'Hôpital général de Montréal (HGM) a été fondé en 1821 par les religieuses de Marguerite d'Youville. Depuis 1955, l'hôpital est sis au 1650 Ave Cedar sur le Mont Royal. C'est la plus ancienne institution de recherche universitaire en milieu hospitalier au Québec et elle fait partie du Centre universitaire de santé McGill (CUSM). L'HGM représente, par ailleurs, « *un des trois centres de soins tertiaires, c'est-à-dire, des soins ultraspécialisés pour adultes au Québec et le seul situé à Montréa*l» (CUSM 2014a).

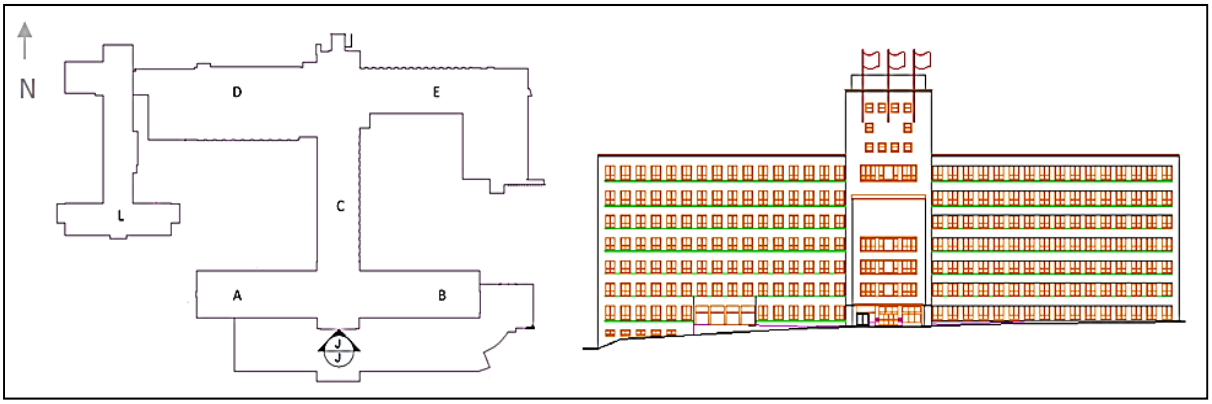


Figure 5.1 Plan principal et vue de la façade sur la rue des Pins (ailes A et B) de l'HGM

Situé sur un terrain de près de 12 acres, le « campus de la montagne », caractérisé par une dénivelée de six étages entre les deux entrées principales (nord et sud), est composé d'un

bâtiment principal avec un plan au sol en forme de H, d'un stationnement étagé et d'autres petits bâtiments logeant des services administratifs (*Voir* Figure 5.1). La structure du bâtiment principal est sise sur le roc (site de catégorie A). Les ailes A à E servent principalement aux soins avec des services essentiels positionnés à différents niveaux et bâtiments. On peut citer : le service d'urgence à l'entrée sud de l'hôpital (Ave des pins) dans l'aile A, la chirurgie dans l'aile C, et les soins intensifs dans l'aile E. L'aile L à laquelle s'est ajoutée une aile R, 20 ans plus tard, loge les laboratoires de recherche. Le Tableau 5.1 donne les spécificités des bâtiments principaux de l'HGM dont la superficie totalise environ 100 000 mètres carrés.

Tableau 5.1 Spécificités des bâtiments principaux de l'HGM
Adapté de Decarel et al. (1998a) et CUSM (2014)

Bâtiments principaux	**Année de construction**	**Superficie (m^2)**	**Changements apportés**	**Services essentiels**
Aile A (7 étages)	1954	7 872	3 étages ajoutés en 1964	Urgence au 1er
Aile B (7 étages)	1954	8 692	3 étages ajoutés en 1964	Oncologie
Aile C (10 étages)	1954	22 211		Chirurgie au 8ème Radiologie
Tour C (23 étages)				
Aile D (17 étages: niveaux 3 à 19)	1954	18 791		Soins intensifs et coronariens au 11ème
Aile E (17 étages : niveaux 3 à 19)	1954	17 522	Agrandissement du niveau 5 avec ajout d'un solarium	Soins intensifs et neurologiques au 9ème et 13ème Radiologie Salle mécanique entre niveaux 3 et 6
Pavillon L (13 étages)	1954	17 882	3 étages ajoutés en 1991 et rehaussement sismique	Laboratoires de recherche

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

5.1.1 Évaluation générale

En 1998, une évaluation de la fonctionnalité des bâtiments existants du CUSM a été faite dans le cadre de la programmation pour un réaménagement des espaces et/ou la conversion de ces espaces (Decarel et al. 1998a). Le rapport présente une appréciation des différents conflits générés à l'interne tant au niveau de la circulation des patients, personnel soignant et visiteurs que de l'accessibilité aux services primordiaux de l'HGM selon trois scénarios cumulatifs: 1) la sécurité des occupants, 2) les déficiences techniques reliées à l'énergie, la maintenance et les soins aux patients et 3) les déficiences fonctionnelles. En 2003, le CUSM accepte, sur demande du Ministère de la santé du Québec, de conserver la fonction hospitalière des installations du centre-ville. De nombreux travaux de modernisation ont alors été lancés et le site est au cœur d'un important « Projet de redéploiement ». Les changements positifs sur l'environnement physique et humain sont présentés régulièrement sur le site web de l'HGM (CUSM 2014a). C'est un milieu en mutation constante qui a été évalué.

Les initiatives incluent la création d'environnements accueillants lumineux et d'accommodements d'espaces verts (aile E en particulier au niveau 5). Lors des visites effectuées entre 2010 et 2012, certains espaces étaient en construction. Ils sont maintenant aménagés et utilisés. On peut citer par exemple, le 4ème étage du bâtiment B qui devient une extension des services en santé mentale de l'aile A et l'étage 7 de l'aile D qui loge un service de chirurgie mineure. D'autres changements importants vont suivre notamment, l'agrandissement de la salle d'urgence et du bloc opératoire (CUSM 2014a).

En 2010, une centaine de CFO (composants architecturaux, techniques et contenu) de cet hôpital a fait l'objet d'une évaluation sismique à l'instar de cinq autres installations hospitalières (Cappai, et al. 2010). Des visites, entre 2011 et septembre 2014, ont permis de refaire, en partie, le parcours des évaluateurs et de réaliser les mesures de vibrations ambiantes pour ce projet. L'accent a été mis sur la revue des CFO évalués précédemment, les nouvelles installations électriques et mécaniques, les espaces de circulation et de concentration à forte densité (nombreux corridors ou parcours d'évacuation, les entrées

principales) mais surtout la compréhension du fonctionnement des systèmes critiques desservant l'HGM.

5.1.2 Conceptualisation des systèmes critiques

Avec sa fonction d'hôpital de référence en service de traumatologie de l'île de Montréal, l'HGM présente de nombreux défis en termes de fonctionnalité post-sismique. Les gestionnaires sont conscients de cette complexité et ont mis en place des systèmes de gestion des systèmes permettant de détecter les vraies alertes et d'intervenir de manière prompte et efficace. L'ensemble de l'information recueillie a permis de construire les AdD de ces systèmes regroupant les CFO essentiels. Ils sont présentés en ANNEXE V (p219 et suivants) ainsi que quelques vues des CFO (p.230).

Tableau 5.2 Répartition des CFO inspectés de l'HGM

Systèmes	**Sous-systèmes**	**CFO**	**Nombre de CFO**
(A) Système CVCA	Chauffage		13
	Conditionnement d'air		14
	Contrôle		
(B) Système de maintien des fonctions vitales	Gaz médicaux		8
	Soins de physiothérapie		3
	Soins intensifs		4
	Décontamination		6
(C) Système d'évacuation partielle	Sorties de secours		9
	Ascenseurs pompiers		3
	Gestion des urgences		
(C) Système protection incendie	Détection et alarme		5
	Réponse		9
(D) Système électricité	Alimentation de secours		5
	Réseau de ville		6
	-	Plateau de câbles	
(D) Système eau	Réseau de ville		2
		Différents composants	3

A. Les systèmes CVCA

L'HGM compte un système central CVCA et de nombreux systèmes secondaires afin de répondre à des demandes différentes en termes de pressurisation relative des espaces desservis ou de niveau de filtration d'air (allant de 40% à 100% d'air neuf préparé dans la centrale de traitement d'air). Par exemple, des considérations spéciales pour les salles d'opération incluant 100% d'air neuf et le contrôle de la température et de l'humidité imposent des restrictions différentes de celles des corridors non climatisés. Le système central est situé dans l'aile E (niveaux 3 à 6). On y retrouve plusieurs générations de CFO, certains datant de la construction de l'hôpital et d'autres plus récents reliés : 1) au système de géothermie dont la connexion à l'hôpital n'est pas encore complétée au moment de la publication de cette recherche et 2) à un système de filtres en série. Le système CVCA est alimenté en partie par un réseau de gaz naturel, assurant une redondance à l'alimentation électrique. Lors des basses températures d'hiver, l'alimentation est alors coupée par le fournisseur conformément aux clauses de gestion. Les Figures-A V-1 à V-4 en Annexe V présentent les systèmes centraux dont les CFO sont situés dans le bâtiment E. Un système de contrôle centralisé assure le suivi du fonctionnement de l'ensemble.

La configuration des systèmes secondaires suit le même patron avec toutefois un système de contrôle à proximité constitué de panneaux de contrôle des pompes et/ou du système de conditionnement d'air. La Figure 5.2 illustre un exemple de système retrouvé dans les salles mécaniques L4 et C8 dont le rôle principal est la production de chaleur. Pour les besoins de l'aile C, une tour de refroidissement (logée aux derniers étages et sur le toit) complète le système de chauffage (*Voir* Figure 5.3). Certains locaux, comme ceux de la chirurgie d'un jour, sont desservis par un système à boucle fermée qui permet une régulation de la température selon les besoins (*Voir* Figure 5.4). Dans tous les cas, la redondance se retrouve dans la quantité des CFO de base comme les systèmes de ventilation, les pompes et les unités de production.

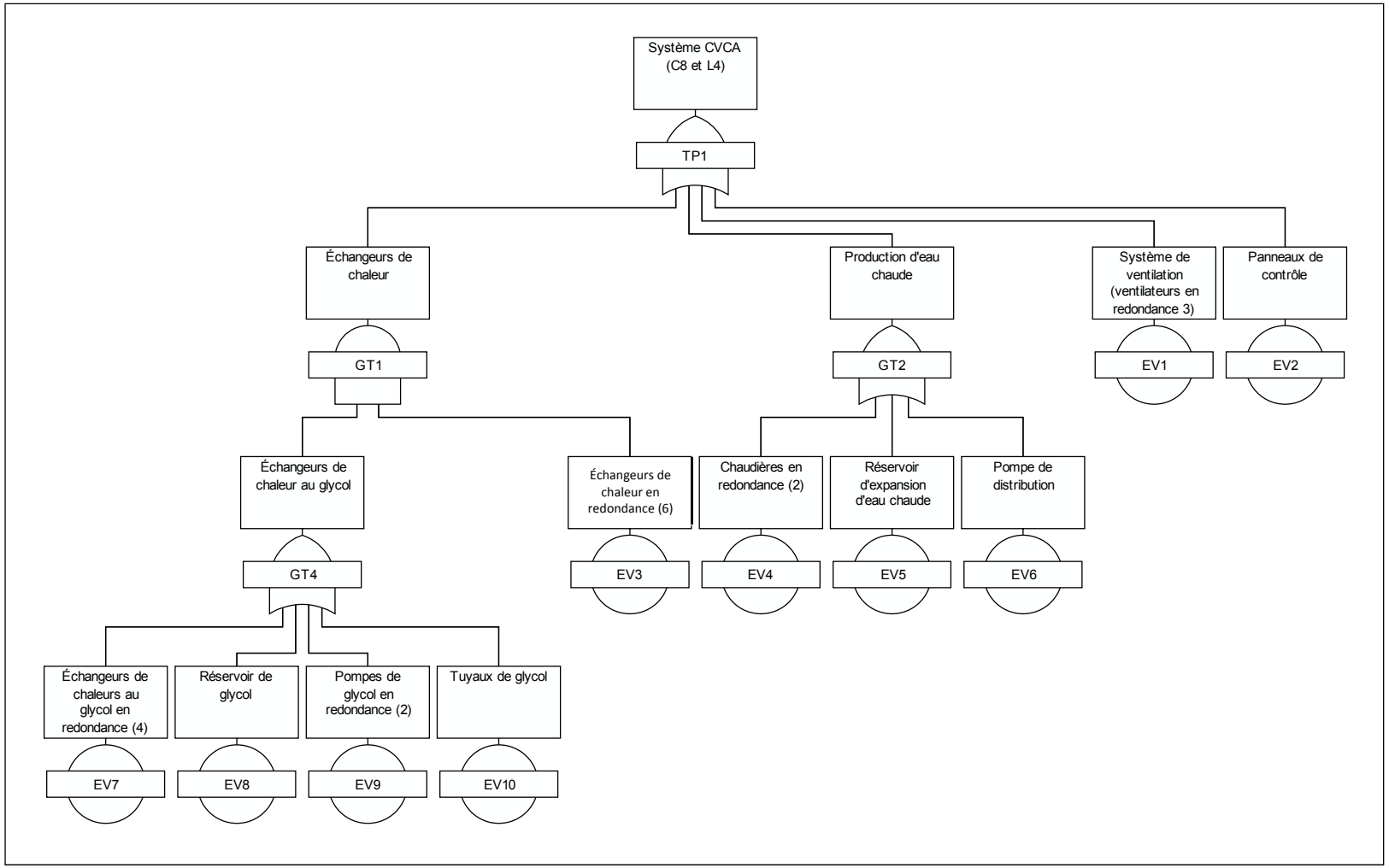


Figure 5.2 Partie du système CVCA des salles mécaniques L4 et C8 de l'HGM

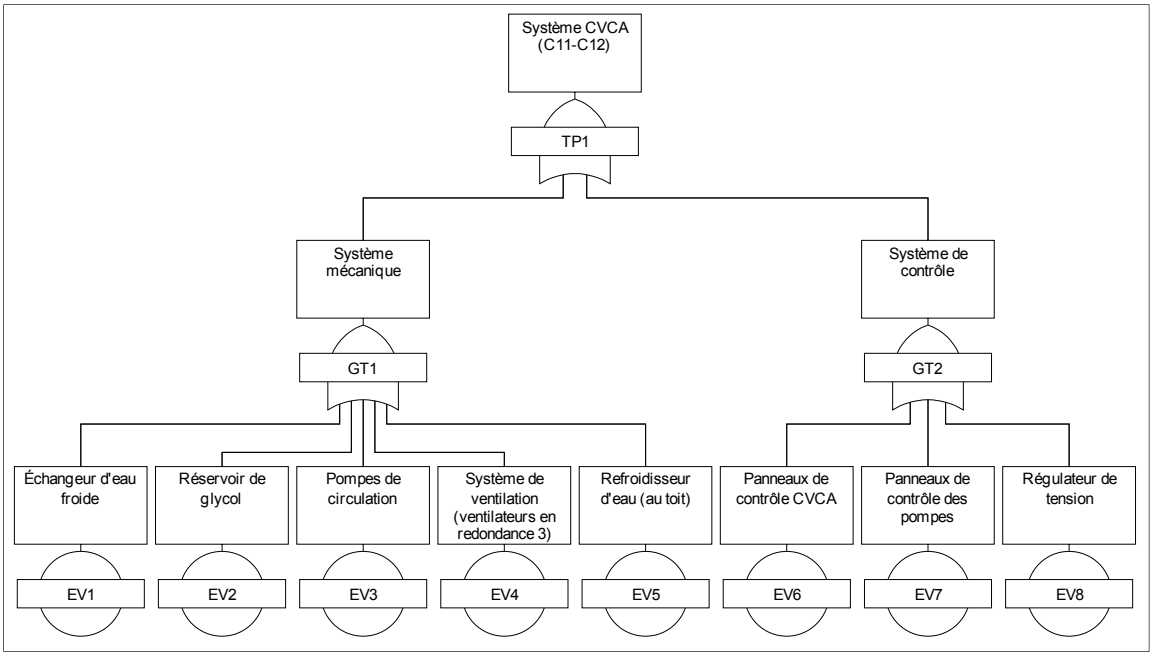


Figure 5.3 Partie du système CVCA – Tour de refroidissement de l'HGM

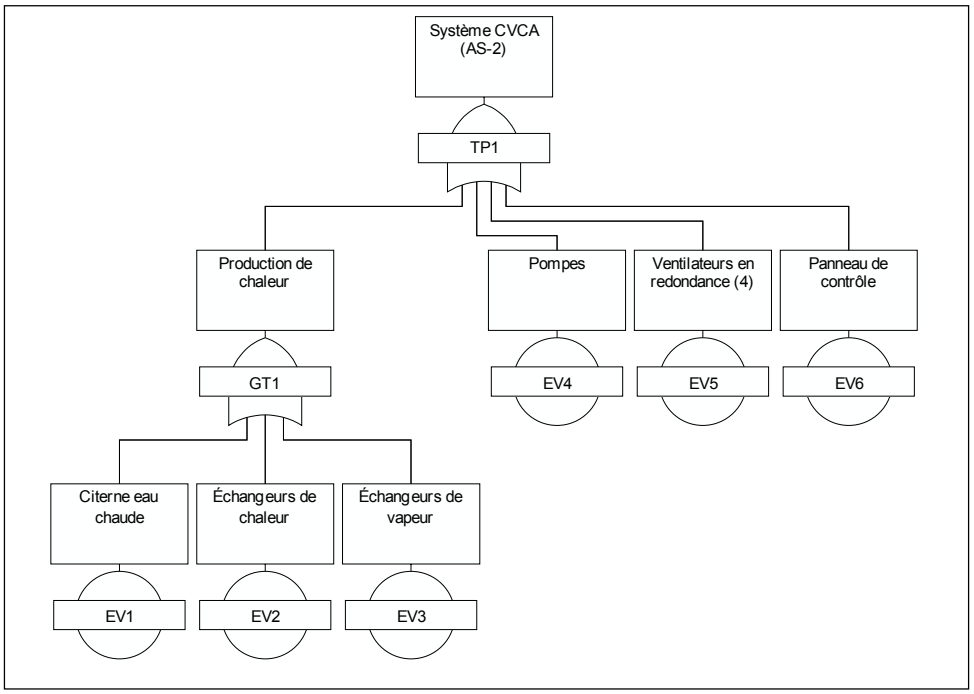


Figure 5.4 Système CVCA à boucle fermée de l'HGM

B. Les systèmes de maintien des fonctions vitales

Les Figures-A V-5 à V-8 de l'ANNEXE V, p. (222 à 226) présentent le système de maintien des fonctions vitales. Le choix a été mis dans ce cas sur la production in situ de gaz médicaux essentiels au fonctionnement de l'ensemble des services de l'HGM (situés au sous-sol de l'aile A), les soins intensifs et de physiothérapie ainsi que les services de décontamination regroupés dans le bâtiment E. L'hôpital compte également une unité de production de gaz médicaux décentralisée dans l'aile C (salle mécanique, niveau 8) et illustrée à la Figure 5.5, laquelle assure l'alimentation en air médical et en azote.

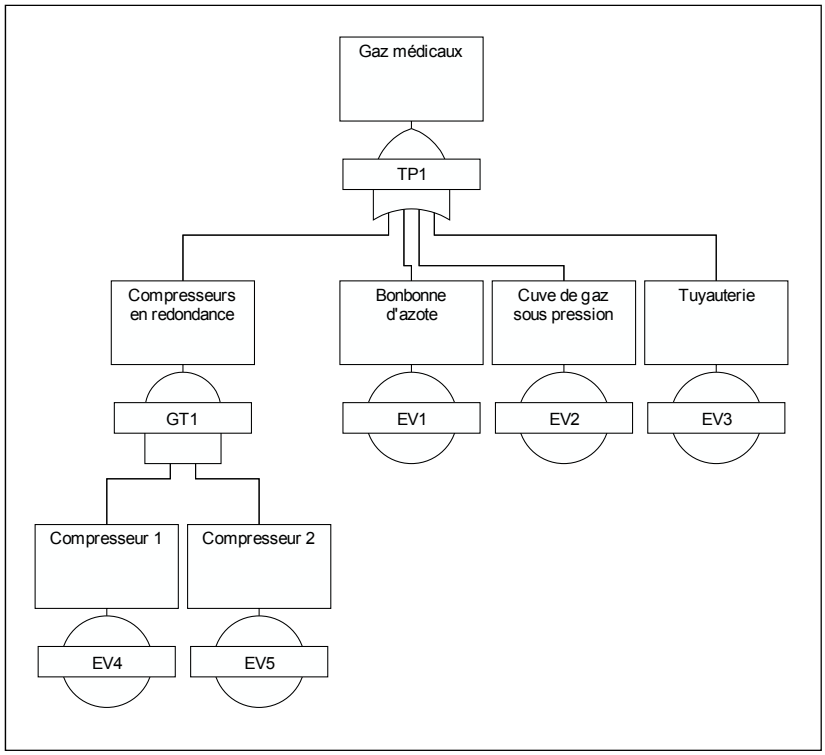


Figure 5.5 Système de gaz médicaux - salle mécanique Aile C, HGM

C. Les systèmes de protection incendie et d'évacuation partielle

Le système de protection incendie, tel que mis en place, priorise une réponse prompte et adéquate afin de limiter les dommages ou la propagation d'un éventuel incendie. Il comprend

les sous-systèmes ou composants suivants: évacuateurs de fumée, système de pressurisation des escaliers, porte coupe-feu, système pré-action (tuyauterie pressurisée sous air au lieu d'être sous eau) dans les services d'archivages et de résonance magnétique plus sensibles à l'eau. Les espaces administratifs et salles mécaniques de la tour C ne sont pas munis de gicleurs. L'alarme peut être confirmée en utilisant les téléphones muraux pour pompiers et la réponse peut être immédiate à l'aide d'extincteurs portatifs disposés dans les salles.

L'évacuation partielle d'une des ailes des installations vers des espaces sécuritaires peut s'avérer nécessaire en cas d'urgence (*Voir* Figures-A V-9 et V-10, ANNEXE V). À ce sujet, le vestibule de l'entrée principale, qui sert de centre de gestion de l'urgence, est très achalandé en période normale. On y retrouve une concentration des services offerts: aire d'attente, petite librairie, café, guichet automatique, téléphones publics, distributrice de liquide antiseptique en plus de donner l'accès à trois corridors principaux. Le risque sismique associé à la marquise d'entrée est faible mais le risque de chute d'objets et d'obstruction vers la sortie est préoccupant mais nécessite une mitigation simple avec les retenues.

D. Les systèmes d'alimentation en eau et électricité

La redondance des systèmes d'alimentation en eau et en électricité caractérise l'HGM. Les installations sont alimentées par deux entrées d'eau du réseau de ville (entrée sur les rues Cedar et des Pins) ainsi que d'un réservoir (situé au 24 étage de la tour C) qui alimente les boyaux d'incendie. L'hôpital a aussi multiplié ses sources d'énergie : deux entrées du réseau électrique de ville, la connexion au réseau de gaz naturel (assurant en partie le fonctionnement de la chaufferie), trois génératrices de secours et des installations de systèmes d'alimentation sans coupure (UPS) comme alternative principalement pour les réseaux informatiques. Chacun des réseaux électriques peut assurer l'alimentation complète des systèmes branchés sauf lors des périodes de pointe où un certain délestage doit être fait (*Voir* Figures-A V-11 et V-12, ANNEXE V).

5.2 Hôpital Rivière-des-Prairies

Fondé au cours des années 1950 par les sœurs de la Providence, l'hôpital de Rivière-des-Prairies (HRDP) est une institution de soins spécialisés et ultraspécialisés dans les domaines de la pédopsychiatrie et du trouble du spectre de l'autisme de tous âges. Cet hôpital constitue une unité de recherche et d'enseignement affiliée à l'Université de Montréal. On y compte des unités de soins de courte durée (observation, hôpital de jour, hospitalisation courte durée). En plus des soins fournis à l'interne, l'hôpital situé, dans le nord-est de l'île de Montréal, répond aux besoins d'une clientèle externe répartie sur les territoires de l'est de Montréal (HRDP 2013).

5.2.1 Évaluation générale

Construit à partir de 1947, l'établissement hospitalier est constitué d'un ensemble de neuf bâtiments de hauteurs différentes (1 à 5 étages), structuralement indépendants et répartis de manière symétrique (*Voir* Figure 5.6). D'une superficie totale de plus de 50 000 m^2 (incluant le sous-sol), on retrouve du côté sud, le bâtiment principal de cinq étages (aile A) qui regroupe, entre autres, les services administratifs, des cliniques externes, un gymnase, et un centre de la petite enfance.

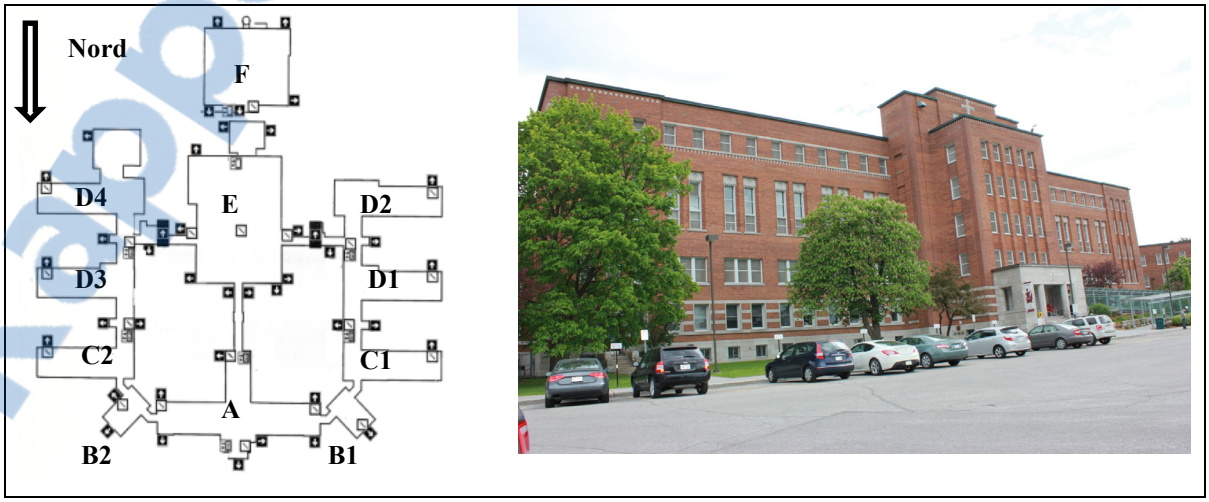


Figure 5.6 Plan principal et vue de la façade du bâtiment administratif (Aile A) de l'HRDP

Rapport-Gratuit.com

La partie ouest comporte les services d'hospitalisation, de soins continus et les locaux d'isolement (C1, D1 et D2). À l'est, sont concentrées les activités de recherche et certaines cliniques spécialisées pour des soins de courte durée et des locaux d'isolement (B2, C2 et D3). Les services d'équipement et un garage logent dans les bâtiments du centre (E et F). L'hôpital compte de nombreux espaces non utilisés comme les espaces de soins de longue durée désaffectés (D4), ou d'autres temporairement fermés au début de cette recherche ont été réhabilités et sont actuellement dédiés à des fonctions diverses, autres que des soins de santé.

Tableau 5.3 Spécificités des bâtiments de l'HRDP

Bâtiments	**Nombre d'étages**	**Services principaux**
Aile A	5 étages	Gestion de l'urgence Pharmacie, Garderie Caisse économie Palestre au niveau 4
Ailes B1 et B2	3 étages	Cliniques de consultation Radiologie
Ailes Ouest (C1, D1, D2)	4 étages	Soins continus Locaux d'isolement Atelier (sous-sol)
Ailes Est (C2, D3, D4)	4 étages	Salle de soins dentaires et salle d'opération (aile D3) Salle de soins externes
Aile E	2 étages	Garderie
Aile F	1 étage	Centrale thermique (sous-sol) Buanderie (niveau 1)

D'importants travaux de réhabilitation et de mise en conformité des CFO ont été réalisés. Il faut citer notamment : 1) la mise à jour du système de protection incendie selon les normes des laboratoires des assureurs du Canada (ULC), 2) la révision du système électrique et 3) la mise en place d'un système de géothermie qui doit assurer l'alimentation du système CVCA. Les visites d'inspection de centre hospitalier ont eu lieu entre les mois de septembre 2010 à 2014 dans un processus de visite-inspection-validation des informations collectées et les tests

de vibrations ambiantes. Ces inspections ne touchent pas l'aile Ouest et les locaux d'isolement dont l'accès est restreint au personnel soignant.

5.2.2 Conceptualisation des systèmes critiques

Compte tenu de la clientèle de l'hôpital, le processus d'évacuation présente de nombreux défis et dépend grandement du rôle joué par l'équipe de gestion des urgences. La fonctionnalité de cet hôpital est, quant à elle, tributaire de la stabilité de la structure, de la réponse du système de protection incendie et du fonctionnement de la génératrice qui assure une redondance de près de 80% des systèmes essentiels. Les AdD de ces systèmes regroupant les CFO essentiels sont présentés en ANNEXE VI, p.231 ainsi que quelques vues des CFO. Les AdD découlent en grande partie de ceux construits pour l'HGM puisque l'on retient les mêmes types de CFO avec toutefois moins de redondance. L'accent est mis sur l'évaluation de la fonctionnalité du système de protection incendie dont le fonctionnement est similaire à celui de l'HGM.

Tableau 5.4 Répartition des CFO inspectés de l'HRDP

Systèmes	Sous-systèmes	CFO	Nombre de CFO
(A) Système CVCA	Chauffage	-	5
	Conditionnement d'air		6
	Contrôle		2
(B) Système protection incendie	Détection et alarme		7
	Réponse		8
(C) Système d'évacuation	Sorties de secours		
	Ascenseurs pompiers		7
	Gestion des urgences		
(D) Système électricité	Alimentation de secours		4
	Réseau de ville		4
	-	Plateau de câbles	1
(D) Système eau	Réseau de ville		4
		Différents composants	

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

A. Le système CVCA

L'hôpital dispose d'un système CVCA simple qui assure le chauffage de l'ensemble des bâtiments, la production d'eau sanitaire et le conditionnement d'air de l'aile Ouest (*Voir* Figures-A VI-1 à VI-3, ANNEXE VI). La ventilation est assurée par des persiennes d'entrée d'air frais et d'évacuation. Les espaces administratifs et les cliniques de soins de l'aile D3 sont alimentés par un petit système de conditionnement d'air à boucle fermée. Les autres espaces sont climatisés par des unités externes selon les besoins. Le contrôle de ce système central est assuré par un ordinateur situé dans une salle connexe à la chaufferie.

Le système CVCA ne comporte pas de dispositif d'évacuation de fumées. On suppose ici que le système passif en place (portes et séparations coupe-feu, colonnes et cloisons ignifuges, etc.) assure la compartimentation des ailes et procure un délai supplémentaire pour l'évacuation sécuritaire partielle ou globale. On note par exemple sur les plans de réhabilitation des locaux de l'aile Ouest, les détails d'ignifugation des poutres, hauts de colonnes d'acier existantes, conduits CVCA et cloisons de gypse afin d'assurer l'intégrité comme coupe-feu et coupe-fumée.

B. Le système de protection incendie

Le bâtiment administratif (aile A) loge le centre stratégique de gestion des opérations d'urgence avec les paramètres identifiés à la Figure 5.7. Le hall d'entrée est considéré comme le circuit d'évacuation prioritaire.

Plus spécifiquement :

- l'ascenseur A-1 répond aux exigences des codes en termes de procédures d'intervention des pompiers et d'évacuation : alimentation d'urgence, fonctionnement en mode manuel et système de communication d'urgence;

- la valve à pression connectée à la pompe incendie est accessible aux pompiers et sert à alimenter les boyaux d'incendie;
- le chariot à codes contient l'ensemble de la documentation pour la gestion des urgences;
- le tableau de commande d'alarme incendie qui gère le système de détection et d'alarme, notamment la localisation de zones distinctes (chaque salle est munie d'un détecteur de fumée photoélectrique) et l'identification de défectuosités provenant de différentes sources se font à partir du panneau annonciateur du poste de contrôle;
- un tableau annonciateur est placé à tous les étages (au poste infirmier) et l'ensemble est relié au poste de commandement. La réponse sur les deux niveaux est simultanée.

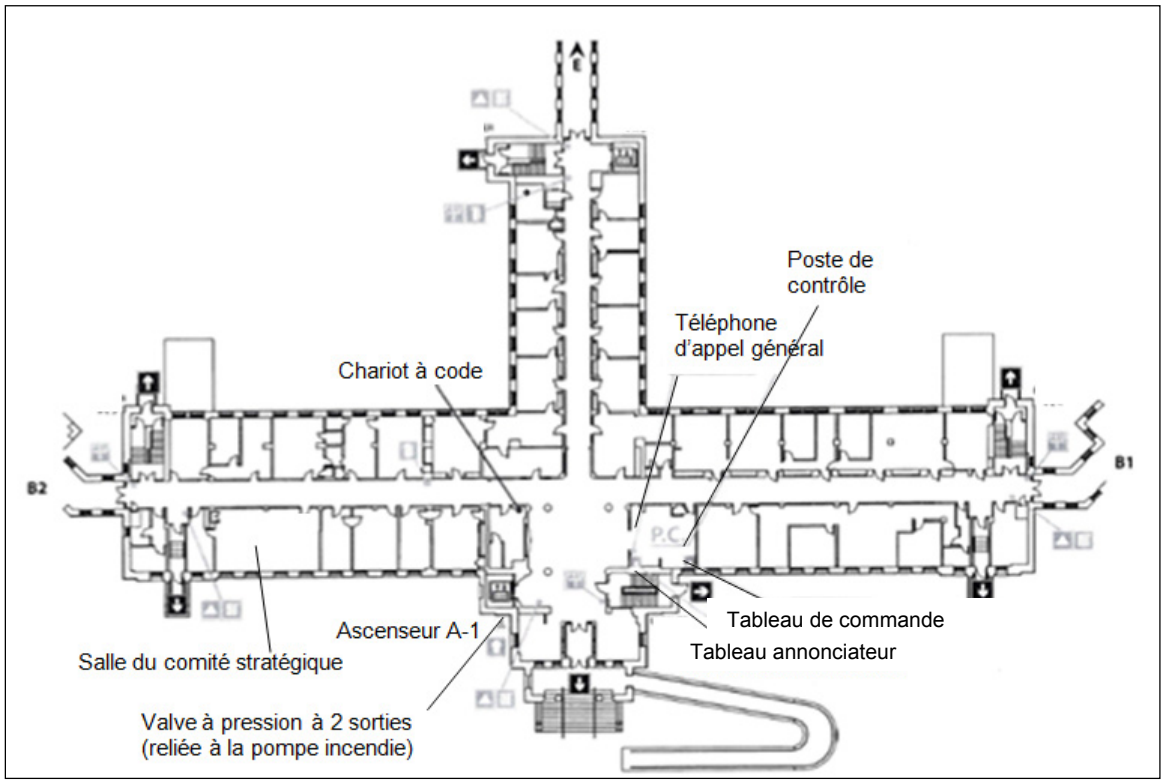


Figure 5.7 Bâtiment administratif et localisation des équipements d'urgence de l'HRDP
Adaptée de HRDP (2005, p. 10)

Les figures suivantes constituent l'arbre de défaillance pour le système de protection incendie. Deux grands sous-systèmes non redondants sont considérés : 1) le système de détection et d'alarme joue un rôle crucial dans la rapidité de réponse donnée à l'interne et la

protection des systèmes informatiques avec le déclenchement d'un système de gicleurs à air (*Voir* Figure 5.8) et 2) le système de réponse basé principalement sur les gicleurs et l'alimentation en eau via le réseau d'aqueduc de la ville qui garantit une certaine redondance, mais hors de contrôle de l'interne (*Voir* Figure 5.9).

C. Le système d'évacuation sécuritaire

Étant donné la clientèle particulière de l'hôpital, la réponse du personnel désigné dans la gestion de l'évacuation et la validation du processus sont primordiales. L'hôpital est divisé en 58 zones d'évacuation, dont au moins quatre circuits de secours pour chacun des bâtiments sauf pour l'aile F qui en compte trois. Le système modélisé schématise l'évacuation partielle d'une aile en mettant l'accent sur les portes coupe-feu assurant la compartimentation des ailes, cages d'escalier et ascenseur, les éléments architecturaux dont la chute peut limiter le processus d'évacuation et le système de gestion des urgences (*Voir* Figure-A VI-4, en ANNEXE IVI, p. 233).

D. Les systèmes d'alimentation en eau et électricité

Deux entrées d'eau desservent l'HRDP (entrées sur les boulevards Perras et Maurice-Duplessis). L'alimentation de secours est constituée d'un système d'UPS et d'une génératrice qui assure la redondance de l'alimentation électrique des services essentiels de l'hôpital (*Voir* Figures VI-F et VI-G, ANNEXE VI). Près de 80% des services sont reliés au système de secours. Tout comme l'HGM, l'HRDP s'est muni d'un système de géothermie dont la connexion n'était pas encore complétée.

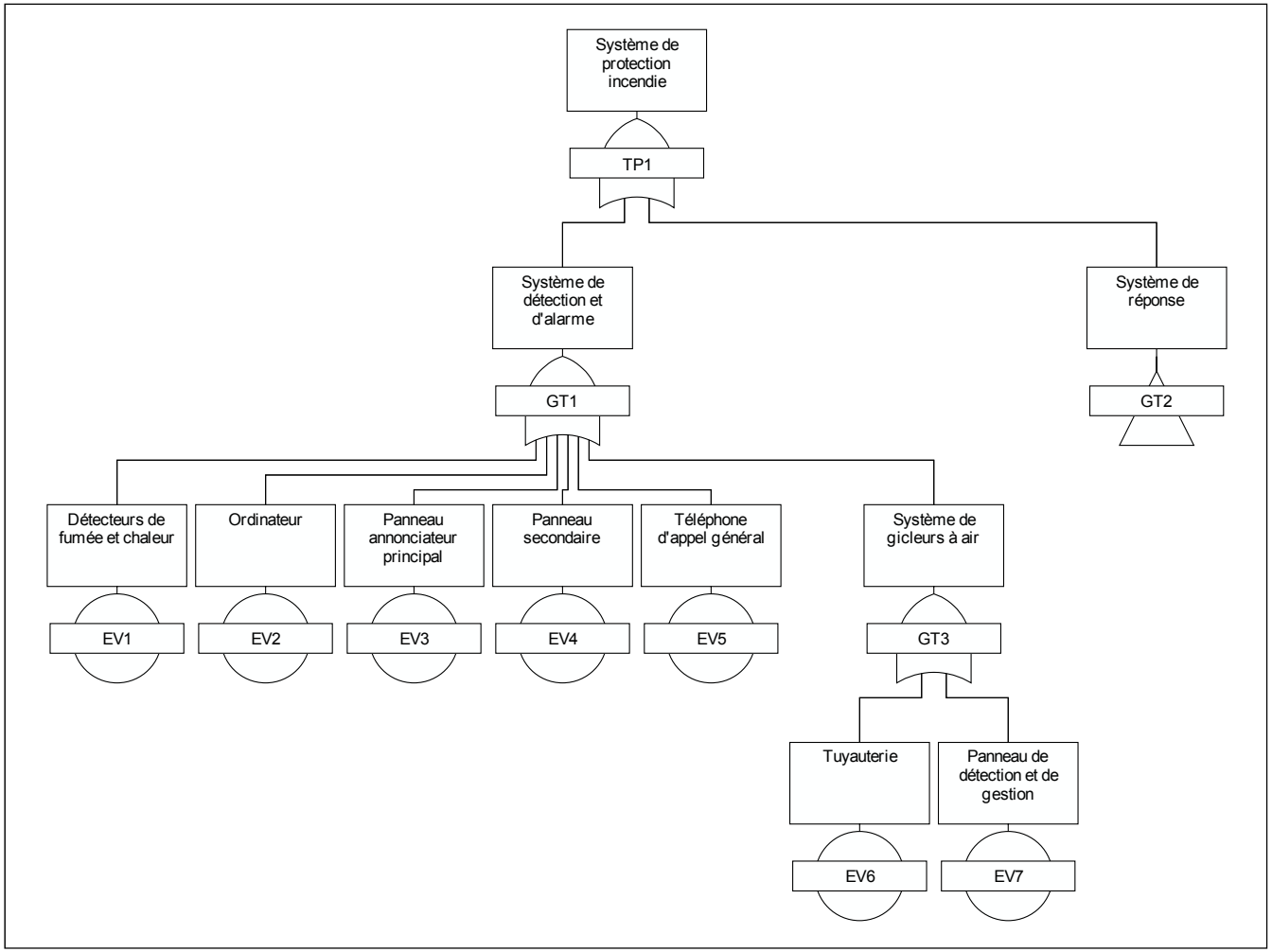


Figure 5.8 Arbre de défaillance du système de protection incendie – branche Système détection et alarme de l'HRDP

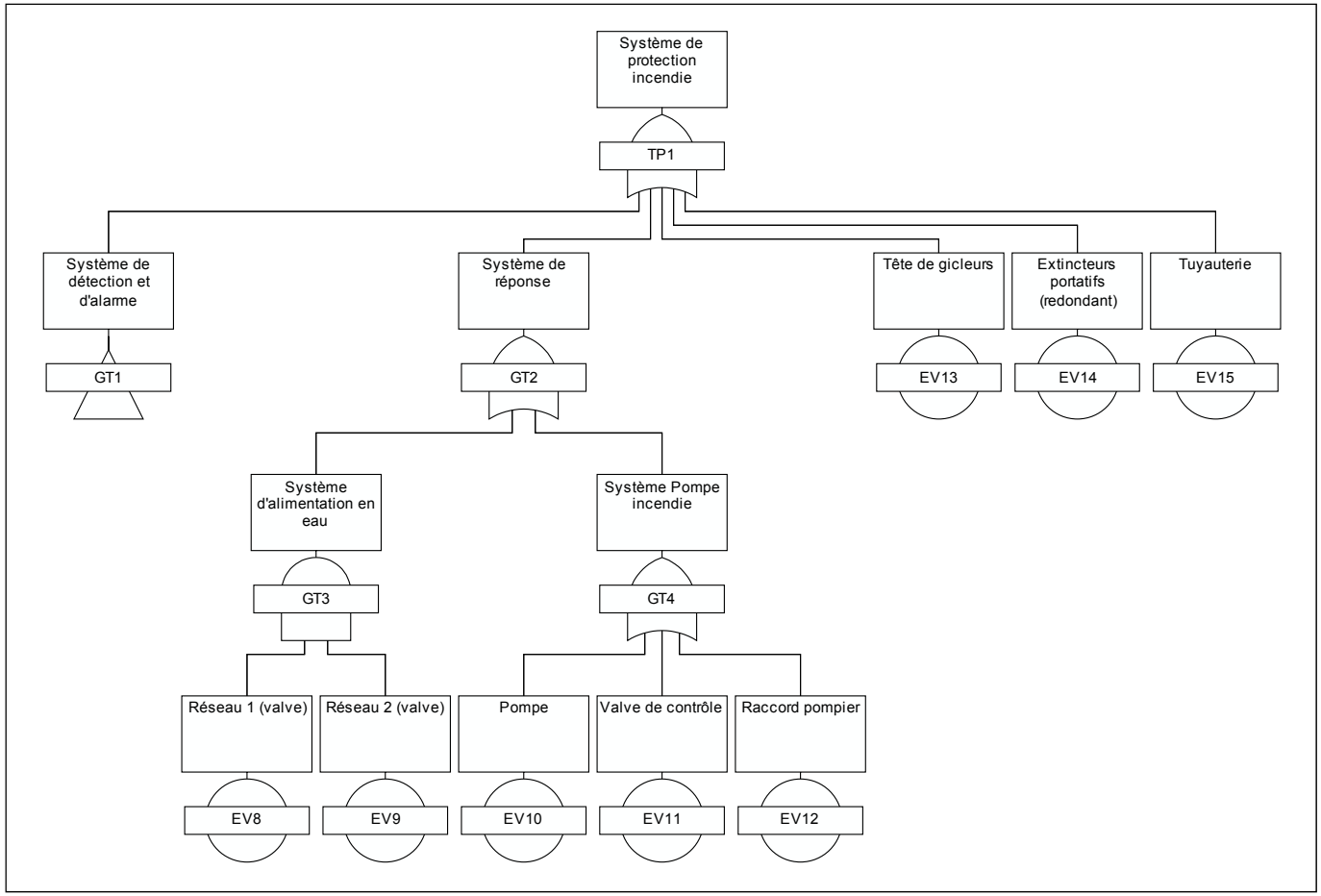


Figure 5.9 Arbre de défaillance du système de protection incendie – branche Système de réponse de l'HRDP

5.3 Mesures de vibrations ambiantes et procédures d'extraction

5.3.1 Dispositif expérimental

Les MVA ont été réalisées à l'aide de six appareils *Micromed Tromino ENGYN PLUS*® dont l'interconnexion (pour un jeu de mesures) et la synchronisation des enregistrements sont assurées par une radio (*Voir* Figure 5.10). Ce sont des appareils portatifs compacts dont le poids n'excède pas un kilo. Les spécifications techniques des capteurs sont présentées en ANNEXE VII, p.237.

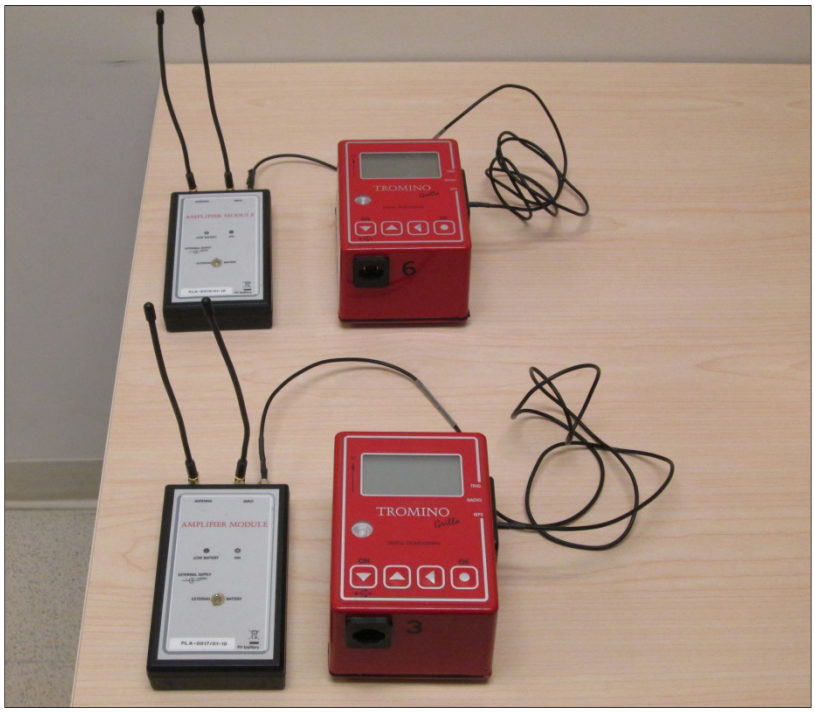


Figure 5.10 Exemple de montage capteurs et radios

Les mesures ont été effectuées de manière à capter le mouvement de la structure en vue d'établir ses caractéristiques dynamiques de base (mode et fréquence). Ce qui nécessite des mesures sur un maximum d'étages, deux à trois points par étage incluant le sous-sol lorsqu'accessible. Toutefois, la configuration finale est établie sur place en fonction des contraintes opérationnelles des milieux hospitaliers. Des mesures ont aussi été prises dans la

cage d'escalier. Michel (2007, p. 33) souligne que celle-ci «*constitue un point dur de la structure qui donne une bonne idée du comportement d'ensemble du bâtiment* ». Cela dépend toujours de la manière dont les escaliers sont reliés au système structural. Dans tous les cas, au moins un capteur de référence fixe, est positionné au haut de la structure ou à un point où l'on estime que tous les modes de vibration horizontaux sont excités; ceci permet d'extraire les déformées modales. Les autres capteurs sont déplacés sur les points de mesure de manière à compléter le dispositif expérimental. Les épisodes de mesures typiques durent huit minutes et sont prises à une fréquence de 128Hz. On mesure des vitesses comprises entre -0,04mm/s et +0,04 mm/s et des accélérations de 0 à 1,0g. Le Tableau 5.5 résume les détails de la prise de mesures sur les bâtiments-témoins.

Tableau 5.5 Détails des mesures de vibrations ambiantes

Aile (nombre d'étages)	**Date**	**Contraintes et alternatives retenues**
Hôpital général de Montréal		
Aile A (7 étages)	8 sept. 10	6 jeux de mesures avec deux capteurs de référence, 3 points par étage et 2 au sous-sol 1
Aile B (7 étages)	10 sept. 10	6 jeux de mesures avec deux capteurs de référence – 3 points par étage et 2 au sous-sol 1, sauf étage 4 fermé pour travaux
Aile C (10 étages)	10 sept. 10	8 jeux de mesures – 3 points par étage et au sous-sol 1 On note des problèmes de connexion avec 1'appareil placé près du laboratoire de radiologie.
Tour C (entre ailes D et E) (23 étages)	oct. 2012	Mesures prises dans la cage d'escalier afin de limiter l'interférence avec l'ascenseur de service et des appareils de refroidissement des étages 21 à 23.
Aile E (17 étages)		Mesures dans la cage d'escalier aux étages impairs et au niveau 2
Hôpital Rivière-des-Prairies		
Ailes de type C et D	sept. 2010 et oct. 2012	3 jeux de mesures avec 1 capteur de référence. 3 points par étage et au sous-sol
Aile de type B		2 jeux de mesures avec 1 capteur de référence, 2 points par étage
Bâtiment administratif		5 jeux de mesures avec 2 capteurs de référence, 5 points par étage et au sous-sol

Les deux hôpitaux comptent de nombreux espaces à accès restreint ajoutés à ceux fermés pour les travaux. L'impact est toutefois faible sur la prise de mesure, compte tenu des techniques d'extraction des données qui permettent d'extrapoler les résultats. Les problèmes d'interférence ont empêché la prise de mesures dans l'aile D de l'HGM.

5.3.2 Procédures d'extraction et d'analyse

Les signaux captés suivent un processus d'extraction, de transformation et d'analyse sur autant de logiciels (Grilla, Matlab, Artemis Extractor/Modal) avant d'être soumis à l'analyse modale par la méthode fréquentielle *Enhanced Frequency Domain Decomposition* ou EFDD (Micromed S.p.A 2011; SVIBS 2011a; 2011b; The MathWorks Inc. 2011). La transformation de Fourier constitue l'outil de base des analyses fréquentielles. Cette méthode utilise la décomposition en valeurs singulières (SVD) qui conduit au rejet de l'effet du bruit pour identifier les fréquences dominantes du bâtiment et les déformées modales correspondantes (Cremona et al. 2003). Les étapes d'analyse des signaux sont présentées en ANNEXE VIII, p.239.

La Figure 5.11 illustre le procédé pour l'identification des fréquences de la tour C de l'HGM en considérant l'ensemble des jeux de signaux intégrés dans le logiciel (courbes grises). En ordonnée, on retrouve l'amplitude des signaux d'entrée donnée en décibel (dB) ou densité spectrale de puissance (DSP) ou *Power Spectral Density*. L'amplitude de la DSP est la transformée de Fourier du carré du signal, représentant en fait, l'énergie contenue dans chaque fréquence qui permet de caractériser un mode (Michel 2007). Le logiciel Artemis identifie automatiquement certains pics correspondant aux fréquences de vibration; il est également possible de compléter l'identification d'autres pics importants manuellement.

Rapport-Gratuit.com

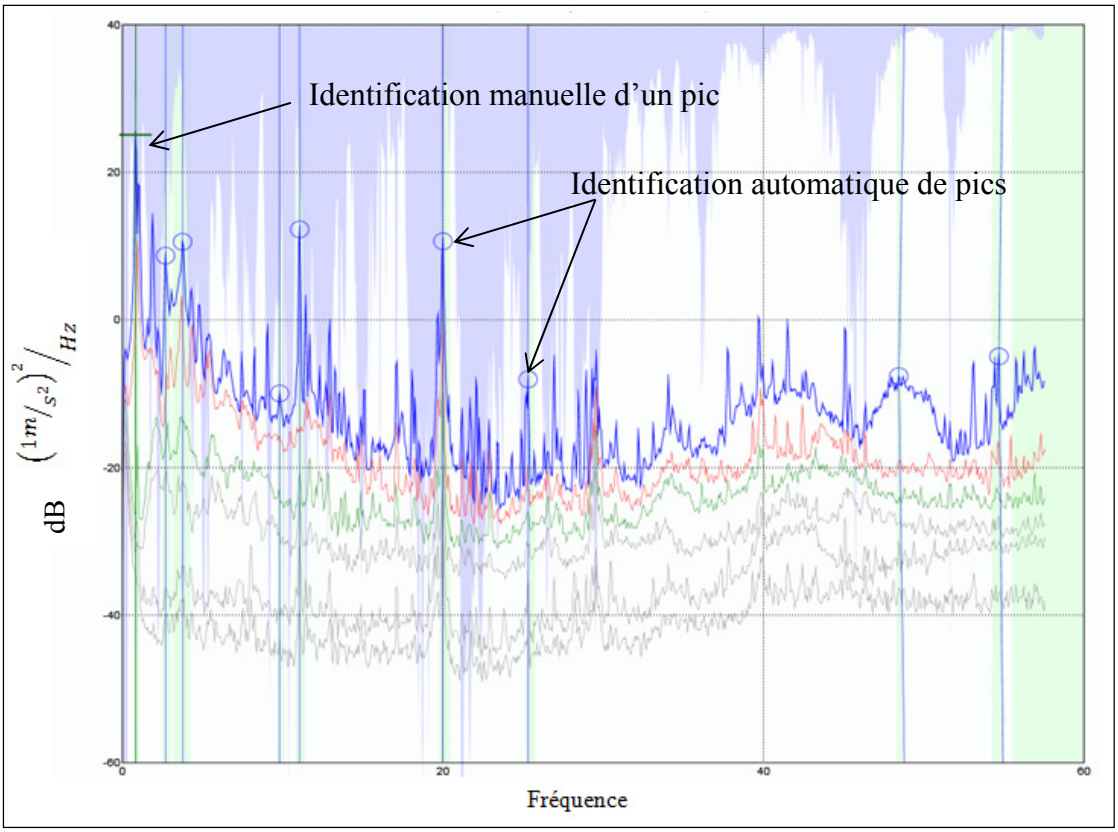


Figure 5.11 Densité spectrale de puissance pour l'identification des fréquences naturelles de vibration du bâtiment

La méthode EFFD (comparée à la version de base FDD) présente l'avantage de mieux décomposer les modes et de calculer un estimé de l'amortissement. Un ajustement est nécessaire en utilisant le *Modal Assurance Criterion* (MAC) qui permet de comparer vecteurs propres expérimentaux et analytiques, avec des résultats présentés sous forme d'une matrice. Lorsque le coefficient est voisin de 1, les déformées modales sont proches et il est alors possible de sélectionner des fréquences ayant une bonne corrélation (Michel 2007; Michel et al. 2008; Ventura 2012). Cette étape peut se faire également avec le logiciel Artemis Modal en relançant l'analyse modale; de nouvelles valeurs singulières sont générées automatiquement. La Figure 5.12 montre des graphes de complexité générés par le logiciel.

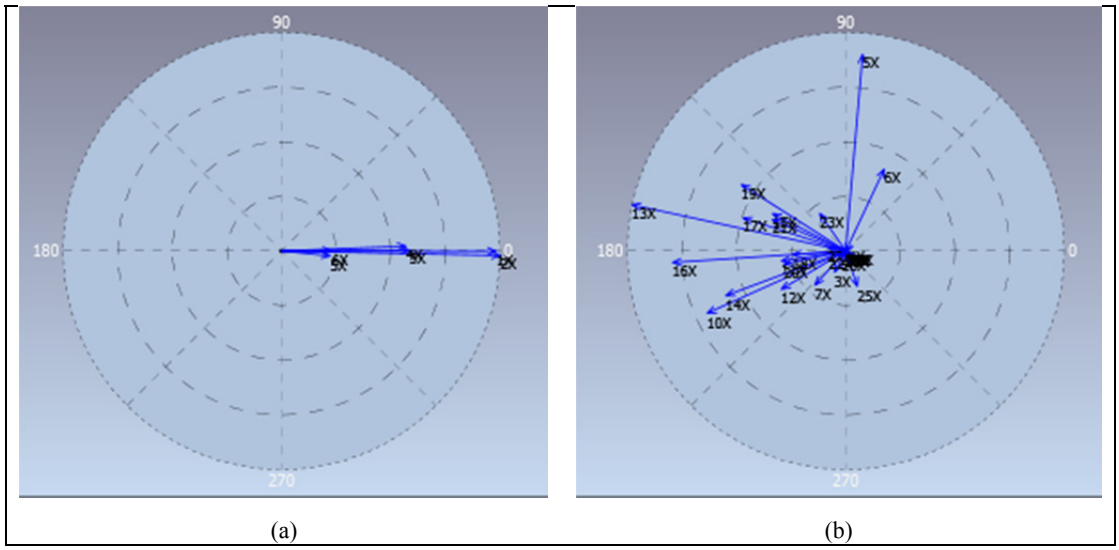


Figure 5.12 Processus de validation - graphes de complexité

La Figure 5.12a indique une complexité normale pour la période fondamentale pour le bâtiment 1 Est de HRDP; donc des valeurs très faibles de la partie imaginaire de la réponse. À l'inverse, la Figure 5.12b illustre la complexité du mode fondamental du bâtiment de l'aile C de HGM. L'ajustement du coefficient MAC (généralement autour de 0,8) et la génération des graphes de complexité ont été utilisés pour valider les fréquences identifiées par l'analyse FDD et ajuster les valeurs au besoin. Les données de vibrations ambiantes constituent une source d'information importante qui peut être utilisée pour des analyses plus détaillées.

5.3.3 Résultats expérimentaux

Le Tableau 5.6 résume les valeurs des paramètres modaux (périodes des trois premiers modes et amortissement) trouvées pour les bâtiments des deux hôpitaux. La période fondamentale obtenue dans les conditions de service est comparée à la formule empirique (équation 5.1) proposée par le CNB 2010 pour les cadres en acier résistant aux moments, où h_n représente la hauteur du bâtiment.

$$T_a = 0{,}085\, h_n^{3/4} \tag{5.1}$$

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Comme attendu, on constate un écart avec la relation du code. Dans le cas de l'étude, l'écart se situe entre 32 et 60% (*Voir* Tableau 5.6).

Tableau 5.6 Paramètres modaux des bâtiments

Caractéristiques du bâtiment		**Période (s)**				**Amortissement ζ (Mode 1) %**
Aile	**N étages**	**Mode 1**	**Mode 2**	**Mode 3**	**Formule empirique CNB 2010**	
Hôpital général de Montréal						
Aile A	7	0,6	0,2	-	0,9	2,8
Aile B	7	2,7	0,3	0,1	0,9	0
Aile C	10	0,2	0,1		1,2	0
Tour C (entre D/E)	23	1,2	0,4	0,3	2,3	4,7
Aile E	17	1,1	0,3	0,2	1,8	4,7
Hôpital Rivière-des-Prairies						
Aile A	5	0,4	0,28	0,21	0,7	1,7
1 Est	4	-	-	-	-	-
3 Est	4	0,3	0,04	0,02	0,6	2,7
B Est	3	0,2	0,1	0,02	0,5	1,6
B Ouest	3	0,2	0,1	0,02	0,5	1,9

Les observations suivantes sont faites sur les résultats obtenus :

1. Les bâtiments se déforment selon des modes réguliers de flexion mais dans de nombreux cas avec une composante de torsion dès le mode 2;
2. Alors que les caractéristiques des ailes A et B de l'HGM sont quasiment semblables, une période de 2,7 s a été trouvée pour l'aile B comparativement à 0,62s à l'aile A. Avec un amortissement nul, il s'agit probablement d'une sollicitation externe dont la source n'a pu être validée. On retient une période de 0,6s pour les ailes A et B;
3. L'aile C (HGM) présente à l'inverse une rigidité importante (T_1 = 0,16s);
4. Les résultats des nombreuses campagnes de mesures de vibration ambiantes, mentionnées entre autres au paragraphe 2.4.2, montrent bien que les relations proposées par le CNB (et les codes de manière générale) donnent des valeurs significativement plus élevées. Les paramètres modaux extraits des bâtiments sous étude s'inscrivent dans cette tendance. Elles reflètent les conditions en service des bâtiments avec l'ensemble des composants

structuraux et non-structuraux retrouvés sur place et non pris en compte dans les équations proposées. Il convient toutefois de rappeler que les enregistrements sont de faibles amplitudes et permettent de caractériser le comportement élastique des structures. La Figure 5.13 illustre un exemple de positionnement des capteurs.

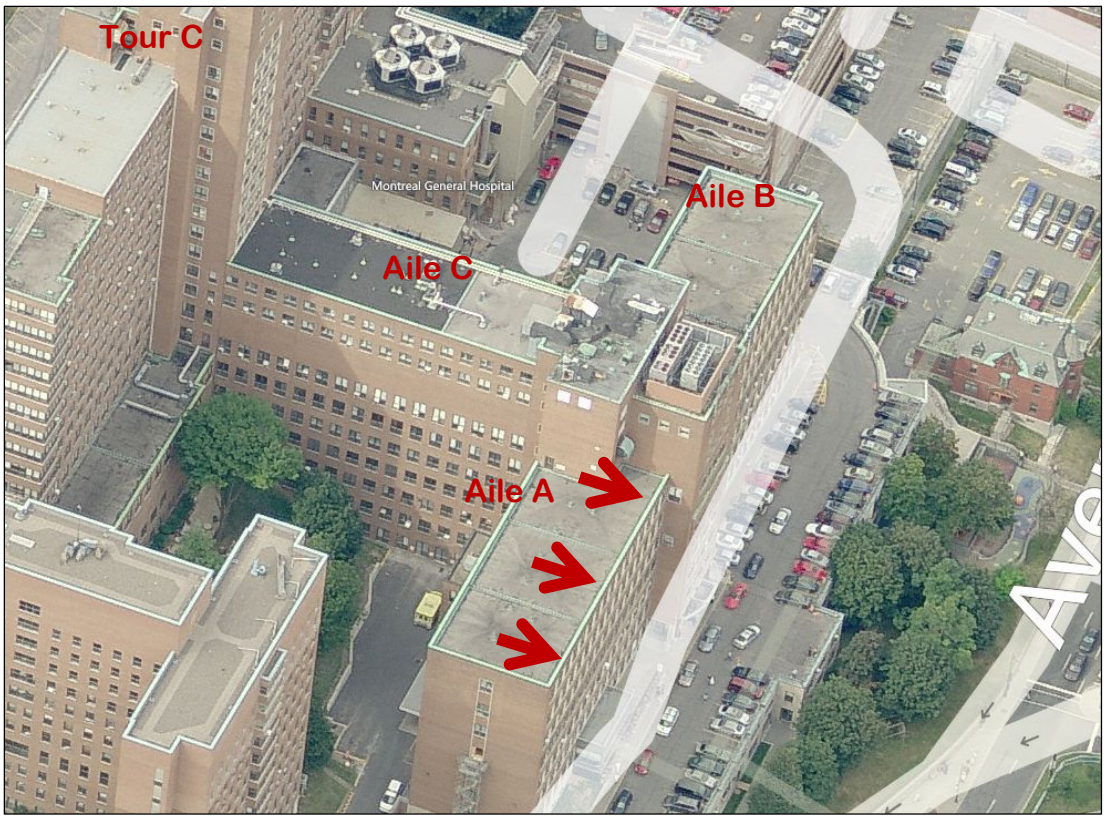


Figure 5.13 Vue aérienne de l'HGM avec identification du bâtiment C et de ses connexions avec les autres bâtiments et exemple de positionnement des capteurs
Adaptée de Microsoft Corporation (2015)

5.4 Évaluation de la vulnérabilité sismique de la structure ou SRI structural

Pour le calcul de l'indice de risque, SRI structural, le choix s'est porté sur la méthode du CNRC mise à jour selon les changements apportés par la version 2010 du CNB en faisant abstraction de la vulnérabilité des CFO (*Voir* équation 5.2). L'objectif est ici de mettre en évidence la vulnérabilité de la structure.

$$SRI_{structural} = IS \tag{5.2}$$
$$SRI_{structural} = A * B * C * D * E$$

Les hypothèses retenues pour le calcul des paramètres A à F sont les suivantes :

1. A est fonction de l'aléa sismique de Montréal et une valeur conservatrice (la plus défavorable et représentative de l'ensemble des structures en cadre) est retenue;
2. L'HGM est situé sur le roc (site A) alors que l'HRDP est sur un site B;
3. La cote structurale C est constante (SFRS semblable pour les bâtiments considérés) et majoré d'un facteur de 1,3 pour tenir compte de l'incertitude sur les informations compilées résultant de l'inspection visuelle et des plans;
4. Les irrégularités géométriques et les modifications augmentent la vulnérabilité des bâtiments, le facteur D est calculé en tenant compte des spécificités de chacun des bâtiments jusqu'à une valeur maximale égale à 4.

Les résultats obtenus pour les deux hôpitaux-témoins indiquent un risque modéré pour l'ensemble des bâtiments de l'HGM alors que pour l'HRDP, la catégorie d'emplacement (site B) et la gamme plus faible des périodes fondamentales augmentent le risque qui devient élevé pour le bâtiment administratif, comme illustré dans le Tableau 5.7.

Tableau 5.7 SRI des bâtiments témoins

Caractéristiques du bâtiment		SRI		
Ailes	**Période**	**IS**	**INS**	**SRI**
Hôpital général de Montréal				
Ailes A et B	0,6	6	6	6
Tour C (entre D/E)	1,2	4	6	4
Aile E	1,1	6	6	6
Hôpital Rivière-des-Prairies				
Aile A	0,3	14	7	14
Ailes C et D (ouest et est)	0,3	9	6	9
Ailes B (ouest et est)	0,2	9	6	9

5.5 Évaluation du risque sismique des composants fonctionnels et opérationnels ou SRI non-structural

Pour le calcul de l'indice SRI non-structural, le choix s'est porté sur l'indice de risque R de la méthode de la norme CSA-S832-14. Pour l'HGM, une mise à jour des données d'inspection calculés selon la version 2005 du CNB est faite afin de refléter la vulnérabilité sismique selon les prescrits de l'édition 2010 du CNB et l'approche système. Comme attendu, le niveau de risque diminue pour l'ensemble des systèmes, avec une diminution de 13% de CFO à risque élevé (*Voir* Figure 5.14) compte tenu de la diminution des valeurs des composants de l'aléa du cadre réglementaire : $S_a(0,2)$, F_a, F_v et leurs effets sur les deux paramètres structuraux RB et RG.

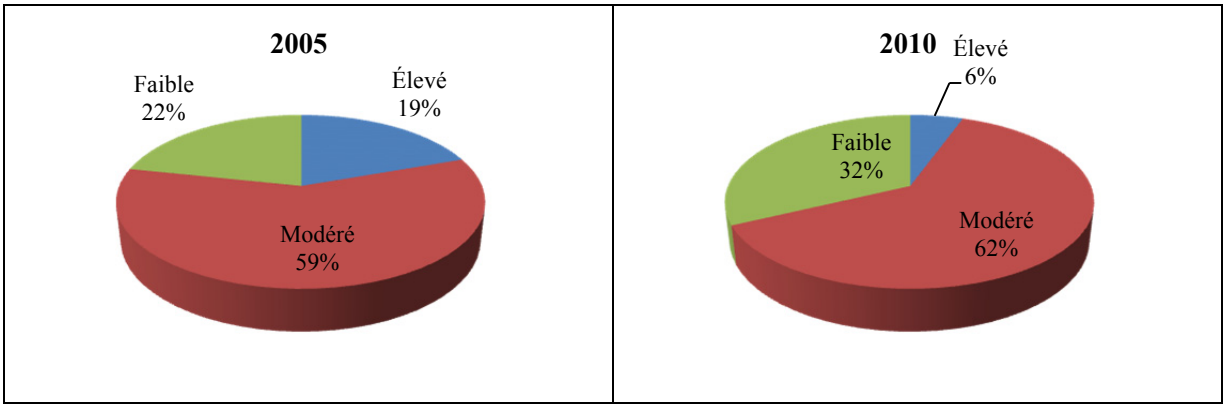


Figure 5.14 Comparaison de la répartition du risque sismique des CFO selon les éditions de 2005 et 2010 du CNB pour les données d'inspection

On considère ici les seuils de risque selon la version précédente de la norme, soit la version CAN/CSA-S832-R11. Plus spécifiquement, la Figure 5.15 illustre le cas de 17 CFO d'un système CVCA. On note une concentration des valeurs du SRI dans la gamme du risque faible R< 32 alors qu'un seul CFO ne nécessite pas de mesure de mitigation (R<16) selon les nouvelles limites.

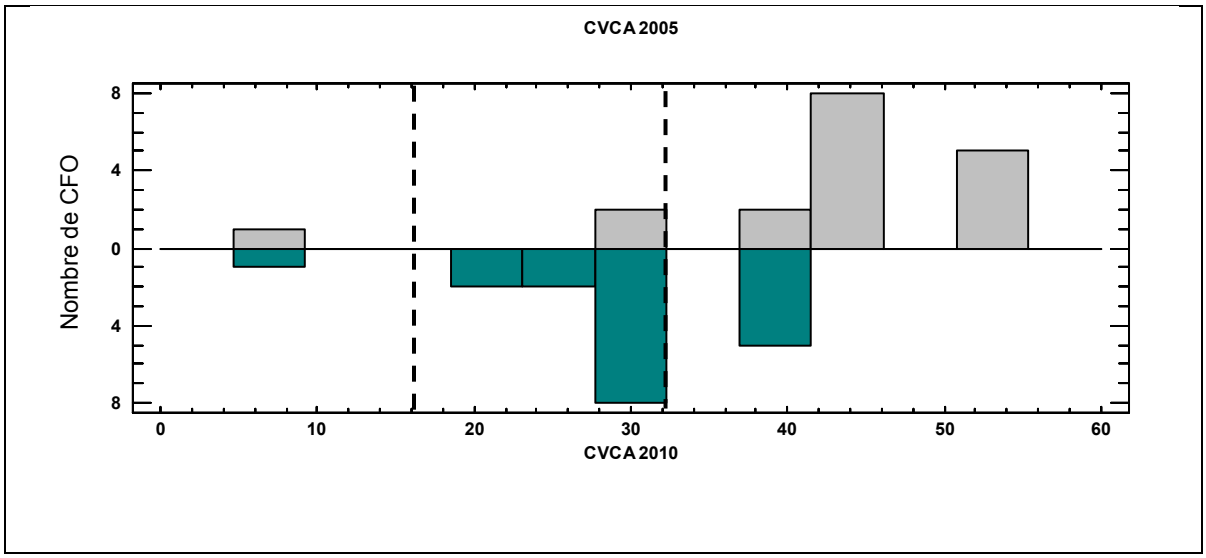


Figure 5.15 Double histogramme des valeurs de R calculées selon les éditions CNB 2005 et 2010 pour un système CVCA

De manière générale, ce sont 134 CFO typiques qui ont été évalués pour les deux hôpitaux-témoins et regroupés en huit systèmes critiques afin de limiter le nombre de données générées. Les analyses vont porter les systèmes suivants: CVCA (trois systèmes), maintien des fonctions vitales, évacuation sécuritaire, protection incendie, électricité et gaz médicaux.

À cette étape, il est important de revenir sur les CFO présentant un risque élevé puisque ce premier niveau de calcul est fait pour un sol de catégorie d'emplacement A (*Voir* Tableau 5.8). Pour ces CFO, on anticipe des valeurs de risque élevé pour les autres catégories d'emplacement et pour un aléa de 2% en 50 ans. Le Tableau 5.9 illustre la variation des paramètres RG (catégorie d'emplacement et aléa) et RB (structure).

Tableau 5.8 CFO à risque élevé et détails du calcul du risque sismique pour l'HGM

CFO	Paramètres de vulnérabilité				V	Paramètres de conséquences			C	R
	Attaches×4	Impacts×3	Renversement ×2	Emplacement×1	Pointage	Sûreté	Fonctionnalité	Protection	Pointage	R=V*C
CFO spécialisés										
CFO 1	40	30	20	5	3,40	10	5	5	20	68
CFO 2	40	3	20	5	2,43	5	10	10	25	61
CFO du système électrique										
CFO 3	40	30	20	10	3,58	5	10	0	15	54
CFO 5	40	3	20	10	2,60	10	10	0	20	52
CFO 6	40	30	20	5	3,40	5	10	0	15	51
CFO 7	40	3	20	5	2,43	10	10	0	20	49
CFO divers										
CFO 8	40	30	20	5	3,40	1	10	5	16	54
CFO 9	40	3	20	5	2,43	10	10	0	20	49
CFO 10	40	3	20	5	2,43	5	10	5	20	49
CFO 11	20	30	2	10	2,23	10	10	0	20	45
CFO 12	20	30	20	10	2,90	10	5	0	15	43

Tableau 5.9 Variation des paramètres RG et RB entrant dans le calcul de l'indice R pour un aléa de 2% en 50 ans

Paramètres selon S-832		Sol A	Sol B	Sol C	Sol D	Sol E
RG = $\frac{F_a * S_a(0,2)}{1,25}$	F_a	0,76	0,86	1	1,14	1,23
	$S_a(0,2)$	0,49	0,55	0,64	0,73	0,79
	RG	0,30	0,38	0,51	0,67	0,78
RB	$0 < T \leq 0,2$	1	1	1,1	1,2	1,3
	$0,2 < T \leq 0,5$	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4
	$0,5 < T$	1,2	1,3	1,3	1,4	1,5

En termes de vulnérabilité, on note principalement des lacunes dans les conditions de retenue latérale ou au plancher des différents CFO et leur sensibilité au renversement. Les panneaux de contrôle représentent l'exemple typique d'un équipement élancé et son ratio hauteur largeur amplifie d'ores et déjà sa vulnérabilité. Même fixés au sol, ils restent vulnérables au renversement en cas de secousses et une fixation au mur permet de réduire le risque. Cet ancrage change cependant la sensibilité du composant puisqu'il devient sensible au déplacement inter-étage (versus accélération). Les exemples sont nombreux dans les deux hôpitaux : chauffe-eau, machine à laver, stérilisateurs ou autoclaves, étagères d'archivage, etc. (*Voir* Figure 5.16). Il est dans certain cas difficile de vérifier la qualité des ancrages et la valeur la plus conservatrice est retenue.

Panneaux de transfert et de contrôle de l'alimentation électrique (a et b) | Machine à laver encastrée (c) | Étagères encastrées (d)

Figure 5.16 Exemples de CFO élancés et conditions de fixation
Tirée de Cappai et al. (2010), photos c et d

Les dommages les plus probables sont dans ces cas-ci, des équipements hors de fonctionnement, le déplacement ou le renversement des composants, la chute d'objet pouvant blesser les occupants ou obstruer les voies d'accès en cas d'évacuation. Conséquemment, l'indice de conséquences *C* est établi en considérant la menace à plusieurs personnes ainsi que l'importance prioritaire du bâtiment: il varie entre 15 et 20 pour la majorité des CFO. Toutefois pour les composants spécialisés ou des équipements de précision (CFO 1, 2, 8 et

9), la prise en compte du facteur de protection (coût d'acquisition, dans ce cas-ci) augmente le pointage du paramètre C et l'indice de risque (R) de 25 à 40%.

D'un autre côté, on retrouve des CFO, comme les systèmes d'alimentation (pompes, compresseurs d'air, etc.) ayant un faible indice de risque pour l'ensemble des catégories d'emplacement pour aléa de 2% en 50 ans. L'ensemble des CFO a aussi été identifié en fonction de leur sensibilité à l'accélération et/ou au déplacement. On note la forte proportion des CFO sensibles à l'accélération comme illustré à la Figure 5.17.

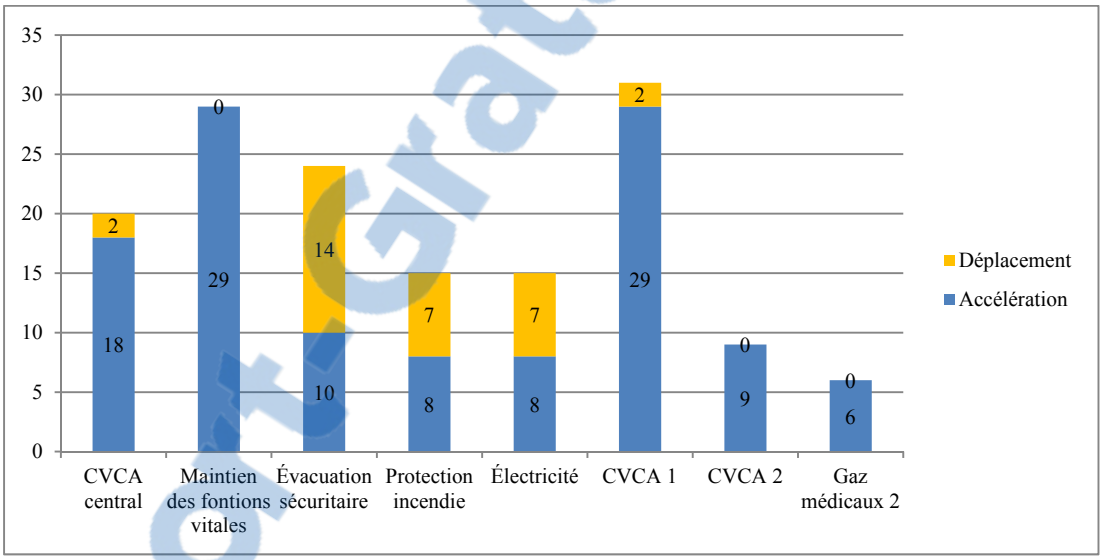


Figure 5.17 Composition des systèmes critiques en fonction de la sensibilité des CFO

5.6 Conclusion

L'évaluation qualitative des systèmes des deux hôpitaux-témoins a permis de collecter l'information sur leur fonctionnement et les composants de base. Une campagne d'investigation a été menée sur deux hôpitaux avec les mesures de vibrations ambiantes et le relevé exhaustif des CFO. En utilisant des méthodes existantes d'évaluation de la vulnérabilité sismique, les indices SRI structuraux et non-structuraux ont été calculés pour les bâtiments-témoins. De manière générale, les conditions de site de l'HGM (sol A) fait que le niveau de risque des CFO est faible ou modéré, à l'exception d'un CFO mobile dont la

Rapport-Gratuit.com

mitigation est simple. Dans le cas de l'HRDP, le niveau de risque augmente sensiblement en raison de la catégorie d'emplacement (B) et les irrégularités en plan du bâtiment administratif. Les inspections ne permettent pas d'évaluer les risques de perte de fonctionnalité reliée aux caractéristiques mécaniques et techniques des CFO. On note toutefois qu'au sein des institutions, des évaluations de l'opérationnalité des CFO se fait de manière régulière à l'aide d'un outil standardisé d'évaluation du risque. Le chapitre suivant porte sur la généralisation des données quantitatives représentatives de l'ensemble des hôpitaux de Montréal et le développement de la méthodologie d'évaluation.

CHAPITRE 6

DÉVELOPPEMENT DE LA MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DE LA FONCTIONNALITÉ POST-SISMIQUE DES HÔPITAUX DE MONTRÉAL

La méthodologie élaborée dans le cadre de cette recherche est basée sur une combinaison de phases qualitative et quantitative (*Voir* Figure 0.2). Le chapitre 6 vise la phase quantitative, menée sous la forme d'une étude paramétrique combinée à une approche probabiliste. La formulation du risque sismique résulte du calcul des indices de fonctionnalité qui sont présentés de manière désagrégée et qui donnent une image fiable de la situation actuelle qui est susceptible de nuire à fonctionnalité post-sismique des hôpitaux.

La démarche retenue implique le développement d'un échantillon de données sur la base de celles recueillies pour les hôpitaux-témoins. On fait varier les paramètres favorables à l'initiation de la défaillance sismique ou du dommage sur le composant : a) l'aléa sismique, b) la catégorie d'emplacement, et c) la période du bâtiment. Concrètement, il s'agit de développer la gamme des IFP et d'en établir des critères d'interprétation selon une matrice de risque. On rappelle que l'IFP est basé sur le calcul d'un indice de priorité de risque (*IPR*) donné par l'équation (6.1).

$$IPR = SRI * P \tag{6.1}$$

Dans laquelle :

1. L'indice *SRI* prendra un ensemble de valeurs obtenues par extension des caractéristiques structurales des bâtiments-témoins. Il représente ainsi un facteur d'importance du dommage;
2. *P* représente la probabilité de dommages pour la structure et/ou les CFO en fonction de la demande sismique (déplacement spectral).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

L'ensemble formé par les systèmes fictifs générés et analysés, 76 pour les structures et 224 systèmes de CFO, pour chacun des scénarios d'aléa sismique, constitue la base de de la méthodologie proposée. L'échantillon analysé inclut les données des bâtiments-témoins.

6.1 Spectre cible de Montréal

L'objectif de sécurité critique, répondant aux objectifs de performance occupation immédiate et fonctionnalité post-sismique, est analysé pour les aléas respectifs de 2% et de 10% en 50 ans. La demande sismique est calculée sur la base des spectres uniformes de risque sismique pour Montréal (*Voir* Figure 6.1). Ces spectres sont construits à partir des coefficients d'emplacement F_a et F_v calculés en tenant compte des accélérations à 0,2s et 1s de la version du CNB2010.

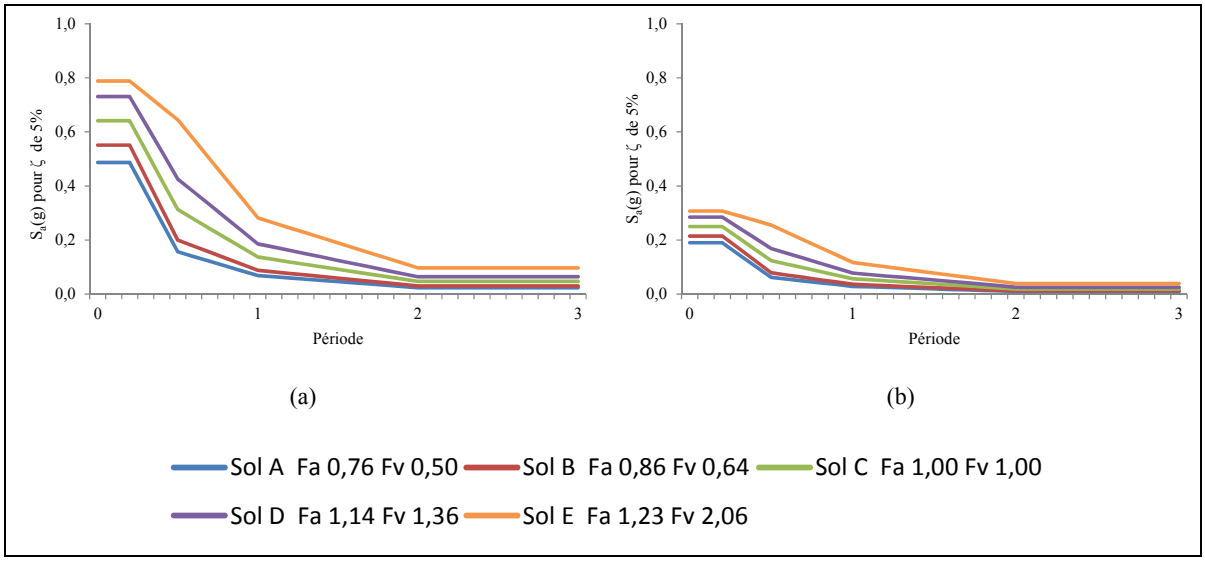


Figure 6.1 Spectres de réponse de la ville de Montréal en fonction de la catégorie d'emplacement pour une occurrence de : a) 2% en 50 ans et b) 10% en 50 ans

6.2 Gamme de valeurs de l'indice SRI

La base de données développée contient 76 entrées pour la structure et 4000 entrées pour les CFO constituant les 224 systèmes considérés. Les deux séries d'échantillons (HGM et

HRDP) sont analysées statistiquement afin de faire ressortir les principales tendances avec le logiciel StatGraphics (StatPoint Technologies 2009). Les caractéristiques de position des valeurs par rapport au seuil de risque élevé établi par les méthodes d'évaluation sont résumées par une représentation graphique en boîte à moustaches. Cette représentation des valeurs (ex. Figure 6.2) qui s'étendent du premier au troisième quartile avec une concentration des 50% centraux dans la boîte, une ligne verticale à la position médiane et un signe « plus » à la position de la moyenne. Le Tableau 6.1 rappelle les seuils de risque relatifs proposés pour l'indice structural IS de la méthode de pointage du CNRC (LeBoeuf et Nollet 2006; Saatcioglu et al. 2013) ainsi que ceux reliés à l'indice R des CFO selon la méthode paramétrique d'évaluation CAN/CSA-S832-14.

Tableau 6.1 Seuils de risque relatif conformément aux méthodes d'évaluation retenues

Niveau de vulnérabilité / risque	**Structure (LeBoeuf et Nollet 2006; Saatcioglu et al. 2013)**	**CFO (CAN/CSA-S832-14)**
Faible / acceptable	$IS \leq 2$	$R \leq 16$
Modéré	$2 < IS \leq 10$	$16 < R \leq 64$
Élevé	$IS > 10$	$64 < R \leq 128$
Très élevé	-	$R > 128$

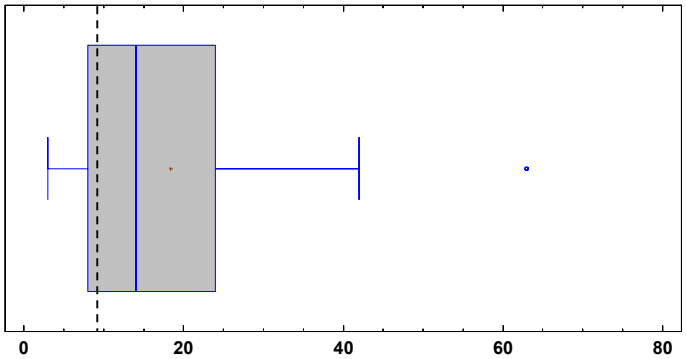
6.2.1 SRI structural – Récapitulatifs des résultats

Les valeurs sont développées en suivant les hypothèses retenues préalablement, et en considérant trois classes de bâtiments selon leurs périodes fondamentales : T inférieure à 0,2s; T comprise entre 0,2 et 0,5s; T supérieure à 0,5s. L'ajout de nouvelles valeurs de risque vient de la variation du paramètre B catégorisant l'emplacement ($0,5 \leq B \leq 2,1$) et la présence d'un minimum (D=1,3) ou d'un maximum de modifications et d'irrégularités géométriques (D=4).

La Figure 6.2 met en évidence les principaux résultats de l'IS pour les 76 structures. La répartition des valeurs d'IS confirme l'importance de l'effet de la présence d'irrégularités et des sols meubles sur la vulnérabilité sismique de la structure au-delà du 75e percentile

(bordure de droite de la boîte) pour un aléa de 2% en 50 ans. La valeur extrême représente le cas d'une structure de période égale à 0,5s sise sur un sol de catégorie E alors que peu de structures se révèlent à risque faible (IS < 2,0) et modéré (IS < 10). La Figure 6.3 illustre la variation des valeurs significatives de l'échantillon.

Statistiques résumées	
Effectif	76
Moyenne	18,4
Écart-type	15,0
Coefficient de variation	81,7 %
Minimum	3,0
Maximum	63,0
Étendue	60,0



(a)

Figure 6.2 Répartition des valeurs d'IS pour l'échantillon de structures fictives constitué à l'aide d'un graphique à moustaches

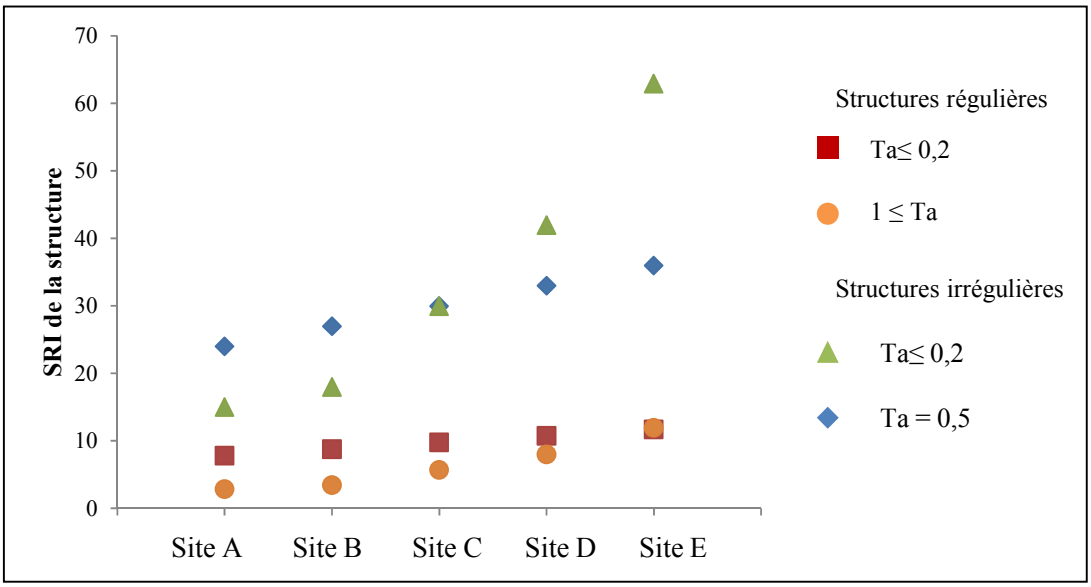
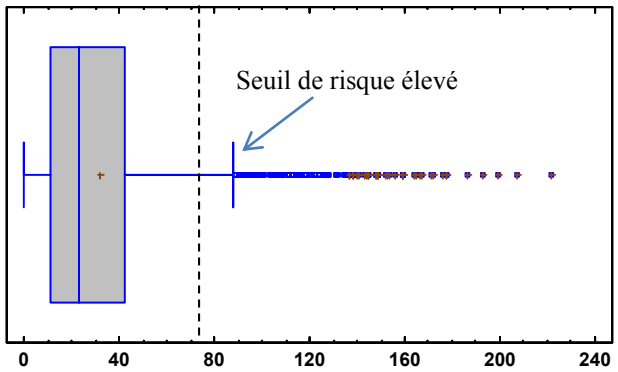


Figure 6.3 Valeurs significatives d'IS selon la catégorie d'emplacement

6.2.2 SRI non-structural – Récapitulatifs des résultats

Les valeurs du SRI, soit l'indice R pour les CFO, sont développées en faisant varier les paramètres RB et RG pour les deux scénarios d'aléa sismique. Tout comme pour la structure, les résultats de l'étude paramétrique sont présentés sous forme de graphique. L'échantillon de données compte 4044 valeurs dont les statistiques sont résumées à la Figure 6.4.

Statistiques résumées	
Effectif	4044
Moyenne	31
Écart-type	28,9
Coefficient de variation	91%
Minimum	0,4
Maximum	222
Étendue	222



Gamme de valeurs de l'échantillon
(a)

Figure 6.4 Répartition des valeurs de R pour l'échantillon de CFO constituée à l'aide d'un graphique à moustaches

Les résultats détaillés de l'analyse paramétrique pour un système CVCA central sont présentés à la Figure 6.5. Un tableau détaillé est présenté en ANNEXE IX, p. 243 (*Voir* Tableaux-A IX-1 à IX-6). Pour l'ensemble des CFO, on note un risque sismique faible ($R \leq 16$) à modéré ($16 < R \leq 64$) pour l'aléa de 10% en 50. Pour un aléa de 2% en 50 ans, les sites A et B vont présenter un niveau de risque également faible et modéré alors que les sites D et E présentent un risque élevé (*Voir* Figure 6.5). Le seuil du risque élevé est représenté par la ligne en trait discontinu. La gamme des valeurs extrêmes supérieures à 86 (au-delà du 95e centile) décrit une classe de risque très élevé qui regroupe l'ensemble des valeurs obtenues pour la catégorie d'emplacement E et pour un aléa de 2% en 50 ans. En comparaison avec le seuil de 128, recommandé par la norme S-832, l'ensemble des CFO se retrouvent dans les trois catégories de risque faible à élevé.

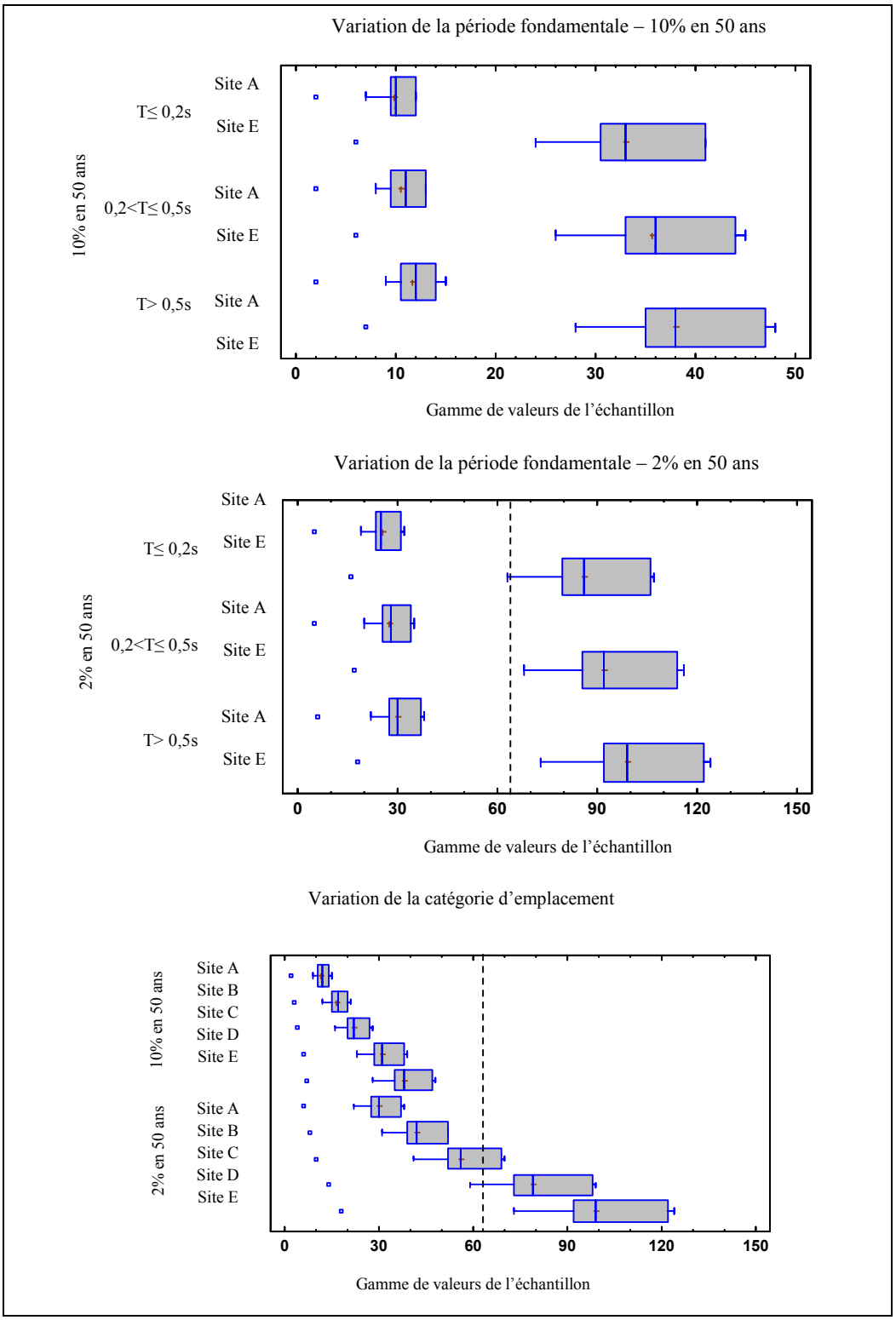


Figure 6.5 Effet de la variation de la période fondamentale et de la catégorie d'emplacement sur l'indice R pour un système CVCA

6.2.3 Classement relatif des composants et discussion

Le Tableau 6.2 présente les quatre « classes de niveaux de risque » retenues en fonction des limites établies par les méthodes de pointage utilisées et la répartition statistique des valeurs de l'échantillonnage considéré (structures et CFO). Ce regroupement en quatre classes permet une harmonisation avec les niveaux de dommages (P) et les données peuvent facilement être incluses dans une matrice de risque typique. Les valeurs des SRI sont normalisées entre 0,1 et 1 pour le calcul des indices IPR et IFP, calculés respectivement selon les équations 4.1, 4.4 et 4.5. On fait ressortir la grande vulnérabilité sismique des classes 2 à 4 pour lesquels des mesures de mitigation ou une évaluation plus approfondie sont obligatoires.

Tableau 6.2 Récapitulatif des classes de niveaux de risque

Classe	Limite inférieure	Limite supérieure	Pointage normalisé (Cs)	Niveau de risque
SRI structural				
1	0	2	0,1	Faible
2	2	10	0,3	Modéré
3	10	20	0,5	Élevé
4	20	63	1	Très élevé
SRI non-structural				
1	0	16	0,1	Faible
2	16	64	0,3	Modéré
3	64	86	0,5	Élevé
4	86	222	1	Très élevé

On rappelle que dans le cas des CFO, les mesures de mitigation peuvent être appliquées lorsque le SRI est compris entre 16 et 32, ces CFO entrent alors dans la classe de risque acceptable. Pour la structure, le seuil de la classe 4 correspond à la plus grande valeur obtenue en considérant le facteur d'irrégularité géométrique faible.

6.3 Développement des valeurs de P

Le premier paramètre de dommage, le SRI, a été calculé pour la structure et les composants non-structuraux essentiels au fonctionnement des bâtiments-témoins de l'étude. Cette section présente le calcul analytique pour la détermination de la demande sismique (S_d), et le développement des courbes de fragilité. Les définitions des niveaux de dommages (faible, modéré, étendu et complet) sont conformes à celles établies dans la méthodologie d'évaluation du risque Hazus (FEMA 2012).

6.3.1 Calcul de la demande sismique

En partant de l'hypothèse que les structures régulières peuvent être modélisées par un système équivalent à un degré de liberté, la relation entre l'accélération spectrale et le déplacement spectral (équation 2.1) est utilisée pour calculer la demande sismique des différents bâtiments étudiés pour des aléas de 2% et 10% en 50 ans. On considère que les CFO se retrouvent à une hauteur équivalente du bâtiment.

Le Tableau 6.3 présente les récapitulatifs des valeurs maximales de déplacement (S_d) et d'accélération (S_a) et pour les différentes catégories d'emplacement, en fonction des spectres de réponse de la ville de Montréal (*Voir* Figure 6.1). Ce sont les valeurs d'entrée pour la détermination des probabilités de dommages P[DS]. Les tendances observées pour l'ensemble des composants sont standards avec : 1) des valeurs d'accélérations spectrales correspondant aux valeurs de référence pour les différents sites, 2) des accélérations spectrales plus élevées pour les bâtiments de faible période et 3) à l'inverse, un déplacement spectral plus important pour les bâtiments plus élevés.

Tableau 6.3 Résultats de l'analyse spectrale pour les occurrences de 10% et 2% en 50 ans

Sol / Période	Sol A		Sol B		Sol C		Sol D		Sol E	
	S_d (mm)	S_a (g)	S_d (mm)	S_a (g)	S_d (mm)	S_a (g)	S_d (mm)	S_a (g)	S_d (mm)	S_a (g)
Occurrence de 10% en 50 ans										
0,2s	1,1	0,2	1,3	0,2	1,5	0,3	1,7	0,3	1,9	0,3
0,3s	3,0	0,2	3,5	0,2	4,3	0,2	5,0	0,3	5,9	0,3
0,34s	3,7	0,1	4,3	0,2	5,5	0,2	6,6	0,2	8,2	0,3
0,50s	3,9	0,1	5,0	0,1	7,8	0,1	10,2	0,2	16,3	0,3
0,62s	5,1	0,1	6,5	0,1	10,2	0,1	13,9	0,2	21,4	0,2
1,05s	7,6	0	9,7	0	15,2	0	20,6	0	31,3	0,1
1,20s	8,9	0	11,3	0	17,7	0	24,1	0	36,5	0,1
Occurrence de 2% en 50 ans										
0,16s	2,9	0,5	3,3	0,6	3,8	0,6	4,4	0,	4,7	0,8
0,28s	7,8	0,4	8,9	0,5	10,9	0,6	12,9	0,6	14,9	0,8
0,34s	9,5	0,3	10,9	0,4	13,9	0,5	16,8	0,6	20,5	0,7
0,50s	9,7	0,2	12,3	0,2	19,5	0,3	26,7	0,4	40,3	0,6
0,62s	12,8	0,1	15,9	0,2	25,6	0,3	34,7	0,4	52,4	0,5
1,05s	18,7	0	21,9	0	37,3	0,1	47,6	0,2	71,9	0,3
1,20s	21,9	0	25,8	0	43,8	0,1	56,0	0,2	84,6	0,2

6.3.2 Développement des courbes de fragilité

La probabilité de dommages est extraite des courbes de fragilité selon la méthodologie d'évaluation du risque Hazus qui définit pour une gamme de bâtiments des données de médianes et d'écart-type (FEMA 2012). Ces courbes sont fonction du système de résistance aux forces latérales du bâtiment (S1 identifiant un cadre en acier résistant au moment avec remplissages), de la hauteur du bâtiment (hauteur faible à élevée, L, M et H) et de sa classification (bâtiment de protection civile).

Rapport-Gratuit.com

Les Figures 6.6 à 6.8 illustrent les courbes de fragilité respectifs de la structure et dCFO sensibles au déplacement et à l'accélération. Dans ce dernier cas, on note une faible variation des paramètres selon la hauteur de la structure (S1L, S1M et S1H) pour les CFO sensibles à l'accélération, les résultats sont donc présentés sur une seule courbe de fragilité (*Voir* Figure 6.8). À une valeur spécifique de demande sismique correspondent les probabilités de subir des dommages de niveaux faible, modéré, étendu et complet ou de n'avoir aucun dommage (non illustré sur les courbes). Les tableaux de probabilités de dommages ainsi que les histogrammes relatifs sont présentés en ANNEXE X, p. 251 (Tableaux-A X-1 à X-3 et Figures-A X-1 à X-6).

Type de bâtiment	Déplacement spectral médian (cm) et Écart-type (Beta)							
	Faible		Modéré		Étendu		Complet	
	Médiane	Beta	Médiane	Beta	Médiane	Beta	Médiane	Beta
Fragilité structural pour les bâtiments de protection civile – Niveau de conception faible								
S1L	0,64	0,80	1,02	0,73	2,15	0,75	5,31	0,93
S1M	1,06	0,66	1,69	0,70	3,59	0,78	8,86	0,91
S1H	1,66	0,64	2,65	0,66	5,60	0,68	13,82	0,86

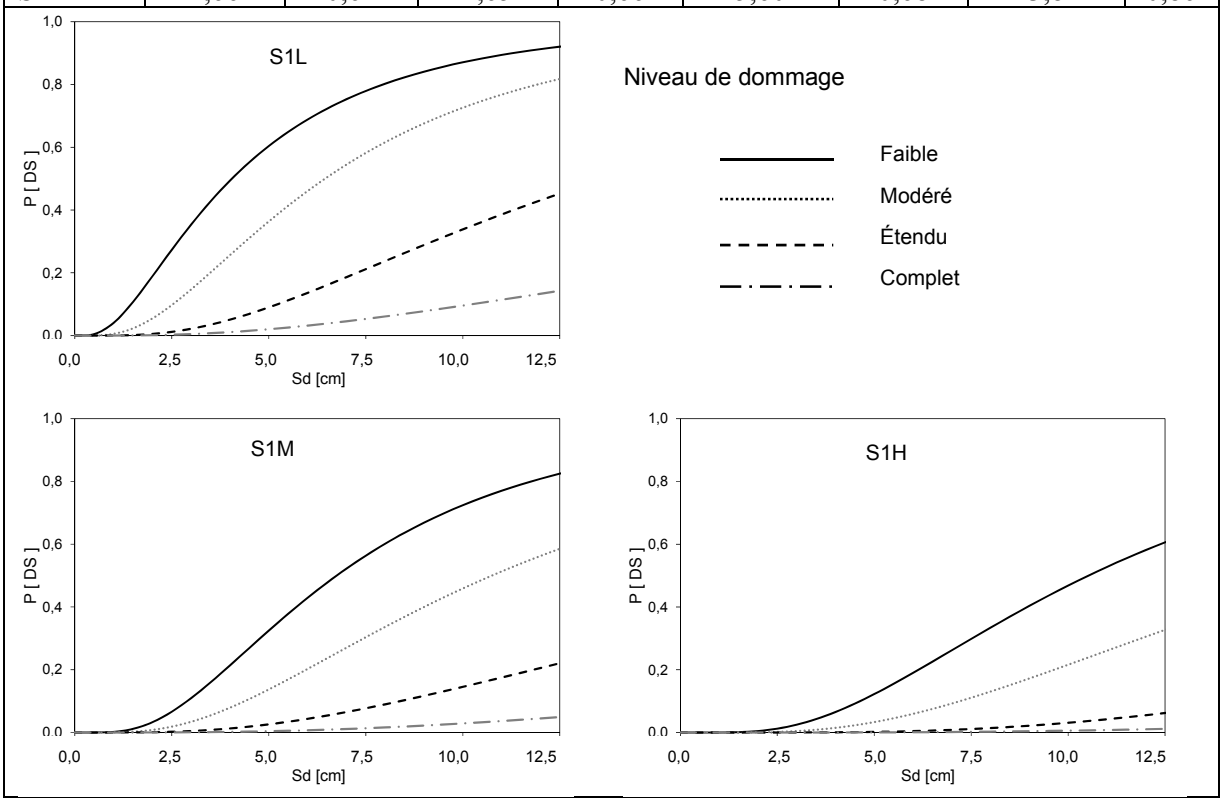


Figure 6.6 Fragilité des structures de hauteur faible à élevée (S1L, S1M et S1H)

Type de bâtiment	Déplacement spectral médian (cm) et Écart-type (Beta)							
	Faible		Modéré		Étendu		Complet	
	Médiane	Beta	Médiane	Beta	Médiane	Beta	Médiane	Beta
Bâtiments de protection civile – Fragilité de CFO sensibles au déplacement								
S1L	0,34	0,81	0,68	0,80	2,12	0,80	4,25	0,94
S1M	0,85	0,73	1,70	0,76	5,30	0,86	10,62	0,98
S1H	1,77	0,71	3,54	0,74	11,05	0,87	22,11	0,98

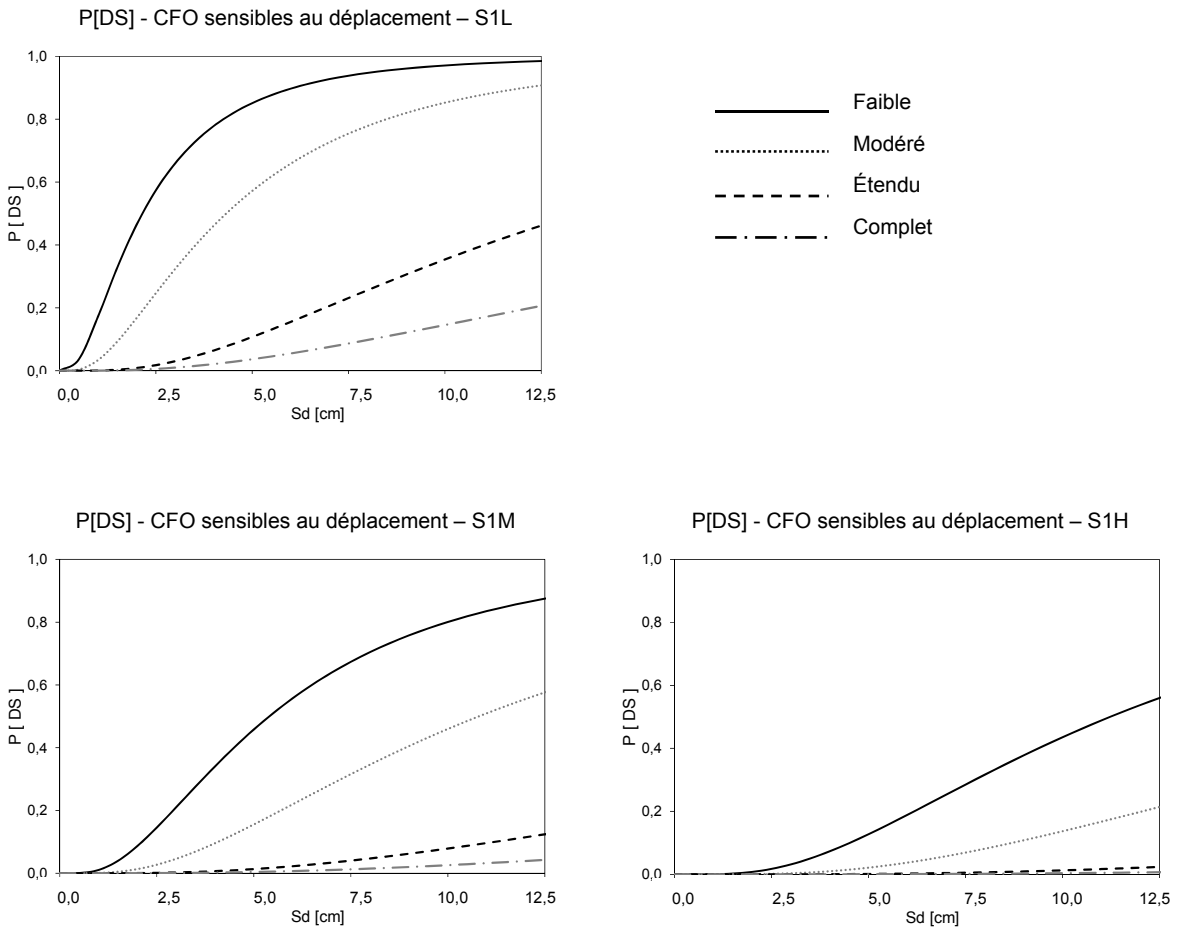


Figure 6.7 Fragilité des CFO sensibles au déplacement

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Type de bâtiment	Accélération spectrale médiane (g) et Écart-type (Beta)							
	Faible		Modéré		Étendu		Complet	
	Médiane	Beta	Médiane	Beta	Médiane	Beta	Médiane	Beta
Bâtiments de protection civile – Fragilité de CFO sensibles à l'accélération								
S1L	0,30	0,66	0,60	0,68	1,20	0,68	2,40	0,68
S1M	0,30	0,66	0,60	0,68	1,20	0,68	2,40	0,68
S1H	0,30	0,67	0,60	0,67	1,20	0,67	2,40	0,67

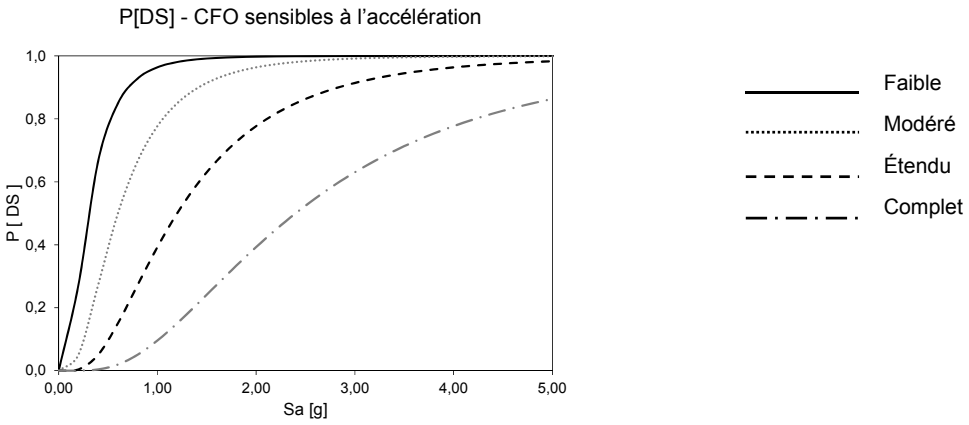


Figure 6.8 Fragilité des CFO sensibles à l'accélération

De manière globale, les résultats reflètent l'aléa modéré de l'île de Montréal et l'effet d'amplification des sites de catégories D et E. Les points suivants sont observables sur les différentes figures de répartition de dommages :

- pour la structure soumise à un séisme d'occurrence de 10% en 50 ans, la probabilité de causer des dommages aux bâtiments de période supérieure à 1,0 s est comprise entre 0,85% et 4% et pratiquement nulle pour les autres structures considérées. La fonctionnalité de l'hôpital dépend alors de la fonctionnalité des sous-systèmes de CFO pour des bâtiments construits sur les sols de catégorie A, B et C;
- pour une occurrence de 2% en 50 ans, les probabilités combinées de dommages faible et modéré varient entre 3% et 35% pour les bâtiments de période supérieure à 0,5s sis sur des sols de catégories C à E. On note l'apparition de dommage étendu (1,3%) et complet (0,3%) pour des bâtiments de période supérieure à 1s. sis sur des sols de catégorie E;

- pour les CFO sensibles au déplacement soumis à un aléa de 10% en 50 ans les probabilités de dommage sont quasi nulles, l'apparition de dommage faible débute pour un sol de catégorie C mais les probabilités de dommage restent inférieures à 5% pour un sol de catégorie E;
- pour le scénario de 2% en 50 ans, la tendance est la même pour le dommage modéré alors qu'on observe un dommage faible plus présent, de 1% à 25% respectivement pour les différentes catégories d'emplacement;
- pour les CFO sensibles à l'accélération, le dommage faible et modéré est fréquent et on note l'apparition de dommages étendus pour les bâtiments de périodes inférieures à 0,5s (entre 5 et 25%) et de dommages complets pour les bâtiments de faible hauteur même dans le cas de sol de catégorie A.

6.4 Indice de fonctionnalité post-sismique et critères d'interprétation

L'indice de fonctionnalité post-sismique (IFP) représente la dernière étape de la phase quantitative. Pour la structure, l'IFP est le produit du SRI par la probabilité P, alors que pour les systèmes de CFO, le calcul suit une démarche ascendante dans l'arborescence de l'AdD. Une fois l'IPR calculé pour chacun des CFO et les quatre niveaux de dommage (faible, modéré, étendu et complet), l'IFP respectif de chacun des niveaux de dommages est calculé selon les équations 4.4 et 4.5. Un indice IFP nul indique que le dommage aux composants n'a aucun effet sur la fonctionnalité post-sismique. À l'inverse, la valeur maximale de 1 représente la généralisation d'un niveau de dommage donné qui limite la performance du système.

6.4.1 Valeurs désagrégées de l'indice IFP

Les Figures 6.9 et 6.10 illustrent le calcul de l'IFP d'un système CVCA central avec ses branches de chauffage et de conditionnement d'air pour un aléa de 2% en 50 ans, une probabilité de dommage faible et un bâtiment de période 0,5s. À l'instar de la majorité des systèmes analysés, le système CVCA compte 4 étapes de calculs d'IFP de sous-systèmes qui sont regroupés sous un indice ascendant S4 à S1.

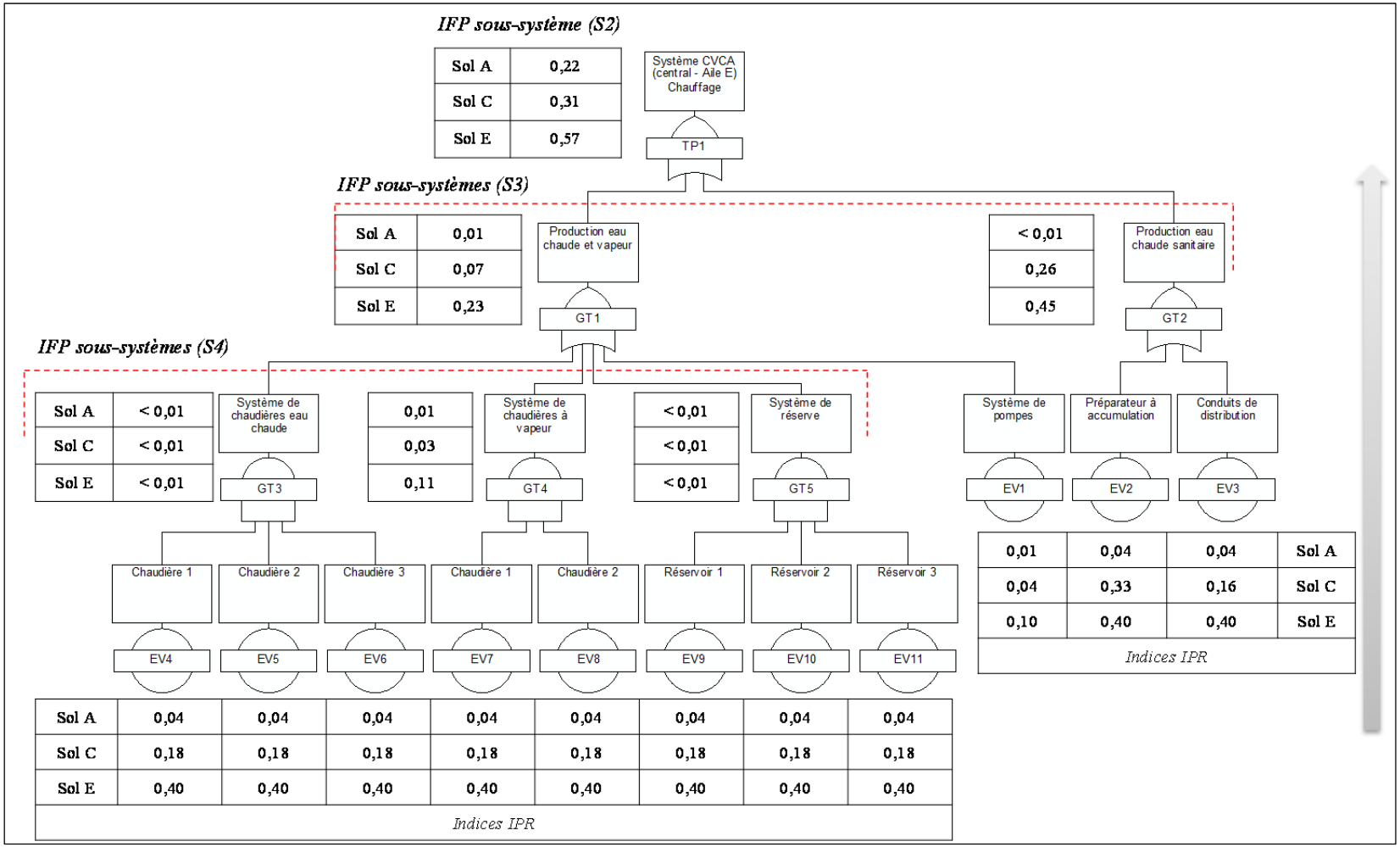


Figure 6.9 Processus ascendant de calcul de l'IFP d'un sous-système de chauffage pour un niveau de dommage faible

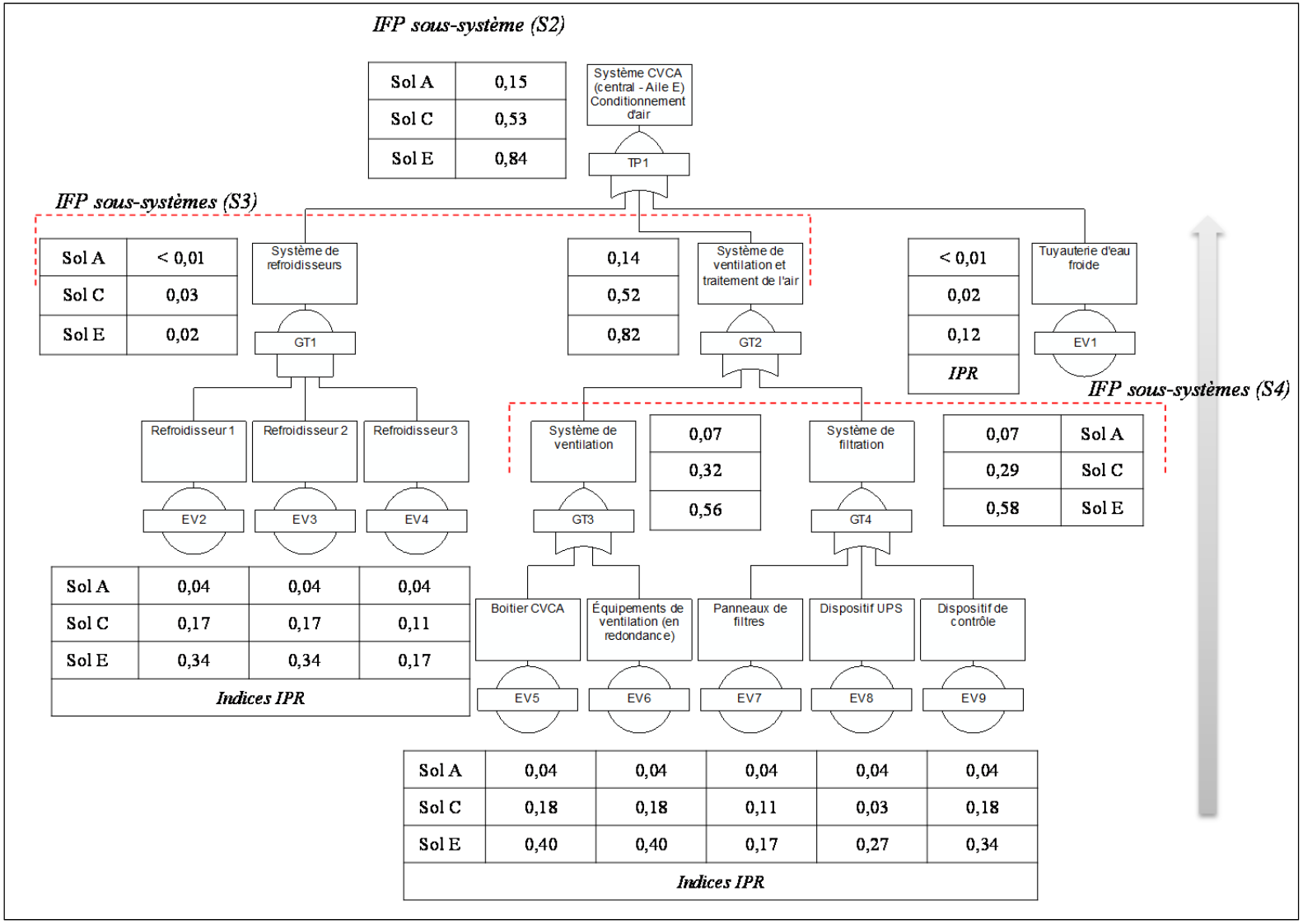


Figure 6.10 Processus ascendant de calcul de l'IFP d'un sous-système de conditionnement d'air pour un niveau de dommage faible

Ces valeurs intermédiaires de calcul servent à quantifier la valeur globale de l'IFP de l'événement de tête en ciblant les points faibles du système. On y voit l'effet de la redondance des sous-systèmes GT3, GT4 et GT5 sur la production d'eau chaude et sur le sous-système chauffage en général ou encore la contribution du sous-système de ventilation et de traitement de l'air (GT2) à la fonctionnalité du système de conditionnement d'air. Une redondance supplémentaire peut être prise en compte dans les branches EV1 du système de chauffage ou EV6 du système de conditionnement d'air puisque ceux-ci peuvent compter de nombreux composants disposés en parallèle.

Le Tableau 6.4 récapitule le calcul de l'IFP pour le système CVCA (niveau S1) selon les catégories d'emplacement A, C et E et les quatre niveaux de dommages. Pour un site de catégorie A, seule la valeur de l'IFP pour une probabilité de dommage faible est significative, les autres niveaux de dommage n'ayant aucun effet sur la performance du système. À l'inverse, on note la généralisation du dommage de niveaux faible et modéré et des valeurs significatives pour les dommages étendu et complet. Le site de catégorie C (référence du CNB) présente des valeurs élevées pour les niveaux faible et modéré. L'interprétation de ces valeurs dans un cadre d'analyse de la performance est présentée au paragraphe 6.4.2.

Tableau 6.4 Récapitulatif du calcul de l'IFP pour le système CVCA central

Niveau de dommage considéré	**Sous-système**	**IFP s-système (S2)**	**IFP Système (S1)**	**IFP s-système (S2)**	**IFP Système (S1)**	**IFP s-système (S2)**	**IFP Système (S1)**
		Sol A		**Sol C**		**Sol E**	
Faible	Chauffage	0,22	0,22	0,31	0,68	0,57	0,93
	Cond. d'air	0,15		0,53		0,84	
Modéré	Chauffage	0,03	< 0,01	0,13	0,34	0,61	0,93
	Cond. d'air	0,03		0,24		0,82	
Étendu	Chauffage	< 0,01	< 0,01	0,02	0,06	0,27	0,59
	Cond. d'air	< 0,01		0,04		0,44	
Complet	Chauffage	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,05	0,13
	Cond. d'air	< 0,01		< 0,01		0,09	

Pour faciliter l'utilisation de la méthodologie, un chiffrier construit sur MS Excel reproduit l'ensemble des calculs paramétriques nécessaires. La démarche de construction des graphes est similaire à celle du système CVCA et repose sur les valeurs des indices IFP calculés pour l'ensemble des systèmes sous analyse. Les valeurs obtenues sont présentées de manière désagrégée pour un aléa de 10% et de 2% en 50 ans. Ce processus de désagrégation compare la probabilité de dépasser un certain niveau de fonctionnalité ou l'ampleur du risque en fonction des paramètres clés de l'étude.

Des exemples de variation de l'IFP selon la catégorie d'emplacement et l'aléa sismique sont présentés aux Tableaux-A XI-1 à XI-3, ANNEXE XI, p.257. Par souci de concision, les résultats pour d'autres systèmes sont présentés sous forme de quatre planches :

- la structure (*Voir* Figure 6.11);
- le système CVCA central, composé de CFO sensibles à l'accélération et au déplacement (*Voir* Figure 6.12 et Figures-A V-3 et V-4 en ANNEXE V);
- le système de maintien des fonctions vitales comptant exclusivement des CFO sensibles à l'accélération (*Voir* Figure 6.13 et Figures-A V-5 à V-8, en ANNEXE V);
- le système d'évacuation sécuritaire, comptant une majorité de CFO sensibles au déplacement (*Voir* Figure 6.14, et Figure-A V-9 en ANNEXE V).

L'information est présentée par système unique afin de faire ressortir la performance de chacun des systèmes. On peut répondre ainsi à des sous-objectifs spécifiques d'évaluation de systèmes critiques des bâtiments. Les valeurs des IFP sont intégrées dans les études de cas présentées au chapitre 7 et l'effet de l'interaction des systèmes pourra y être analysé.

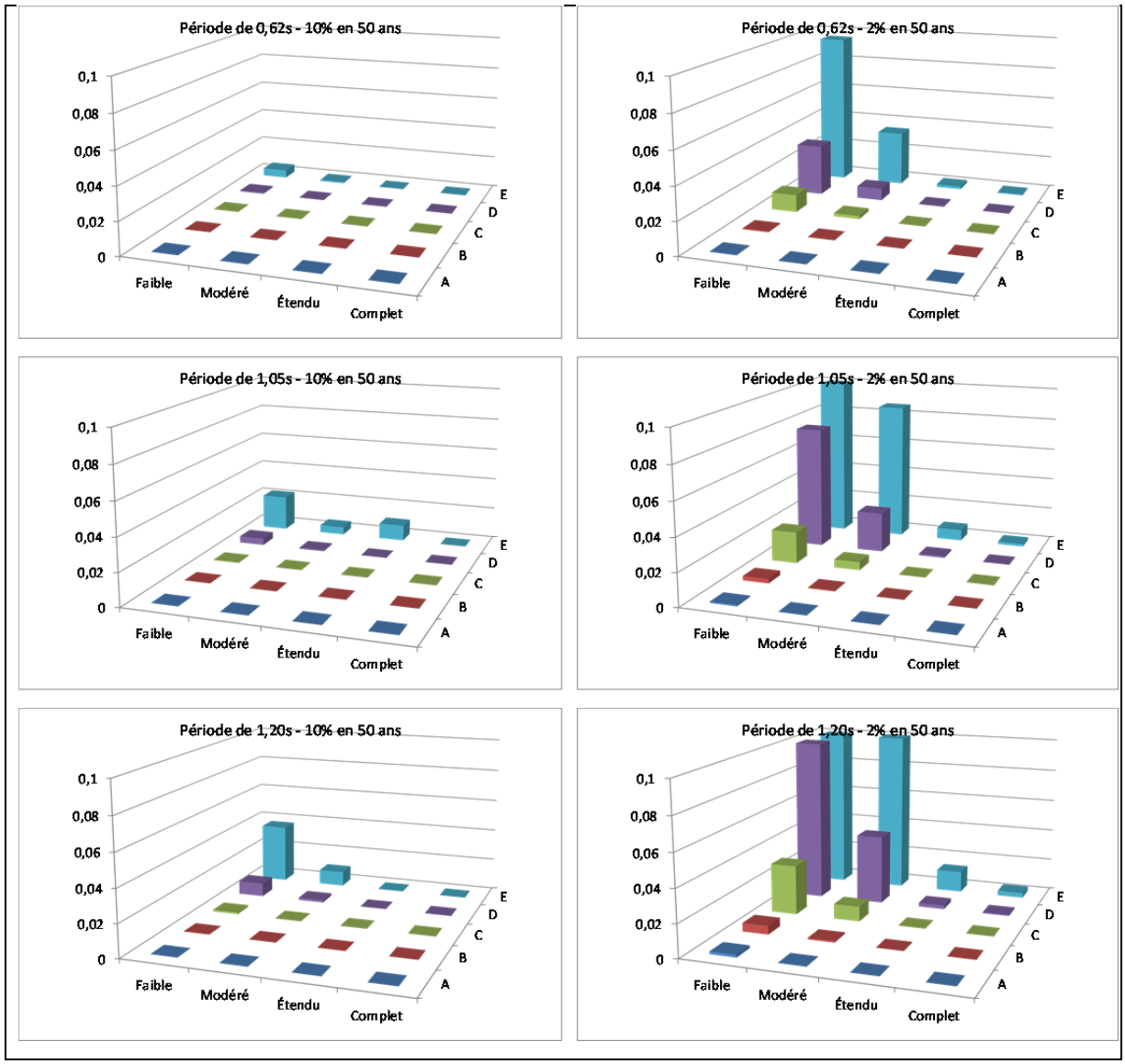


Figure 6.11 Variations de l'indice IFP pour la structure : IFP=SRI $_{structure}$*P

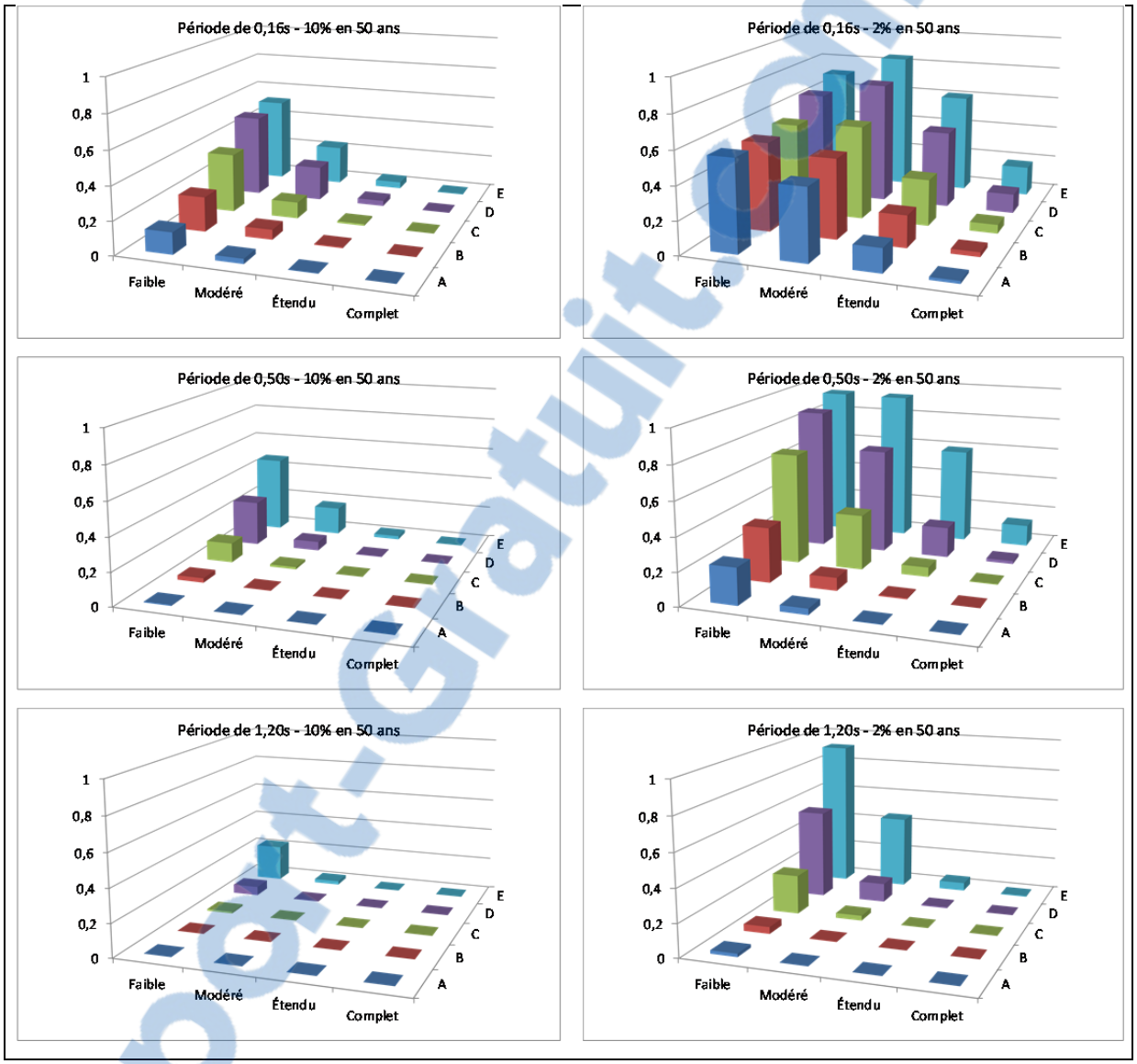


Figure 6.12 Variations de l'indice IFP pour le système "CVCA central"

Rapport-Gratuit.com

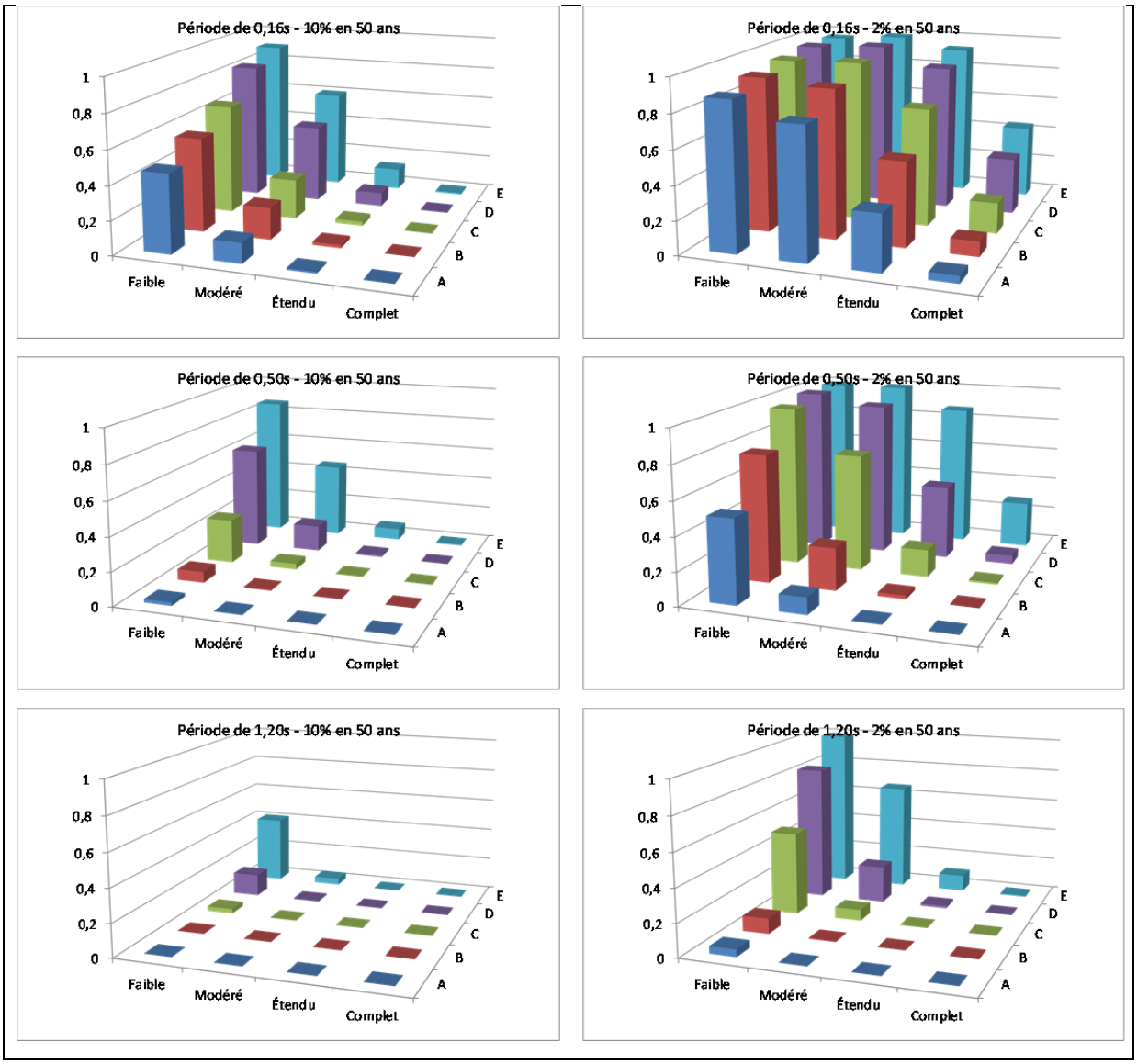


Figure 6.13 Variations de l'indice IFP pour le système "Maintien des fonctions vitales"

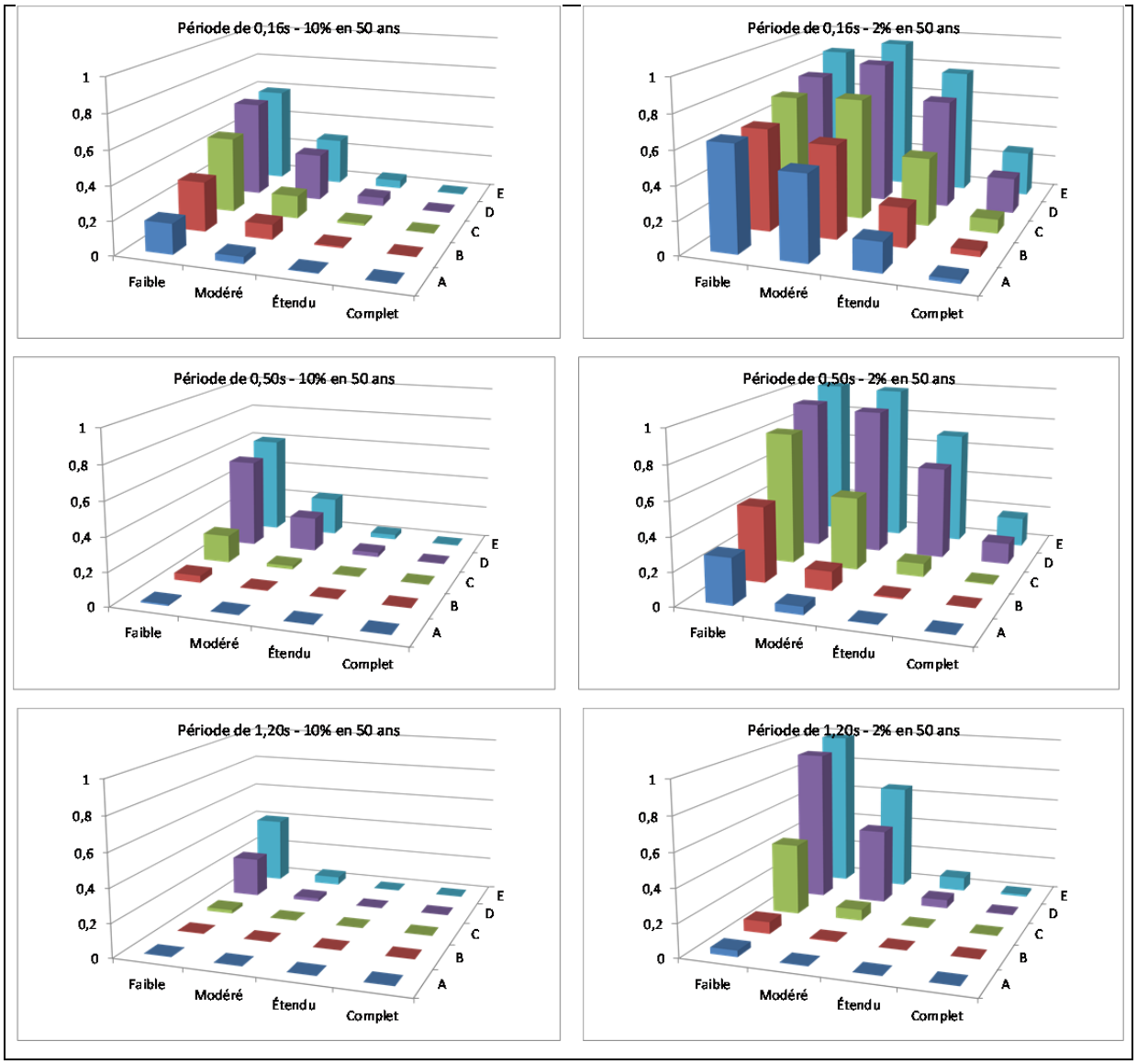


Figure 6.14 Variations de l'indice IFP pour le système "Évacuation sécuritaire"

6.4.2 Critères d'interprétation de l'IFP

L'interprétation de l'indice IFP est intuitive : l'IFP représente l'occurrence de l'événement de tête et le calcul des paramètres et du choix des classes de niveaux de risque équivalentes aux niveaux de dommages. En ce sens, l'IFP permet d'identifier les problèmes à la source en plus de contribuer à suivre l'évolution de la performance des systèmes dans le temps ou après l'application de mesures de mitigation principalement pour les CFO avec un SRI modéré. La

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Figure 6.15 illustre une matrice de risque typique qui regroupe les valeurs de départ de l'indice IPR (IPR=SRI*P) et qui permet d'anticiper la performance probable atteinte par les systèmes. Les zones de fonctionnalité et d'occupation immédiate (ou continuité des opérations pour les CFO) sont recherchées pour l'ensemble des systèmes critiques. Dans ce processus, l'indice SRI sur lequel il est possible d'agir permet de réduire le risque relié au dysfonctionnement d'un système donné ou à l'échelle de l'hôpital.

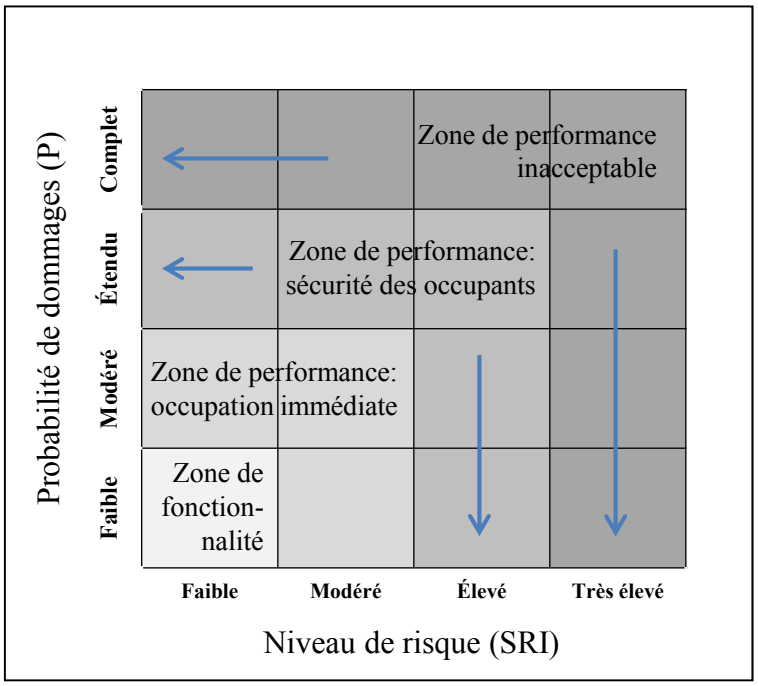


Figure 6.15 Matrice d'analyse de risque

Les points suivants peuvent être relevés sur les Figures 6.11 à 6.14 :

1. L'IFP structural est très faible (échelle 1/10 de celle des CFO) et il est directement proportionnel à la vulnérabilité du bâtiment et à la probabilité de dommages. Les structures sises sur les sols meubles sont les plus affectées. La fonctionnalité post-sismique des bâtiments construits sur les sols A et B est principalement gouvernée par celle des systèmes de CFO. Pour un aléa de 10% en 50 ans, la réponse du bâtiment permet la continuité des opérations pendant un événement sismique;

2. L'indice de fonctionnalité des structures est quasiment nul pour les structures de faible hauteur (période inférieure à 0,5s) et celles sises sur des sols de catégorie A ou B;
3. Aucune structure ne révèle une probabilité de dommage complet. En référence à la méthode Yavari et al. (2010), toutes les gammes d'IFP des systèmes de CFO sont alors considérées dans l'analyse;
4. Pour le système CVCA analysé précédemment (aléa de 2% en 50 ans), 95% des CFO présentent un risque modéré pour un site de catégorie A, alors que 75% de ces CFO sont à risque très élevé pour une catégorie d'emplacement E. Les niveaux de performance respectifs attendus sont la continuité des opérations et une performance inacceptable. Avec la majorité des SRI dans la classe de risque élevé, la performance attendue pour un site de catégorie C est minimalement la sécurité des occupants. Lorsque soumis à un aléa de 10% en 50 ans, les indices IFP sont inférieurs à 0,4 et les résultats pour les CFO sont concentrés dans les zones de dommages faible et modéré, ce qui suggère un niveau de performance acceptable soit la fonctionnalité ou la continuité des opérations;
5. Le système de maintien des fonctions vitales montre une répartition quasi égale d'un IFP élevé (proche de l'unité) pour un aléa de 2% en 50 ans principalement relié au sous-système de décontamination. Ce sont en grande partie des composants uniques mobiles pour lesquels le SRI est élevé ou très élevé et qui réduisent la performance globale et empêchent l'atteinte des objectifs de fonctionnalité ou de sécurité des occupants;
6. Pour un aléa de 2% en 50 ans, le système d'évacuation sécuritaire montre des valeurs non négligeables de l'IFP pour toutes les catégories de dommages. Ces valeurs sont liées aux risques élevés reliés à des CFO comme les étagères, les civières et les distributrices;
7. Pour un aléa de 2% en 50 ans et en considérant le seuil de 128 recommandé par la norme S-832, la performance attendue d'un bâtiment hospitalier construit sur un site de catégorie D ou E et de ses systèmes critiques est minimalement la sécurité des occupants à l'instar d'un site de catégorie C. Des mesures de mitigation sont nécessaires pour les hôpitaux construits sur ces trois catégories d'emplacement;
8. Par contre, les résultats de l'évaluation de la fonctionnalité post-sismique indiquent que pour un aléa de 10% en 50 ans, les performances les plus probables sont celles de la fonctionnalité et de l'occupation immédiate. Avec le nombre élevé de CFO sensibles à

l'accélération que comptent les hôpitaux, des recommandations spécifiques sur les mesures de mitigation peuvent s'avérer nécessaires.

6.5 Discussion et conclusion

Une méthodologie indicielle d'évaluation de la fonctionnalité post-sismique des hôpitaux est présentée. Elle repose sur une synthèse de données spécifiques aux hôpitaux et une combinaison de plusieurs outils d'analyse de fiabilité, d'identification et d'évaluation du risque sismique. L'étude de la fonctionnalité post-sismique par le biais des indices de risque et de probabilité de dommage est une approche logique et pratique dans un contexte de rareté des données pour le Québec. Elle permet d'identifier les effets des facteurs de risque et de défaillance des systèmes et aide à leur compréhension. Par ailleurs, l'analyse des données désagrégées permet de cibler les CFO ou les sous-systèmes les plus à risque afin de définir les mesures de mitigation appropriées. La démarche a suivi les étapes suivantes :

Le développement de données sur les structures et les composants non-structuraux (Calcul du SRI)

La compilation des données a été réalisée avec rigueur par l'évaluation des composants à l'aide de méthodes existantes et l'utilisation de données de base de qualité issues des inspections des bâtiments-témoins. En faisant varier les paramètres de l'étude (ou facteurs de risque tels que conditions de sol, période fondamentale, etc.), on obtient une base de données statistiquement représentative des valeurs que peuvent prendre l'indice SRI et la probabilité de dommage P. L'indice SRI est divisé en quatre classes de niveaux de risque en s'appuyant sur des études déjà éprouvées (méthode NRC-92 et norme CAN/CSA-S832) et en y définissant un niveau de risque très élevé. Cette approche permet de tenir compte des facteurs de vulnérabilité sismique pour les structures et pour les CFO et d'une occurrence de séisme sévère de 2% en 50 ans. Elle permet en plus une harmonisation avec les quatre niveaux de probabilité de dommage.

La détermination de la demande sismique (Calcul de la probabilité de dommages P)

La demande sismique est établie directement à l'aide du spectre de réponse de Montréal, on suppose que les CFO sont positionnés à une hauteur équivalente du bâtiment. Les valeurs maximales de S_a constituent une alternative intéressante aux analyses détaillées et sont largement acceptées. Le déplacement spectral S_d est alors calculé dans le domaine linéaire et les probabilités de dommage sont calculées pour la structure et les CFO selon leur sensibilité à l'accélération ou au déplacement afin de déterminer la probabilité de dommage P.

Le calcul des indices IPR et IFP

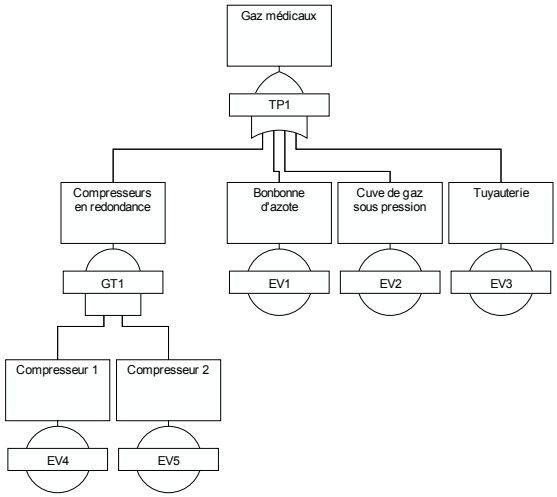
L'interprétation de l'indice IFP est reliée à l'indice IPR, entrée de l'arbre de défaillance. Malgré des probabilités de dommages étendu et complet relativement faibles, on a vu l'importance des conditions d'attache dans la perte de fonctionnalité. Ce risque est généralisé pour les systèmes comprenant des CFO mobiles dans le cas du système de maintien des fonctions vitales, ou des composants généraux dans le cas du système d'évacuation. L'indice IFP entre alors dans une large gamme de valeurs (entre 0 et 1), mais la défaillance de l'équipement peut avoir des conséquences ponctuelles. Il est alors important de revenir sur les évaluations in situ, notamment sur le paramètre des conséquences afin de faire des recommandations plus spécifiques.

Le développement d'un chiffrier sur MS Excel

Le développement de la méthodologie a amené la construction d'un chiffrier MS Excel qui permet de compléter les deux étapes de calcul (*Voir* Figures 6.16 et 6.17), soit:

1. Le calcul de l'indice SRI structural du bâtiment à partir de la définition des paramètres du NRC-92 et de la variation des facteurs de risque;
2. Le calcul de l'indice SRI pour les CFO selon la norme CAN/CSA-S832-14;
3.

1. SRI structural	**Pre-65 - tous les cadres**
IS=A*B*C*D*E (*Voir* Tableau 5.7)	**Paramètre A** Ta ≤ 1 — 2,4 1 < Ta < 2 — 1,4 2 ≤ Ta — 0,7 Catégories d'emplacement **Paramètre B** — A: 0,8; B: 0,9; C: 1; D: 1,1; E: 1,2 Ta ≤ 0.2 — 0,8; 0,9; 1; 1,1; 1,2 Ta = 0.5 — 0,5; 0,6; 1; 1,4; 2,1 1 ≤ Ta — 0,5; 0,6; 1; 1,4; 2,1 **Paramètre C** — 1,2 — Facteur selon information disponible sur le bâtiment * 1,3 **Paramètre D** — 1,3 ≤ D ≤ 4 **Paramètre E** — E = 2
2. SRI CFO	(*Voir* Tableau 5.8)



RG	0,30
RB	1,1

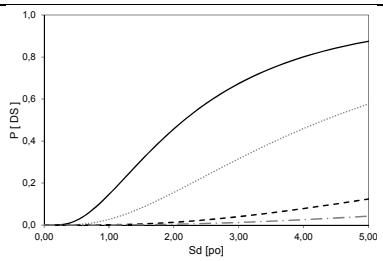
Nom du CFO	Type	Localisation	Quantité	N	h/d	Paramètres de vulnérabilité				V	Paramètres de conséquences			C	Risque sismique	
						Attaches×4	Impacts×3	Renversement×2	Emplacement×1	Pointage	Sûreté	Fonctionnalité	Protection	Pointage	R=V*C	Niveau de risque
Compresseur 1	MÉC	Salle mécanique, C8-105	2	0	0	20	30	2	5	1,9	1	10	5	16	30	Modéré
Compresseur 2	MÉC	Salle mécanique, C8-105	2	0	0	20	30	2	5	1,9	1	10	5	16	30	Modéré
Conduits	MÉC	Salle mécanique, C8-105		0	0	4	3	0	1	0,3	10	10	0	20	5	Faible
Valves de contrôle	MÉC	Salle mécanique, C8-105		0	0	4	3	0	1	0,3	10	10	0	20	5	Faible
Bonbonnes d'azote	MÉC	Salle mécanique, C8-105	3	0	0	4	3	0	5	0,393	1	5	0	6	2	Faible
Cuve de gaz sous pression	MÉC	Salle mécanique, C8-105	1	0	0	40	30	20	5	3,113	1	5	5	11	34	Modéré

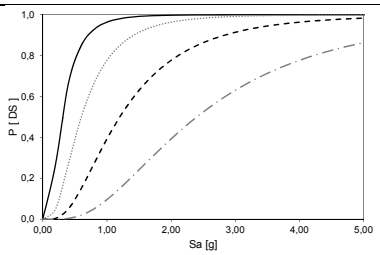
Figure 6.16 Extraits du chiffrier de calcul relié aux étapes 1 et 2 (pour l'HGM)

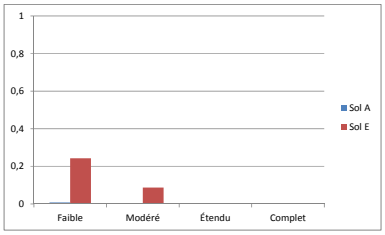
4. Les fichiers consécutifs du calcul des indices IPR et IFP sont construits en regroupant les CFO en système et en indiquant pour chaque CFO sa sensibilité S (à l'accélération A, ou au déplacement D) et la valeur normalisée (Cs) reliée à la « classe de niveau de risque ». Ils intègrent les valeurs de la probabilité de dommage P issues des courbes de fragilité pour les CFO selon leur sensibilité.

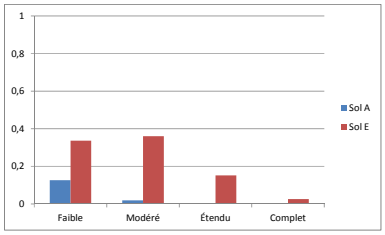
3. Détermination de P

Bâtiment S1M
(cadre en acier)









4. Calcul IPR et IFP

Aléa: 2% en 50 ans

Période du bâtiment : S1M et 0,5s

Système : Gaz médicaux

Catégorie d'emplacement : Sites A et E

Niveau de dommage : Faible (les 4 niveaux doivent être complétés)

(*Voir* Tableau-A XI-1, ANNEXE XI).

S1	S2	S3	Nom du CFO	SRI	Cs	SRI	Cs	S	Probabilité		IPR		IPR - Sol A			IPR - Sol E		
				sol A		sol E			Sol A	Sol E	Sol A	Sol E	S3	S2	S1	S3	S2	S1
Système de gaz médicaux .OU.	Système air médical	Système compresseurs centrifuges .ET.	Compresseur 1	30	0,3	100	1,0	A	0,13	0,34	0,04	0,34	0,0014	0,01	0,06	0,11	0,26	0,53
			Compresseur 2	30	0,3	100	1,0	A	0,13	0,34	0,04	0,34						
		.OU.	Conduits	5	0,1	17	0,3	D	0,01	0,24	0,00	0,07	0,0008			0,07		
			Valves de contrôle	5	0,1	17	0,3	A	0,13	0,34	0,01	0,10	0,01			0,10		
		.OU.	Bonbonnes d'azote	2	0,1	8	0,1	A	0,13	0,34	0,01	0,03	0,01	0,05		0,03	0,36	
			Cuve de gaz sous pression	34	0,3	114	1,0	A	0,13	0,34	0,04	0,34	0,04			0,34		

Figure 6.17 Extraits du chiffrier de calcul reliés aux étapes 3 et 4

L'utilisateur fait le choix de la feuille de calcul adéquate en fonction des paramètres de l'étude de cas : aléa considéré, période du bâtiment, système analysé, catégorie d'emplacement et niveaux de dommages. Les résultats sont présentés pour chacun des sous-

systèmes ascendants et le système analysé (S4 à S1) et selon les 4 niveaux de dommage. L'outil est ouvert et des CFO peuvent être ajoutés en reproduisant des cellules de calcul. Les CFO non considérés dans le cas d'un système plus petit ont un SRI nul.

Selon les informations disponibles sur le bâtiment analysé, l'utilisateur peut également choisir de calculer la demande sismique d'un système équivalent à un degré de liberté (ESDOF), essentiel à l'utilisation de la méthodologie proposée, et l'intégrer dans le chiffrier pour obtenir la répartition des probabilités de dommages. La disponibilité des données modales extraites des mesures de vibrations ambiantes permet cette considération et une estimation rapide la demande sismique. Cette approche est utilisée dans les études de cas présentées au chapitre 7 après l'étape de validation.

Les deux premières classes de niveaux de risque des CFO suivent les recommandations de la norme S-832. Toutefois le seuil de la classe élevé est calqué sur la répartition des données de l'échantillon développé; ceci pour faire ressortir le risque très élevé relié aux bâtiments construits sur un sol de catégorie E. De manière générale, les résultats obtenus sont en faisant varier les facteurs de risque (conditions de sol, aléa sismique, etc.) sont assez prévisibles et concordent avec l'hypothèse de départ de la recherche selon laquelle le risque de perte de fonctionnalité augmente avec le cumul des effets des facteurs de risque.

CHAPITRE 7

VALIDATION ET ÉTUDES DE CAS

Ce chapitre vient compléter la thèse avec un processus de validation et des études de cas. La précision des valeurs désagrégées de l'indice IFP selon les niveaux de dommages (*Voir* Figures 6.11 à 6.14) dépend principalement de la qualité de la démarche de calcul et de celle des données de risque (SRI des CFO) et de vulnérabilité sismique de la structure (SRI structure).

Ce chapitre présente, en première partie, un processus de validation qui vise à comparer les indices IPR obtenus par la procédure d'évaluation à des données de probabilité de dommages issues d'observations de dommages post-sismiques. Les données disponibles sont peu nombreuses toutefois. On se réfère aux fonctions développées par Porter et al. (2010) et Yao et Tu (2012) pour esquisser la répartition de dommages. La demande sismique est estimée à partir d'exemples de bâtiments modélisés sur SAP 2000 et soumis à des analyses temporelles, ce qui permet également de comparer les valeurs obtenues à celles intégrées dans la méthodologie d'évaluation.

La deuxième partie de ce chapitre porte sur des études de cas spécifiques aux deux hôpitaux-témoins, l'Hôpital Général de Montréal (HGM) et l'Hôpital de Rivières des Prairies (HRDP). Les évaluations sont faites pour des sollicitations sismiques d'occurrence de 2% en 50 ans. L'objectif de ces exemples d'application est d'optimiser l'interprétation de l'indice IFP et de faire des recommandations résultant des évaluations.

7.1 Modèles analysés et paramètres du processus de validation

Le processus de validation suit les étapes suivantes :

1. Estimation de la demande sismique sur quatre modèles de bâtiments de hauteur différente pour des conditions variables : période fondamentale, catégorie d'emplacement, présence

Rapport-Gratuit.com

d'irrégularités géométriques. Les accélérations et déplacements spectraux aux différents niveaux de plancher sont extraits des résultats d'analyses dynamiques temporelles en utilisant trois accélérogrammes de séismes historiques de l'Est du Canada;

2. Calcul des probabilités de dommages de quatre catégories de CFO à partir des données de fragilité tirées des travaux de Porter et al. (2010) pour les composants mécaniques, électriques et de plomberie, et ceux de Yao et Tu (2012) pour une plus large gamme de CFO. La demande sismique est dans ces cas définie respectivement par le PGA et l'accélération maximale horizontale de plancher ou *Peak Horizontal Floor Acceleration* (PFHA). Cette dernière est de plus en plus utilisée dans l'estimation de la vulnérabilité des CFO tant pour les méthodes empiriques, analytiques qu'expérimentales;
3. Comparaison entre des valeurs de probabilité de dommages tel qu'observés sur des CFO et les indices IPR établis par la méthodologie d'évaluation de la fonctionnalité post-sismique définie au Chapitre 6.

7.1.1 Modélisation

Pour estimer la demande sismique, quatre bâtiments faits de cadres d'acier résistant au moment sont modélisés sur SAP2000. Les dalles de plancher sont considérées rigides en plan et sont donc modélisées comme des diaphragmes rigides. La Figure 7.1 illustre les modèles analysés et donnent les caractéristiques géométriques ainsi que les trois premières périodes considérées.

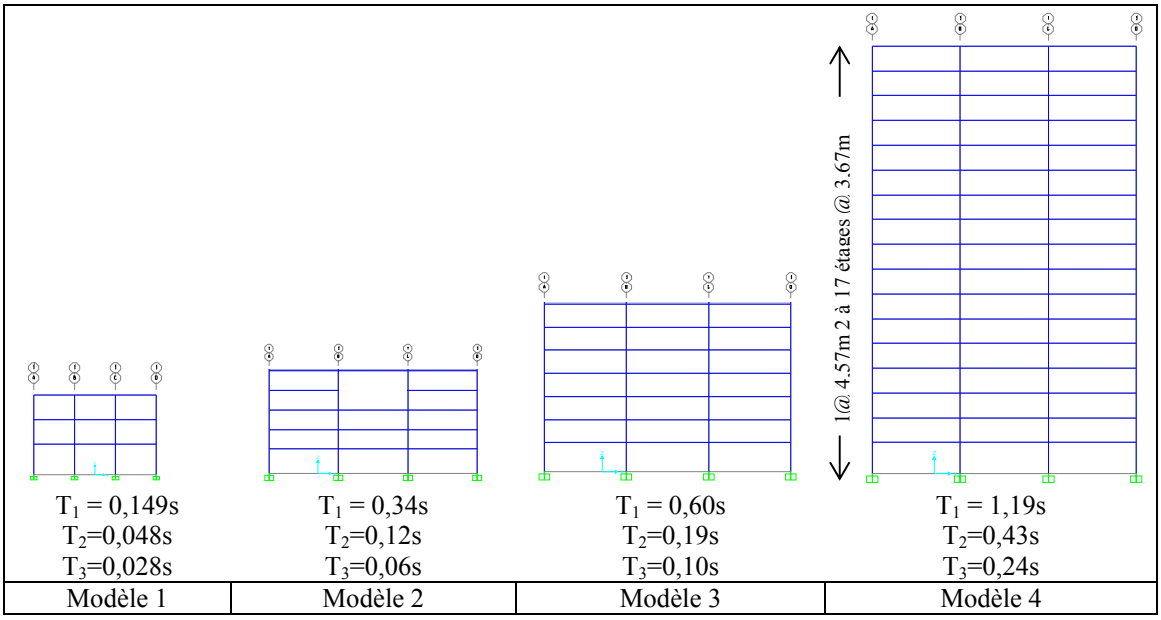


Figure 7.1 Caractéristiques des modèles de bâtiments analysés

Les modèles sont calibrés sur la base des données extraites des MVA et sont considérés représentatifs des bâtiments analysés au chapitre 6. Ils sont soumis à des accélérogrammes correspondant à des séismes de 2% en 50 ans en considérant différentes catégories d'emplacement. Le modèle 2 calqué sur l'aile A de l'HRDP présente un changement de rigidité au niveau 4 (absence de poutres centrales) simulant la présence d'une palestre sur deux niveaux.

7.1.2 Sélection et transformation des accélérogrammes représentatifs

Le choix des accélérogrammes représentatifs de l'aléa sismique de l'Est du Canada est en général limité. En plus des enregistrements de séismes naturels, on a également recours aux séismes artificiels générés par calcul de manière à refléter les spécificités de l'aléa local en termes d'amplitude, de contenu fréquentiel et de durée. Les recherches menées montrent que les effets engendrés par les deux types d'accélérogrammes (naturel et synthétique) donnent des résultats équivalents pour les analyses linéaires et non-linéaires (Atkinson 2009; Atkinson et Macias 2009). Les propriétés des trois accélérogrammes (2 séismes) sélectionnés pour Montréal sont présentées au Tableau 7.1.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Tableau 7.1 Caractéristiques des accélérogrammes

Séisme	Date	M_w	R (km)	Composante	PGA (g)	PGV (m/s)
S17_270	Saguenay, 25 nov. 1988	5,9	60	Saint-André, EO 270°	0,091	0,009
S20_270		5,9	90	Les Éboulements, EO 270°	0,102	0,027
N3_270	Nahanni, 23 déc. 1985	6,5	24	Battlement Creek Site 3, N270°	0,186	0,063

Afin d'évaluer la réponse des structures sur différentes catégories d'emplacement, les accélérogrammes naturels sont transformés à l'aide du logiciel SHAKE2000 (Ordonez 2004) puis calibrés aux spectres uniformes de l'aléa de Montréal. Le processus de transformation des signaux est obligatoire puisque ces accélérogrammes ont été enregistrés sur du roc; ils ne représentent pas ainsi la propagation des ondes sismiques à travers les différentes strates du sol pour d'autres catégories d'emplacement. En effet, les caractéristiques des sols en place peuvent faire modifier l'intensité ou le contenu fréquentiel des ondes sismiques (Seed et al. 1976). Cette analyse ne vise pas les accélérogrammes artificiels qui sont représentatifs d'un sol de classe C et la catégorie d'emplacement A pour lequel les accélérogrammes peuvent être utilisés directement après calibration aux spectres respectifs de Montréal pour les sols C et A.

7.1.3 Modélisation des sites pour les différentes catégories d'emplacement

Le logiciel SHAKE 2000 est largement utilisé pour la transformation des accélérogrammes. Il permet par itération d'approcher la réponse réaliste d'un sol modélisé sous forme d'un système viscoélastique ou colonne homogène (idéalement constituée de 10 couches de 3m) ou hétérogène représentant les caractéristiques de forages réels. Dans ce cas, des études de sensibilité montrent qu'un nombre de couches compris entre 5 et 20 donne une réponse appropriée (Galy 2009; 2013). Par ailleurs la modélisation d'une colonne représentant uniquement le sol au-dessus du roc donne des résultats identiques si l'on y ajoute les premiers mètres de roc sous le sol (Galy 2014).

Chacune des couches du système est complètement définie par le module de cisaillement (G), le taux d'amortissement critique (β), la densité (ρ) et la hauteur de la couche (h), indépendamment de la fréquence des ondes sismiques (Ordonez 2004). Dans SHAKE2000, le comportement du sol est modélisé selon des courbes de dégradation du module de cisaillement et d'amortissement (G/G_{max}) dont des modèles sont intégrés dans le logiciel. Les modèles « *Average sand* » (Seed et Idriss 1970), « Argile PI de 15% » (Vucetic et Dobry) et « *Rock* » (Schnabel 1973) ont été adoptés. Pour le calcul de G_{max}, le logiciel inclut différentes équations dont l'équation (7.1) utilisée pour la transformation.

$$G_{max} = \left(\frac{\gamma}{g}\right)\left(V_s\right)^2 \tag{7.1}$$

Où :

G_{max} : est le module de cisaillement maximum (kN/m^2)

γ : le poids spécifique d'une unité de sol (kg/m^3)

g : l'accélération gravitaire (m/s^2)

V_s : la vitesse des ondes de cisaillement (m/s)

Le Tableau 7.2 présente les caractéristiques des forages retenus, plus spécifiquement les catégories d'emplacement ainsi que la nature du sol et les facteurs d'amplification (FA) obtenus dans les travaux de Madriz (2005). Les valeurs moyennes de γ et de V_s utilisées, issues des travaux complémentaires de Chouinard et Rosset (2007) ainsi que les caractéristiques de modélisation sont présentées en ANNEXE XII, p.261. Une fois le sol modélisé, les signaux retenus sont mis dans la dernière couche de la colonne en utilisant la condition « *outcrop* » (affleurement rocheux) qui représente le fait que les signaux aient été enregistrés à la surface libre a contrario de « *within* » (Galy 2014).

Tableau 7.2 Modèles stratigraphiques utilisés pour l'étude

Site	Forage	V_{moy} (m/s)	Hauteur colonne (m)	Nature du sol	FA
A	N/A				
B	10 couches de 3m, Vs=1000m/s			Bloc, sable et silt (dépôt glaciaire)	
C	84F00 1-6460	600	22,25	- Remblai graveleux - Argile - plasticité moyenne (dépôt marin) - Silt, un peu de sable, traces de sable, argile (dépôt glaciaire)	1,68 à 6,79
C	84F00 1-6425	500	22,10	- Remblai graveleux (dépôt marin) - Argile silteuse, traces de sable (dépôt marin) - Silt, un peu d'argile, trace de sable (dépôt glaciaire)	2,30 à 6,40
D	74F08 1-036	210	24,24	- Sable argileux et présence de coquillage (dépôt de cours d'eau) - Argile plasticité moyenne (dépôt marin) - Sable et silt graveleux (dépôt glaciaire)	0,88 à 1,25
D	77F05 9-0021	248	21,34	- Argile (dépôt marin) - Argile, gravier et silt sableux (dépôt glaciaire) - Argile de plasticité moyenne, sable graveleux et présence de coquillages (dépôt marin)	1,5 à 2

Les résultats de la transformation des accélérogrammes sont présentés à la Figure 7.2. On note les effets d'amplification des forages 6460 et 6425. Les accélérogrammes sont par la suite calibrés selon le spectre uniforme de l'aléa sismique du CNB 2010 pour Montréal. Le logiciel Spectre est utilisé à cette fin en limitant le nombre d'itérations à deux afin de garder les caractéristiques principales des signaux. Quelques exemples sont présentés dans les Figures-A XIII-1 à 4, ANNEXE XIII, p.263.

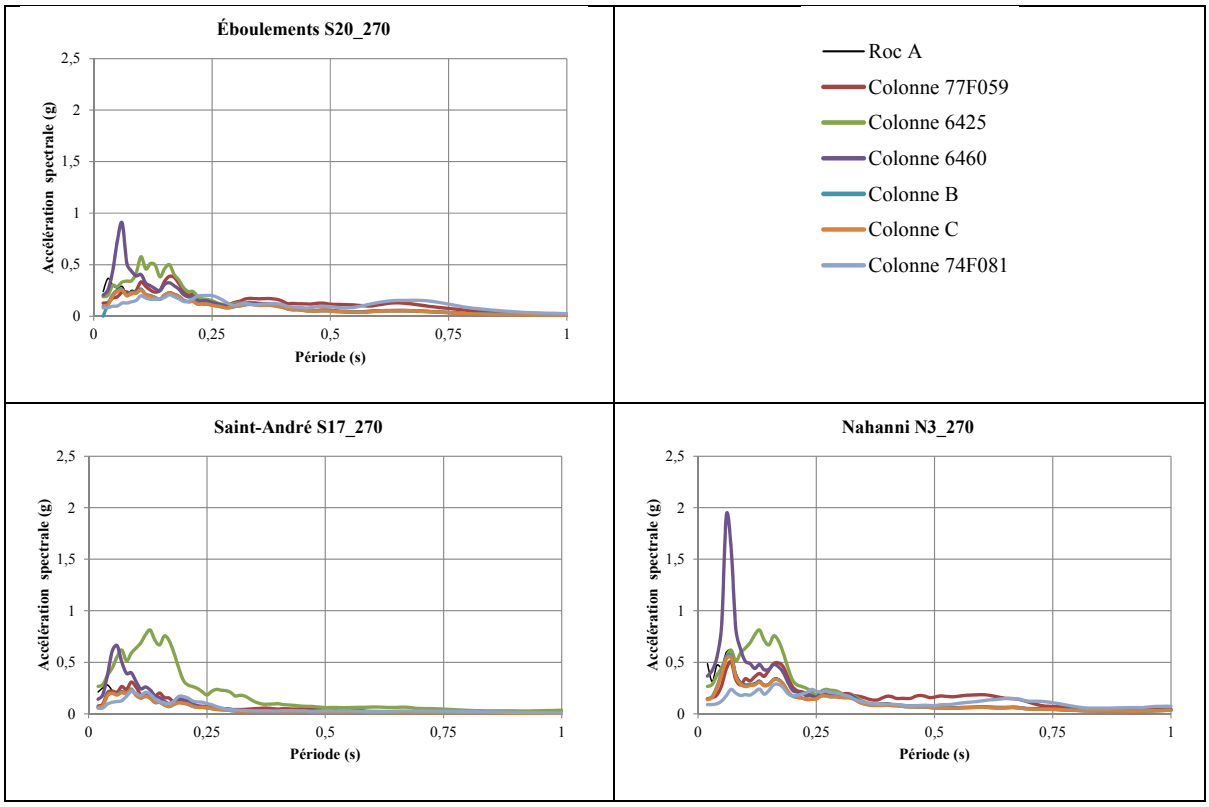


Figure 7.2 Spectres correspondant des accélérogrammes
en fonction de la catégorie d'emplacement

7.1.4 Analyse dynamique

Les bâtiments modélisés sont soumis aux trois accélérogrammes : Nahanni, Les Éboulements et St-André pour prendre la moyenne des résultats. Pour les fins de l'étude, les valeurs d'accélération spectrale et le déplacement au niveau des planchers sont les résultats les plus importants. Ils sont obtenus par analyse temporelle par intégration numérique modale, pour laquelle, un pas d'intégration de 0,02s et un amortissement constant de 5% pour chaque mode sont retenus (*Voir* Figure 7.3).

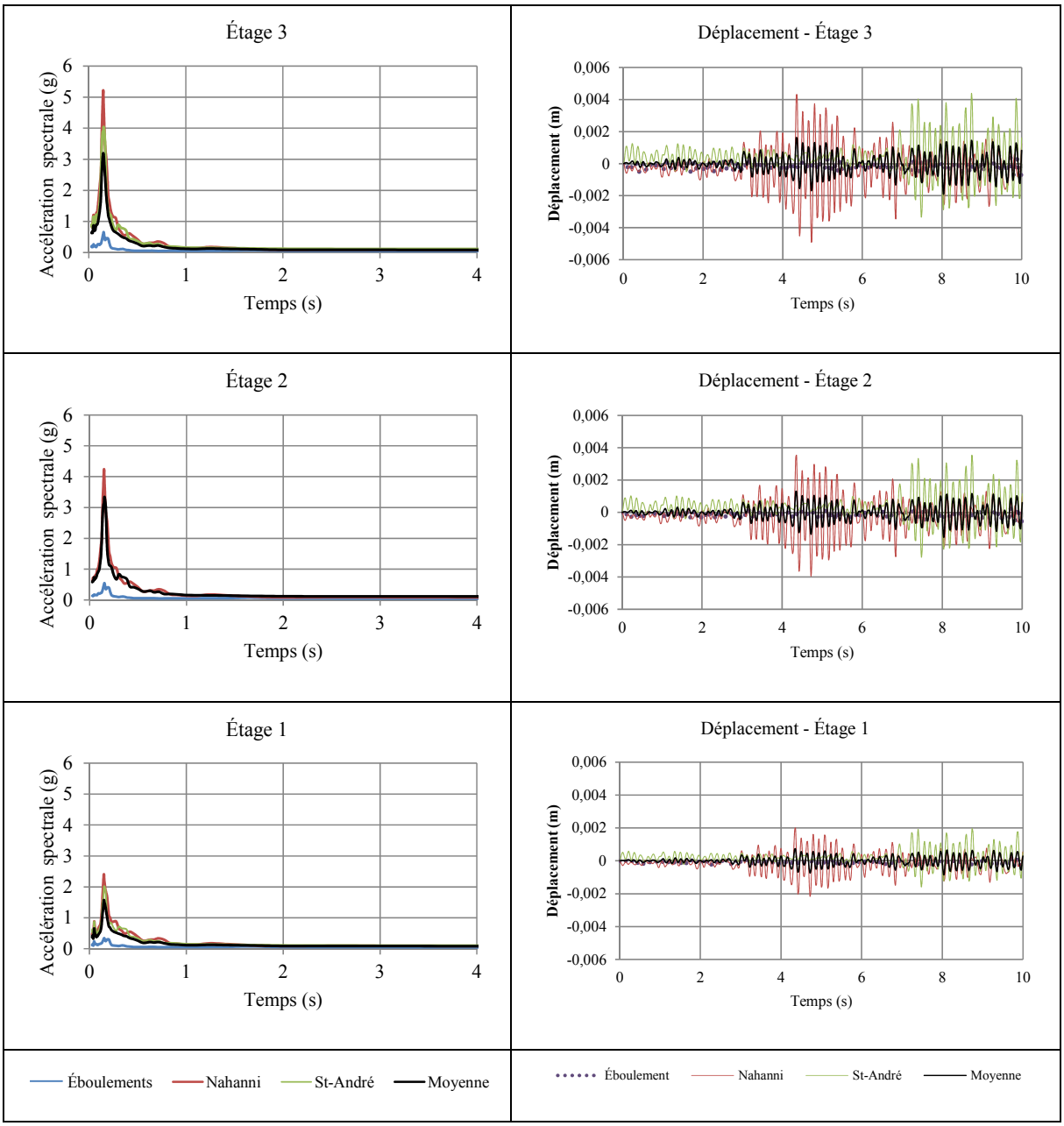


Figure 7.3 Accélération spectrale et déplacement mesurés sur les différents étages
Cas du modèle 1 (3 étages)

Le Tableau 7.3 résume les résultats des analyses dynamiques pour l'ensemble des quatre modèles. On fait l'hypothèse que les structures sont sises sur des sites différents afin de vérifier les effets d'amplification. Pour un PGA (mesuré à la base du rez-de-chaussée) de 0,20g, les valeurs de PHFA ou l'accélération spectrale au temps T=0 atteignent

respectivement un pic de 0,62g et 0,47g pour les sites C et D. De manière générale, les valeurs d'accélération au toit sont proches des valeurs maximales intégrées dans la méthodologie d'évaluation (*Voir* Tableau 6.3), avec pour le modèle 2, une valeur quasi équivalente de 0,49g. La dernière colonne représente le ratio de déplacement inter-étage qui est dans tous les cas inférieur : 1) à la limite fixée par le CNB 2010 de 0,01h pour les bâtiments de protection civile, h étant la hauteur de l'étage et 2) à 0,005h en-deçà duquel le bâtiment est sécuritaire et garantit une continuité des opérations selon la norme CAN/CSA-S832-14. On note toutefois l'effet de l'irrégularité verticale du modèle 2 avec une hausse importante du ratio inter-étage et un déplacement maximal au toit de l'ordre de 2cm, soit 50% plus élevé que les valeurs intégrées dans la méthodologie.

Tableau 7.3 Résultats des analyses dynamiques temporelles

Catégorie d'emplacement / Forage	**Étage**	**Valeurs moyennes**			
		Amplification maximale (g)	**PHFA (g)**	**Déplacement maximal (mm)**	**Ratio inter-étage**
Bâtiment 3 étages – Modèle 1					
D / 74F081-036	Toit	3,20	0,62	1,61	8 E^{-5}h
	2e	2,62	0,45	1,29	7 E^{-5}h
	1er	1,57	0,37	0,72	1,5 E^{-5}h
	RDC		0,22		
Bâtiment 5 étages – Modèle 2					
C / 84F001-6460	Toit	2,02	0,47	21	1,3 E^{-3}h
	3e	1,40	0,34	11,5	0,8 E^{-3}h
	1er	0,62	0,24	4,9	
	RDC		0,20		
Bâtiment 7 étages – Modèle 3					
B	Toit	0,93	0,23	8,55	
	4e	0,59	0,16	5,7	
	1er	0,46	0,13	1,2	0,3 E^{-3}h
	RDC		0,17		
Bâtiment 17 étages – Modèle 4					
A	Toit	0,55	0,12	12,35	
	9e	0,34	0,09	8,60	
	6e	0,33	0,10	6,61	0,2 E^{-3}h
	5e	0,40	0,10	5,72	0,3 E^{-3}h
	4e	0,45	0,10	4,70	0,3 E^{-3}h
	RDC		00,17		

7.1.5 Comparaison des données d'IPR et de probabilité de dommage

Idéalement le processus de validation devrait être effectué pour un nombre élevé de CFO ou de systèmes. Toutefois, en raison de l'état de la recherche sur les fonctions de fragilité les données précises et diversifiées sont très limitées. L'indice IPR de sept CFO est comparé aux probabilités de dommage (P) des modèles de Yao et Tu (2012) pour des CFO reliés au système d'évacuation sécuritaire (*Voir* Figure 7.4) et de ceux de Porter et al. (2010) reliés aux systèmes CVCA (*Voir* Figure 7.5). On rappelle que l'IPR représente les conditions in situ des composants soit le facteur de risque relié aux conditions d'attaches et la probabilité de dommage.

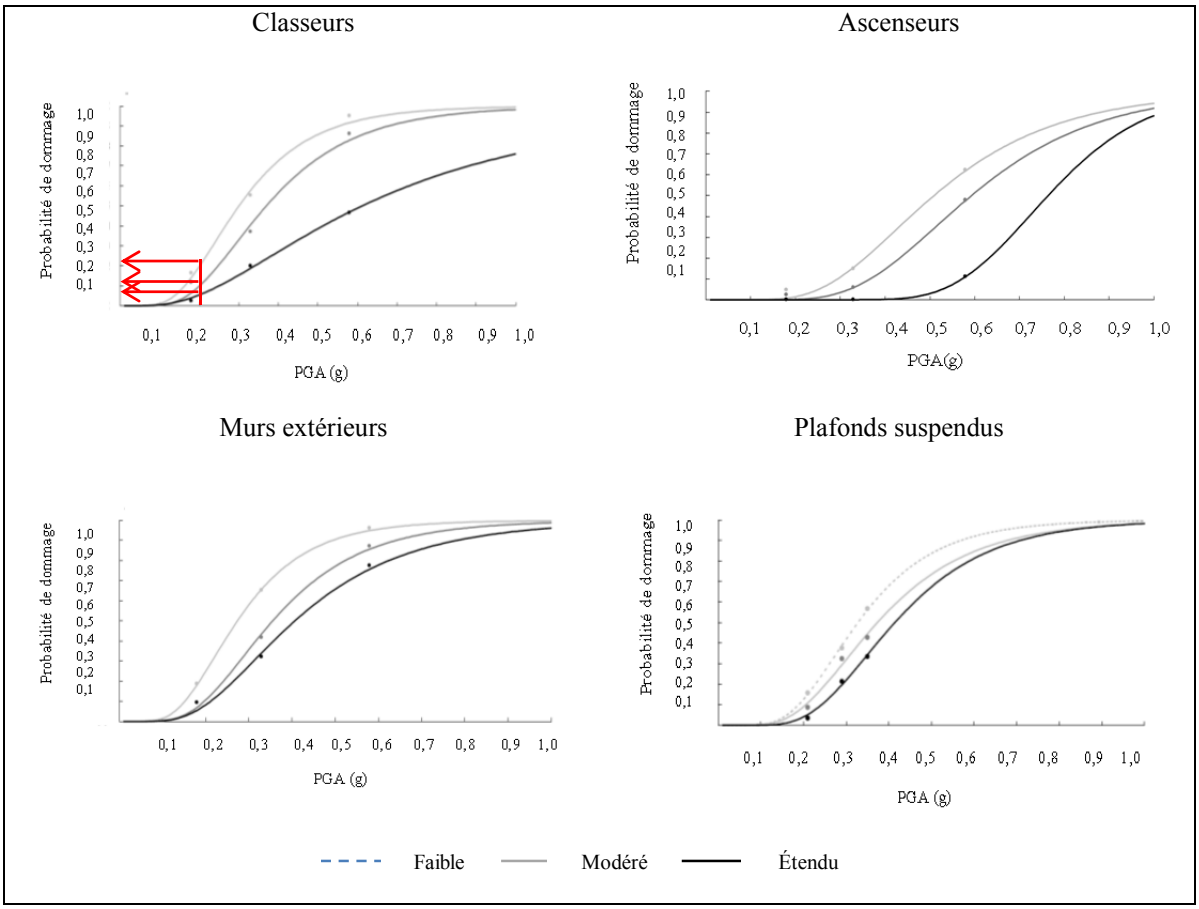


Figure 7.4 Courbes de fragilité de composants non-structuraux de bâtiments d'hôpitaux
Adaptée de Yao et Tu (2012)

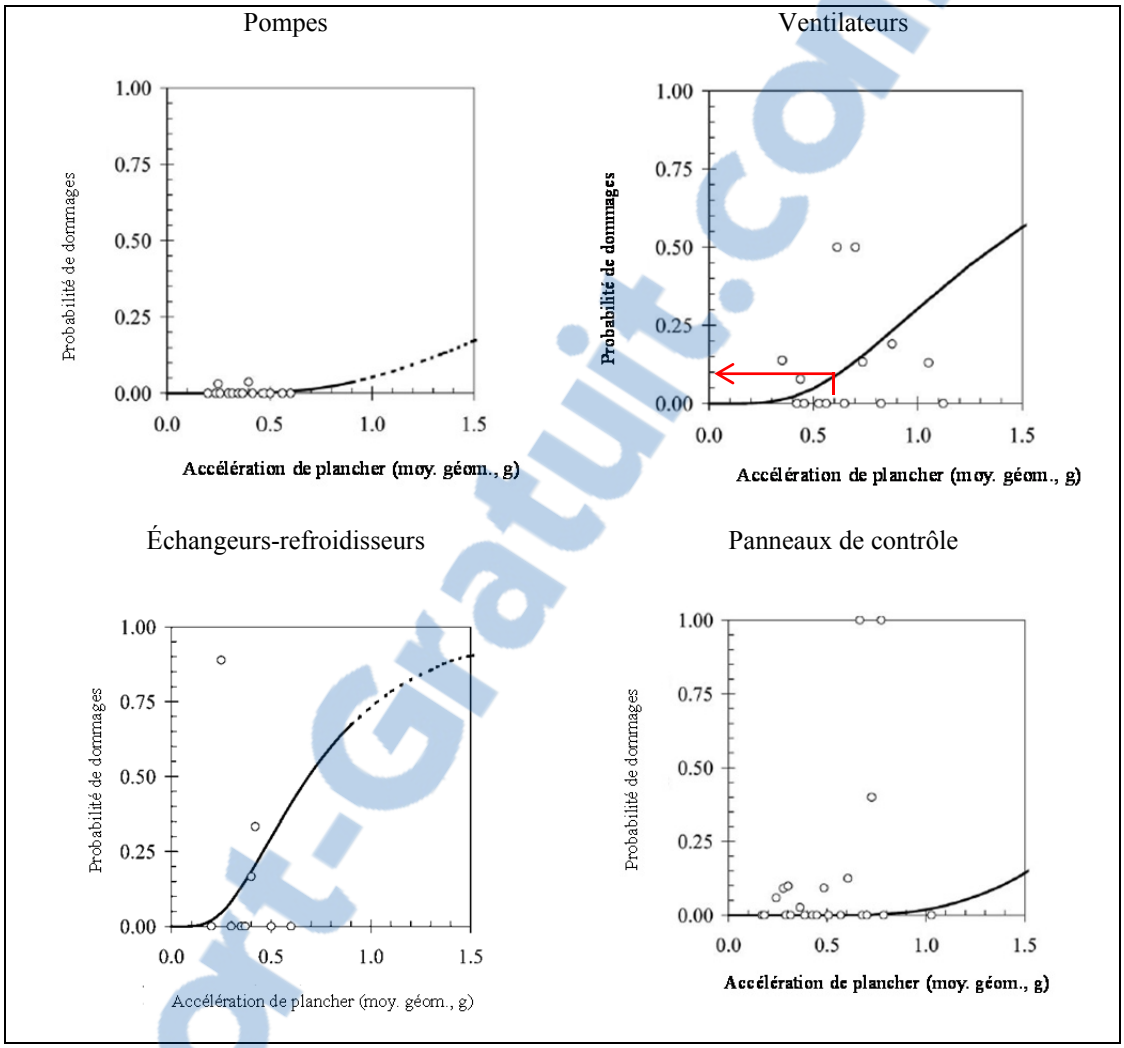


Figure 7.5 Courbes de fragilité de CFO de système CVCA
Adaptée de Porter et al. (2010)

Les courbes des Figures 7.4 et 7.5 sont construites sur la base d'observations de dommages enregistrées à partir des valeurs de PGA pour les travaux de Yao et Tu (2012), le PGA variant de 0,8g à 2,5g et de l'accélération horizontale à la base du composant (*Voir* Paragraphe 2.3.3) pour Porter et al. (2010). Dans ce deuxième cas, les CFO considérés ont été soumis à des accélérations variant de 0,14g à 1,32g.

Le Tableau 7.4 compare les valeurs de l'indice IPR (pour le PHFA maximal au toit) aux valeurs de probabilité de rupture (ou dommage complet) développées par Porter et al. (2010).

Rapport-Gratuit.com

On peut retenir que le niveau de risque est équivalent mais en considérant dans la méthodologie d'évaluation les deux grandes classes de CFO, ce sont des valeurs d'IPR constantes qui entrent dans le calcul de l'IFP du système.

Tableau 7.4 Comparaison des valeurs de probabilité de dommage

Accélération	**CFO**	**IPR Youance (2015)**	**P Porter et al. (2010)**
0,12g	Pompes	0	0
	Équipements de ventilation		0
	Échangeurs		0
	Panneau		0
0,23g	Pompes	0,05	0
	Équipements de ventilation		0
	Échangeurs		0,1
	Panneau	0,09	0
0,47g	Pompes	0	0
	Équipements de ventilation	0,08	0,1
	Échangeurs	0,04	0,2
	Panneau	0	0
0,62g	Pompes	0,09	0,05
	Équipements de ventilation		0,1
	Échangeurs		0,3
	Panneau	0	0

Lorsqu'on considère les valeurs d'IPR pour un PGA variant de 0,17g à 0,20g et les travaux de Yao et Tu (2012), on obtient également une bonne concordance globale pour les trois niveaux de dommages. La différence entre les valeurs comparées est de l'ordre de 10 à 15%.

De cette comparaison, il ressort que les courbes de fragilité spécifique de CFO donnent une estimation plus fine du dommage cumulatif probable. On conclut toutefois, que dans la démarche retenue pour développer l'indice IFP, il est possible de considérer la contribution de l'ensemble des CFO d'un système dans l'estimation de la fonctionnalité post-sismique des hôpitaux. Cet indice peut être plus précis si l'on dispose d'une base de données sur la fragilité spécifique des CFO.

7.2 Études de cas – Application de la méthodologie

Cette section présente des études de cas tirées des évaluations menées sur des bâtiments-témoins de l'Hôpital Général de Montréal (HGM) et de l'Hôpital Rivière-des-Prairies (HRDP). Les bâtiments sont construits sur un sol de catégorie A pour l'HGM et B pour l'HRDP. L'indice IFP est calculé selon la méthodologie proposée au Chapitre 6 et à l'aide du chiffrier de calculs pour les quatre systèmes suivants :

- le système de CVCA central logé dans l'aile E de l'HGM (*Voir* Figure 5.4);
- le système de maintien des fonctions vitales dont le système de production des gaz médicaux est logé dans l'aile A et les CFO reliés aux systèmes de soins intensifs, de physiothérapie et de décontamination sont logés dans l'aile E de l'HGM (*Voir* Figures-A V-5 à V-8, ANNEXE V);
- pour l'HRDP, les systèmes de protection incendie (*Voir* Figures 5.8 et 5.9) logés dans le bâtiment administratif (Aile A) et électrique logé dans l'aile F, petit bâtiment de 1 niveau pour lequel les mesures de vibrations ambiantes n'ont pas été prises (Voir Figure-A VI-5).

Le premier paragraphe fait une excursion dans la théorie des propriétés des oscillateurs multiples linéaires et est suivi du calcul des paramètres de demande sismique, S_a et S_d tirés des travaux de Chopra (2001), Craig et Kurdila (2006).

7.2.1 Propriétés des oscillateurs multiples linéaires

Avec la connaissance des paramètres modaux (périodes naturelles de vibration et modes propres) des structures extraits des mesures de vibrations ambiantes, on fait face au problème inverse couramment résolu en dynamique des structures (Michel et al. 2008). On part en effet des modes propres, correspondant aux allures de la déformée du bâtiment, Φ, contrôlés essentiellement par la rigidité du système, K que l'on doit déterminer; la masse aux étages étant considérée constante. On peut aussi associer à chaque mode propre, une période

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

naturelle de vibration de la structure T_j, ainsi qu'une pulsation naturelle de la structure, ω_j, par l'équation (7.2).

$$T_j = \frac{2\pi}{\omega_j} \tag{7.2}$$

Les fréquences (ou vecteurs propres) et les modes propres d'un système linéaire non amorti sont obtenus par un calcul aux valeurs propres standard. Il s'agit de calculer les racines (ou valeurs propres) de l'équation caractéristique du système (7.3) obtenue en posant le déterminant égal à zéro, puisque la solution triviale Φ=0 correspond à un système au repos.

$$\begin{gathered} [K - \omega^2 M]\Phi = 0 \\ \text{avec} \\ \det(K - \omega^2 M) = 0 \end{gathered} \tag{7.3}$$

Dans cette équation, M et K sont des matrices définies positives de dimensions n*n. On peut rappeler que la construction de l'équation caractéristique est écrite en considérant un oscillateur multiple linéaire en régime libre à amortissement nul. L'équation (7.4) décrit le mouvement du système où $\ddot{u}(t)$ *et u(t)* représentent respectivement le vecteur d'accélération en vibration libre et le vecteur de déplacement généralisé :

$$\begin{gathered} M\ddot{u} + Ku = 0 \\ \text{avec} \\ u(t) = \Phi \sin(\omega t - \theta) \\ \ddot{u}(t) = -\omega^2 \Phi \sin(\omega t - \theta) = \omega^2 u(t) \end{gathered} \tag{7.4}$$

Par ailleurs, la propriété fondamentale d'orthogonalité des modes propres d'une structure permet de reformuler l'équation (7.2). En supposant le vecteur Φ_j, une déformée arbitraire associée à la pulsation naturelle ω_j, on peut écrire les équations (7.4) et (7.5)

$$\widetilde{M} = \Phi^T M \Phi \tag{7.5}$$

$$\widetilde{K} = \Phi^T K \Phi \tag{7.6}$$

Où $\widetilde{M}$ et $\widetilde{K}$ sont des matrices diagonales et dont les termes $\widetilde{m}$ et $\widetilde{k}$ sont des scalaires et représentent respectivement la masse et la rigidité modale appelée également masse et rigidité généralisée, équation (7.7).

$$\begin{aligned} \widetilde{m_i} &= \Phi_i^T M \Phi_i \\ \widetilde{k_i} &= \Phi_i^T K \Phi_i \end{aligned} \tag{7.7}$$

En portant les équations (7.5) et (7.6) dans l'équation (7.3) la fréquence naturelle est reliée à la rigidité et à la masse modale selon l'équation (7.8):

$$\omega_j^2 = \frac{\widetilde{K_j}}{\widetilde{M_j}} \tag{7.8}$$

Il est alors possible de déterminer le mouvement élastique d'un système sous l'effet d'un séisme modéré à partir des paramètres modaux déterminés par mesures de vibrations ambiantes sans aucune hypothèse sur le système structural (Michel et al. 2008). Dans le cas des structures présentant d'importantes irrégularités géométriques comme l'aile A de l'HRDP, les valeurs de déplacement seront sous-estimées. Les travaux de Mirshafiei et al. (2013) apportent une réponse appropriée à ce type de bâtiment.

7.2.2 Détermination de la demande sismique à partir des extrants des mesures de vibrations ambiantes

Le Tableau 7.5 résume les résultats obtenus pour des bâtiments des études de cas pour l'HGM et un aléa de 2% en 50 ans selon des données sismiques pour Montréal du CNB 2010. Comme attendu, les bâtiments présentent une rigidité supérieure aux estimations

directes du spectre de réponse. On peut se questionner sur l'effet de la forte densité de CFO lourds reliés aux systèmes CVCA et électricité, entre autres, aux niveaux 3 à 5 de l'aile E de l'HGM. À ce sujet, Filiatrault et Sullivan (2014) citent des travaux en cours qui démontrent les liens entre le type et la densité de CFO sur l'amortissement et sur la demande sismique.

Tableau 7.5 Détermination de la demande sismique pour une occurrence de 2% en 50 ans

	T (s)	**Pulsation (ω, rd/s)**	S_a **(g)**	S_d **(mm)**
Aile E (HGM - sol A)				
Mode 1	1,1	35,8	<0,1	2,0
Mode 2	0,3	503,5		
Mode 3	0,2	584,0		
Aile A (HGM - sol A)				
Mode 1	0,6	102,7	0,1	1,4
Mode 2	0,2	1093,6		
Mode 3	0,1	3947,9		

7.2.3 Études de cas

Les paramètres SRI et P de la structure et des CFO développés aux chapitres 5 et 6 sont repris dans les Figures 7.6 à 7.8. La Figure 7.6 présente les valeurs du SRI et la répartition du niveau de risque nécessaire à l'interprétation de l'indice IFP. Les probabilités de dommages respectives sont calculées en tenant compte des valeurs de déplacement S_d et d'accélération S_a du Tableau 7.4 pour l'HGM et les valeurs suggérées de la méthodologie pour l'HRDP compte tenu des irrégularités de l'aile A et de l'absence de mesures de vibrations ambiantes pour l'aile F. On considère une période inférieure à 0,2s.

La probabilité cumulative de dommage faible à complet est quasiment nulle pour les structures compte tenu de la faible valeur de déplacement (*Voir* Figure 7.6) et pour les CFO de l'HGM. L'indice IFP est tributaire principalement de l'indice IPR des CFO sensibles à l'accélération dont la répartition de dommages, incluant la probabilité de n'avoir aucun dommage, est illustrée à la Figure 7.7. Les valeurs de probabilité de dommages pour les CFO

sensibles au déplacement pour les bâtiments de l'HRDP sont intégrées dans les calculs; la probabilité de n'avoir aucun dommage est supérieure à 99%. Les résultats détaillés du calcul sont présentés en ANNEXE XV, p.273.

1. SRI structural	HGM	HRDP
IS=A*B*C*D*E (*Voir* Paragraphe 5.4)	IS Aile A = 6 (Modéré): Cs=0,3 IS Aile E = 6 (Modéré): Cs=0,3	IS Aile A = 14 (Élevé): Cs=0,5

2. SRI non-structural	HGM *(T > 0,5s)* RG = 0,3 RB =1,2	HRDP *(0,2 < T ≤ 0,5)* RG = 0,38 RB =1,2

Répartition du niveau de risque des CFO					
H	Systèmes	Faible Cs=0,1	Modéré Cs=0,3	Élevé Cs=0,5	Très élevé Cs=1
HGM	CVCA central	1	19	0	0
	Maintien des fonctions vitales	12	15	2	0
HRDP	Protection incendie	6	6	3	0
	Électricité	0	5	4	0

Figure 7.6 Calculs des indices SRI pour les études de cas

3. 1 Détermination de P (structure)

Répartition de la probabilité de dommage pour les structures (%)					
	Ailes	Faible	Modéré	Étendu	Complet
HGM	Aile A (T=0,62s – S_d=1,36 mm)	0	0	0	0
	Aile E (T=1,05s – S_d=1,95 mm)	0	0	0	0
HRDP	Aile A (T=0,34s – S_d=10,97 mm)	< 0,01	0	0	0
	Aile A (T=0,16s – S_d=3,28 mm)	0	0	0	0

Figure 7.7 Détermination de la probabilité de dommage P des structures

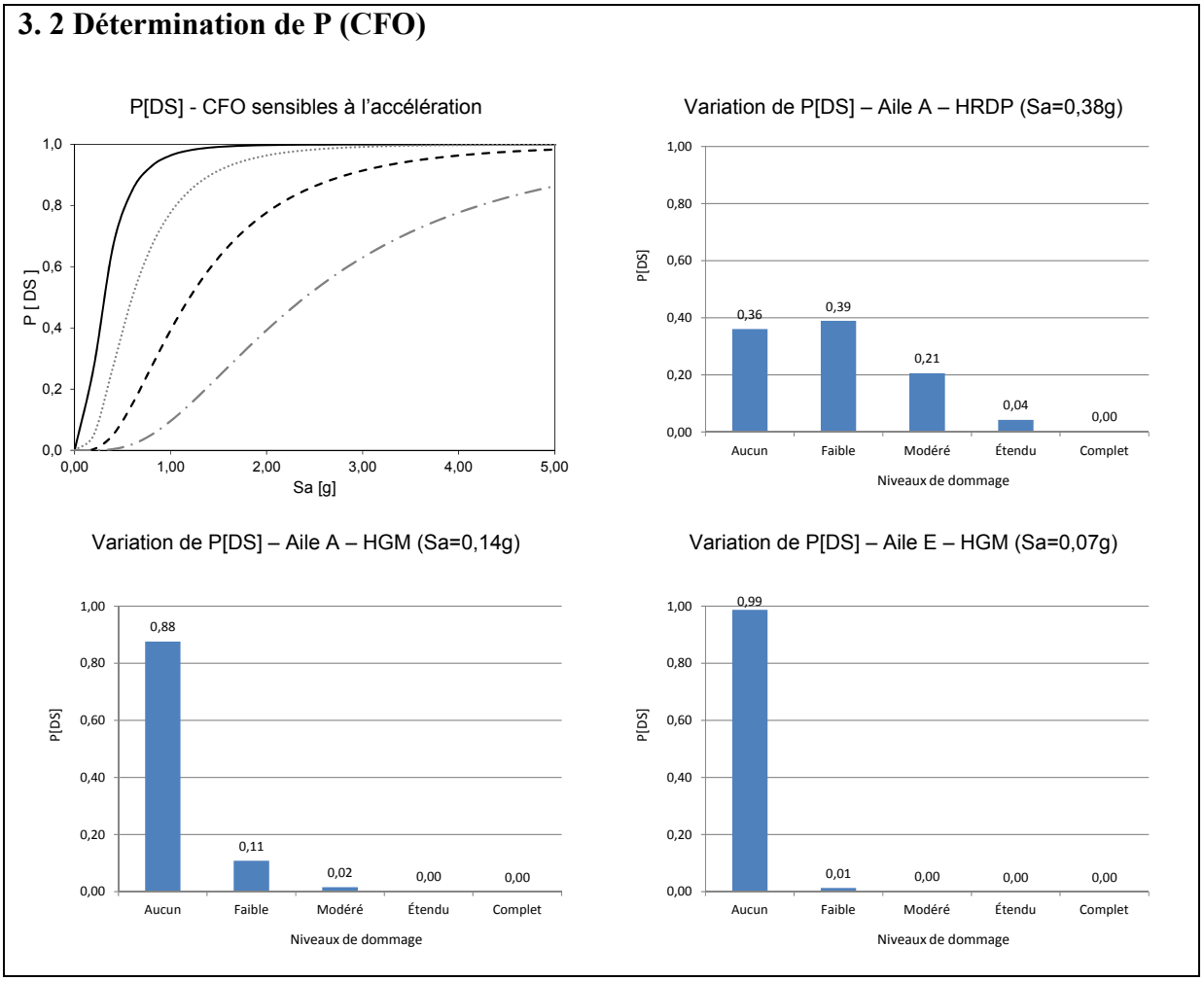


Figure 7.8 Courbes de fragilité des CFO sensibles à l'accélération des bâtiments-témoins de l'HRDP et de l'HGM et variation de la probabilité de dommages pour 2% en 50ans

A. Étude de cas – Hôpital général de Montréal

En faisant le choix des systèmes CVCA et de maintien des fonctions vitales, on met l'accent sur des réalités opérationnelles de l'HGM. D'un côté, les CFO du système CVCA sont fixes et regroupés à des étages différents du bâtiment E et assurent le chauffage de l'ensemble des installations. Dans ce sens, le système CVCA est comparable au système Électricité par exemple. Avec cette interdépendance, la fonctionnalité de tous les systèmes critiques de cet hôpital dépend alors des risques sismiques reliés à l'aile E, et à ses systèmes non-redondants

entre autres. D'un autre côté, le système de maintien des fonctions vitales avec ces CFO mobiles sont appelés à être utilisés et/ou entreposés dans différents locaux, notamment les bonbonnes de gaz médicaux (oxygène ou azote), les chariots de soins avec défibrillateurs, etc.

Les résultats détaillés du calcul de l'IPR (SRI, P) et de l'IFP des CFO des sous-systèmes composant les systèmes de CVAC central et de Maintien des fonctions vitales sont présentés à l'Annexe XV (*Voir* Tableaux-A XV-1 à 3, ANNEXE XV, p.273). Le Tableau 7.6 présente le récapitulatif de ces résultats pour les deux systèmes analysés. L'indice IFP est calculé pour les probabilités de dommage non négligeables. La combinaison de probabilités de dommage faible, le niveau de risque modéré des CFO (SRI) et la redondance démontrée du système CVCA amènent une valeur très faible de l'IFP. Le système de maintien des fonctions vitales présente un IFP faible de 0,14 pour un niveau de dommage équivalent.

Tableau 7.6 Synthèse des résultats de l'IFP pour l'Hôpital général de Montréal

Niveau de dommage considéré	**Sous-systèmes**	**Position des CFO**	**IFP s-système (S2)**	**IFP Système (S1)**
Système CVCA				
Faible	Chauffage	Aile E	< 0,01	< 0,01
	Conditionnement d'air	Aile E	< 0,01	
Système Maintien des fonctions vitales				
Faible	Gaz médicaux	Aile A	0,1	0,14
	Soins de physiothérapie	Aile E	< 0,01	
	Soins intensifs	Aile E	< 0,01	
	Décontamination	Aile E	< 0,01	
Modéré	Gaz médicaux	Aile A	< 0,01	< 0,01
	Soins de physiothérapie	Aile E	0	
	Soins intensifs	Aile E	0	
	Décontamination	Aile E	0	

La majorité des CFO étant associée à un risque faible ou modéré, soit 95% pour le système CVCA et 93% pour le système de maintien des fonctions vitales (*Voir* Figure 7.5), les indices IFP calculés suggèrent un niveau de performance de continuité des opérations. Des mesures de mitigation simple peuvent être appliquées aux deux CFO du système de maintien des

fonctions vitales : appareil de décontamination et armoires de rangement qui présentent un risque élevé avec des conséquences ponctuelles sur la sécurité des occupants.

B. Étude de cas – Hôpital Rivière-des-Prairies

La deuxième étude porte sur les systèmes de protection incendie et électricité de l'HRDP. Les CFO du système de protection incendie sont logés dans l'aile A et ceux du système électricité dans l'aile F. Les résultats détaillés du calcul de l'IPR (SRI, P) des CFO des sous-systèmes composants les systèmes de Protection incendie et Électrique présentés à l'Annexe XV (*Voir* Tableaux-A XV-4 à 7, ANNEXE XV, p.273). Les résultats pour les deux systèmes analysés sont synthétisés au Tableau 7.7. L'IFP calculé pour le système de protection incendie varie de 0,44 à 0,06 pour les niveaux de dommages faible à étendu, alors que l'IFP calculé pour le système électrique varie de 0,29 à 0,09.

Tableau 7.7 Synthèse des résultats de l'IFP pour l'Hôpital Rivière-des-Prairies

Niveau de dommage considéré	**Sous-systèmes**	**Position des CFO**	**IFP s-système (S2)**	**IFP Système (S1)**
Système CVCA				
Faible	Détection et alarme	Aile A	<0,01	0,5
	Réponse	Aile A	0,4	
Modéré	Détection et alarme	Aile A	<0,01	0,3
	Réponse	Aile A	0,2	
Étendu	Détection et alarme	Aile A	< 0,01	<0,01
	Réponse	Aile A	<0,01	
Système Électricité				
Faible	Alimentation de secours	Aile F	0,2	0,3
	Réseau de ville	Aile F	0,1	
Modéré	Alimentation de secours	Aile F	0,1	0,2
	Réseau de ville	Aile F	<0,01	
Étendu	Alimentation de secours	Aile F	<0,01	<0,01
	Réseau de ville	Aile F	<0,01	
Structure				
Faible		Aile A		0,01

Avec 17 CFO sur 24 dans la gamme des risques modérés ou élevés, les résultats d'IFP indiquent une performance probable de continuité des opérations; les valeurs de l'IFP pour le

dommage élevé étant relativement faibles. Toutefois, des sept CFO de la gamme de risque élevé, le système de gicleurs et les CFO auxiliaires de la génératrice et de l'alimentation en électricité ont un indice de conséquences maximal en plus de la vulnérabilité inhérente des composants lourds quant à leur ratio hauteur-largeur. Des mesures de mitigation doivent être prises pour garantir le niveau de performance de continuité des opérations, d'autant plus que contrairement au cas de l'HGM, les systèmes se révèlent peu redondants.

Au niveau opérationnel, ces CFO font l'objet d'un processus de suivi-évaluation continu à l'instar des portes coupe-feu, de l'ascenseur prioritaire, etc. L'indice IFP de la structure reste faible malgré le SRI élevé et a peu d'effet sur la fonctionnalité de l'ensemble. Le déplacement réel de ce bâtiment devient essentiel pour bien refléter le risque associé à la structure.

7.3 Discussion

La démarche d'évaluation de la fonctionnalité post-sismique montre que par combinaison d'un certain nombre de facteurs, il est possible de concrétiser l'état de vulnérabilité et de risque sismique des hôpitaux et leurs effets sur la performance de l'ensemble. Dans des cas de système avec des composants mobiles, c'est une photographie d'un moment précis qui peut évoluer dans le temps, tout comme leurs effets sur la sécurité des occupants. Bien qu'il soit difficile de capter cette dynamique pour les grands hôpitaux, comme l'HGM, cette évaluation établit des conditions de référence incontournables avec des informations sur les sources de défaillance probables et de l'interprétation de leurs effets sur la fonctionnalité globale. La comparaison avec des données externes est limitée à cause de l'état de la recherche sur les fonctions de fragilité des CFO mais justifie le choix des paramètres d'entrée de l'analyse et confirme la variabilité de l'IFP. Il apparait que la méthodologie globale donne une image appréciable de la fonctionnalité post-sismique des hôpitaux fondée sur une analyse technique en profondeur et par conséquent amène à la décision de mesures de mitigation ou d'actions prioritaires.

Rapport-Gratuit.com

CONCLUSION

L'objectif de cette thèse est de développer une méthodologie d'évaluation de la fonctionnalité post-sismique des hôpitaux de Montréal. L'intérêt de cette recherche réside dans le fait qu'il est devenu essentiel d'évaluer le potentiel de dysfonctionnement des bâtiments de protection civile ; dans un cadre global d'analyse du risque sismique pour des régions d'aléa sismique modéré comme Montréal.

Dans l'ensemble, l'originalité de la thèse est dans l'assemblage de techniques et de méthodologies connues dans un cadre méthodologique adapté à l'évaluation de la fonctionnalité post-sismique des hôpitaux de Montréal. Les résultats objectifs obtenus donnent un point de vue nouveau sur cette problématique et la manière de l'aborder. Sur le plan méthodologique, la démarche utilisée montre que les outils d'évaluation des différents composants structuraux et non-structuraux existants sont adéquats et qu'il est possible de franchir l'étape suivante d'évaluation de la performance intégrée d'un ou de plusieurs systèmes et de fonctionnalité post-sismique des hôpitaux. L'outil développé permet aux gestionnaires d'hôpitaux d'évaluer les installations et de bâtir des stratégies plus efficaces visant la sécurité des occupants, l'opérationnalité des différents systèmes critiques et l'efficience des investissements financiers contre les effets des séismes. L'utilisation a été simplifiée puisque le fichier contient l'ensemble des pré-calculs nécessaires pour les sites de Montréal avec les sous-systèmes prédéfinis. Les conclusions spécifiques sont les suivantes :

L'analyse des hôpitaux sous forme d'un système complexe

Les méthodes classiques d'évaluation de la vulnérabilité sismique des structures ou des CFO existantes ne suffisent pas pour établir le niveau de fonctionnement post-sismique d'un hôpital dans sa globalité. Cette infrastructure doit être analysée comme un système complexe dans lequel interagit un ensemble de composants critiques.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Les CFO représentent la plus grande part des investissements financiers dans la construction d'un hôpital en plus d'assurer, par leur bonne performance, la fonctionnalité des post-sismique des hôpitaux. En outre, les dommages relevés sur les CFO posent des problèmes relatifs à la sécurité des occupants et à leur évacuation sécuritaire. On retrouve cette préoccupation dans la dernière édition du CNB 2010, où l'on note l'importance de tenir compte des effets des secousses sismiques dans la conception sismique de tous les matériaux de construction, composants, ensembles et leurs interfaces. Sans être explicites, ces recommandations permettent, toutefois, d'établir les objectifs de performance d'un centre hospitalier sous forme d'une matrice d'analyse du risque pour des séismes d'occurrence de 10% et de 2% en 50 ans qui permet une évaluation basée sur la performance.

La revue de littérature menée aux chapitres 1, 2 et 3 a porté sur l'analyse des méthodes existantes pour l'évaluation des composants individuels puis des méthodologies d'évaluation de la fonctionnalité post-sismique. Les objectifs étaient d'identifier les relations entre la performance des différents composants de l'hôpital défini comme un système, d'analyser les relations entre leur performance et analyser les relations entre différents systèmes. Parmi les outils d'évaluation disponibles, dans le développement de la méthodologie de recherche, on retient principalement :

1. La méthode paramétrique de la norme canadienne CAN/CSA-S832-14, qui vise à identifier le risque associé à un CFO, considérée comme l'étape fondamentale compte tenu du contexte dans lequel la présente recherche s'inscrit;
2. La méthode de pointage du Conseil national de recherches du Canada qui permet une priorisation de la structure du bâtiment en fonction de sa vulnérabilité sismique;
3. Les courbes de fragilité qui permettent d'estimer la probabilité de dommage d'un composant donné ou d'un ensemble de composants sur la base d'une mesure d'intensité sismique ou de demande sismique. Ces méthodes probabilistes sont appropriées en raison des nombreuses incertitudes et variabilités caractérisant la réponse sismique des composants;

4. L'analyse de fiabilité par arbres de défaillance (AdD) qui s'appuie sur la modélisation des systèmes, en reproduisant leur complexité et leur interdépendance, et dans laquelle on vise l'estimation de la probabilité de défaillance du système sous analyse;
5. La méthode d'analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC) qui permet de relier la sévérité des conditions in situ (équivalente au niveau de vulnérabilité sismique) à la probabilité de dommages. Lorsqu'appliquées à la méthodologie actuelle, les modalités de développement sont simplifiées puisqu'on fait référence à un seul mode de défaillance qui est le dommage dû à un séisme.

Le montage d'une base de données sur les hôpitaux-témoins

L'estimation de la fonctionnalité post-sismique des hôpitaux demande une multitude d'informations. Cette thèse a présenté l'ensemble des données recueillies sur les bâtiments-témoins de l'Hôpital général de Montréal (HGM) et de l'Hôpital de Rivière-des-Prairies (HRDP). À ce propos, les points suivants sont à noter :

1. Des mesures de vibrations ambiantes ont été effectuées sur les bâtiments afin de caractériser la structure et développer des modèles d'analyse dynamique sur la base des paramètres modaux;
2. La cueillette de données sur les CFO tel que recommandé par la norme CAN/CSA-S832-14 : a) les caractéristiques *in situ* des composants et b) leurs conditions d'attache au bâtiment;
3. La modélisation des systèmes critiques de CFO de l'HGM et de l'HRDP et la compilation des données sur le risque sur les CFO critiques sont faits dans une perspective de complémentarité des données et des systèmes et non d'exhaustivité. Un ensemble de 17 AdD a été construit.

Une base de données a été construite à partir de ces relevés et d'une analyse paramétrique en faisant varier les facteurs de risque : la période fondamentale, la présence d'irrégularités et la catégorie d'emplacement. L'analyse selon les aléas sismiques d'occurrence respective de 2%

en 50 ans et de 10% en 50 ans, a permis de généraliser au-delà des situations spécifiques et de bâtir un cadre d'interprétation de l'indice de fonctionnalité post-sismique.

Le calcul d'un indice de fonctionnalité post-sismique et l'établissement d'un cadre d'interprétation des résultats

Dans une démarche ascendante, le point d'entrée du calcul de l'IFP est un indice de priorité de risque (IPR) combinant, pour chacun des composants du système, sa vulnérabilité sismique ainsi que la probabilité de dommages. Le dysfonctionnement du système global est considéré comme une suite d'événements; la rupture de sous-systèmes est pour sa part estimée en calculant un indice IFP qui en fonction de leur robustesse (présence de redondance ou non).

En fonction des combinaisons des niveaux de dommages (probabilité de dommage) et de risque, l'IFP peut être interprété selon la concentration de l'indice IPR dans les zones de danger, de sécurité des occupants, d'occupation immédiate et de fonctionnalité. Les enseignements tirés de cette expérimentation permettent d'évaluer la performance d'un ensemble de systèmes structuraux et non-structuraux dans la globalité de leur interaction, à savoir la réponse globale du système-hôpital. Des études de cas ont été présentées ainsi qu'un processus de validation qui, a contrario de la démarche simplifiée reposant sur l'utilisation de données de vibrations ambiantes pour caractériser les structures et calculer la demande sismique, a nécessité une modélisation et des analyses dynamiques. Cette démarche comparative démontre l'intérêt de développer des données de fragilité spécifiques, qui permettent de raffiner les valeurs de l'indice de fonctionnalité post-sismique.

Les résultats obtenus dans le cadre de cette recherche doivent être considérés dans une démarche globale d'évaluation à grande échelle, mais ils ouvrent les portes vers des actions proactives dans le domaine de l'évaluation du risque sismique. La méthodologie proposée peut être appliquée à d'autres bâtiments de protection civile, selon les niveaux de performance requis. Pour terminer, il faut rappeler qu'une réponse adéquate de l'hôpital à une

telle situation dépend également de la présence d'un personnel préparé aux mesures d'urgence et d'un plan bien établi et testé de contingence.

L'outil d'application

Les études paramétriques effectuées ont généré un fichier MS Excel avec des calculs inter reliés. Ce fichier permet de reprendre l'ensemble de la démarche pour d'autres hôpitaux de Montréal ou d'autres installations. Une fiche récapitulative, inspirée des formulaires d'évaluation du risque existant dans les hôpitaux, a été développée et peut efficacement compléter le portrait du risque opérationnel.

RECOMMANDATIONS

Si l'approche retenue dans cette thèse permet de combiner des méthodologies existantes et de construire un cadre d'évaluation de la fonctionnalité post-sismique des hôpitaux, elle fait ressortir le manque de données sur les dommages sismiques spécifiques au Québec. Compte tenu de l'intérêt démontré entre autres, par le nombre de publications sur l'état des connaissances sur la performance des composants non-structuraux et la fonctionnalité post-sismique, il convient de poursuivre la recherche dans les domaines suivants :

1. Le développement de courbes de fragilité pour des CFO dans le contexte de sismicité du Québec de manière analytique ou expérimentale puisque les techniques nécessaires sont connues et fiables;
2. L'étude paramétrique a été effectuée sur la base de données de deux hôpitaux. Il serait intéressant de poursuivre l'analyse à d'autres hôpitaux pour lesquels l'information de base sur les CFO existe déjà. En apportant davantage d'informations sur les systèmes, la composante théorique de l'indice IFP pourrait être améliorée et les conclusions pourraient alors être raffinées. Cette démarche permettrait de dresser le portrait global du risque sismique sur l'île de Montréal;
3. L'analyse détaillée d'un ou de plusieurs systèmes critiques avec une caractérisation complète des composants. Pour la structure, les données de mesures de vibrations ambiantes sont disponibles et méritent d'être réutilisées. Il est possible de faire ressortir des éléments d'analyse comme l'interaction sol-structure ou d'évaluer les dommages, en utilisant les modes de vibration autres que ceux de la fréquence fondamentale ou celles découlant de l'analyse non linéaire. Les interfaces avec les infrastructures de services essentiels méritent également une étude plus approfondie;
4. La disponibilité de logiciels d'analyse des AdD, à l'instar du logiciel RWB, permet de faire des analyses de fiabilité plus poussées. Il est alors possible d'approfondir les connaissances initiées par cette recherche et de procéder à l'analyse dynamique de ces systèmes : variation temporelle de la fonctionnalité, durée de perte de fonctionnalité, temps de récupération et estimation des pertes, etc.;

5. Par ailleurs, il existe au sein des installations hospitalières québécoises un outil d'évaluation du risque opérationnel avec lequel il serait approprié de faire des liens d'autant plus que la méthodologie d'évaluation repose sur une approche par système en ciblant les équipements critiques des installations hospitalières. Les pointages accordés à ces systèmes représentent une troisième composante utilisée dans les processus de l'AMDEC et donc peut mener à des conclusions plus précises sur des facteurs opérationnels qui peuvent limiter le fonctionnement d'un ou de plusieurs composantes d'un système critique;
6. Enfin, on a pu constater que les ressources et les efforts sont concentrés dans un sous-domaine (par exemple la structure ou les composants non-structuraux) tant dans la conception, l'évaluation ou la mise en place des CFO; ceci en fonction des spécialités des professionnels intervenant dans les phases d'étude et de réalisation de projets. La perspective plus globale d'analyse des systèmes mérite d'être rappelée.

ANNEXE I

VALEURS NUMÉRIQUES POUR LE CALCUL DE L'INDICE DE CONFORMITÉ POUR LES BÂTIMENTS CLASSÉS PRÉ-CODE

Tableau-A I-1 Importance relative des systèmes/composants/occupations critiques
Adapté de Holmes (2002, p. 4)

e_i	Function or Occupancy
0.20	Emergency Room Surgery Labor and Delivery Critical Care Beds: Each 12 beds or fraction thereof Emergency Generator
0.15	Laboratory Radiology
0.10	Beds other than Critical Care: Each 50 beds or fraction thereof
0.05	Pharmacy Dietary Required General Storage Boilers[1] Medical Gases[1] Transformers, Main Switchgear[1]

1. e_i value to be tripled for items with non-complying seismic protection.

$P = D \times E$, where

D = Structure Deficiency Index

D = 9.00 for clearly hazardous structures
D = 2.25 for intermediate structures
D = 1.00 for non-complying structures judged "life safe"

E = Essential Function Exposure

$E = 0.5 + \Sigma e_i$ (e_i from table above)

Rapport-Gratuit.com

ANNEXE II

ÉVOLUTION DES NORMES PARASISMIQUES CANADIENNES

Tableau-A II-1 Évolution du calcul de la charge latérale équivalente V
Adapté de Mitchell et al.(2010)

Codes	**Calcul de la charge latérale V**	**Facteurs C (facteur de flexibilité – type de structure)**	**Nouveaux facteurs**
CNB 1941	$V = C * W$	0,02 ≤ C ≤ 0,05	
CNB 1953 / 1960	$F_i = C_i * W_i$	$C_i = \frac{\alpha * 0{,}15}{N + 4{,}5}$	N = nombre d'étages α = 1, 2, 4 selon la zone sismique W_i = 1.25W
CNB 1965	$V = RCIFSW$	0,75 ≤ C ≤ 1,25	1,0 ≤ I ≤ 1,3 (importance du bâtiment) $S = \frac{0{,}25}{N + 9}$ R = 1, 2, 4 selon la zone sismique W_i = 1.25W
CNB 1970	$V = \frac{1}{4} * R(KCIFW)$	C=0,1 (1 étage) $C = \frac{0{,}05}{T^{1/3}}$	0,67 ≤ K ≤ 2,0 facteur de comportement Introduction du paramètre : T, période fondamentale du bâtiment W = W
CNB 1975 1977	$V = ASKIFW$		0,7 ≤ K ≤ 2,0 A=0, 0,02, 0,04, 0,08 (selon zone sismique 1, 2, 3, 4) F facteur de fondation = 1,3
CNB 1980			$S = \frac{0{,}5}{T^{1/2}}$
CNB 1985	$V = vSKIFW$		$S = \frac{0{,}22}{T^{1/2}}$ pour T≥0,5s S=0,62; 0,44; 0,31 νS accélération spectrale
CNB 1990/1995	$V = \frac{UvSKIFW}{R}$		U =0,6 $S = \frac{1{,}5}{T^{1/2}}$ pour T≥0,5s S=4,2; 3,0; 2,1 F=2 (soft soil)

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Codes	**Calcul de la charge latérale V**	**Facteurs C (facteur de flexibilité – type de structure)**	**Nouveaux facteurs**
CNB 2005	$V = \frac{S(T_a)M_v I_E W}{R_d R_0}$		M_v, facteur prenant en compte l'effet des modes supérieurs I_E=1,5 pour les hôpitaux R_d , R_0 facteurs de modification de force et de sur-résistance
CNB 2010	$V = \frac{S(T_a)M_v I_E W}{R_d R_0}$		Considérations particulières pour certaines structures Murs, murs couples, cadre en murs : $V \geq \frac{S(4{,}0)M_v I_E W}{R_d R_0}$ Autres systèmes : $V \geq \frac{S(2{,}0)M_v I_E W}{R_d R_0}$ Avec des conséquences sur les valeurs de Mv : M_v pour $T_a > 2{,}0$ devient M_v pour $T_a = 2{,}0$ et ajout de M_v pour $T_a > 4{,}0$

ANNEXE III

COMPORTEMENT DES HÔPITAUX LORS DE SÉISMES MAJEURS

Tableau-A III-1 Comportement des hôpitaux lors des principaux séismes majeurs survenus entre 1906 et 2006
Adapté de Davidovici (2007, p. 2.15)

Date **Lieu**	**Données sismiques :** **- Magnitude** **- Intensité** **- Hypocentre (km)** **- Profondeur (km)** **- Accélération Hg/ Vg**	**Comportement des hôpitaux**
1906 San Francisco **1906** Valparaiso **1922** Vallena **1923** Tokyo **1925** Santa Barbara **1933** Long Beach **1939** Chilean Earth **1950** Imperial Valley **1949** Kern County **1954** Eureka	M = 8,2 M = 6,2 M = 6,2 M = 6,7 M = 7,7 M = 6,6	Premier code parasismique où la force horizontale sismique est un pourcentage de la charge gravitaire : • Californie, 1934 : Code parasismique adopté par loi «Riley Act», • Japan: code de 1924 revu pour tenir compte du séisme • Chile: 1939.
1957 Mexico, Mexique	M = 7,7 E = 260 km	Avant 1957, absence d'un code parasismique
1963 26 juillet, Skopje, Macédoine	M = 6,2 I (MSK) = IX Profondeur 5 - 15 km	• 9 polycliniques, 3 maternités et les pharmacies ont été détruites, • Tous les hôpitaux de la ville ont été endommagés sans exception.
1968 Tokachi-oki, Japon	M = 7,9	L'inspection post sismique a mis en évidence que les structures des 10 hôpitaux construits suivant le règlement parasismique n'ont pas été endommagées • Dommages localisés au droit des joints de dilatation entre les blocs, • Dommages importants pour les façades vitrées.
1969 26 octobre Banja Luka, Yougoslavie	M = 6,3	• La Tour de l'hôpital (murs en maçonnerie porteuse) et les autres bâtiments ont été gravement endommagés • L'endommagement des murs intérieurs a rendu les bâtiments dangereux.

Date **Lieu**	**Données sismiques :** **- Magnitude** **- Intensité** **- Hypocentre (km)** **- Profondeur (km)** **- Accélération Hg/ Vg**	**Comportement des hôpitaux**
1971 9 février San Fernando, Los Angeles	M = 6,4-6,7 Profondeur : 13 km H = 0,28 g	4 hôpitaux ont été gravement endommagés: hors d'usage après séisme [1974-3]: • Hôpital des Vétérans Administration bâtiment construit avant 1933 non réhabilité pour l'action sismique : effondrement, • Hôpital Olive View, nouvelle construction, pour un montant de 30 M$, a été gravement endommagé, 3 cages d'escaliers se sont effondrées - La sous-station d'énergie électrique et le générateur de secours hors d'usage - 600 patients ont été évacués par la seule cage d'escalier restante, les ascenseurs étant hors service, • Effondrement de l'hôpital Sylmar VA.
1972 Managua, Nicaragua	M = 6,2 à 7,2	• Tous les hôpitaux étaient hors d'usage, • L'hôpital général a été gravement endommagé: évacué et démoli, • L'hôpital Baptiste a été endommagé par l'éclatement du réservoir de stockage d'eau.
1976 4 février Guatemala City, Guatemala	M = 7,5 E = 150 km	• Plusieurs hôpitaux ont dû être évacués, • Les pertes du pays ont été estimées à 60 % du produit national brut.
1976 6 mai Gemona di Friuli Italie	M = 6,3 I (MSK) = VIII E = 30 km H = 0,33g	• Hôpital d'Ospedaletto : 10 étages étaient encore en cours de construction • Construction en BA avec des fondations isolées et longrines de liaison sur un sol alluvionnaire • Endommagement important des poteaux courts • Les poteaux situés au sous-sol n'ont pas été endommagés, • Aile à cinq étages avec fondations superficielles et patio au R-d-c : faux-aplomb de 20 cm après séisme. Cette aile a été démolie à l'explosif.
1977 4 mars Bucarest, Roumanie	M = 7,2 I (MSK) = VIII Profondeur = 90-100km H = 0,38g	• Les hôpitaux construits avant 1940 ont été gravement endommagés.
1979 15 avril Monténégro, Yougoslavie	M = 7,2	• Le centre médical de Ulcinj (2 niveaux), bien que construit suivant les règles parasismiques, a été modérément endommagé.
1980 10 octobre El Asnam, Algérie	M = 7,3	• Deux hôpitaux ont été gravement endommagés.

Date **Lieu**	**Données sismiques :** **- Magnitude** **- Intensité** **- Hypocentre (km)** **- Profondeur (km)** **- Accélération Hg/ Vg**	**Comportement des hôpitaux**
1983 May 26, Nihonkai-Chubu, Japon	M = 7,7 E = 100 km	L'hôpital de la ville Naomika, quatre niveaux, a été gravement endommagé ainsi que la structure principale, et les éléments non-structuraux, bien que conçus et calculés suivant le règlement japonais 1968 – 1970 : • Rupture par cisaillement des poteaux et des murs, • La plupart des vitres ont éclaté, • La couverture en plastique du réservoir situé en toiture a cassé, • Les rails des ascenseurs ont été déformés, • Le matériel de radiographie ainsi que d'autres équipements médicaux a été endommagé, les médicaments de la pharmacie n'étaient pas récupérables.
1985 Valparaiso, Chili	M = 7,8	• 79 hôpitaux et centres médicaux ont été endommagés ou détruits : 3271 lits perdus
1985 Mendoza, Argentine	M = 6,2	• 10 établissements sanitaires ont été affectés par le séisme ; 1 hôpital a dû être évacué et 2 ont été démolis.
1985 19 Septembre Michoachan Mexico	M = 8,1 E = 300 km H = 0,17g	• 5 bâtiments hospitaliers se sont effondrés ; l'équipe médicale, les visiteurs et les patients ont été tués (environ 900 personnes), • 22 hôpitaux gravement endommagés, • Suite au séisme, les hôpitaux ont été classés dans la catégorie A : construction devant fonctionner pendant et après séisme.
1986 10 octobre San Salvador, Salvador	M = 5,4 H = 0,78g	• Plus de 11 hôpitaux ont été endommagés ; 2000 lits perdus, Plusieurs interventions chirurgicales étaient en cours lors du séisme.
1988 7 décembre Spitak, Armenie	M = 6,8 E = 25 km H = 0,21g à 0,40g	• Hôpital de Leninakan gravement endommagé.
1989 17 octobre Loma Prieta, Californie	M = 7,1	• L'hôpital des Vétérans a été affecté bien que le séisme n'ait pas atteint le niveau maximal prévu par les règlements (SEAOC et UBC), Les dommages étaient suffisamment importants pour nécessiter des travaux de réfection, • Cependant aucun bâtiment hospitalier renforcé ou construit après le séisme de 1971, en appliquant des règles plus contraignantes, n'a été endommagé.
1990 21 décembre Gevgelija, Grèce	M = 5,6 I (MSK) = VIII	• 8 hôpitaux (6000 m²) endommagés ainsi qu'une nouvelle unité d'équipement médical.
1992 13 mars Erzincan, Turquie	M = 6,8 – 6,9	• Effondrement de trois hôpitaux.

Date **Lieu**	**Données sismiques :** **- Magnitude** **- Intensité** **- Hypocentre (km)** **- Profondeur (km)** **- Accélération Hg/ Vg**	**Comportement des hôpitaux**
1994 17 janvier Los Angeles, Northridge	M = 6,6 to 6,7 E = 15 km H: 0,91g / 0,82g / 2,31 g V: 0,60 g / 0,34 g / -	L'endommagement des éléments non-structuraux a entrainé la perte temporaire de la fonction hospitalière nécessitant l'évacuation et le transfert des patients Centre Médical «Olive View » (très endommagé en 1971) • Rupture des gicleurs et des tuyauteries d'eau potable, • Aéroréfrigérants en toiture endommagés, • Pas de vitres cassées, • Le groupe de secours s'est bien comporté mais il s'est arrêté pour cause de manque de combustible dans le réservoir de 24 heures, • Pas de dégâts sur les ascenseurs, • Décrochage de nombreux éclairages situés dans les plafonds suspendus, Hôpital « Holly Cross » (a remplacé celui gravement endommagé en 1971) : • Le balancement des éléments de conditionnement d'air a entrainé l'endommagement des plafonds suspendus, • Déclenchement des gicleurs, • Les services de radiologie arrêtés pour cause de manque d'électricité (capacité insuffisante du générateur), • Endommagement important du réservoir d'oxygène exigeant l'installation rapide d'une nouvelle unité, Centre Médical « Indian Hills » à Sylmar (le même bâtiment a subi le séisme de 1971) : • Destruction du vitrage au RdCh,; effondrement d'une • partie du plafond suspendu et des diffuseurs d'air • conditionné, Centre Médical des Vétérans à Sepulveda (en remplacement de celui effondré en 1971) comprennent 6 bâtiments à plusieurs niveaux et 10 bâtiments avec un seul niveau • Endommagement des éléments non-structuraux avec un maximum de dégradations au 6ème étage, • Effondrement de surfaces importantes du plafond • suspendu dans l'auditorium, • Évacuation des deux bâtiments à cause de la rupture des tuyauteries d'eau potable, • Dommage structuraux limités et dommages importants des éléments non-structuraux (coût élevé de la réfection) Hôpital St, John's à Santa Monica : • Dommages liés à la rupture des tuyauteries d'eau potable, • Dégâts importants sur les éléments non-structuraux • Bris de vitres.

Date **Lieu**	**Données sismiques :** **- Magnitude** **- Intensité** **- Hypocentre (km)** **- Profondeur (km)** **- Accélération Hg/ Vg**	**Comportement des hôpitaux**
1994 1er septembre Bitola, Grèce, Albanie	M = 5,4 I (MSK) = VII Profondeur = 23 km	27 bâtiments médicaux soit 37,000 m² ont été rapidement contrôlés : • 9 bâtiments, dont la structure a été endommagée, ont été temporairement fermés; 10 bâtiments n'ont eu que des dégâts sur les éléments non-structuraux, Si les exigences sanitaires concernant les interventions chirurgicales avaient été appliquées, 19 bâtiments auraient dû être déclarés hors service, • L'hôpital Général (17,000 m²), construit dans la période 1960-1970 avec 5 niveaux en portiques en béton armé : pas de dommages significatifs, Cependant le comportement « flexible » a provoqué une dégradation importante des murs de remplissage, Les dégâts les plus significatifs étaient situés au niveau du RdCh, moins aux niveaux supérieurs.
1995 17 janvier Kobe, Japon	M = 6,9 to 7,2 E = 20 km Profondeur = 10 km	• Nombre d'hôpitaux affectés à des degrés divers : 1,207 (comparé au nombre total des hôpitaux au Japon de 10,066)
1995 13 mai Bitola, Macédoine, Grèce, Albanie	M = 6,0 I (MSK) = VI	L'inspection post sismique a mis en évidence les aspects suivants : • Région de Bitola : deux séismes modérés dans la même année, • Certains bâtiments construits dans la décennie précédente ont eu un comportement acceptable, • Endommagement important de l'équipement hospitalier, • Pendant 24 heures l'ensemble des établissements sanitaires a été désorganisé.
1999 17 août Kocaeli, Izmit Turquie	M = 7,4 Profondeur = 17 km H = 0,2g - 0,4g	L'inspection post sismique a mis en évidence que le système structural des deux hôpitaux à 2 niveaux (Izmit and Gölcük) construits suivant les normes parasismiques n'a pas été endommagé, A retenir toutefois les remarques suivantes : • Meilleur comportement des bâtiments à forme régulière, • Renversement des 2 réservoirs à oxygène.
2001 13 janvier San Salvador	M =7,6 Profondeur = 50 km H = 0,22g to 0,87 g (alluvions) V = 0,16g to 0,24g	L'inspection post sismique a relevé que sur 82 bâtiments hospitaliers, 6 ont été gravement endommagés et 7 autres n'ont eu qu'un endommagement des éléments non-structuraux : • L'hôpital de San Rafael bien que gravement endommagé a dispensé des soins à l'extérieur sous des tentes, • Hôpital Rosales a perdu sa capacité d'offrir des soins d'urgence, • Hôpital San Juan de Dios : gravement endommagé

Date **Lieu**	**Données sismiques :** **- Magnitude** **- Intensité** **- Hypocentre (km)** **- Profondeur (km)** **- Accélération Hg/ Vg**	**Comportement des hôpitaux**
		• Hôpital San Pedro : gravement endommagé, • Hôpital San Miguel construit en 1985, 5 niveaux, portiques légèrement endommagés, Tous les murs de remplissage étaient isolés des mouvements des portiques.
2002 Morgan Hill Californie	M = 6,2	• Dommages étendus dans les laboratoires • Effondrement des meubles de rangement dans la bibliothèque entrainant les cloisons auxquelles ils étaient attachés.
2003 22 décembre San Simeon Californie	M = 6,5 Profondeur = 7,6 km H = 0,48g	• L'enregistrement des secousses les plus importantes ont eu lieu dans l'hôpital « Twin Cities Community » bâtiment a un niveau en ossature bois situé à 38 km de l'épicentre, • Le spectre de réponse montre un pic avec une accélération de 1,3g au niveau du toit, • Faibles dommages à la structure du bâtiment.
2003 26 décembre Bam, Iran	M = 6,7 E = 10 km Profondeur = 10 km H = 0,7g-0,8g V = 0,98g	• Dommages très importants aux hôpitaux et cliniques : • La plupart du personnel du corps médical a été tué lors de l'effondrement de bâtiments • Mise en service à Bam des hôpitaux provisoires.
2006 15 octobre Hawaï	M = 6,7 ; 6,0 E = 24 km Profondeur = 39 km	Prédominance des vibrations à haute fréquence, Plusieurs semaines après le séisme, les hôpitaux n'étaient pas complètement opérationnels à cause de : • Faibles endommagements structuraux, • Dommages importants concernant les éléments non-structuraux: plafonds suspendus, suspension de l'éclairage, Kona Community Hospital (94 lits) : dommages non-structuraux, Les patients ont été évacués sur Hilo Medical Center, L'interruption de l'approvisionnement en électricité a déclenché le générateur de secours. Seulement les ascenseurs n'étant pas connectés au réseau de secours, l'évacuation a été faite par les escaliers, Hale Ho'ola Hamakua (2 niveaux) a été construit en 1995 en remplacement d'un hôpital construit en 1951, Dommages : • Destruction de l'habillage de la façade, • Plafonds suspendus sans contreventement, absence des • éléments pour résister au séisme vertical ascendant, Il est probable que l'espace prévu pour le plenum soit la cause de cet endommagement : la densité importante des réseaux a empêché la mise en place d'un système de contreventement. • Cloisons de séparation.

ANNEXE IV

DIAGRAMMES DE SYSTÈMES MÉCANIQUES

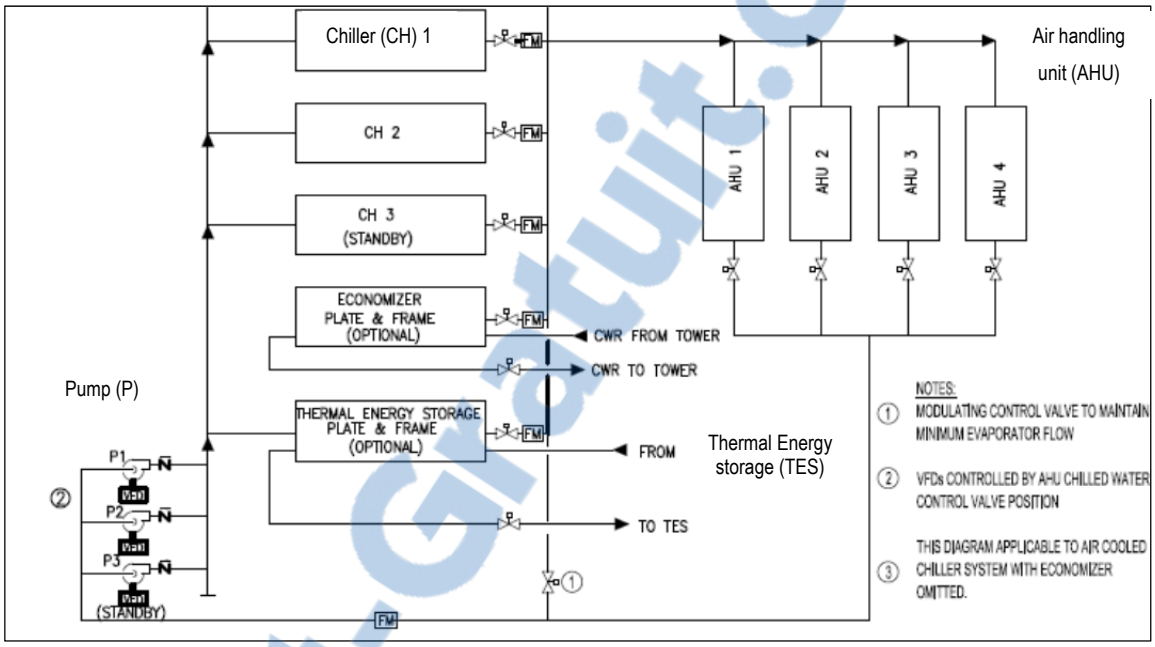


Figure-A IV-1 Diagramme schématique de production et distribution de l'eau froide – Exemple de système primaire
Adaptée de OCFMQS (2011, p. 4.22)

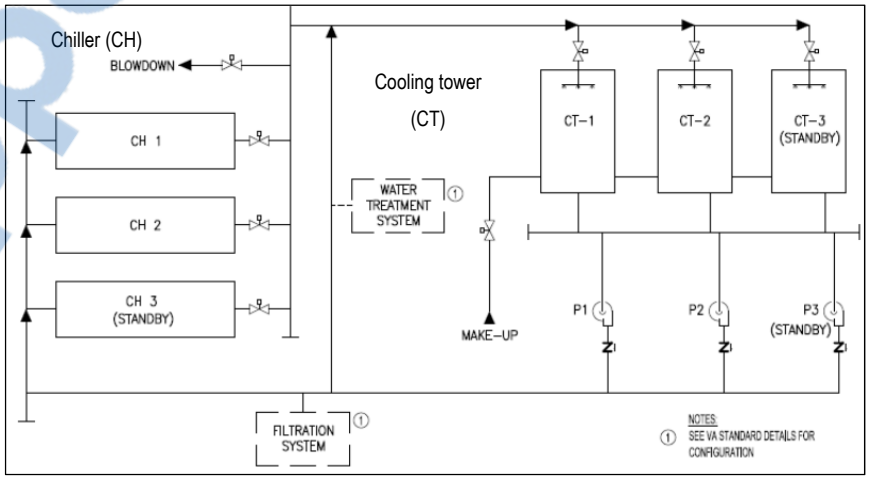


Figure-A IV-2 Diagramme schématique d'un système de tour d'eau
Adaptée de OCFMQS (2011, p. 4.24)

Rapport-Gratuit.com

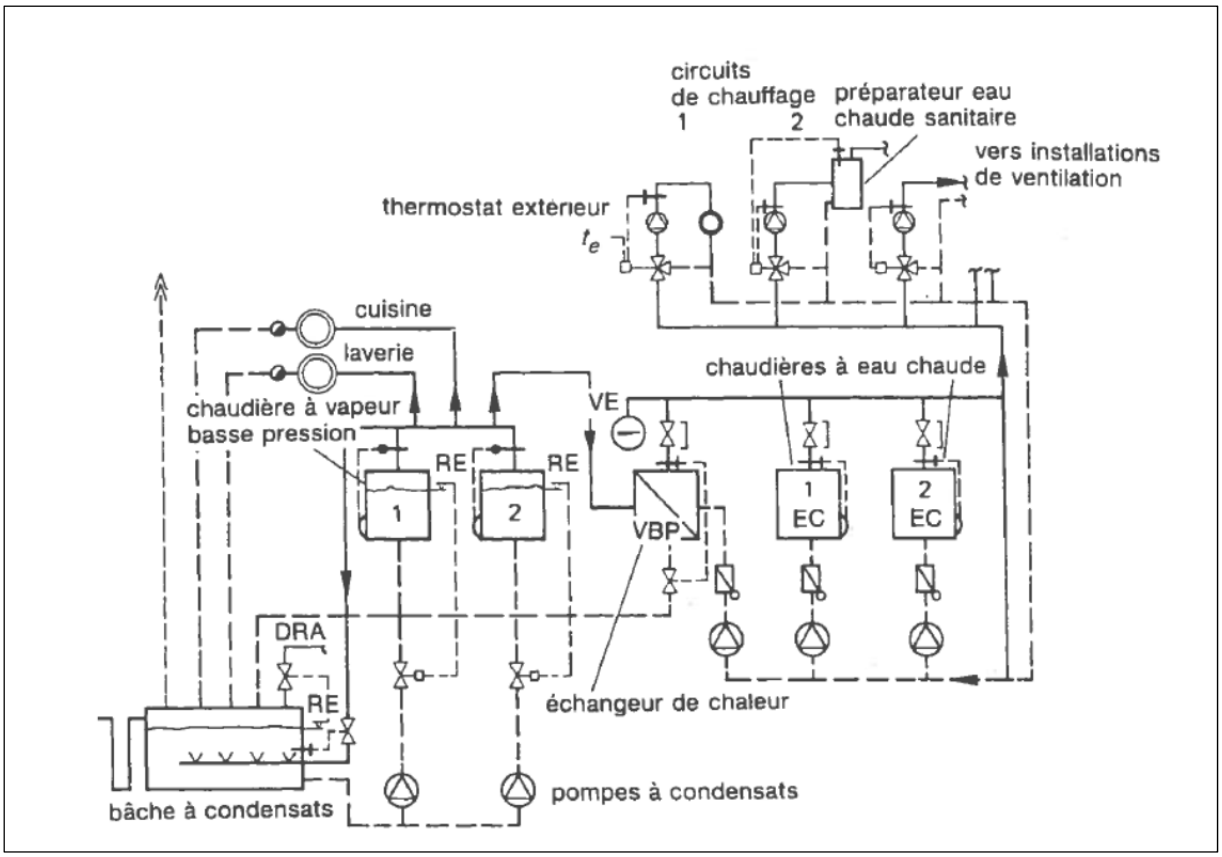


Figure-A IV-3 Schéma de principe des différents réseaux de chaleur d'un hôpital de moyenne importance équipée de chaudières à eau chaude et à vapeur basse pression
Tirée de Recknagel et al. (1995, p. 956)

ANNEXE V

ARBRES DE DÉFAILLANCE DE SYSTÈMES DE L'HÔPITAL GÉNÉRAL DE MONTRÉAL

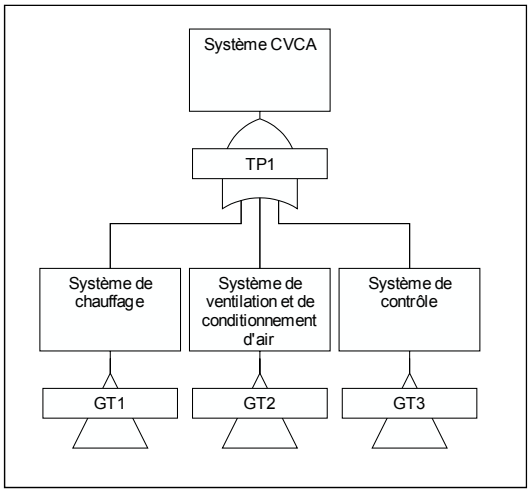


Figure-A V-1 Sous-systèmes essentiels du CVCA

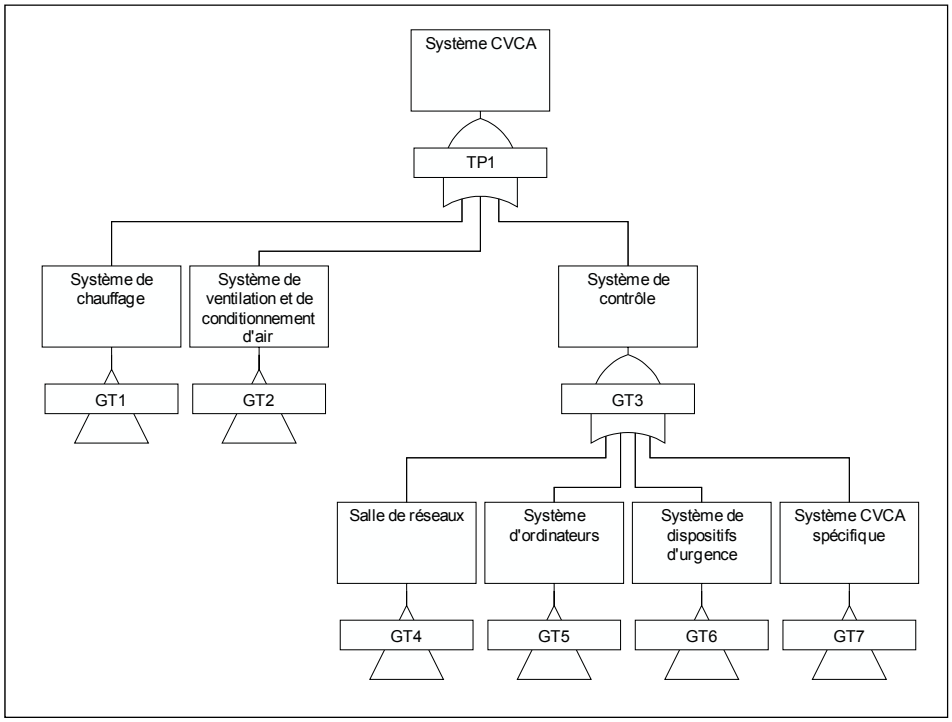


Figure-A V-2 Arbre de défaillance Système de contrôle

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

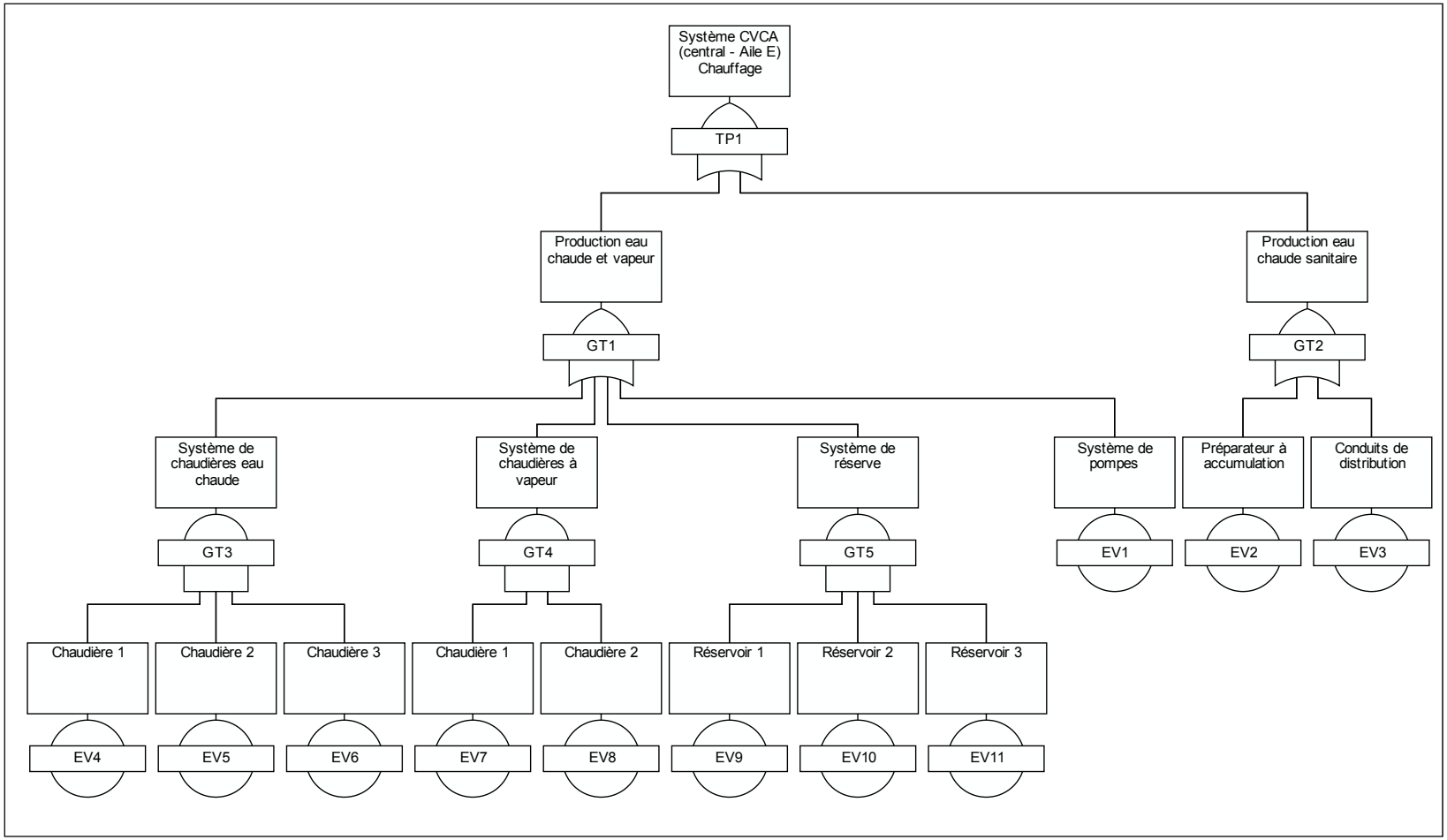


Figure-A V-3 Arbre de défaillance du système de chauffage

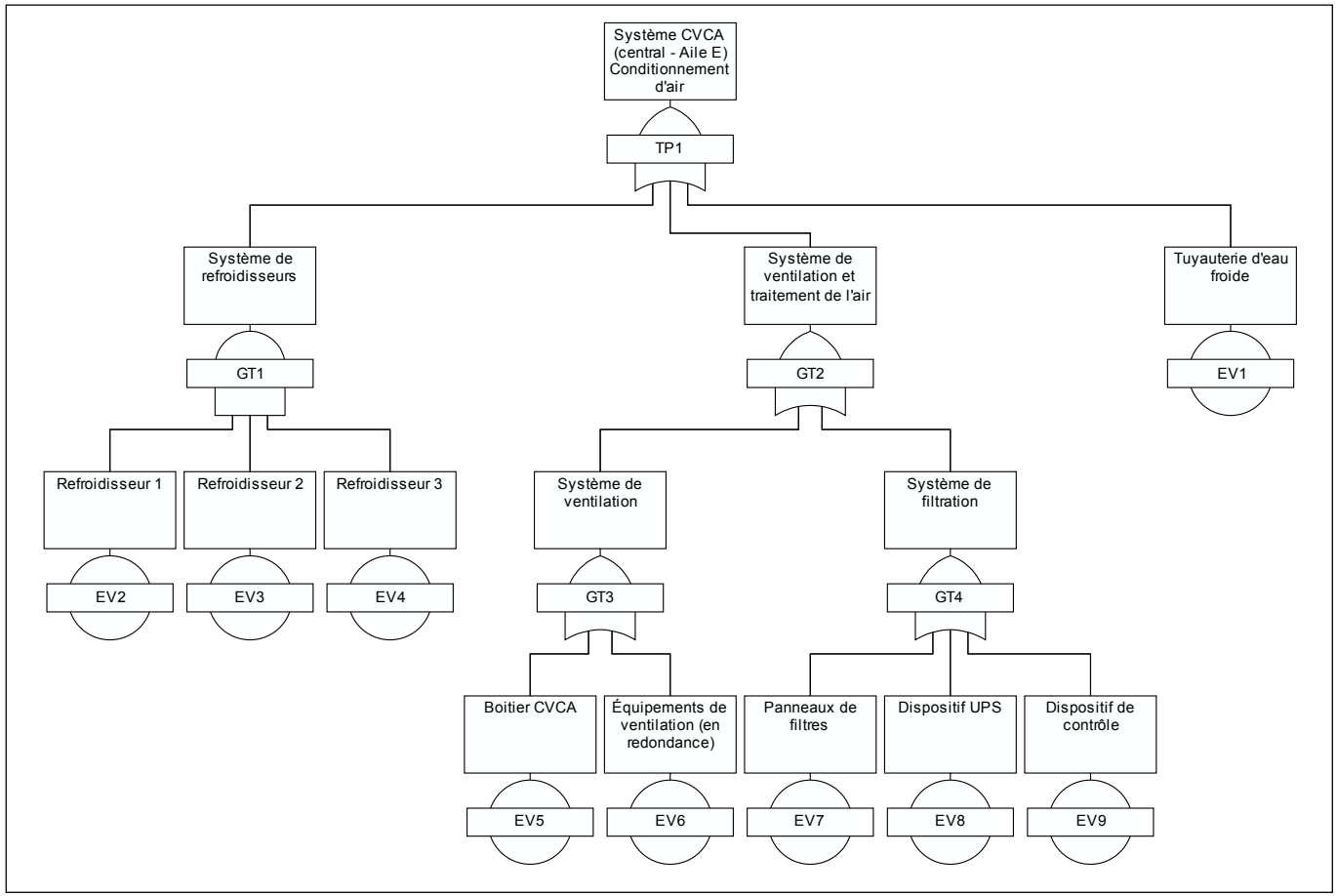


Figure-A V-4 Arbre de défaillance du système de conditionnement d'air

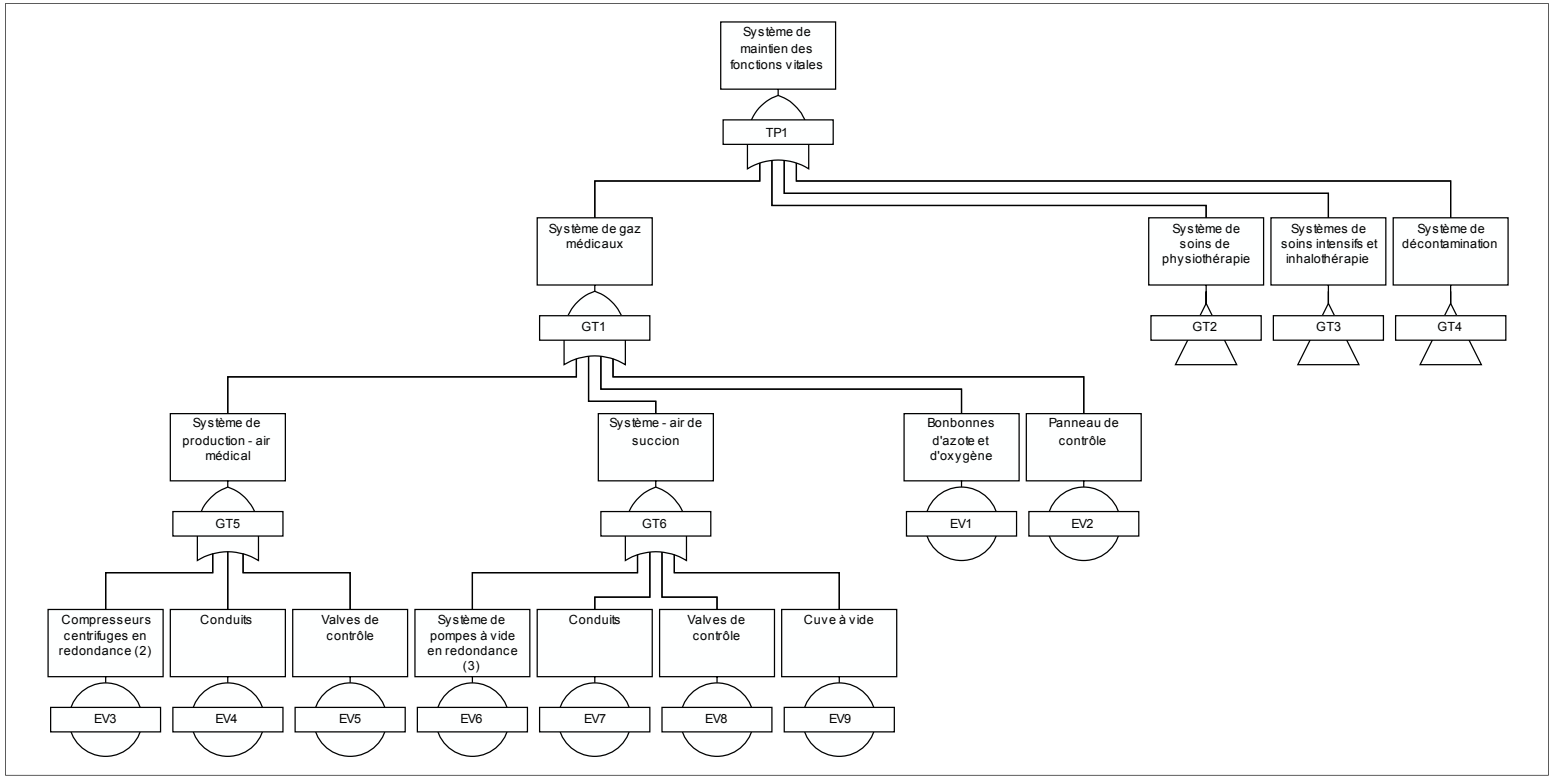


Figure-A V-5 Arbre de défaillance du système de maintien des fonctions vitales – branche gaz médicaux

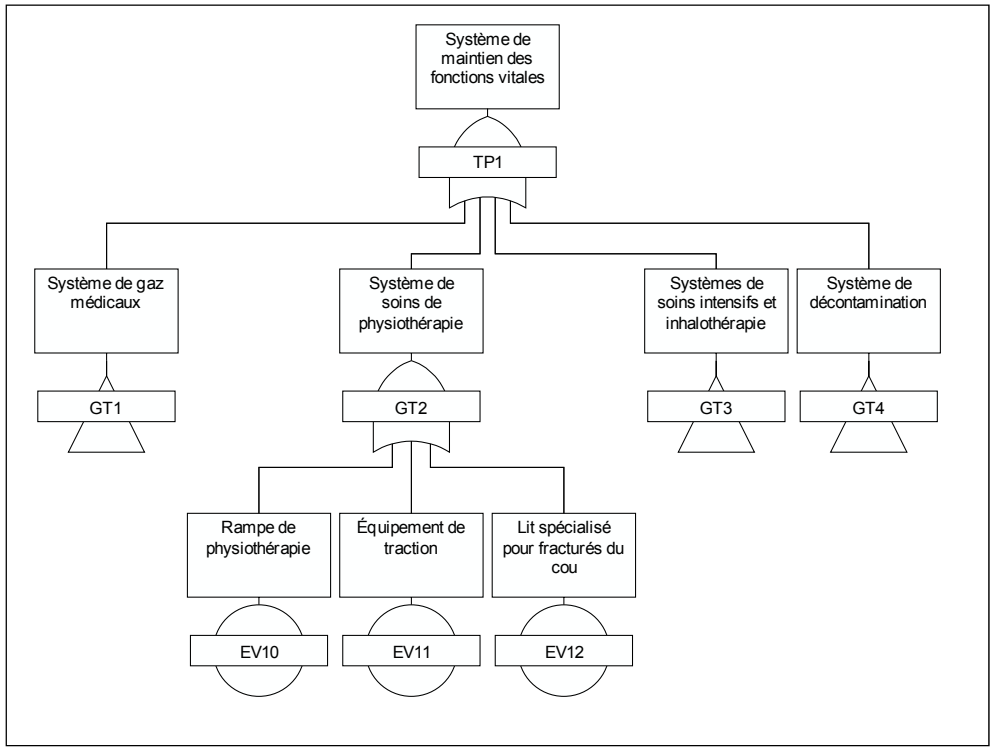


Figure-A V-6 Arbre de défaillance du système de maintien des fonctions vitales – branche soins de physiothérapie

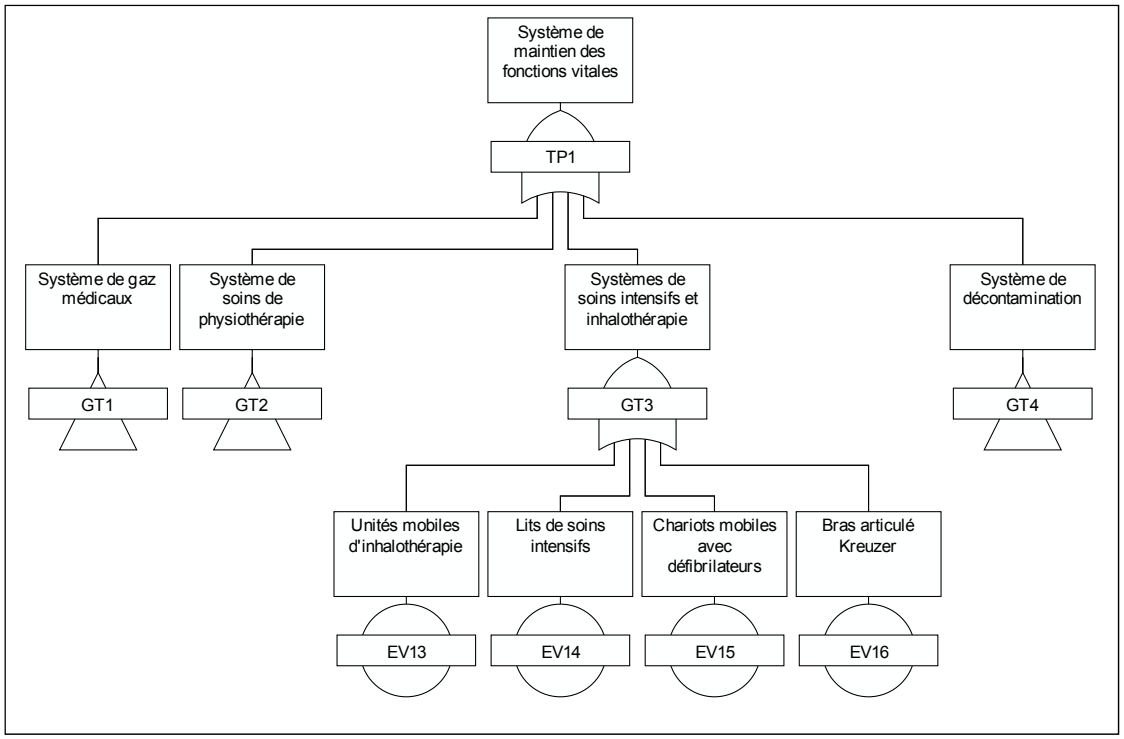


Figure-A V-7 Arbre de défaillance du système de maintien des fonctions vitales – branche soins intensifs*

* Le poste de travail pour infirmiers (ères) aurait pu être ajouté, le risque associé à ce CFO est faible. Seule la perte de contenu non dangereux est probable en cas de fortes secousses (Cappai et al. 2010).

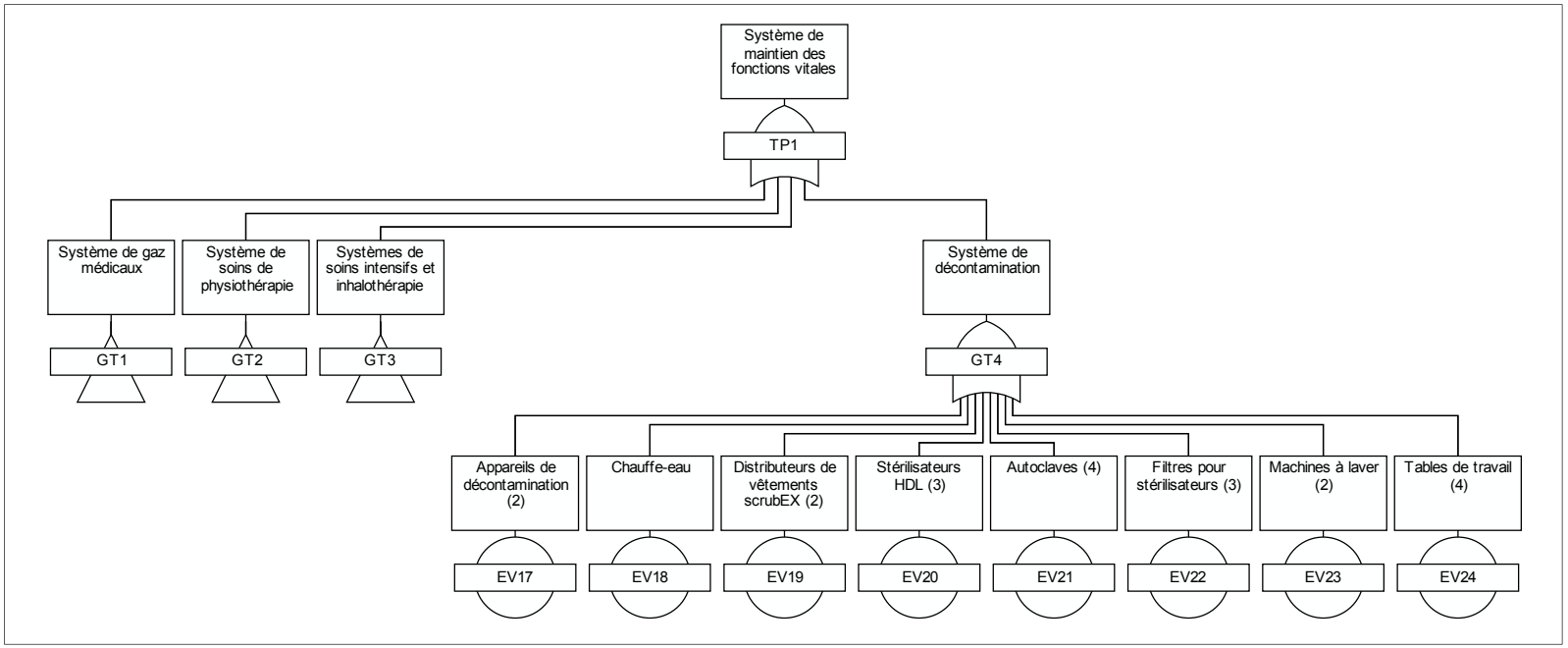


Figure-A V-8 Arbre de défaillance du système de maintien des fonctions vitales – branche décontamination*

* Seuls les CFO spécialisés sont considérés ici. On pourrait y ajouter les étagères de produits de décontamination et de buanderie, les armoires de rangement, les meubles de vêtement souillés, etc. qui ont fait l'objet de l'évaluation. Leur indice de risque est généralement faible de par leur usage non vital et de la faible fréquentation des salles de rangement (Cappai et al. 2010).

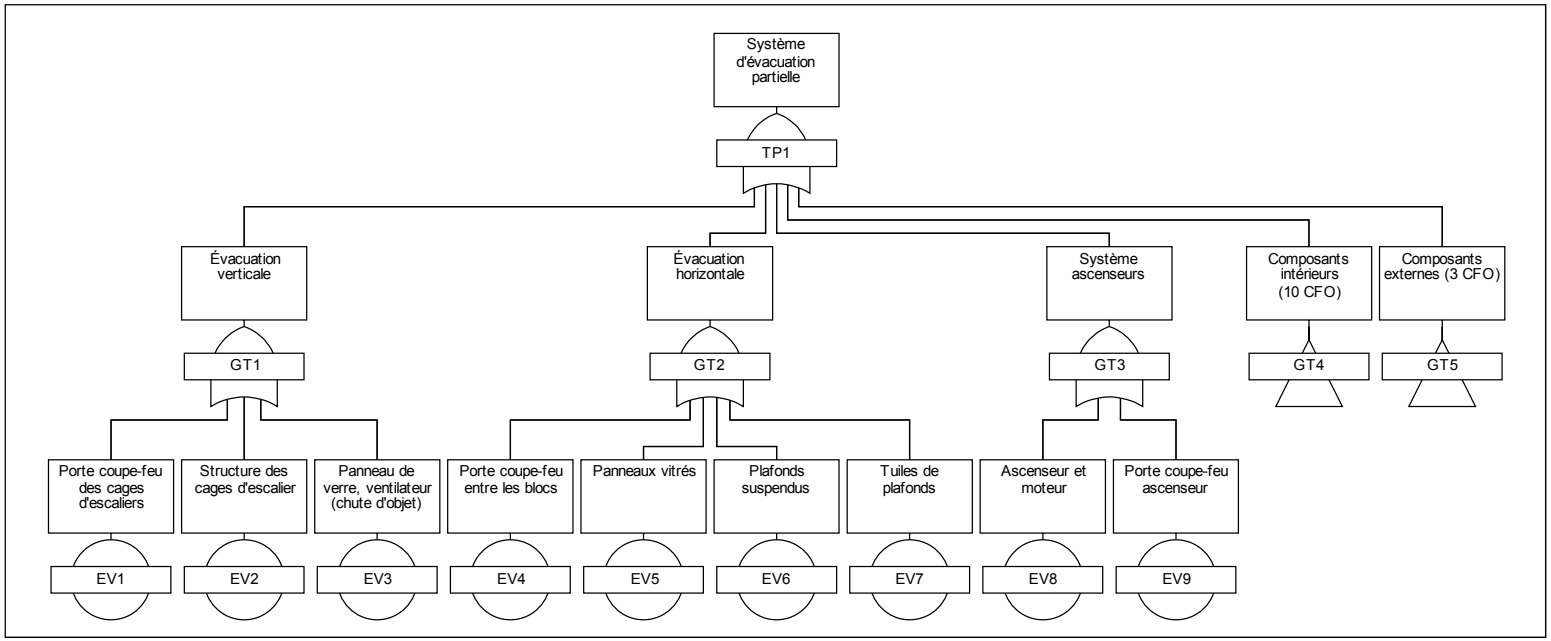


Figure-A V-9 Arbre de défaillance du système d'évacuation partielle du bâtiment E

Le système de gestion peut comprendre les dispositifs de communication, l'éclairage temporaire, la sécurité du vestibule d'entrée selon que le système est évalué séparément ou non.

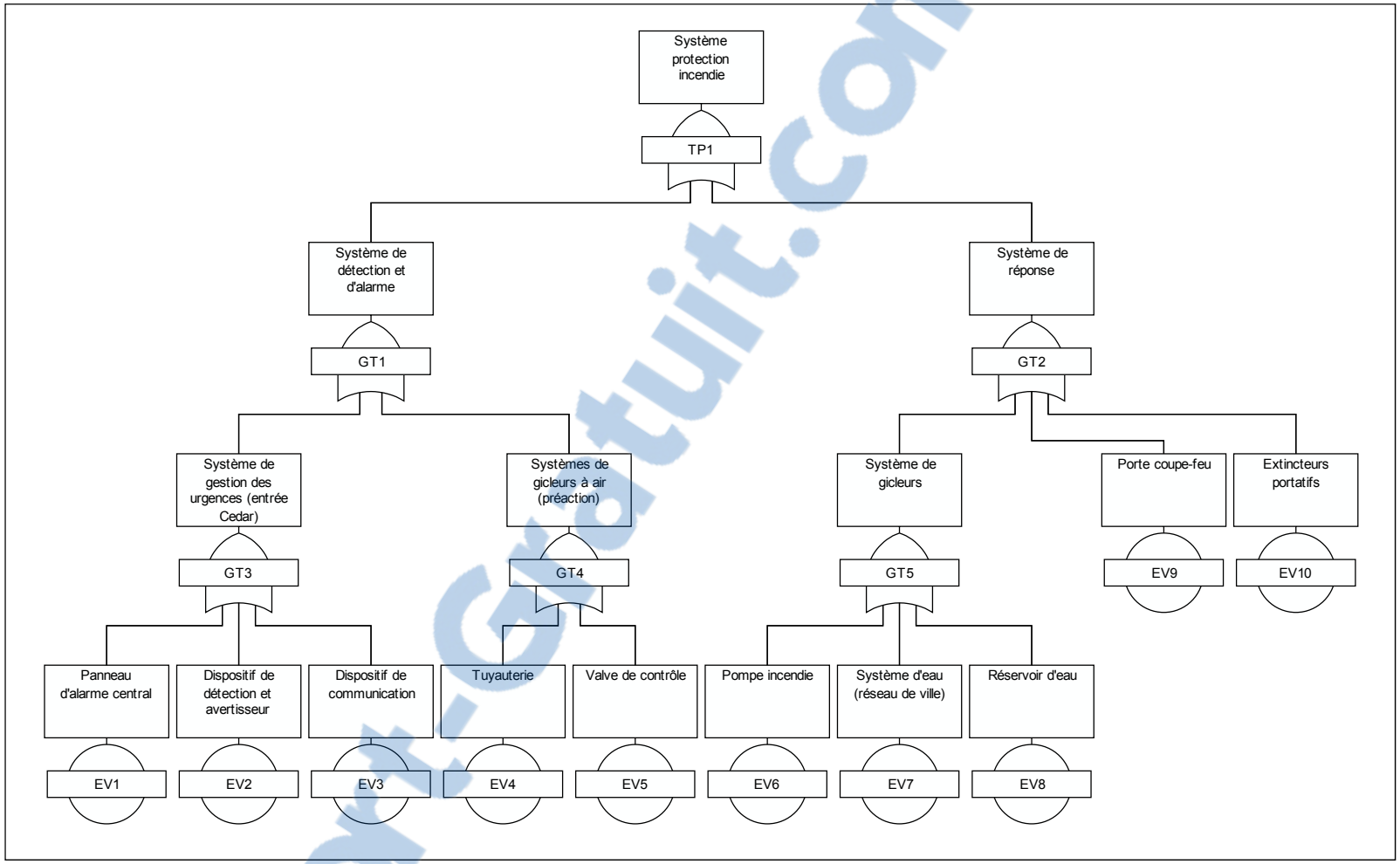


Figure-A V-10 Arbre de défaillance du système de protection incendie

apport-Gratuit.com

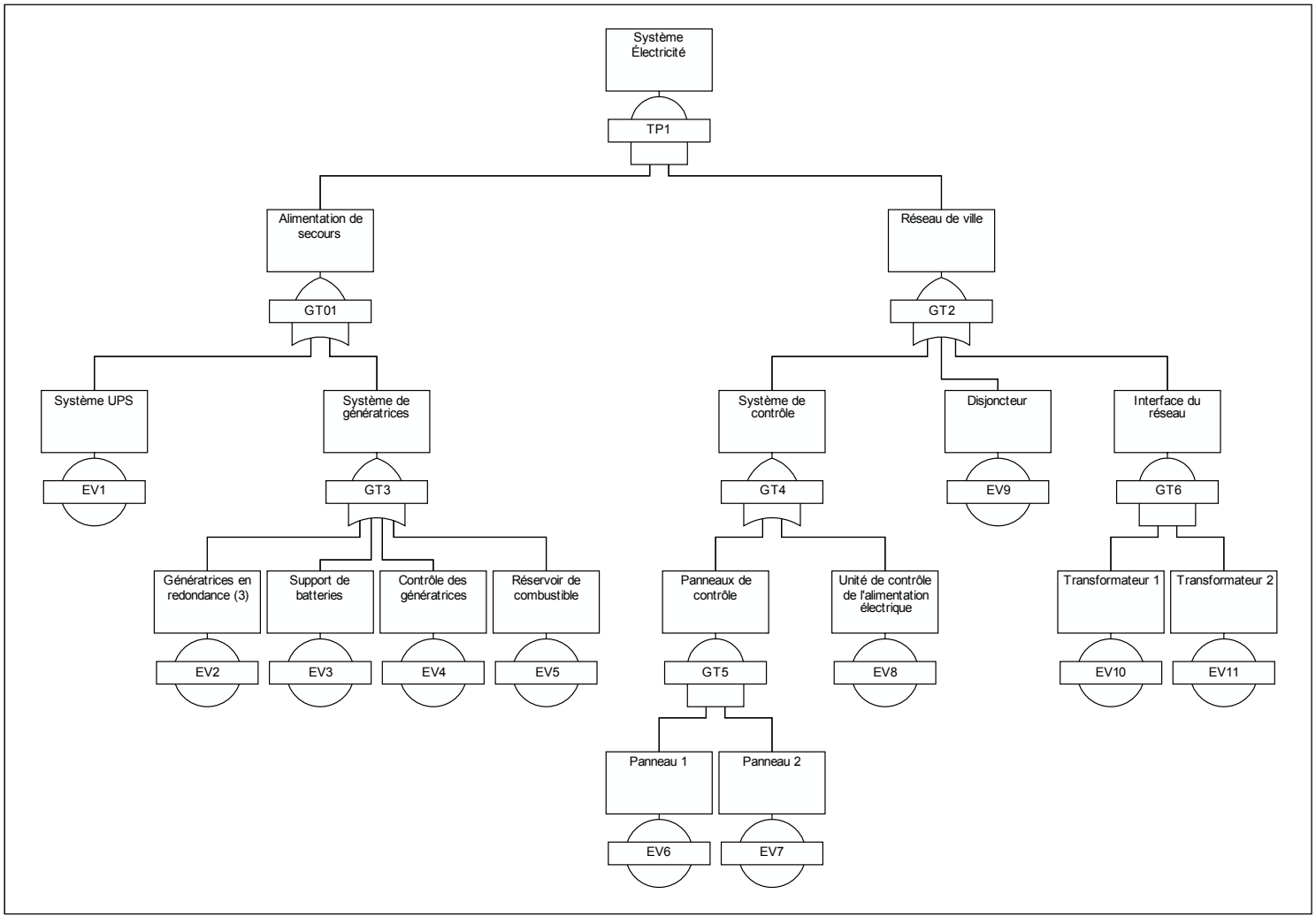


Figure-A V-11 Arbre de défaillance du système électrique

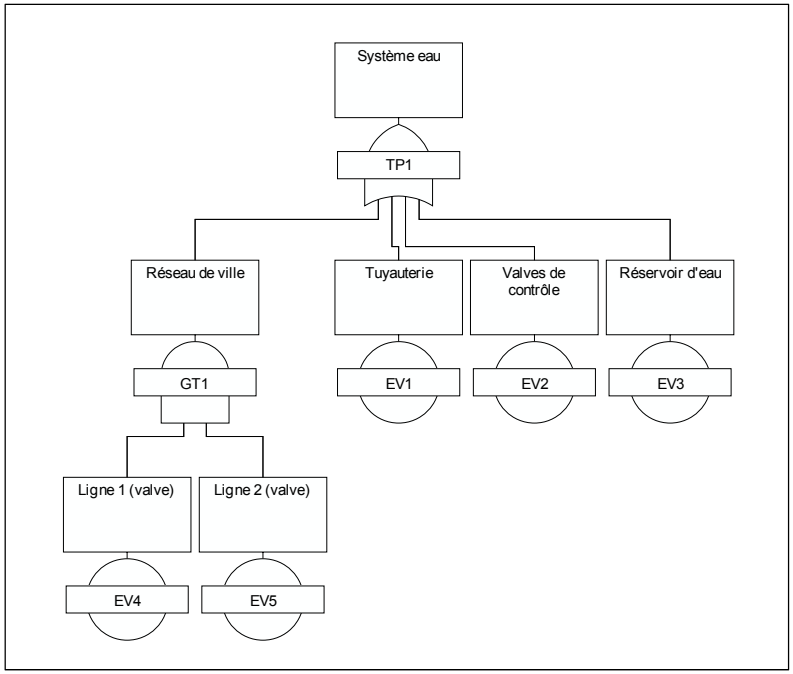
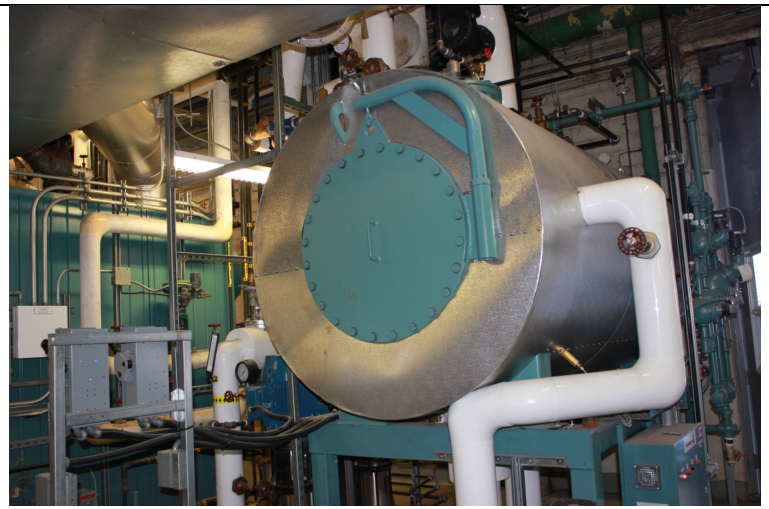


Figure-A V-12 Arbre de défaillance du système Eau

a) Système de filtre



b) Unité de préparation eau sanitaire

c) Tuyauterie eau froide et pompes

d) Système de pompes à vide (gaz de succion)

Figure-A V-13 Quelques CFO essentiels du système CVCA et gaz médicaux

ANNEXE VI

ARBRES DE DÉFAILLANCE DE SYSTÈMES DE L'HÔPITAL RIVIÈRE-DES-PRAIRIES

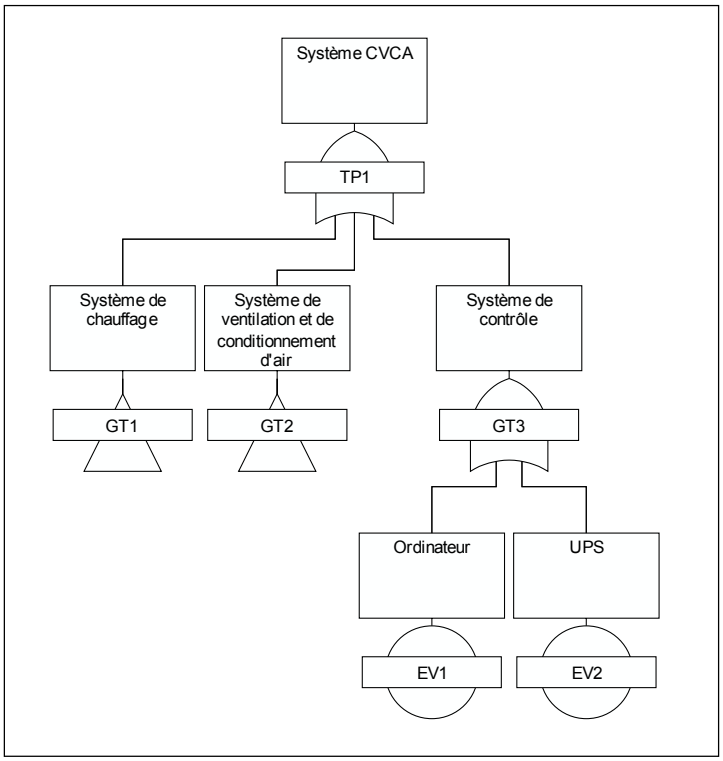


Figure-A VI-1 Arbre de défaillance du système CVCA

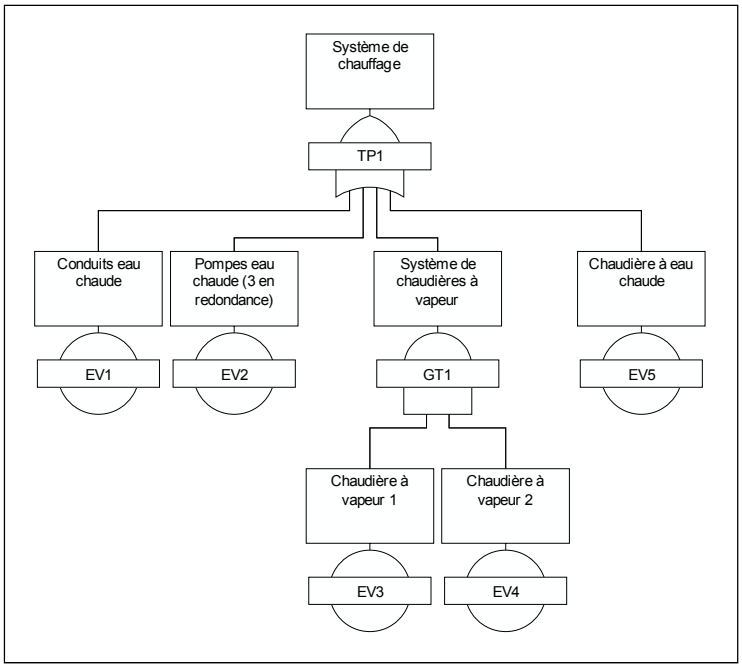


Figure-A VI-2 Arbre de défaillance du système de chauffage

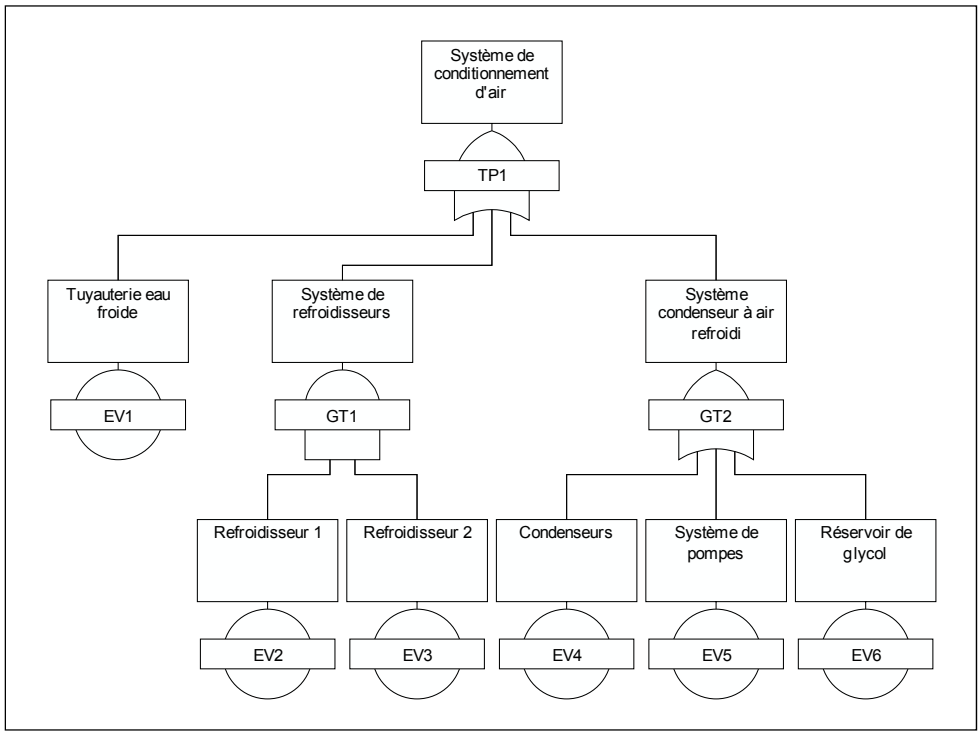


Figure-A VI-3 Arbre de défaillance du système de conditionnement d'air

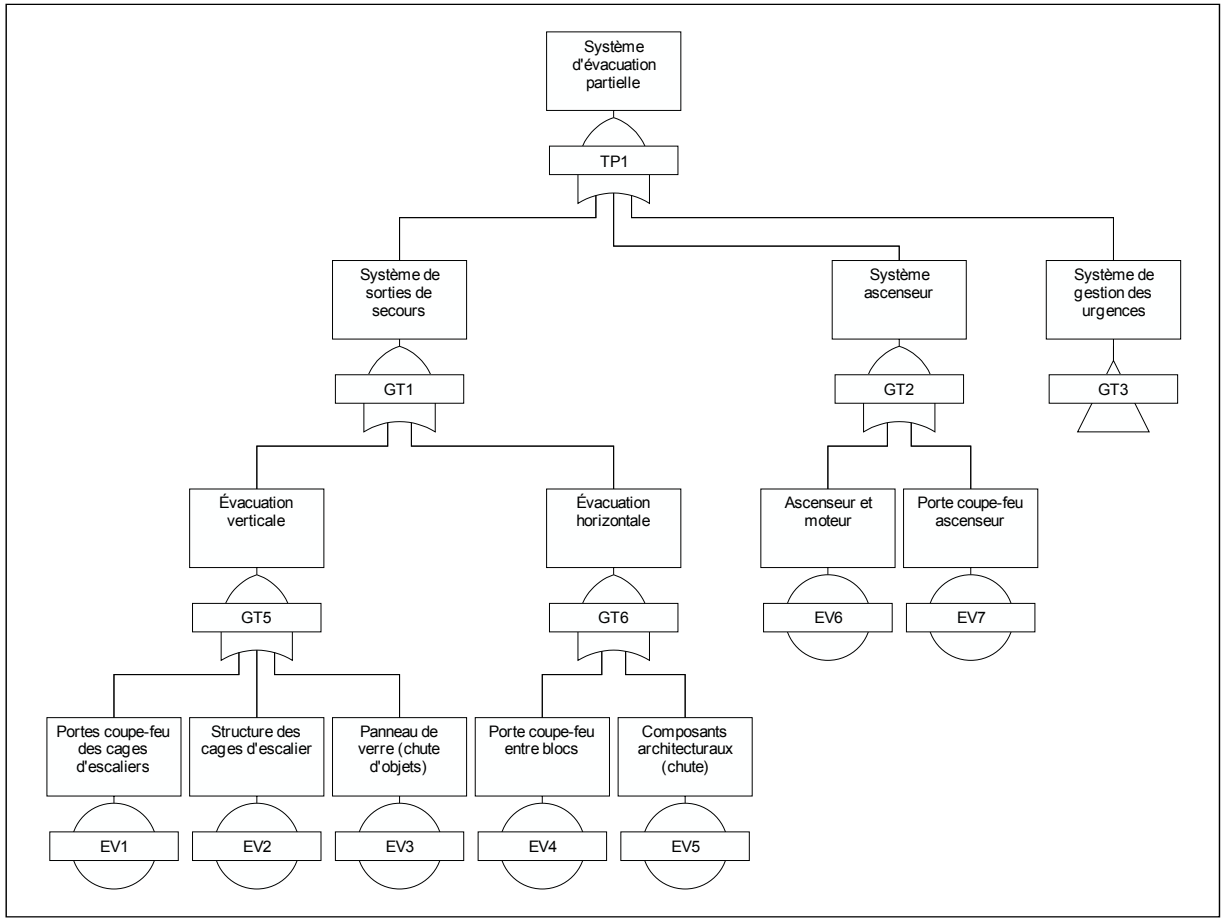


Figure-A VI-4 Arbre de défaillance du système d'évacuation partielle

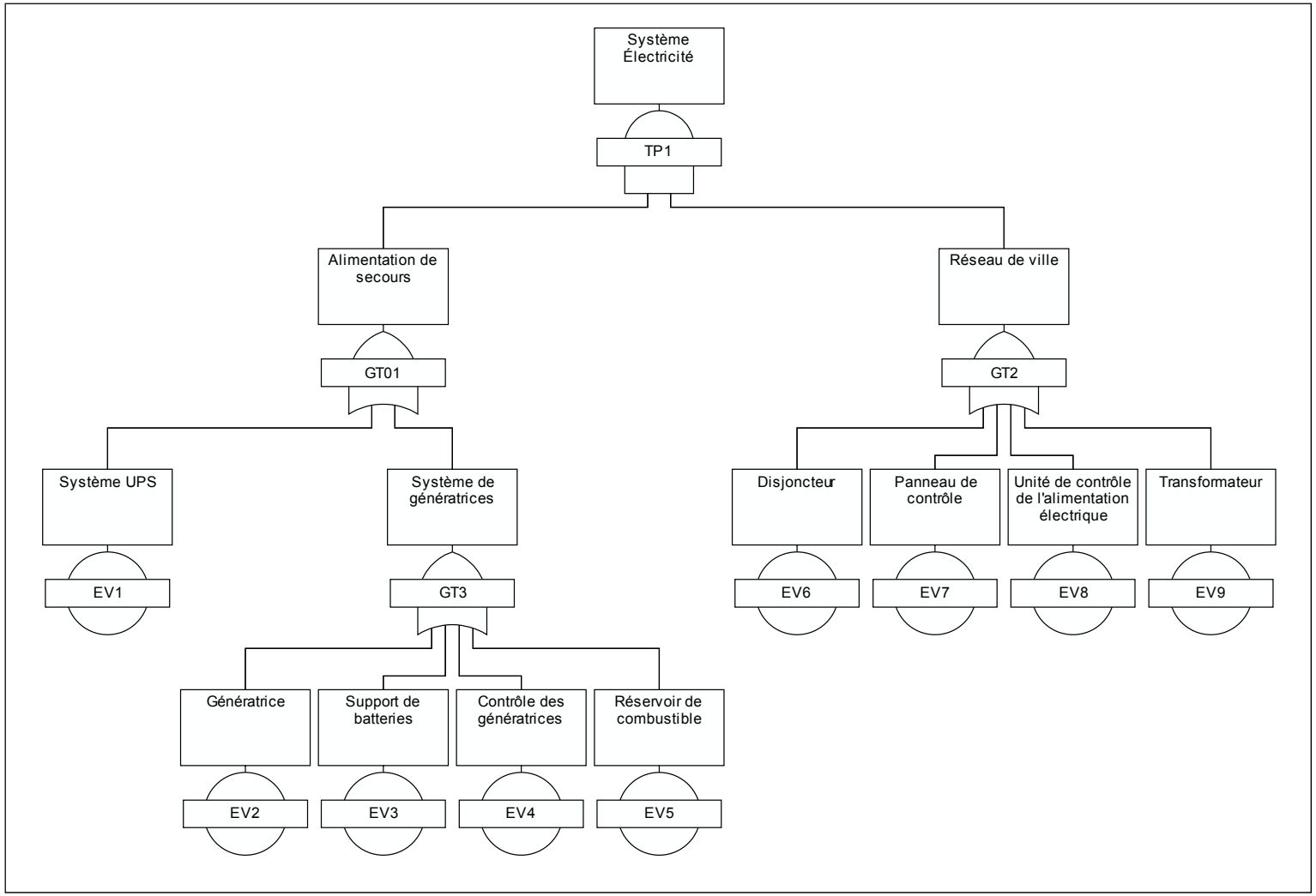


Figure-A VI-5 Arbre de défaillance du système Électricité

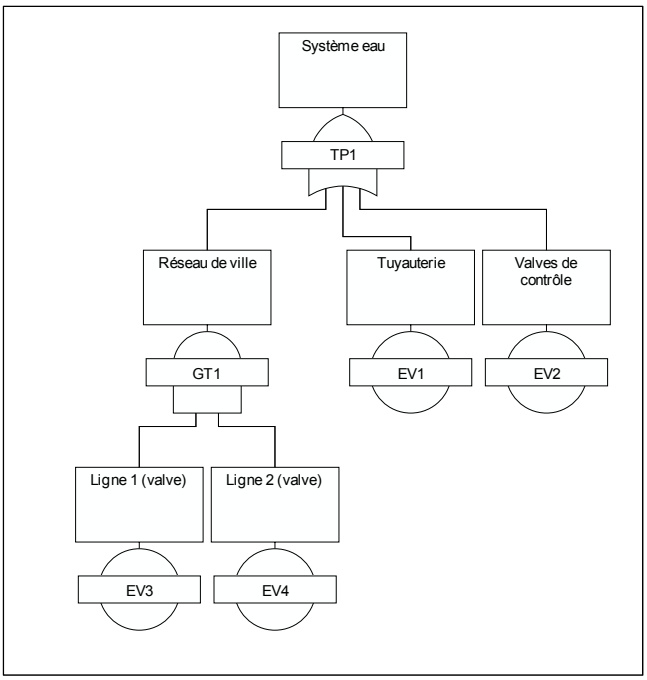
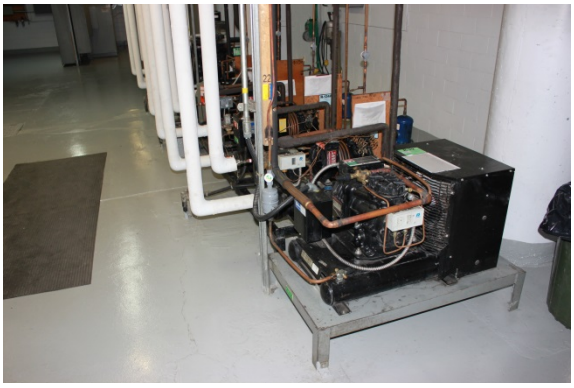


Figure-A VI-6 Arbre de défaillance du système Eau

a) raccordement de l'alimentation en eau au réseau de ville

b) système de chaudières

c) pompe à incendie



d) pompes de circulation en tandem

Figure-A VI-7 Quelques CFO des systèmes essentiels de l'HRDP

ANNEXE VII

SPÉCIFICATIONS DES APPAREILS UTILISÉS POUR LES MESURES DE VIBRATIONS AMBIANTES

TROMINO® is the first high-resolution all-in-one system for passive and active seismic surveys and vibration monitoring.

TROMINO® is equipped with*:

- 3 velocimetric channels for seismic ambient microtremor recordings (up to ±1.5 mm/s ~)
  3 velocimetric channels for strong motion recordings (up to ±5 cm/s ~)
- 3 accelerometric channels for strong vibration monitoring
- 1 analog channel (e.g., external trigger for MASW/refraction)
- built-in GPS receiver, internal and/or external antenna for positioning and absolute timing/synchronization of different units
- built-in radio transmitter/receiver module for indoor/outdoor synchronization of different units and alarm transmission (e.g., signal above threshold levels)

TROMINO® works in the frequency range 0.1 - 1024 Hz on all channels (up to 32 kHz on 2 channels*) with A/D conversion > 24 bit equivalent at 128 Hz. All this in a single ultra-portable package:

- no external cables
- very small size (10 x 14 x 8 cm)
- light weight (~1 kg)

very low consumption (75 mW*):

- 2 standard AA batteries (1.5 V) allow more than 100 h continuous recording
- works also on AC adapter for long monitoring

Figure-A VII-1 Caractéristiques des appareils Tromino utilisés
Tiré de Micromed (2011)

Rapport-Gratuit.com

ANNEXE VIII

ÉTAPES D'ANALYSE DES SIGNAUX DE MESURES DE VIBRATIONS AMBIANTES

Étape 1 : Extraction des enregistrements à l'aide de Grilla

- extraction des enregistrements à l'aide du logiciel Grilla fourni avec les capteurs;
- organisation des données pour chacun des jeux de mesures.

Étape 2 : Regroupement des signaux captés à l'aide de Matlab et création d'un fichier .txt pour chacun des jeux de mesures - Enregistrement en temps d'un bruit de fond à caractère stationnaire

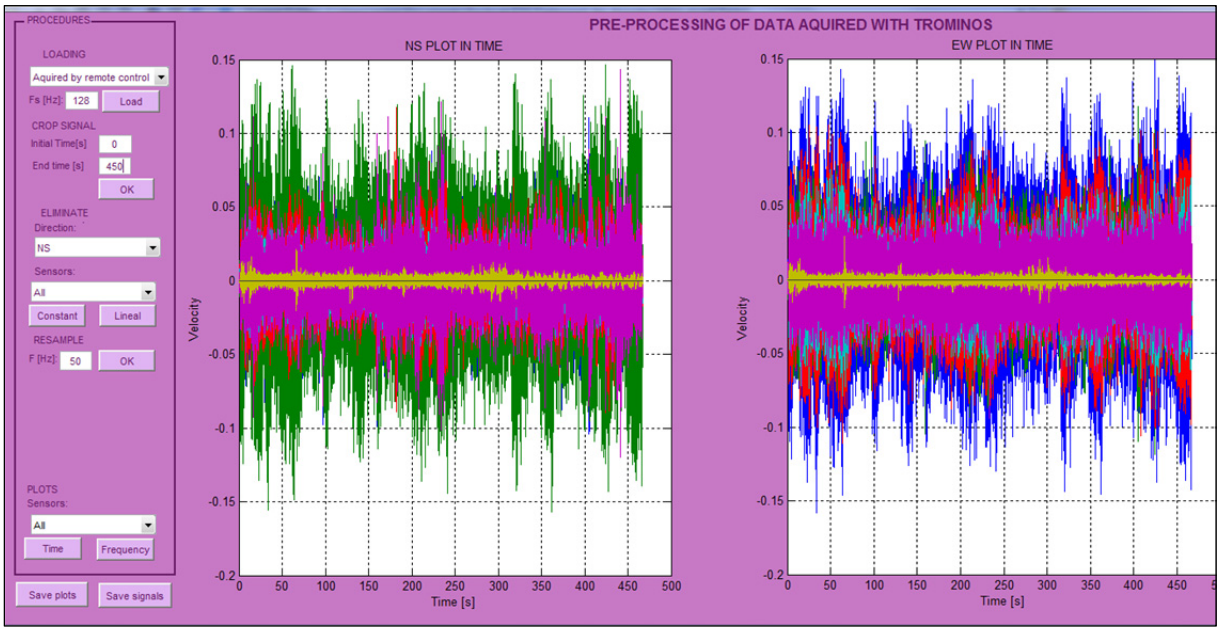


Figure-A VIII-1 Exemple du signal de sortie après traitement par Matlab

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Étape 3 : Création d'un fichier .cfg reproduisant le positionnement des points de mesures relié aux fichiers .txt pour modélisation du bâtiment (points, lignes, surfaces)

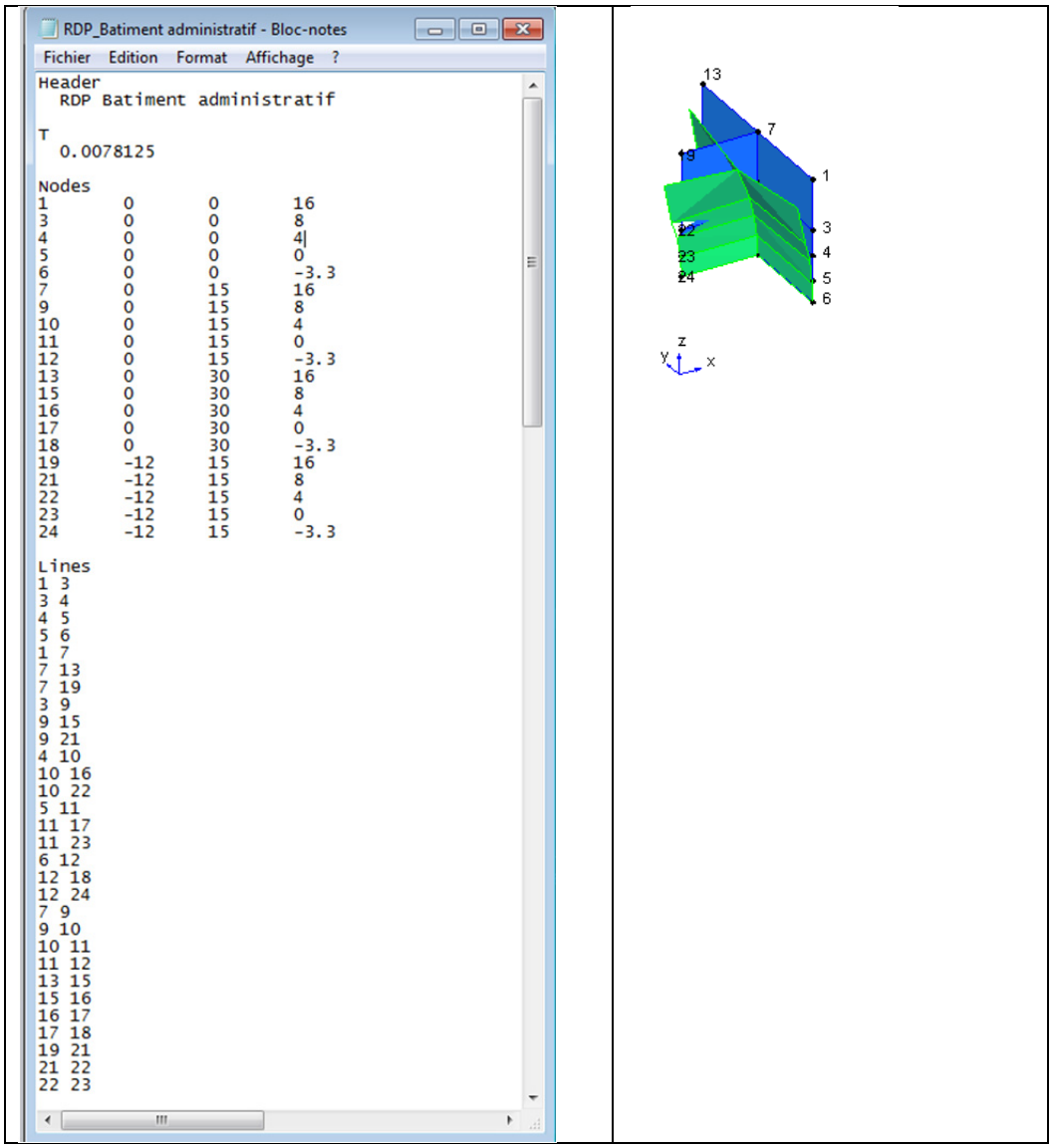
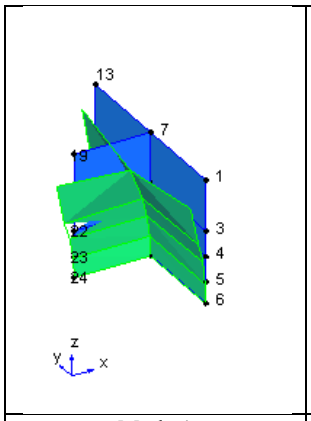
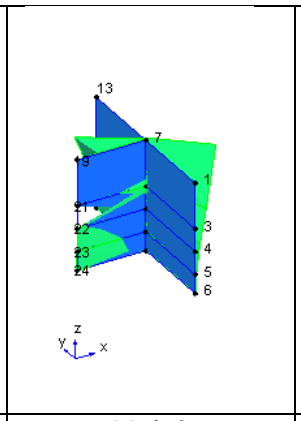
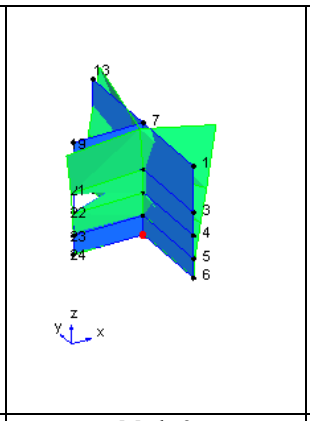
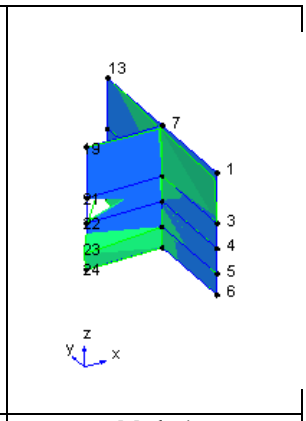


Figure-A VIII-2 Extrait du fichier .cfg et modélisation du bâtiment

Étape 4 : Analyse modale sur Artemis Extractor/Modal

Tableau-A VIII-1 Résultats de l'analyse modale (FDD) sur Artemis Extractor (Bâtiment administratif – HRDP)

			
Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
Fréquence en Hz 2,94	Fréquence en Hz 3,56	Fréquence en Hz 4,59	Fréquence en Hz 62,94

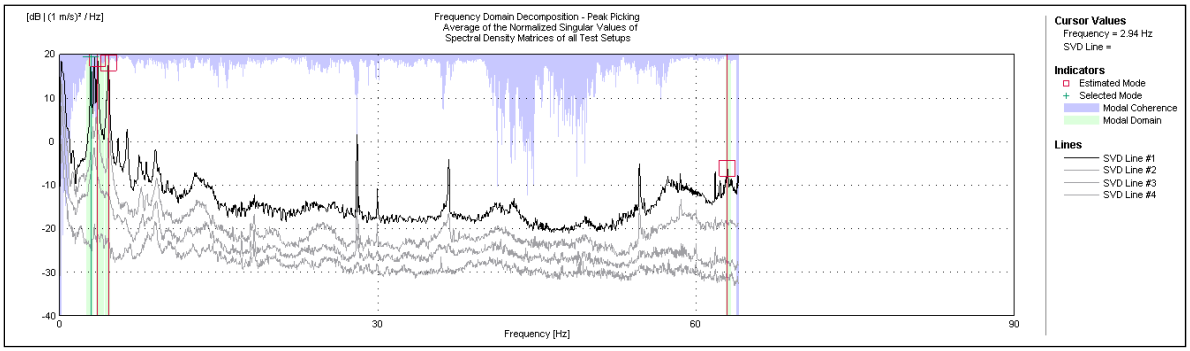


Figure-A VIII-3 Identification des fréquences de vibration sur Artemis Extractor

Tableau-A VIII-2 Résultats de l'analyse modale (FDD) sur Artemis Modal

Mode	Frequency [Hz]	Std. Frequency [Hz]	Damping Ratio [%]	Std. Damping Ratio [%]	Comment	Creation Date & Time
FDD Mode 1	2,94	0	0	0	Found Automatically	11-01-2014 21:41:57
FDD Mode 2	3,56	0	0	0	Found Automatically	11-01-2014 21:41:57
FDD Mode 3	4,59	0	0	0	Found Automatically	11-01-2014 21:41:57
FDD Mode 4	62,94	0	0	0	Found Automatically	11-01-2014 21:41:57

Tableau-A VIII-3 Validation des résultats de l'analyse modale par analyse EFDD sur Artemis Modal

Mode	Frequency [Hz]	Std. Frequency [Hz]	Damping Ratio [%]	Std. Damping Ratio [%]	Comment	Creation Date & Time
EFDD Mode 1	2,95	< 0,01	1,26	0,28	Found Automatically	11-01-2014 21:45:23
EFDD Mode 2	3,57	< 0,01	1,35	0,36	Found Automatically	11-01-2014 21:45:23
EFDD Mode 3	4,65	0,12	1,09	0,44	Found Automatically	11-01-2014 21:45:23
EFDD Mode 4	6,14	0,51	2,14	2,41	Found Automatically	11-01-2014 21:45:23
EFDD Mode 5	51,40	2,46	0	0,40	Found Automatically	11-01-2014 21:45:23
EFDD Mode 6	53,30	2,21	0	1,30	Found Automatically	11-01-2014 21:45:23
EFDD Mode 7	54,67	< 0,01	0,07	< 0,01	Found Automatically	11-01-2014 21:45:23
EFDD Mode 8	63,59	0,48	1,03	1,51	Found Automatically	11-01-2014 21:45:24

ANNEXE IX

EXEMPLE DE CALCULS DES INDICES SRI POUR LES CFO

Tableau-A IX-1 Variation du risque des CFO (SRI) pour un bâtiment de période inférieure à 0,2s - 10% en 50 ans

	RG		**0,12**				**0,15**			**0,2**			**0,26**			**0,3**		
	RB		**1**				**1**			**1,1**			**1,2**			**1,3**		
Sous-systèmes	**Nom du CFO**	**Type**	**VA**	**C**	**Risque sismique sol A**		**VB**	**Risque sismique sol B**		**VC**	**Risque sismique sol C**		**VD**	**Risque sismique sol D**		**VE**	**Risque sismique sol E**	
			Pointage	**Pointage**	**R=V*C**	**Risque**	**Pointage**	**R=V*C**	**Risque**	**Pointage**	**R=V*C**	**Risque**	**Pointage**	**R=V*C**	**Risque**	**Pointage**	**R=V*C**	**Risque**
Système de chauffage	Système de pompes	PLO	0,16	11	2	F	0,21	2	F	0,31	3	F	0,44	5	F	0,55	6	F
	Chaudière 1	MÉC	1,10	11	12	F	1,43	16	F	2,09	23	M	2,96	33	M	3,71	41	M
	Chaudière 2	MÉC	1,10	11	12	F	1,43	16	F	2,09	23	M	2,96	33	M	3,71	41	M
	Chaudière 3 (électrique)	É&IT	1,10	11	12	F	1,43	16	F	2,09	23	M	2,96	33	M	3,71	41	M
	Réservoir eau chaude 1	MÉC	0,90	11	10	F	1,13	12	F	1,65	18	M	2,34	26	M	2,93	32	M
	Réservoir eau chaude 2	MÉC	0,90	11	10	F	1,13	12	F	1,65	18	M	2,34	26	M	2,93	32	M
	Réservoir eau chaude 3	MÉC	0,90	11	10	F	1,13	12	F	1,65	18	M	2,34	26	M	2,93	32	M
	Chaudière à vapeur 1	MÉC	1,10	11	12	F	1,43	16	F	2,09	23	M	2,96	33	M	3,71	41	M
	Chaudière à vapeur 2	MÉC	1,10	11	12	F	1,43	16	F	2,09	23	M	2,96	33	M	3,71	41	M
	Préparateur à accumulation	MÉC	0,90	11	10	F	1,13	12	F	1,65	18	M	2,34	26	M	2,93	32	M
	Système de pompes	MÉC	0,45	16	7	F	0,59	9	F	0,86	14	F	1,22	19	M	1,52	24	M
Système de conditionnement d'air	Tuyauterie eau froide	PLO	0,66	11	7	F	0,86	9	F	1,25	14	F	1,78	20	M	2,22	24	M
	Refroidisseur 1	MÉC	0,89	11	10	F	1,16	13	F	1,69	19	M	2,40	26	M	3,00	33	M
	Refroidisseur 2	MÉC	0,89	11	10	F	1,16	13	F	1,69	19	M	2,40	26	M	3,00	33	M
	Refroidisseur 3	MÉC	0,40	21	8	F	0,53	11	F	0,77	16	F	1,09	23	M	1,37	29	M
	Boitier CVCA	MÉC	0,89	11	10	F	1,16	13	F	1,69	19	M	2,40	26	M	3,00	33	M
	Équipements de ventilation	MÉC	0,89	11	10	F	1,16	13	F	1,69	19	M	2,40	26	M	3,00	33	M
	Panneau de filtration	É&IT	0,44	20	9	F	0,56	11	F	0,81	16	F	1,15	23	M	1,44	29	M
	Dispositif UPS	MÉC	0,61	20	12	F	0,80	16	F	1,17	23	M	1,65	33	M	2,07	41	M

Légende : Plomberie (PLO), Mécanique (MÉC), Électrique et Télécommunication (É&IT)

Tableau-A IX-2Variation du risque des CFO (SRI) pour un bâtiment de période inférieure à 0,2s - 2% en 50 ans

	RG			**0,30**			**0,38**			**0,51**			**0,67**			**0,78**		
	RB			**1**			**1**			**1,1**			**1,2**			**1,3**		
Sous-systèmes	**Nom du CFO**	**Type**	**C**	**VA**	**Risque sismique sol A**		**VB**	**Risque sismique sol B**		**VC**	**Risque sismique sol C**		**VD**	**Risque sismique sol D**		**VE**	**Risque sismique sol E**	
			Pointage	**Pointage**	**R=V*C**	**Risque**	**Pointage**	**R=V*C**	**Risque**	**Pointage**	**R=V*C**	**Risque**	**Pointage**	**R=V*C**	**Risque**	**Pointage**	**R=V*C**	**Risque**
Système de chauffage	Système de pompes	PLO	11	0,42	5	F	0,53	6	F	0,79	9	F	1,13	12	F	1,42	16	F
	Chaudière 1	MÉC	11	2,83	31	M	3,61	40	M	5,33	59	M	7,64	84	É	9,63	106	É
	Chaudière 2	MÉC	11	2,83	31	M	3,61	40	M	5,33	59	M	7,64	84	É	9,63	106	É
	Chaudière 3 (électrique)	É&IT	11	2,83	31	M	3,61	40	M	5,33	59	M	7,64	84	É	9,63	106	É
	Réservoir eau chaude 1	MÉC	11	2,23	25	M	2,85	31	M	4,21	46	M	6,03	66	É	7,61	84	É
	Réservoir eau chaude 2	MÉC	11	2,23	25	M	2,85	31	M	4,21	46	M	6,03	66	É	7,61	84	É
	Réservoir eau chaude 3	MÉC	11	2,23	25	M	2,85	31	M	4,21	46	M	6,03	66	É	7,61	84	É
	Chaudière à vapeur 1	MÉC	11	2,83	31	M	3,61	40	M	5,33	59	M	7,64	84	É	9,63	106	É
	Chaudière à vapeur 2	MÉC	11	2,83	31	M	3,61	40	M	5,33	59	M	7,64	84	É	9,63	106	É
	Préparateur à accumulation	MÉC	11	2,23	25	M	2,85	31	M	4,21	46	M	6,03	66	É	7,61	84	É
	Système de pompes	MÉC	16	1,16	19	M	1,48	24	M	2,19	35	M	3,14	50	M	3,95	63	É
Système de conditionnement d'air	Tuyauterie eau froide	PLO	11	1,70	19	M	2,17	24	M	3,20	35	M	4,58	50	M	5,78	64	É
	Refroidisseur 1	MÉC	11	2,29	25	M	2,93	32	M	4,32	48	M	6,19	68	É	7,81	86	É
	Refroidisseur 2	MÉC	11	2,29	25	M	2,93	32	M	4,32	48	M	6,19	68	É	7,81	86	É
	Refroidisseur 3	MÉC	21	1,04	22	M	1,33	28	M	1,96	41	M	2,81	59	M	3,55	75	É
	Boitier CVCA	MÉC	11	2,29	25	M	2,93	32	M	4,32	48	M	6,19	68	É	7,81	86	É
	Équipements de ventilation	MÉC	11	2,29	25	M	2,93	32	M	4,32	48	M	6,19	68	É	7,81	86	É
	Panneau de filtration	É&IT	20	1,10	22	M	1,41	28	M	2,08	42	M	2,97	59	M	3,75	75	É
	Dispositif UPS	MÉC	20	1,58	32	M	2,01	40	M	2,97	59	M	4,26	85	É	5,37	107	É
	Dispositif de contrôle	MÉC	20	1,58	32	M	2,01	40	M	2,97	59	M	4,26	85	É	5,37	107	É

Tableau-A IX-3 Variation du risque des CFO (SRI) pour un bâtiment de période comprise entre 0,2 et 0,5s – 10% en 50 ans

RG			**0,12**				**0,15**			**0,2**			**0,26**			**0,3**		
RB			**1,1**				**1,2**			**1,2**			**1,3**			**1,4**		
Sous-systèmes	**Nom du CFO**	**Type**	**VA**	**C**	**Risque sismique sol A**		**VB**	**Risque sismique sol B**		**VC**	**Risque sismique sol C**		**VD**	**Risque sismique sol D**		**VE**	**Risque sismique sol E**	
			Pointage	**Pointage**	**R=V*C**	**Risque**	**Pointage**	**R=V*C**	**Risque**	**Pointage**	**R=V*C**	**Risque**	**Pointage**	**R=V*C**	**Risque**	**Pointage**	**R=V*C**	**Risque**
Système de chauffage	Système de pompes	PLO	0,18	11	2	F	0,25	3	F	0,34	4	F	0,47	5	F	0,59	6	F
	Chaudière 1	MÉC	1,21	11	13	F	1,71	19	M	2,28	25	M	3,21	35	M	3,99	44	M
	Chaudière 2	MÉC	1,21	11	13	F	1,71	19	M	2,28	25	M	3,21	35	M	3,99	44	M
	Chaudière 3 (électrique)	É&IT	1,21	11	13	F	1,71	19	M	2,28	25	M	3,21	35	M	3,99	44	M
	Réservoir eau chaude 1	MÉC	0,95	11	10	F	1,35	15	F	1,80	20	M	2,54	28	M	3,15	35	M
	Réservoir eau chaude 2	MÉC	0,95	11	10	F	1,35	15	F	1,80	20	M	2,54	28	M	3,15	35	M
	Réservoir eau chaude 3	MÉC	0,95	11	10	F	1,35	15	F	1,80	20	M	2,54	28	M	3,15	35	M
	Chaudière à vapeur 1	MÉC	1,21	11	13	F	1,71	19	M	2,28	25	M	3,21	35	M	3,99	44	M
	Chaudière à vapeur 2	MÉC	1,21	11	13	F	1,71	19	M	2,28	25	M	3,21	35	M	3,99	44	M
	Préparateur à accumulation	MÉC	0,95	11	10	F	1,35	15	F	1,80	20	M	2,54	28	M	3,15	35	M
	Système de pompes	MÉC	0,50	16	8	F	0,70	11	F	0,94	15	F	1,32	21	M	1,64	26	M
Système de conditionnement d'air	Tuyauterie eau froide	PLO	0,72	11	8	F	1,03	11	F	1,37	15	F	1,93	21	M	2,39	26	M
	Refroidisseur 1	MÉC	0,98	11	11	F	1,39	15	F	1,85	20	M	2,60	29	M	3,23	36	M
	Refroidisseur 2	MÉC	0,98	11	11	F	1,39	15	F	1,85	20	M	2,60	29	M	3,23	36	M
	Refroidisseur 3	MÉC	0,44	21	9	F	0,63	13	F	0,84	18	M	1,18	25	M	1,47	31	M
	Boitier CVCA	MÉC	0,98	11	11	F	1,39	15	F	1,85	20	M	2,60	29	M	3,23	36	M
	Équipements de ventilation	MÉC	0,98	11	11	F	1,39	15	F	1,85	20	M	2,60	29	M	3,23	36	M
	Panneau de filtration	É&IT	0,47	20	9	F	0,67	13	F	0,89	18	M	1,25	25	M	1,55	31	M
	Dispositif UPS	MÉC	0,67	20	13	F	0,95	19	M	1,27	25	M	1,79	36	M	2,23	45	M
	Dispositif de contrôle	MÉC	0,67	20	13	F	0,95	19	M	1,27	25	M	1,79	36	M	2,23	45	M

Tableau-A IX-4 Variation du risque des CFO (SRI) pour un bâtiment de période comprise entre 0,2 et 0,5s – 2% en 50 ans

	RG		**0,30**				**0,38**			**0,51**			**0,67**			**0,78**		
	RB		**1,1**				**1,2**			**1,2**			**1,3**			**1,4**		
Sous-systèmes	**Nom du CFO**	**Type**	**C**	**VA**	**Risque sismique sol A**		**VB**	**Risque sismique sol B**		**VC**	**Risque sismique sol C**		**VD**	**Risque sismique sol D**		**VE**	**Risque sismique sol E**	
			Pointage	**Pointage**	**R=V*C**	**Risque**	**Pointage**	**R=V*C**	**Risque**	**Pointage**	**R=V*C**	**Risque**	**Pointage**	**R=V*C**	**Risque**	**Pointage**	**R=V*C**	**Risque**
Système de chauffage	Système de pompes	PLO	11	0,46	5	F	0,64	7	F	0,86	9	F	1,22	13	F	1,53	17	F
	Chaudière 1	MÉC	11	3,11	34	M	4,33	48	M	5,81	64	M	8,27	91	É	10,37	114	É
	Chaudière 2	MÉC	11	3,11	34	M	4,33	48	M	5,81	64	M	8,27	91	É	10,37	114	É
	Chaudière 3 (électrique)	É&IT	11	3,11	34	M	4,33	48	M	5,81	64	M	8,27	91	É	10,37	114	É
	Réservoir eau chaude 1	MÉC	11	2,46	27	M	3,42	38	M	4,59	50	M	6,53	72	É	8,19	90	É
	Réservoir eau chaude 2	MÉC	11	2,46	27	M	3,42	38	M	4,59	50	M	6,53	72	É	8,19	90	É
	Réservoir eau chaude 3	MÉC	11	2,46	27	M	3,42	38	M	4,59	50	M	6,53	72	É	8,19	90	É
	Chaudière à vapeur 1	MÉC	11	3,11	34	M	4,33	48	M	5,81	64	M	8,27	91	É	10,37	114	É
	Chaudière à vapeur 2	MÉC	11	3,11	34	M	4,33	48	M	5,81	64	M	8,27	91	É	10,37	114	É
	Préparateur à accumulation	MÉC	11	2,46	27	M	3,42	38	M	4,59	50	M	6,53	72	É	8,19	90	É
	Système de pompes	MÉC	16	1,28	20	M	1,78	28	M	2,39	38	M	3,40	54	M	4,26	68	É
Système de conditionnement d'air	Tuyauterie eau froide	PLO	11	1,87	21	M	2,60	29	M	3,49	38	M	4,96	55	M	6,22	68	É
	Refroidisseur 1	MÉC	11	2,52	28	M	3,51	39	M	4,71	52	M	6,71	74	É	8,41	92	É
	Refroidisseur 2	MÉC	11	2,52	28	M	3,51	39	M	4,71	52	M	6,71	74	É	8,41	92	É
	Refroidisseur 3	MÉC	21	1,15	24	M	1,60	34	M	2,14	45	M	3,05	64	M	3,82	80	É
	Boitier CVCA	MÉC	11	2,52	28	M	3,51	39	M	4,71	52	M	6,71	74	É	8,41	92	É
	Équipements de ventilation	MÉC	11	2,52	28	M	3,51	39	M	4,71	52	M	6,71	74	É	8,41	92	É
	Panneau de filtration	É&IT	20	1,21	24	M	1,69	34	M	2,26	45	M	3,22	64	M	4,04	81	É
	Dispositif UPS	MÉC	20	1,74	35	M	2,42	48	M	3,24	65	É	4,62	92	É	5,79	116	É
	Dispositif de contrôle	MÉC	20	1,74	35	M	2,42	48	M	3,24	65	É	4,62	92	É	5,79	116	É

rapport-gratuit.com

Tableau-A IX-5 Variation du risque des CFO (SRI) pour un bâtiment de période supérieure à 0,5s – 10% en 50 ans

	RG		**0,12**				**0,15**			**0,20**			**0,26**			**0,3**		
	RB		**1,2**				**1,3**			**1,3**			**1,4**			**1,5**		
Sous-systèmes	**Nom du CFO**	**Type**	**C**	**VA**	**Risque sismique sol A**		**VB**	**Risque sismique sol B**		**VC**	**Risque sismique sol C**		**VD**	**Risque sismique sol D**		**VE**	**Risque sismique sol E**	
			Pointage	**Pointage**	**R=V*C**	**Risque**	**Pointage**	**R=V*C**	**Risque**	**Pointage**	**R=V*C**	**Risque**	**Pointage**	**R=V*C**	**Risque**	**Pointage**	**R=V*C**	**Risque**
Système de chauffage	Système de pompes	PLO	11	0,19	2	F	0,27	3	F	0,36	4	F	0,51	6	F	0,63	7	F
	Chaudière 1	MÉC	11	1,32	14	F	1,85	20	M	2,47	27	M	3,46	38	M	4,28	47	M
	Chaudière 2	MÉC	11	1,32	14	F	1,85	20	M	2,47	27	M	3,46	38	M	4,28	47	M
	Chaudière 3 (électrique)	É&IT	11	1,32	14	F	1,85	20	M	2,47	27	M	3,46	38	M	4,28	47	M
	Réservoir eau chaude 1	MÉC	11	1,04	11	F	1,46	16	F	1,95	21	M	2,73	30	M	3,38	37	M
	Réservoir eau chaude 2	MÉC	11	1,04	11	F	1,46	16	F	1,95	21	M	2,73	30	M	3,38	37	M
	Réservoir eau chaude 3	MÉC	11	1,04	11	F	1,46	16	F	1,95	21	M	2,73	30	M	3,38	37	M
	Chaudière à vapeur 1	MÉC	11	1,32	14	F	1,85	20	M	2,47	27	M	3,46	38	M	4,28	47	M
	Chaudière à vapeur 2	MÉC	11	1,32	14	F	1,85	20	M	2,47	27	M	3,46	38	M	4,28	47	M
	Préparateur à accumulation	MÉC	11	1,04	11	F	1,46	16	F	1,95	21	M	2,73	30	M	3,38	37	M
	Système de pompes	MÉC	16	0,54	9	F	0,76	12	M	1,01	16	F	1,42	23	M	1,76	28	M
Système de conditionnement d'air	Tuyauterie eau froide	PLO	11	0,79	9	F	1,11	12	M	1,48	16	F	2,07	23	M	2,57	28	M
	Refroidisseur 1	MÉC	11	1,07	12	F	1,50	17	M	2,00	22	M	2,80	31	M	3,47	38	M
	Refroidisseur 2	MÉC	11	1,07	12	F	1,50	17	M	2,00	22	M	2,80	31	M	3,47	38	M
	Refroidisseur 3	MÉC	21	0,49	10	F	0,68	14	M	0,91	19	M	1,27	27	M	1,58	33	M
	Boitier CVCA	MÉC	11	1,07	12	F	1,50	17	M	2,00	22	M	2,80	31	M	3,47	38	M
	Équipements de ventilation	MÉC	11	1,07	12	F	1,50	17	M	2,00	22	M	2,80	31	M	3,47	38	M
	Panneau de filtration	É&IT	20	0,51	10	F	0,72	14	F	0,96	19	M	1,35	27	M	1,67	33	M
	Dispositif UPS	MÉC	20	0,73	15	F	1,03	21	M	1,38	28	M	1,93	39	M	2,39	48	M
	Dispositif de contrôle	MÉC	20	0,73	15	F	1,03	21	M	1,38	28	M	1,93	39	M	2,39	48	M

Tableau-A IX-6 Variation du risque des CFO (SRI) pour un bâtiment de période supérieure à 0,5s – 2% en 50 ans

	RG		**0,3**				**0,38**			**0,51**			**0,67**			**0,78**		
	RB		**1,2**				**1,3**			**1,3**			**1,4**			**1,5**		
Sous-systèmes	**Nom du CFO**	**Type**	**C**	**VA**	**Risque sismique sol A**		**VB**	**Risque sismique sol B**		**VC**	**Risque sismique sol C**		**VD**	**Risque sismique sol D**		**VE**	**Risque sismique sol E**	
			Pointage	**Pointage**	**R=V*C**	**Risque**	**Pointage**	**R=V*C**	**Risque**	**Pointage**	**R=V*C**	**Risque**	**Pointage**	**R=V*C**	**Risque**	**Pointage**	**R=V*C**	**Risque**
Système de chauffage	Système de pompes	PLO	11	0,50	6	F	0,69	8	F	0,93	10	F	1,31	14	F	1,64	18	F
	Chaudière 1	MÉC	11	3,40	37	M	4,69	52	M	6,30	69	É	8,91	98	É	11,12	122	É
	Chaudière 2	MÉC	11	3,40	37	M	4,69	52	M	6,30	69	É	8,91	98	É	11,12	122	É
	Chaudière 3 (électrique)	É&IT	11	3,40	37	M	4,69	52	M	6,30	69	É	8,91	98	É	11,12	122	É
	Réservoir eau chaude 1	MÉC	11	2,68	29	M	3,71	41	M	4,97	55	M	7,04	77	É	8,78	97	É
	Réservoir eau chaude 2	MÉC	11	2,68	29	M	3,71	41	M	4,97	55	M	7,04	77	É	8,78	97	É
	Réservoir eau chaude 3	MÉC	11	2,68	29	M	3,71	41	M	4,97	55	M	7,04	77	É	8,78	97	É
	Chaudière à vapeur 1	MÉC	11	3,40	37	M	4,69	52	M	6,30	69	É	8,91	98	É	11,12	122	É
	Chaudière à vapeur 2	MÉC	11	3,40	37	M	4,69	52	M	6,30	69	É	8,91	98	É	11,12	122	É
	Préparateur à accumulation	MÉC	11	2,68	29	M	3,71	41	M	4,97	55	M	7,04	77	É	8,78	97	É
	Système de pompes	MÉC	16	1,39	22	M	1,93	31	M	2,59	41	M	3,66	59	É	4,56	73	É
Système de conditionnement d'air	Tuyauterie eau froide	PLO	11	2,04	22	M	2,82	31	M	3,78	42	M	5,35	59	É	6,67	73	É
	Refroidisseur 1	MÉC	11	2,75	30	M	3,80	42	M	5,11	56	M	7,22	79	É	9,01	99	É
	Refroidisseur 2	MÉC	11	2,75	30	M	3,80	42	M	5,11	56	M	7,22	79	É	9,01	99	É
	Refroidisseur 3	MÉC	21	1,25	26	M	1,73	36	M	2,32	49	M	3,28	69	É	4,10	86	É
	Boitier CVCA	MÉC	11	2,75	30	M	3,80	42	M	5,11	56	M	7,22	79	É	9,01	99	É
	Équipements de ventilation	MÉC	11	2,75	30	M	3,80	42	M	5,11	56	M	7,22	79	É	9,01	99	É
	Panneau de filtration	É&IT	20	1,32	26	M	1,83	37	M	2,45	49	M	3,47	69	É	4,33	87	É
	Dispositif UPS	MÉC	20	1,89	38	M	2,62	52	M	3,51	70	É	4,97	99	É	6,20	124	É
	Dispositif de contrôle	MÉC	20	1,89	38	M	2,62	52	M	3,51	70	É	4,97	99	É	6,20	124	É

ANNEXE X

DÉTAILS DE CALCUL DE LA PROBABILITÉ DE DOMMAGES

Tableau-A X-1 Variation de la probabilité de dommage - Structure S1L

Niveaux de dommage	Structure S1L - Probabilité de dommage en %									
	10% en 50 ans									
	Sol A		Sol B		Sol C		Sol D		Sol E	
	0,16s	0,28s	0,16s	0,28s	0,16s	0,28s	0,16s	0,28s	0,16s	0,28s
Aucun	100	99,98	100	99,96	100	99,90	100	99,79	100	99,63
Faible	0	0,02	0	0,04	0	0,09	0	0,19	0	0,33
Modéré	0	0	0	0	0	0	0	0,02	0	0,05
Étendu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Complet	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2% en 50 ans										
Aucun	99,99	98,83	99,97	98,21	99,94	96,54	99,90	94,33	99,83	91,68
Faible	0,01	0,99	0,03	1,48	0,05	2,76	0,09	4,35	0,15	6,16
Modéré	0	0,18	0	0,30	0	0,67	0,01	1,24	0,02	2,01
Étendu	0	0	0	0,01	0	0,02	0	0,06	0	0,11
Complet	0	0	0	0,00	0	0,01	0	0,02	0	0,04

Tableau-A X-2 Variation de la probabilité de dommage - Structure S1M

Niveaux de dommage	Structure S1M - Probabilité de dommage en %									
	10% en 50 ans									
	Sol A		Sol B		Sol C		Sol D		Sol E	
	0,34s	0,5s	0,34s	0,5s	0,34s	0,5s	0,34s	0,5s	0,34s	0,5s
Aucun	0	0	0	0	99,99	99,95	99,98	99,76	99,94	98,54
Faible	0	0	0	0	0,01	0,04	0,02	0,20	0,05	1,13
Modéré	0	0	0	0	0	0,01	0	0,04	0,01	0,29
Étendu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,03
Complet	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2% en 50 ans										
Aucun	99,87	99,85	99,73	99,56	99,20	97,13	98,36	92,38	96,59	78,88
Faible	0,11	0,12	0,22	0,36	0,63	2,17	1,27	5,42	2,55	13,36
Modéré	0,02	0,02	0,05	0,08	0,15	0,62	0,33	1,92	0,76	6,51
Étendu	0	0	0	0,01	0,01	0,07	0,03	0,24	0,08	1,08
Complet	0	0	0	0	0	0,01	0,01	0,04	0,04	0,18

Tableau-A X-3 Variation de la probabilité de dommage - Structure S1H

Niveaux de dommage	Structure S1H - Probabilité de dommage en %														
	10% en 50 ans														
	Sol A			Sol B			Sol C			Sol D			Sol E		
	0,62s	**1,05s**	**1,20s**	**0,62s**	**1,05s**	**1,20s**	**0,62s**	**1,05s**	**1,20s**	**0,62s**	**1,05s**	**1,20s**	**0,62s**	**1,05s**	**1,20s**
Aucun	100	100	99,99	100	99,99	99,98	99,99	99,88	99,75	99,93	99,50	99,00	99,41	97,27	95,32
Faible	0	0	0	0	0,01	0,02	0,01	0,10	0,22	0,07	0,43	0,85	0,51	2,22	3,70
Modéré	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,03	0,01	0,07	0,15	0,08	0,49	0,94
Étendu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,03
Complet	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01
2% en 50 ans															
Aucun	99,96	99,69	99,35	99,85	99,35	98,71	98,71	94,99	91,90	96,03	89,76	84,30	86,80	73,26	64,30
Faible	0,04	0,27	0,56	0,13	0,56	1,08	1,08	3,94	6,15	3,17	7,61	11,10	9,54	17,24	21,33
Modéré	0	0,04	0,09	0,02	0,09	0,20	0,20	1,02	1,85	0,77	2,49	4,29	3,44	8,63	12,74
Étendu	0	0	0	0	0	0	0	0,03	0,07	0,02	0,11	0,24	0,18	0,71	1,33
Complet	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,02	0,01	0,03	0,07	0,05	0,17	0,31

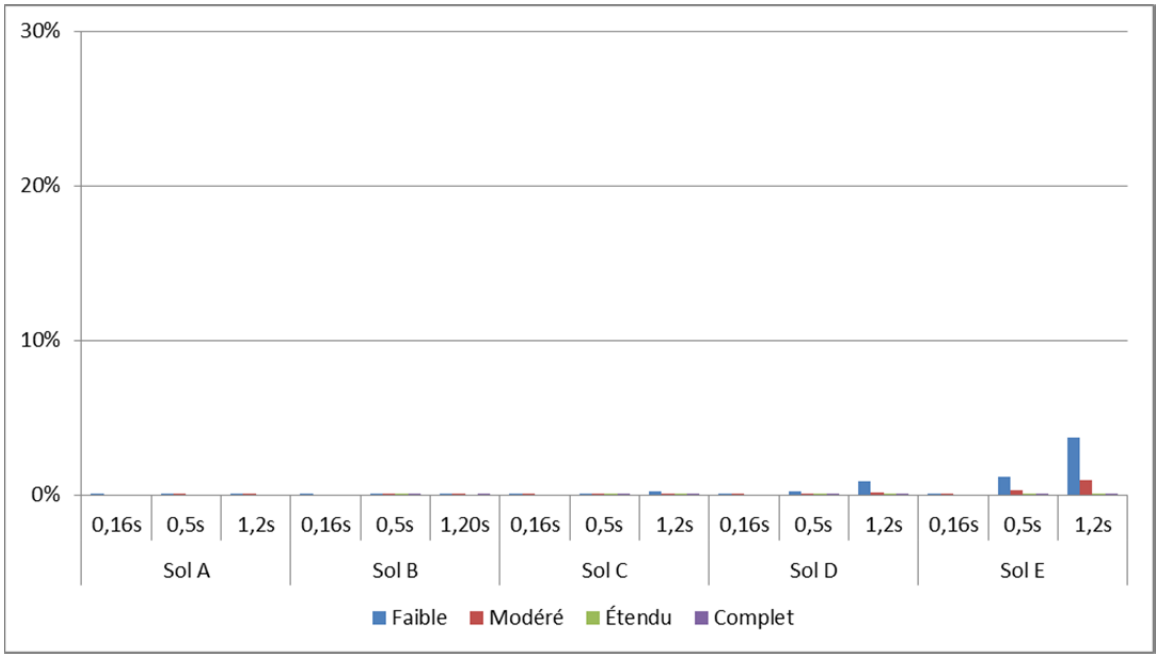


Figure-A X-1 Répartition de la probabilité de dommages pour la structure - 10% en 50 ans

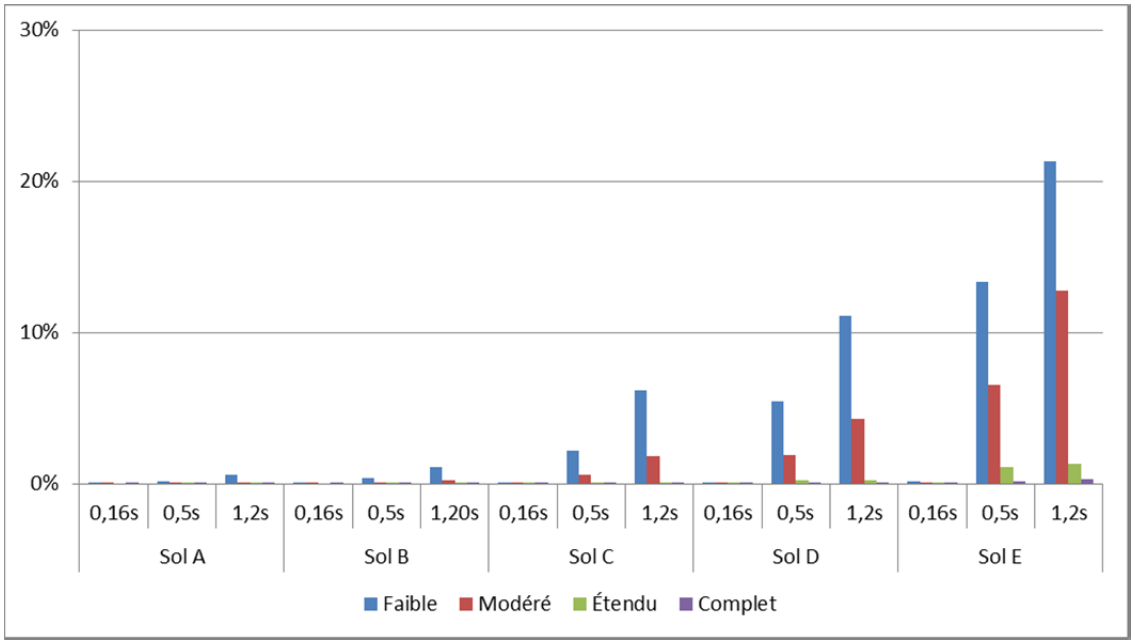


Figure-A X-2 Répartition de la probabilité de dommages pour la structure - 2% en 50 ans

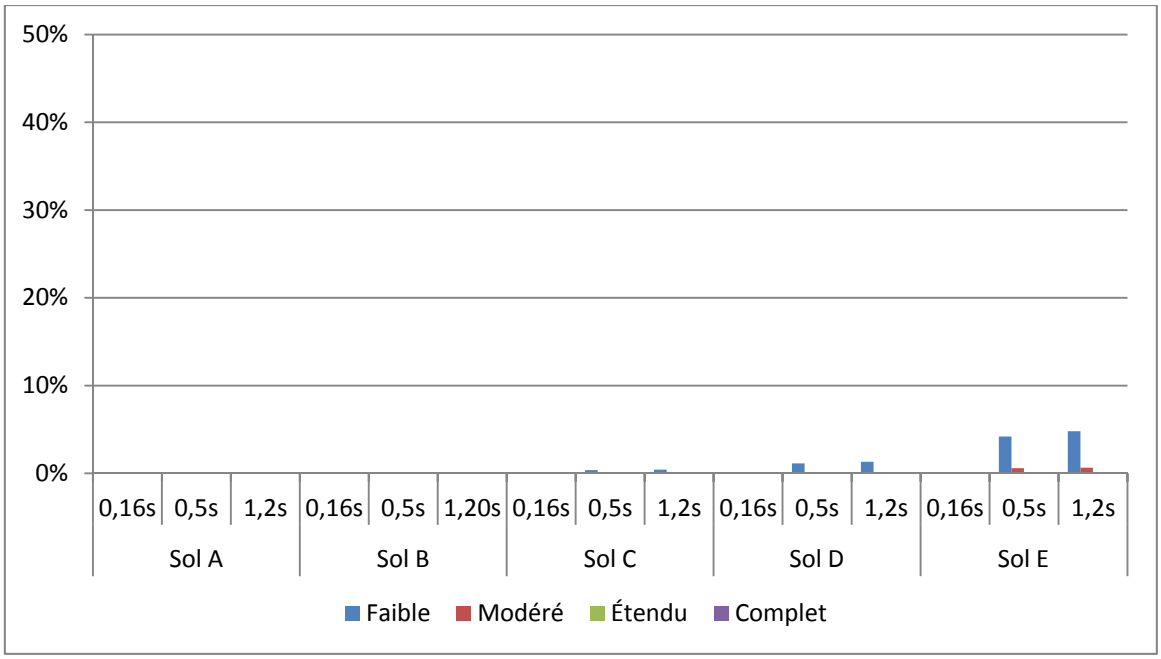


Figure-A X-3 Répartition de la probabilité de dommage reliée aux CFO sensibles au déplacement en fonction de la catégorie d'emplacement 10% en 50 ans

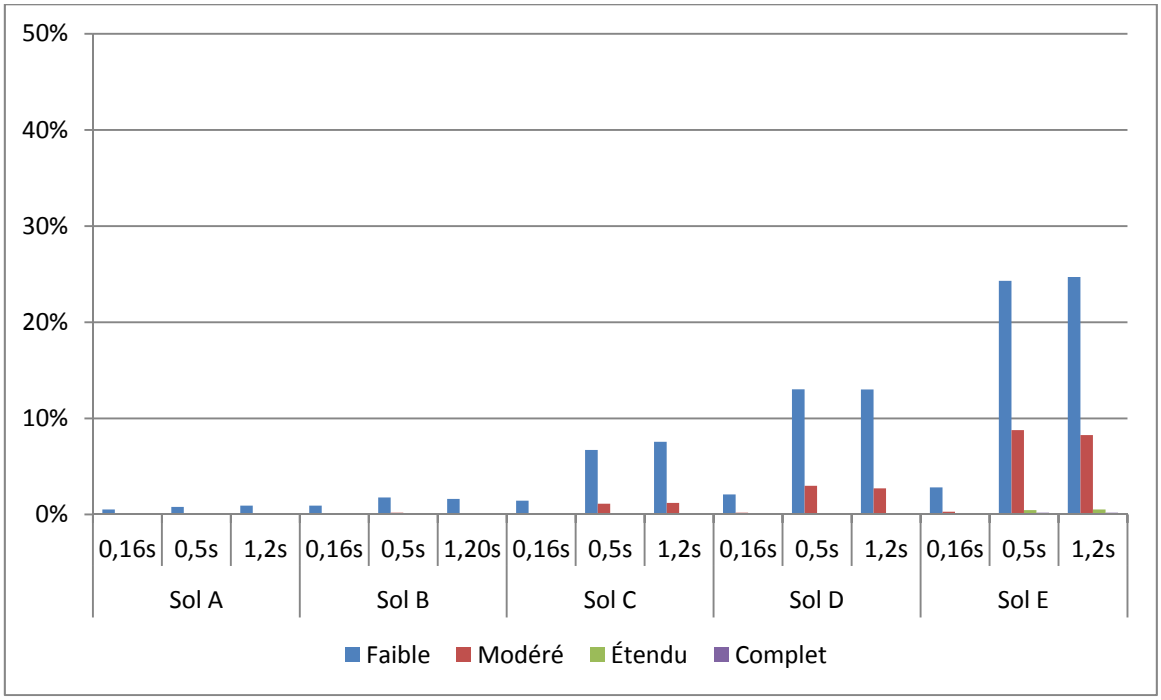


Figure-A X-4 Répartition de la probabilité de dommage reliée aux CFO sensibles au déplacement en fonction de la catégorie d'emplacement 2% en 50 ans

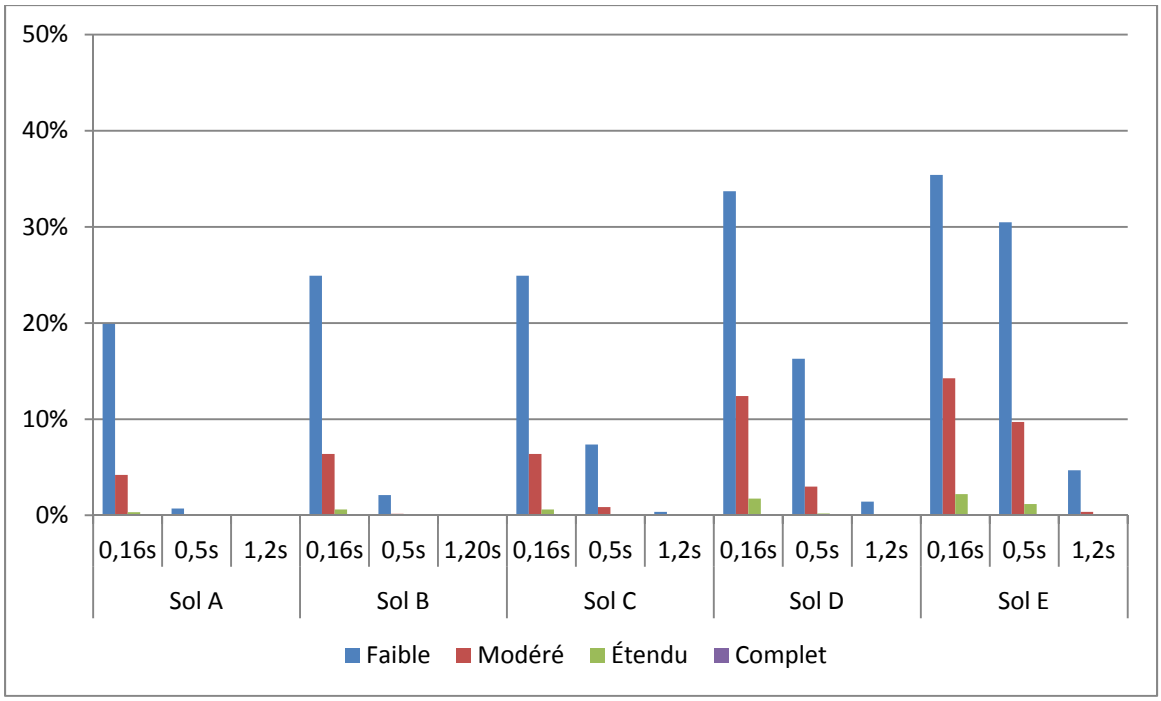


Figure-A X-5 Répartition de la probabilité de dommage reliée aux CFO sensibles à l'accélération en fonction de la catégorie d'emplacement – 10% en 50 ans

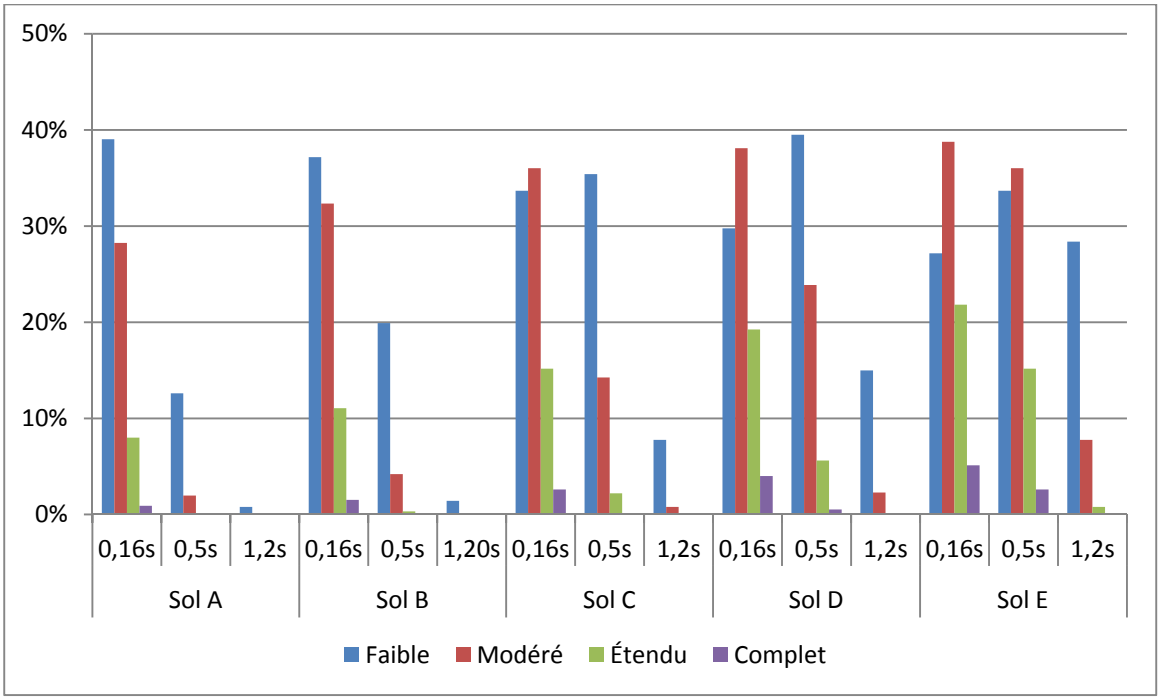


Figure-A X-6 Répartition de la probabilité de dommage reliée aux CFO sensibles à l'accélération en fonction de la catégorie d'emplacement – 2% en 50 ans

ANNEXE XI

DÉTAILS DE CALCUL DE L'IFP

Rapport-Gratuit.com

Tableau-A XI-1 Exemple de variation de l'IFP selon la catégorie d'emplacement (cas d'un système CVCA central, T=0,5s, 2% en 50 ans, Niveau de dommage faible)

			Nom du CFO	SRI	Cs	SRI	Cs	S	P		IPR		IFP - sol A				IFP - sol E			
S2	S3	S4		sol A		sol E			Sol A	Sol E	Sol A	Sol E	S4	S3	S2	S1	S4	S3	S2	S1
Système de chauffage .OU.	Production eau chaude et vapeur .OU.		Système de pompes	5	0,1	17	0,3	A	0,126	0,337	0,013	0,101	0,013	0,014	0,087	0,221	0,101	0,233	0,577	0,933
		Système de chaudières .ET.	Chaudière 1	34	0,3	114	1,0	A	0,126	0,337	0,038	0,337	0,0001				0,038			
			Chaudière 2	34	0,3	114	1,0	A	0,126	0,337	0,038	0,337								
			Chaudière 3 (électrique)	34	0,3	114	1,0	A	0,126	0,337	0,038	0,337								
		Système de réserve .ET.	Réservoir eau chaude 1	27	0,3	90	1,0	A	0,126	0,337	0,038	0,337	0,0001				0,038			
			Réservoir eau chaude 2	27	0,3	90	1,0	A	0,126	0,337	0,038	0,337								
			Réservoir eau chaude 3	27	0,3	90	1,0	A	0,126	0,337	0,038	0,337								
		Système de chaudières à vapeur . ET.	Chaudière à vapeur 1	34	0,3	114	1,0	A	0,126	0,337	0,038	0,337	0,001				0,113			
			Chaudière à vapeur 2	34	0,3	114	1,0	A	0,126	0,337	0,038	0,337								
	Production eau chaude sanitaire .OU.		Préparateur à accumulation	27	0,3	90	1,0	A	0,126	0,337	0,038	0,337	0,074	0,074			0,448	0,448		
			Système de pompes	20	0,3	68	0,5	A	0,126	0,337	0,038	0,168								
Système de conditionnement d'air .OU.	Système de refroidisseurs .OU.		Tuyauterie eau froide	21	0,3	68	0,5	D	0,008	0,243	0,002	0,122	0,002	0,002	0,147		0,122	0,138	0,842	
		.ET.	Refroidisseur 1	28	0,3	92	1,0	A	0,126	0,337	0,038	0,337	0,0001				0,019			
			Refroidisseur 2	28	0,3	92	1,0	A	0,126	0,337	0,038	0,337								
			Refroidisseur 3	24	0,3	80	0,5	A	0,126	0,337	0,038	0,168								
	Système de ventilation et traitement d'air .OU.	Système de ventilation	Boiter CVCA	28	0,3	92	1,0	A	0,126	0,337	0,038	0,337	0,074	0,145			0,560	0,816		
			Équipements de ventilation	28	0,3	92	1,0	A	0,126	0,337	0,038	0,337								
		Système de filtration	Panneau de filtration	24	0,3	81	0,5	A	0,126	0,337	0,038	0,168	0,076				0,582			
			Dispositif UPS	35	0,3	116	1,0	D	0,008	0,243	0,002	0,243								
			Dispositif de contrôle	35	0,3	116	1,0	A	0,126	0,337	0,038	0,337								

Tableau-A XI-2 Variation de l'IFP pour un ensemble de systèmes selon la catégorie d'emplacement et un aléa de 10% en 50 ans

Slight période 0,50s - 10%

CVCA central					Maintien des fonctions vitales					Évacuation sécuritaire					Protection incendie				
A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
0,0049	0,0274	0,1210	0,2786	0,4735	0,0208	0,0654	0,2677	0,6207	0,8645	0,0085	0,0421	0,1691	0,5452	0,6022	0,0086	0,0258	0,0899	0,1940	0,4463
Électricité					CVCA local 1					CVCA local 2					Gaz médicaux				
A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
0,0029	0,0089	0,0322	0,0788	0,1683	0,0154	0,0456	0,1518	0,3326	0,5416	0,0042	0,0126	0,0437	0,0956	0,1750	0,0042	0,0127	0,0444	0,0976	0,1819

Moderate période 0,50s - 10%

CVCA central					Maintien des fonctions vitales					Évacuation sécuritaire					Protection incendie				
A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
0,0002	0,0019	0,0147	0,0560	0,1744	0,0010	0,0048	0,0356	0,1594	0,4582	0,0004	0,0030	0,0210	0,2122	0,2356	0,0004	0,0018	0,0107	0,0367	0,1551
Électricité					CVCA local 1					CVCA local 2					Gaz médicaux				
A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
0,0001	0,0006	0,0037	0,0132	0,0459	0,0008	0,0033	0,0189	0,0697	0,2122	0,0002	0,0009	0,0052	0,0178	0,0575	0,0002	0,0009	0,0052	0,0180	0,0586

Extensive période 0,50s - 10%

CVCA central					Maintien des fonctions vitales					Évacuation sécuritaire					Protection incendie				
A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
0,0000	0,0000	0,0006	0,0038	0,0221	0,0000	0,0001	0,0015	0,0114	0,0702	0,0000	0,0001	0,0008	0,0278	0,0303	0,0000	0,0000	0,0004	0,0024	0,0188
Électricité					CVCA local 1					CVCA local 2					Gaz médicaux				
A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
0,0000	0,0000	0,0001	0,0008	0,0048	0,0000	0,0001	0,0008	0,0047	0,0278	0,0000	0,0000	0,0002	0,0012	0,0070	0,0000	0,0000	0,0002	0,0012	0,0070

Complete période 0,50s - 10%

CVCA central					Maintien des fonctions vitales					Évacuation sécuritaire					Protection incendie				
A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0011	0,0000	0,0000	0,0000	0,0003	0,0033	0,0000	0,0000	0,0000	0,0013	0,0015	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0010
Électricité					CVCA local 1					CVCA local 2					Gaz médicaux				
A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0003	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0013	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0003	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0003

Tableau-A XI-3 Variation de l'IFP pour un ensemble de systèmes selon la catégorie d'emplacement et un aléa de 2% en 50 ans

Slight période 0,50s - 2%																				
	CVCA central					**Maintien des fonctions vitales**					**Évacuation sécuritaire**					**Protection incendie**				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
	0,2215	0,3325	0,6787	0,8693	0,9331	0,5004	0,7630	0,9604	0,9915	0,9923	0,2772	0,4585	0,8078	0,9245	0,9857	0,1521	0,3038	0,5593	0,7456	0,8543
	Électricité					**CVCA local 1**					**CVCA local 2**					**Gaz médicaux**				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
	0,0601	0,1005	0,2157	0,4841	0,6359	0,2673	0,3923	0,7207	0,8445	0,8854	0,0743	0,1161	0,3188	0,3515	0,4592	0,0758	0,1558	0,2835	0,3853	0,3666
Moderate période 0,50s - 2%																				
	CVCA central					**Maintien des fonctions vitales**					**Évacuation sécuritaire**					**Protection incendie**				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
	0,0371	0,0784	0,3377	0,6464	0,9290	0,1008	0,2539	0,7033	0,9327	0,9948	0,0475	0,1153	0,4455	0,8981	0,9728	0,0243	0,0687	0,2487	0,4772	0,7487
	Électricité					**CVCA local 1**					**CVCA local 2**					**Gaz médicaux**				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
	0,0087	0,0191	0,0705	0,2411	0,4433	0,0464	0,0972	0,3799	0,6460	0,8834	0,0117	0,0251	0,1368	0,2227	0,4852	0,0119	0,0337	0,1148	0,2347	0,3678
Extensive période 0,350 - 2%																				
	CVCA central					**Maintien des fonctions vitales**					**Évacuation sécuritaire**					**Protection incendie**				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
	0,0021	0,0062	0,0582	0,1898	0,5924	0,0059	0,0223	0,1657	0,4481	0,8676	0,0026	0,0092	0,0812	0,5667	0,6980	0,0013	0,0053	0,0395	0,1204	0,3493
	Électricité					**CVCA local 1**					**CVCA local 2**					**Gaz médicaux**				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
	0,0004	0,0013	0,0092	0,0471	0,1343	0,0026	0,0078	0,0684	0,2042	0,5524	0,0007	0,0020	0,0218	0,0552	0,2267	0,0007	0,0026	0,0176	0,0559	0,1532
Complete période 0,50s - 2%																				
	CVCA central					**Maintien des fonctions vitales**					**Évacuation sécuritaire**					**Protection incendie**				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
	0,0000	0,0002	0,0036	0,0192	0,1330	0,0001	0,0007	0,0107	0,0526	0,2812	0,0001	0,0003	0,0053	0,1291	0,1804	0,0000	0,0002	0,0026	0,0127	0,0722
	Électricité					**CVCA local 1**					**CVCA local 2**					**Gaz médicaux**				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
	0,0000	0,0001	0,0007	0,0051	0,0254	0,0001	0,0002	0,0043	0,0209	0,1244	0,0000	0,0001	0,0013	0,0052	0,0411	0,0000	0,0001	0,0011	0,0053	0,0264

ANNEXE XII

DONNÉES POUR LA TRANSFORMATION DES SIGNAUX

Tableau-A XII-1 Modèle de couche de sol considéré pour la simulation numérique
Tiré de Chouinard et Rosset (2007, p.515)

Episodes of deposit	Nomenclature	Type of deposit	Unit Weight kg/m^3	S-Wave Velocity m/s
LATE DEPOSIT	Bog-pond deposit	Peat, muck, filled ground	2000	150
FLUVIAL DEPOSIT	St-Lawrence deposits	sand, gravel	2054	400
MARINE DEPOSIT	Offshore sediments	Clay-silt, marine shells	1720	150
GLACIAL DEPOSIT	Fort Covington Till	Undifferentiated till	2080	600
	Intermediate Till	Sand, gravel, silt, cobble	2160	800
	Malone Till	Boulders, sand, silt	2400	1000
ROCK	Trenton Limestone	Limestone	2730	2300
	Utica Shale	Shale	2670	2100

Tableau-A XII-2 Modèles retenus pour les forages – Classe argile
Adapté de Madriz (2005, p. 110)

	Description du sol	**Nomenclature**	**Hauteur (m)**	**Poids spécifique (kN/m^3)**	**Vs (m/s)**
	Forage 74F081-0036 avec facteur d'amplification de 0,88 à 1,25				
1	Sable (dépôt de cours d'eau)	St-Lawrence deposit	2,13	20,14	400
2	Sable argileux + présence de coquillage (dépôt de cours d'eau)	Offshore sediments	2,59	16,90	150
3	Argile - plasticité moyenne (dépôt marin)	Offshore sediments	18,75	16,90	150
4	Sable et silt graveleux (dépôt glaciaire)	Intermediate till	0,76	21,19	800
	Forage 77F059-0021 avec facteur d'amplification de 1,5 à 2				
1	Argile et sable graveleux (dépôt marin)	Offshore sediments	1,37	16,90	150
2	Argile - plasticité moyenne (dépôt marin)	Offshore sediments	3,2	16,90	150
3	Argile - plasticité moyenne – présence de coquillages (dépôt marin)	Offshore sediments	3,35	16,90	150
4	Argile (dépôt marin)	Offshore sediments	5,18	16,90	150
5	Argile (dépôt marin)	Offshore sediments	0,61	16,90	150
6	Argile - plasticité moyenne, présence de coquillage (dépôt marin)	Offshore sediments	3,05	16,90	150
7	Argile et gravier (dépôt glaciaire)	Undifferentiated till	1,52	20,40	600
8	Argile et silt sableux (dépôt glaciaire)	Undifferentiated till	3,05	20,40	600

Tableau-A XII-3 Modèles retenus pour les forages – Till de base
Adapté de (Madriz (2005, p. 116))

	Description du sol	Nomenclature	Hauteur (m)	Densité (kN/m^3)	Vs (m/s)
	Forage 84F001-6460 avec facteur d'amplification de 1,68 à 6,79				
1	Remblai graveleux	Late sediments	0,90	19,62	150
2	Argile silteuse (dépôt marin)	Offshore sediments	0,50	16,90	150
3	Argile - plasticité moyenne (dépôt marin)	Offshore sediments	0,50	16,90	150
4	Silt et argile (dépôt glaciaire)	Undifferentiated till	3,45	20,40	600
5	Silt, un peu de sable, traces de sable (dépôt glaciaire)	Intermediate till	3,65	21,19	800
6	Silt et sable, consistance dure (dépôt glaciaire)	Intermediate till	1,00	21,19	800
7	Silt, un peu de sable, traces de sable, consistance dure (dépôt glaciaire)	Intermediate till	1,60	21,19	800
8	Silt, une peu d'argile, trace de sable (dépôt glaciaire)	Undifferentiated till	9,40	20,40	600
9	Sable, un peu de gravier, traces de silt (dépôt glaciaire)	Intermediate till	1,25	21,19	800
	Forage 84F001-6425 avec facteur d'amplification de 2,30 à 6,40				
1	Remblai graveleux (dépôt marin)	Late sediments	0,60	19,62	150
2	Argile silteuse, traces de sable (dépôt marin)	Offshore sediments	1,60	16,90	150
3	Argile silteuse(dépôt marin)	Offshore sediments	0,80	16,90	150
4	Argile et silt, consistance molle (dépôt marin)	Offshore sediments	0,70	16,90	150
5	Silt, une peu d'argile, trace de sable (dépôt glaciaire)	Undifferentiated till	18,4	20,40	600

ANNEXE XIII

DONNÉES ISSUES DES ANALYSES

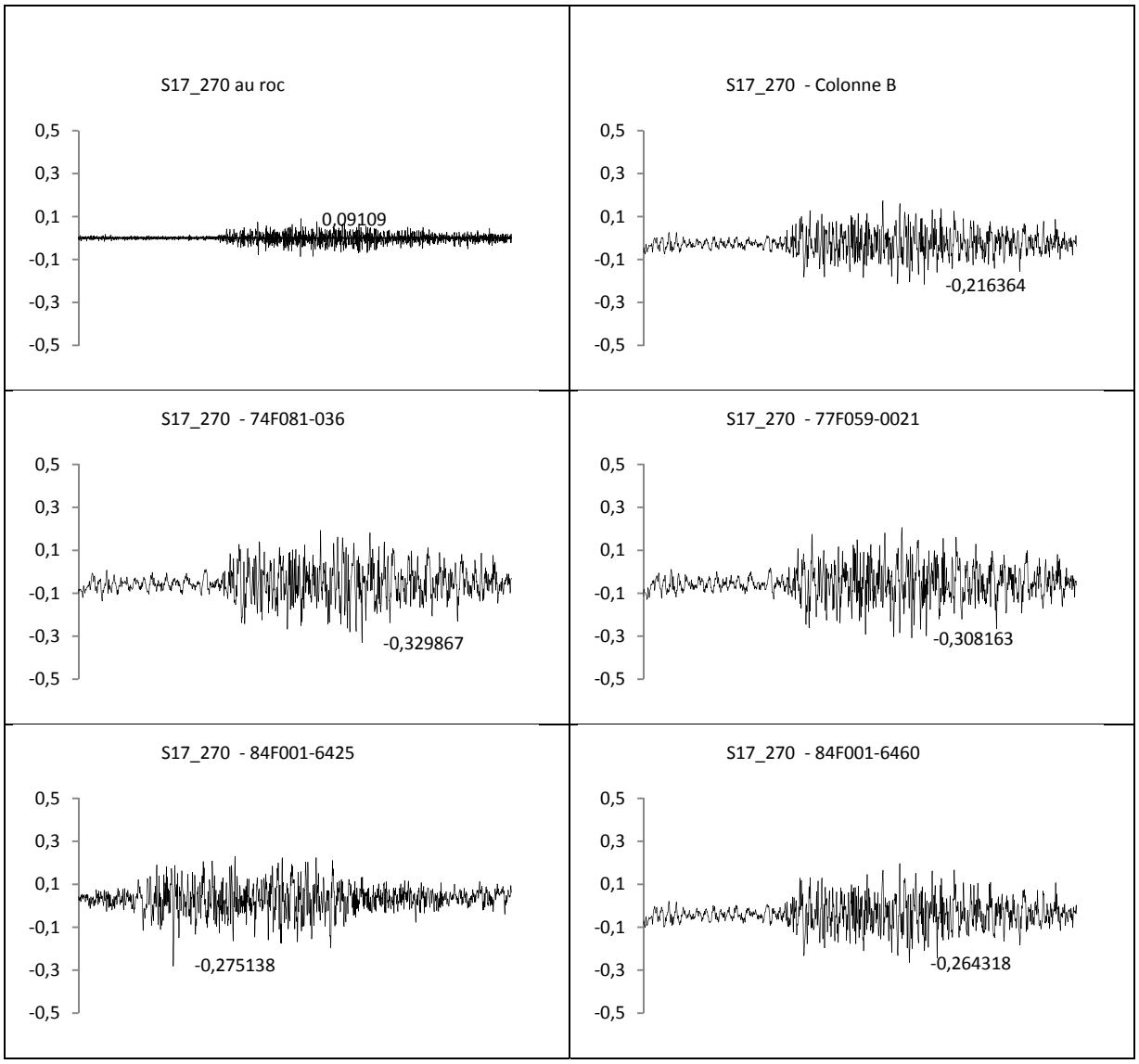


Figure-A XIII-1 Accélérogrammes séisme Saguenay-Saint-André, EO 270°
(temps : 0 – 82s)

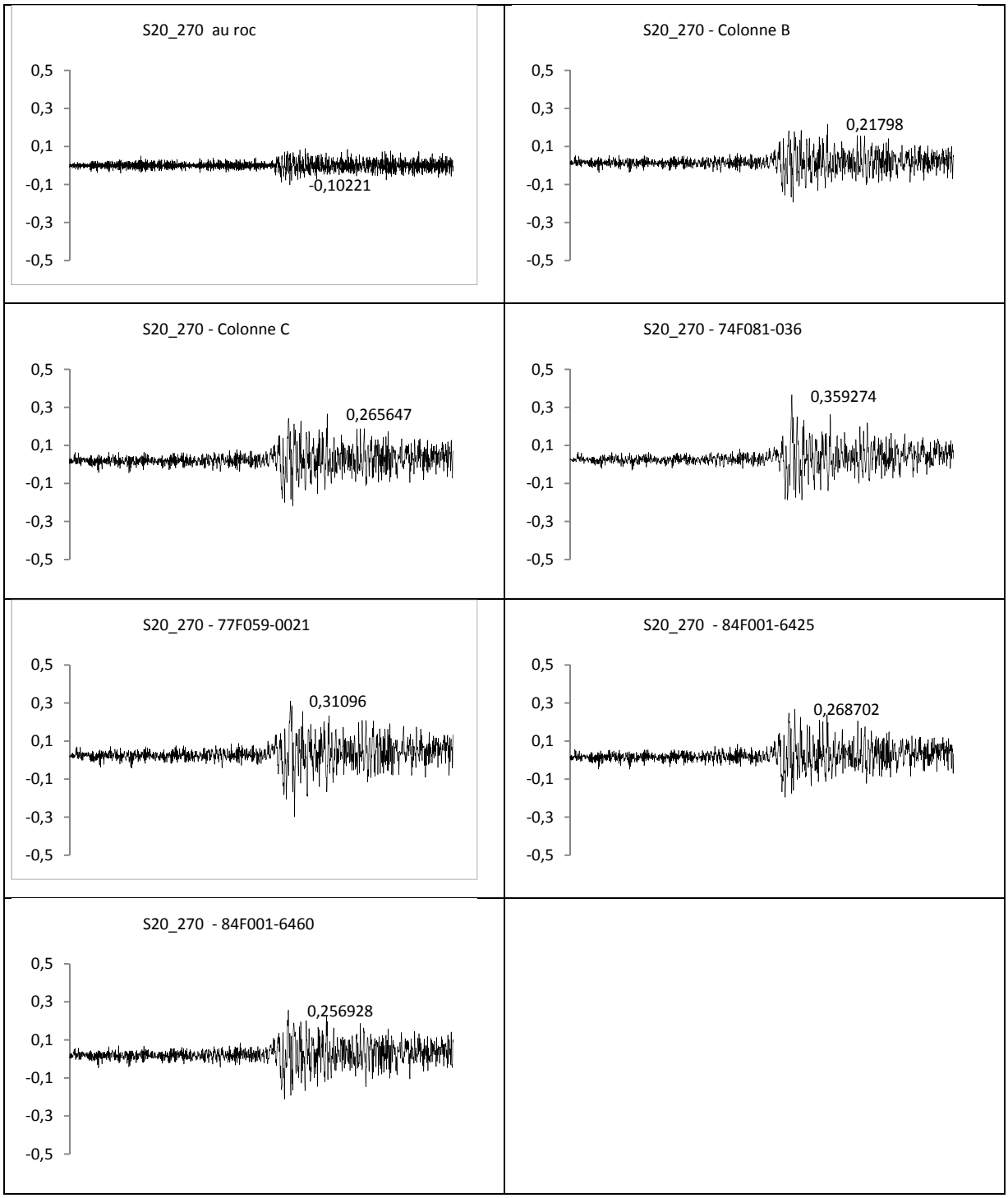


Figure-A XIII-2 Accélérogrammes séisme Saguenay-Les Éboulements, EO 270°
(temps : 0 – 40s)

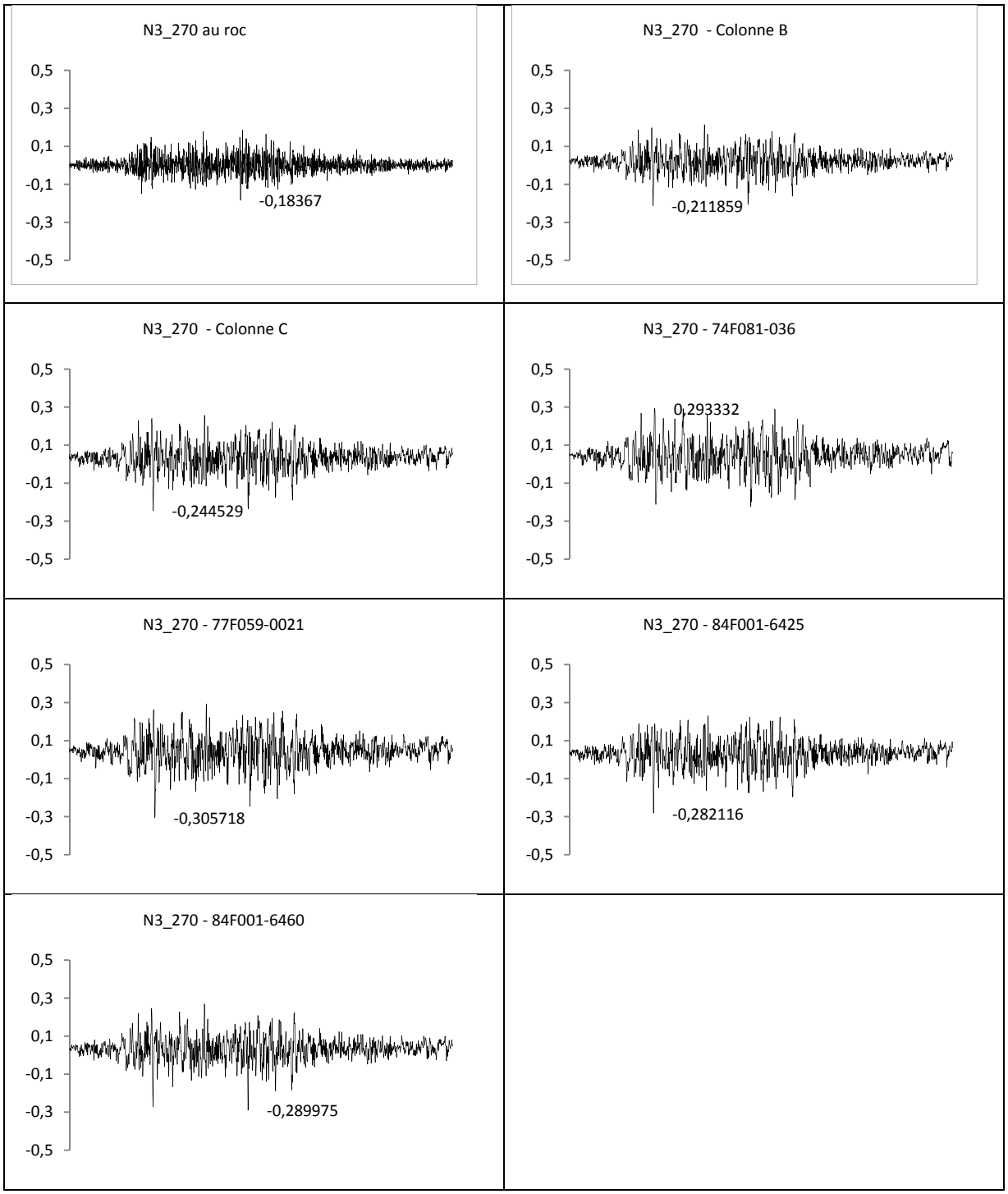


Figure-A XIII-3 Accélérogrammes séisme Nahanni – Battlement Creek, N270^{o}
(temps : 0 – 40s)

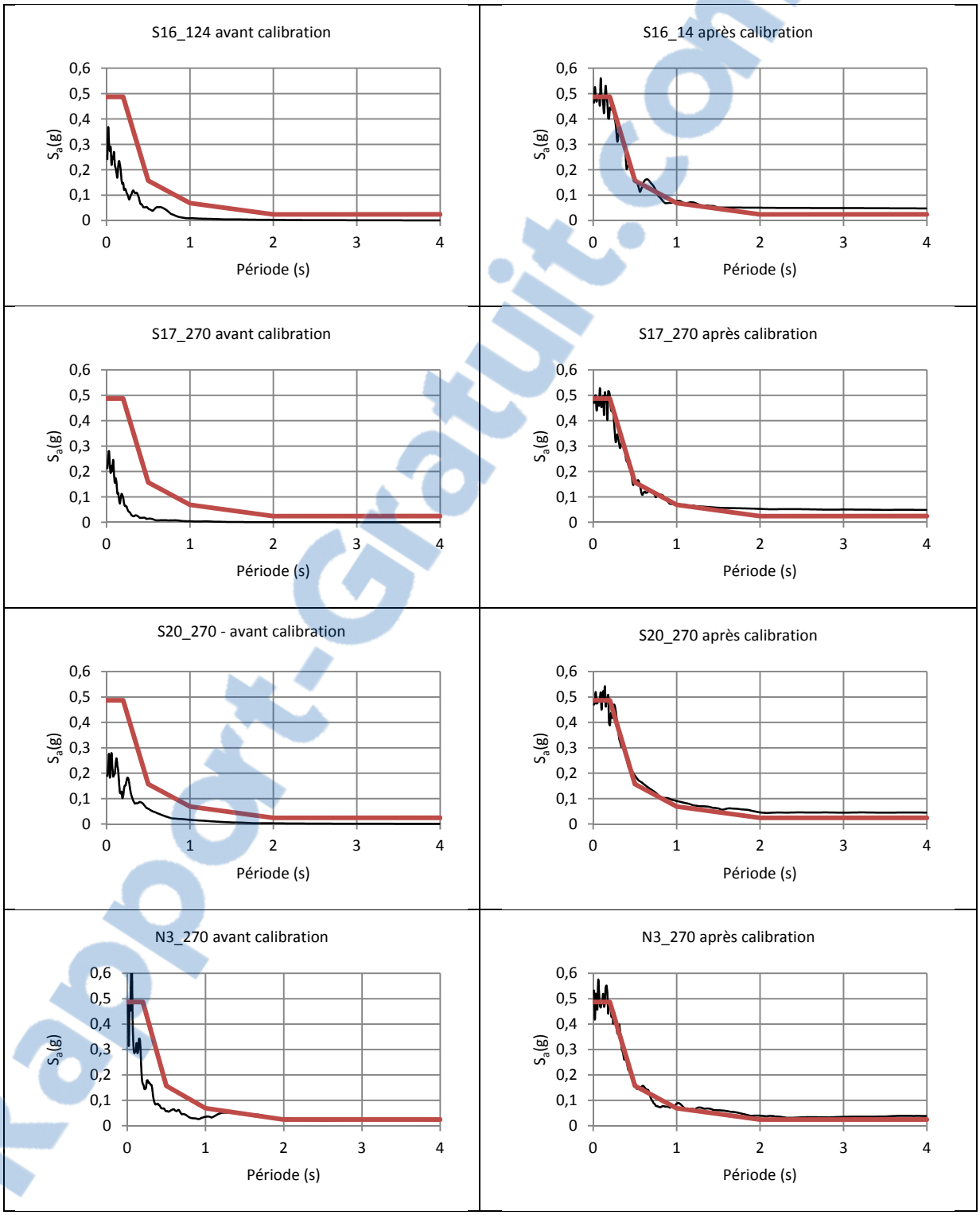


Figure-A XIII-4 Comparaison des spectres de réponses pour le roc avant et après calibration

Rapport-Gratuit.com

ANNEXE XIV

RÉSULTATS DES ANALYSES TEMPORELLES - MDOF

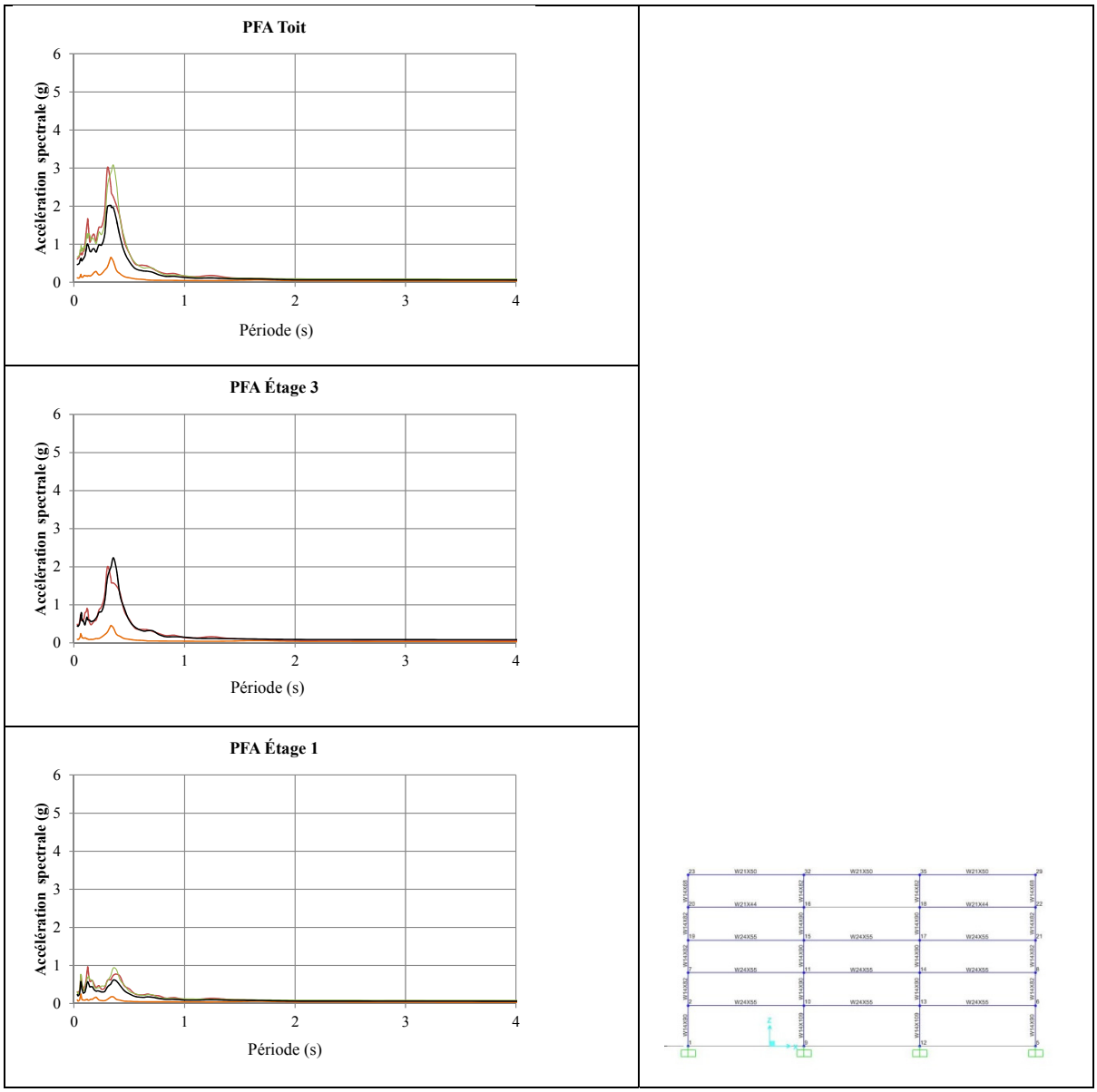


Figure-A XIV-1 Accélération spectrale au niveau de trois étages du Modèle 2 (5 étages)

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

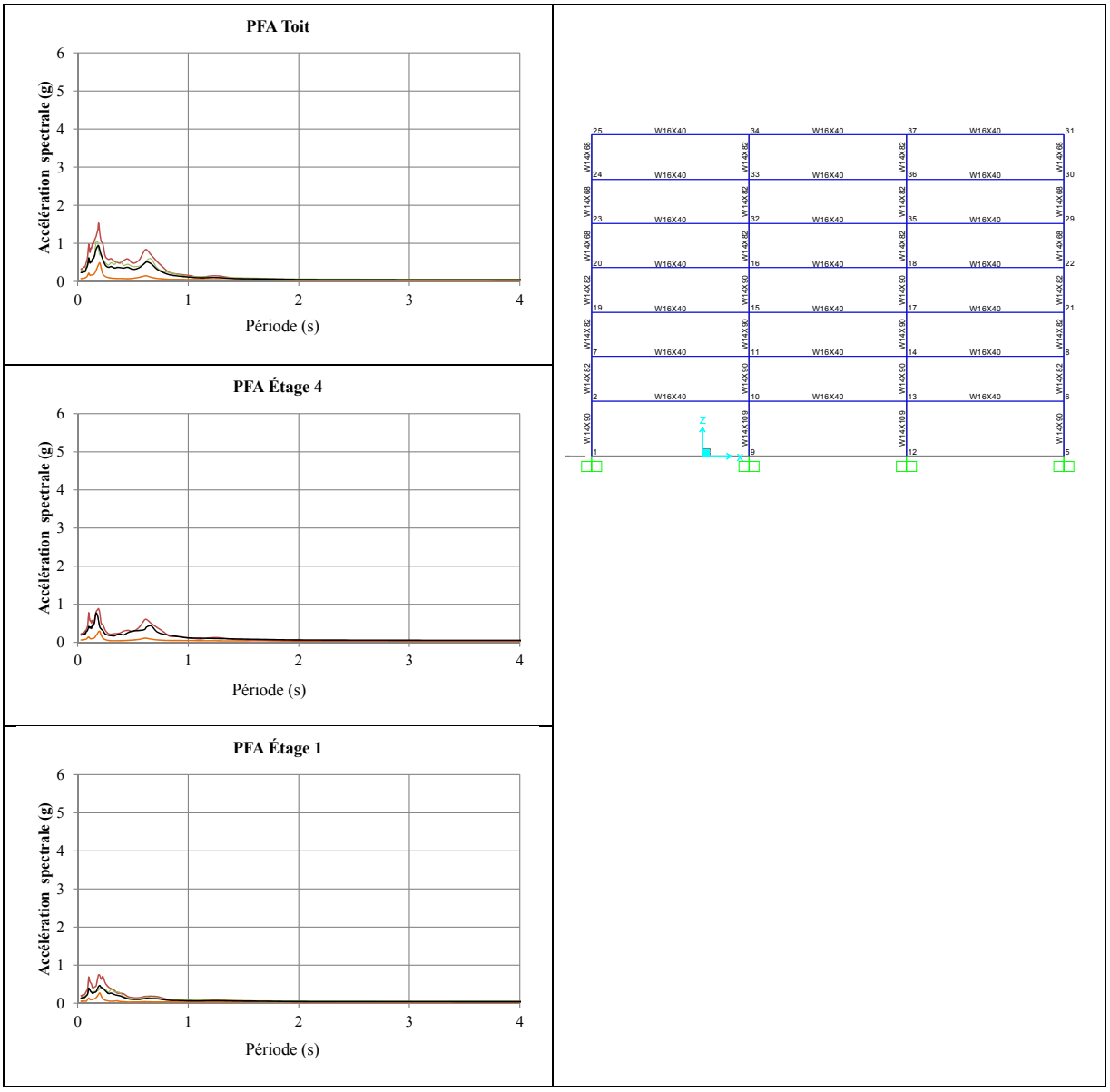


Figure-A XIV-2 Accélération spectrale au niveau de trois étages du Modèle 3 (7 étages)

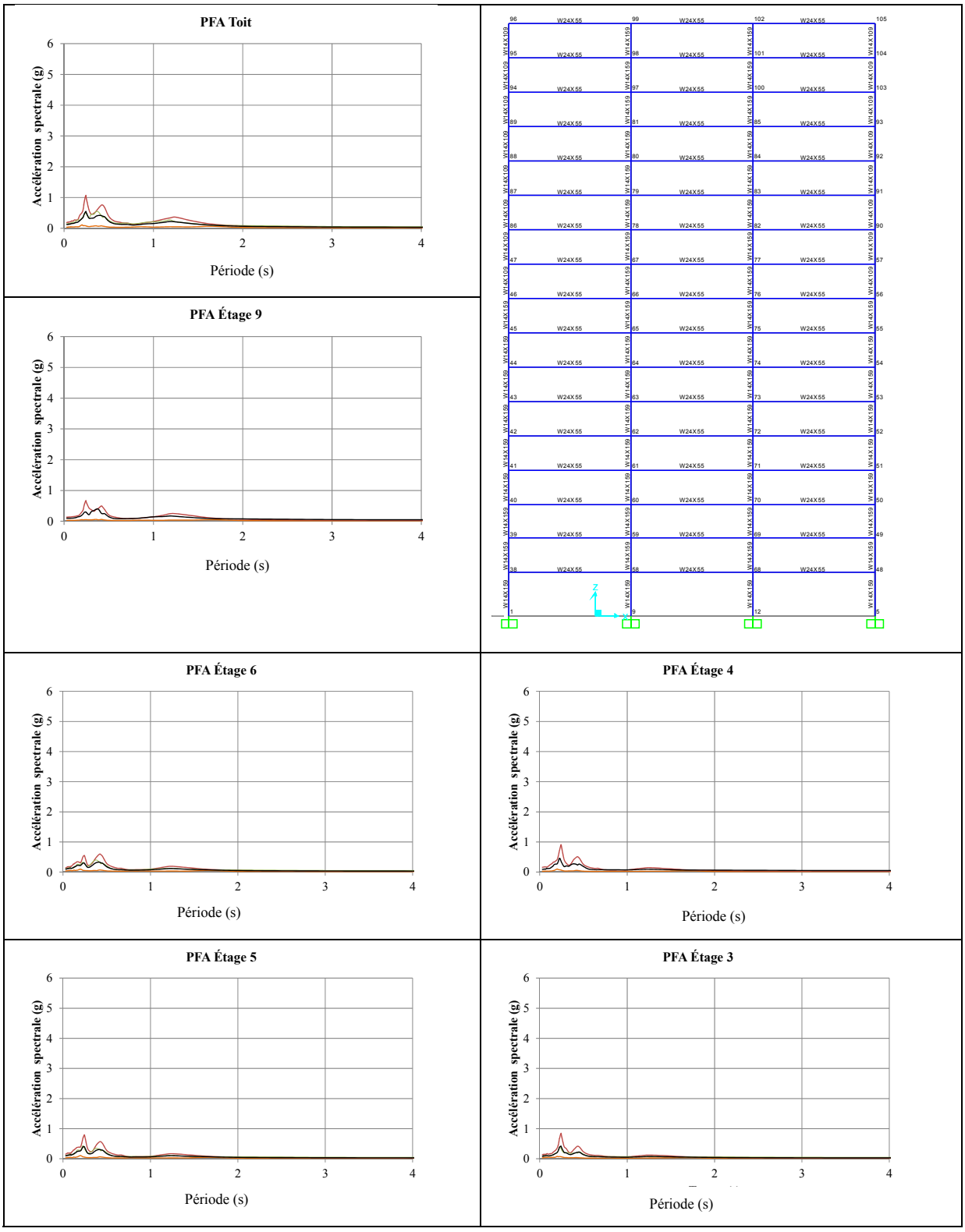


Figure-A XIV-3 Accélération spectrale au niveau de six étages du Modèle 4 (17 étages)

ANNEXE XV

RÉSULTATS DÉTAILLÉS DES ÉTUDES DE CAS

Tableau-A XV-1 Calcul de l'IFP pour le système CVCA central– Aile E et niveau de dommage « Faible »

S2	S3	S4	Nom du CFO	SRI	Cs	S	P	IPR	IFP - sol A			
									S4	S3	S2	S1
Système de chauffage	Production eau chaude et vapeur		Système de pompes	6	0,1	A	0,0079	0,0008	7,86E-04	0,001	0,005	0,015
		Système de chaudières . ET.	Chaudière 1	37	0,3	A	0,0079	0,0024	1,31E-08			
			Chaudière 2	37	0,3	A	0,0079	0,0024				
			Chaudière 3 (électrique)	37	0,3	A	0,0079	0,0024				
		Système de réserve .ET.	Réservoir eau chaude 1	29	0,3	A	0,0079	0,0024	1,31E-08			
			Réservoir eau chaude 2	29	0,3	A	0,0079	0,0024				
			Réservoir eau chaude 3	29	0,3	A	0,0079	0,0024				
		Système de chaudières à vapeur .ET.	Chaudière à vapeur 1	37	0,3	A	0,0079	0,0024	5,55E-06			
			Chaudière à vapeur 2	37	0,3	A	0,0079	0,0024				
	Production eau chaude sanitaire	.OU.	Préparateur à accumulation	29	0,3	A	0,0079	0,0024	4,71E-03	0,005		
			Système de pompes	22	0,3	A	0,0079	0,0024				
Système de conditionnement d'air	Système de refroidisseurs	.OU.	Tuyauterie eau froide	22	0,3	D	0,0000	0,0000	0,00E+00	0,000	0,009	
		.ET.	Refroidisseur 1	30	0,3	A	0,0079	0,0024	1,31E-08			
			Refroidisseur 2	30	0,3	A	0,0079	0,0024				
			Refroidisseur 3	26	0,3	A	0,0079	0,0024				
	Système de ventilation et traitement d'air	Système de ventilation .OU.	Boiter CVCA	30	0,3	A	0,0079	0,0024	4,71E-03	0,009		
			Équipements de ventilation	30	0,3	A	0,0079	0,0024				
		Système de filtration .OU.	Panneau de filtration	26	0,3	A	0,0079	0,0024	4,71E-03			
			Dispositif UPS	38	0,3	D	0,0000	0,0000				
			Dispositif de contrôle	38	0,3	A	0,0079	0,0024				

Tableau-A XV-2 Calcul de l'IFP pour le système Maintien des fonctions vitales – Ailes A et E et niveau de dommage « Faible »

S2	S3	S4	Nom du CFO	SRI	Cs	S	P	IPR	IFP - sol A			
									S4	S3	S2	S1
Système de gaz médicaux **Aile A**	Système air médical	Système compresseurs centrifugeuses .ET.	Compresseur 1	15	0,3	A	0,112735	0,03382	1,14E-03	4,58E-02	1,11E-01	0,14
			Compresseur 2	15	0,3	A	0,112735	0,03382				
		.OU.	Conduits	29	0,3	A	0,112735	0,03382	4,47E-02			
			Valves de contrôle	6	0,1	A	0,112735	0,01127				
	Système air de succion	Système de pompe à vide .ET.	Pompe 1	7	0,1	A	0,112735	0,01127	1,43E-06	3,34E-02		
			Pompe 2	7	0,1	A	0,112735	0,01127				
			Pompe 3	7	0,1	A	0,112735	0,01127				
		.OU.	Cuve à vide	7	0,1	A	0,112735	0,01127	3,34E-02			
			Conduits	6	0,1	A	0,112735	0,01127				
			Valves de contrôle	6	0,1	A	0,112735	0,01127				
			Bonbonnes d'oxygène et d'azote	27	0,3	A	0,007855	0,00236	2,36E-03			
			Panneau de contrôle	29	0,3	A	0,112735	0,03382	3,38E-02			
Système de soins de physiothérapie - **Aile E**	.OU.		Rampe de physiothérapie	3	0,1	A	0,007855	0,00079	3,92E-03			
			Équipement de traction	15	0,1	A	0,007855	0,00079				
			Lit spécialisé pour fracturés du cou	17	0,3	A	0,007855	0,00236				

S2	S3	S4	Nom du CFO	SRI	Cs	S	P	IPR	IFP - sol A			
									S4	S3	S2	S1
Systèmes soins intensifs **Aile E**	.OU.		Unités mobiles d'inhalothérapie	16	0,3	A	0,007855	0,00236	9,39E-03			
			Lits de soins intensifs	27	0,3	A	0,007855	0,00236				
			Chariots mobiles de soins avec défibrillateurs	21	0,3	A	0,007855	0,00236				
			Bras articulés Kreuzer	17	0,3	A	0,007855	0,00236				
Système de décontamination **Aile E**			Appareils de décontamination	61	0,5	A	0,007855	0,00393	2,18E-02			
			Appareils de décontamination ultrasonique	27	0,3	A	0,007855	0,00236				
			Chauffe-eau	49	0,3	A	0,007855	0,00236				
			Distributeurs de vêtements	68	0,5	A	0,007855	0,00393				
			Stérilisateurs HDL	41	0,3	A	0,007855	0,00236				
			Autoclaves	11	0,1	A	0,007855	0,00079				
			Filtres pour stérilisateurs	7	0,1	A	0,007855	0,00079				
			Machines à laver	11	0,1	A	0,007855	0,00079				
			Tables de travail	20	0,3	A	0,007855	0,00236				
			Armoires de rangement	16	0,3	A	0,007855	0,00236				

Tableau-A XV-3 Calcul de l'IFP pour le système Maintien des fonctions vitales – Ailes A et E et niveau de dommage « Modéré »

S2	S3	S4	Nom du CFO	SRI	Cs	S	P	IPR	IFP - sol A			
									S4	S3	S2	S1
Système de gaz médicaux **Aile A**	Système air médical	Système compresseurs centrifugeuses .ET.	Compresseur 1	15	0,3	A	0,014254	0,00428	1,83E-05	4,58E-02	1,42E-02	0,014
			Compresseur 2	15	0,3	A	0,014254	0,00428				
		.OU.	Conduits	29	0,3	A	0,014254	0,00428	5,70E-03			
			Valves de contrôle	6	0,1	A	0,014254	0,00143				
	Système air de succion	Système de pompe à vide .ET.	Pompe 1	7	0,1	A	0,014254	0,00143	2,90E-09	3,34E-02		
			Pompe 2	7	0,1	A	0,014254	0,00143				
			Pompe 3	7	0,1	A	0,014254	0,00143				
		.OU.	Cuve à vide	7	0,1	A	0,014254	0,00143	4,27E-03			
			Conduits	6	0,1	A	0,014254	0,00143				
			Valves de contrôle	6	0,1	A	0,014254	0,00143				
			Bonbonnes d'oxygène et d'azote	27	0,3	A	0	0	0			
			Panneau de contrôle	29	0,3	A	0,014254	0,00428	4,28E-03			
Système de soins de physiothérapie - **Aile E**	.OU.		Rampe de physiothérapie	3	0,1	A	0	0	0			
			Équipement de traction	15	0,1	A	0	0				
			Lit spécialisé pour fracturés du cou	17	0,3	A	0	0				

rapport-gratuit.com

S2	S3	S4	Nom du CFO	SRI	Cs	S	P	IPR	IFP - sol A			
									S4	S3	S2	S1
Systèmes soins intensifs **Aile E**	.OU.		Unités mobiles d'inhalothérapie	16	0,3	A	0	0	0			
			Lits de soins intensifs	27	0,3	A	0	0				
			Chariots mobiles de soins avec défibrillateurs	21	0,3	A	0	0				
			Bras articulés Kreuzer	17	0,3	A	0	0				
Système de décontamination **Aile E**			Appareils de décontamination	61	0,5	A	0	0	0			
			Appareils de décontamination ultrasonique	27	0,3	A	0	0				
			Chauffe-eau	49	0,3	A	0	0				
			Distributeurs de vêtements	68	0,5	A	0	0				
			Stérilisateurs HDL	41	0,3	A	0	0				
			Autoclaves	11	0,1	A	0	0				
			Filtres pour stérilisateurs	7	0,1	A	0	0				
			Machines à laver	11	0,1	A	0	0				
			Tables de travail	20	0,3	A	0	0				
			Armoires de rangement	16	0,3	A	0	0				

Tableau-A XV-4 Calcul de l'IFP pour le système de protection incendie – Bâtiment administratif (HRDP) et niveau de dommage « Faible »

S2	S3	S4	Nom du CFO	SRI	CS	S	P	IPR	IFP -Sol B S4	IFP -Sol B S3	IFP -Sol B S2	IFP -Sol B S1
Système de détection et d'alarme .OU.	Système de gestion des urgences .OU.			9	0,1	A	0,389	0,0389	0,05038	0,05038	0,05948	0,45811
			Ordinateur	25	0,3	D	0,012	0,0036				
			Panneau annonciateur principal	32	0,3	D	0,012	0,0036				
			Panneau secondaire	32	0,3	D	0,012	0,0036				
			Téléphone d'appel général	7	0,1	D	0,012	0,0012				
	Système de gicleurs à air .OU.		Tuyauterie	57	0,5	D	0,012	0,006	0,00958	0,00958		
			Panneau de détection et de gestion	38	0,3	D	0,012	0,0036				
Système de réponse .OU.	Système de gicleurs .OU.		Extincteur portatif	38	0,3	A	0,389	0,1167	0,1167	0,42384	0,42384	
			Tête de gicleurs	57	0,5	A	0,389	0,1945	0,1945			
			Tuyauterie	57	0,5	D	0,0120	0,006	0,006			
		Système d'eau (réseau de ville) .ET.	Ligne 1 (valve)	7	0,1	A	0,389	0,0389	0,00151			
			Ligne 2 (valve)	7	0,1	A	0,389	0,0389				
		Système pompe incendie .OU.	Pompe	48	0,3	A	0,389	0,1167	0,18409			
			Valve de contrôle	7	0,1	A	0,389	0,0389				
			Raccord pompier	7	0,1	A	0,389	0,0389				

Tableau-A XV-5 Calcul de l'IFP pour le système de protection incendie – Bâtiment administratif (HRDP) et niveau de dommage « Modéré »

S2	S3	S4	Nom du CFO	SRI	CS	S	P	IPR	IFP -Sol B			
									S4	S3	S2	S1
Système de détection et d'alarme .OU.	Système de gestion des urgences .OU.			9	0,1	A	0,20547	0,02055	0,02162	0,02162	0,02248	0,25984
			Ordinateur	25	0,3	D	0,0011	0,00033				
			Panneau annonciateur principal	32	0,3	D	0,0011	0,00033				
			Panneau secondaire	32	0,3	D	0,0011	0,00033				
			Téléphone d'appel général	7	0,1	D	0,0011	0,00011				
	Système de gicleurs à air .OU.		Tuyauterie	57	0,5	D	0,0011	0,00055	0,00088	0,00088		
			Panneau de détection et de gestion	38	0,3	D	0,0011	0,00033				
Système de réponse .OU.	Système de gicleurs .OU.		Extincteur portatif	38	0,3	A	0,20547	0,06164	0,06164	0,24281	0,24281	
			Tête de gicleurs	57	0,5	A	0,20547	0,10274	0,10274			
			Tuyauterie	57	0,5	D	0,0011	0,00055	0,00055			
		Système d'eau (réseau de ville) .ET.	Ligne 1 (valve)	7	0,1	A	0,20547	0,02055	0,00042			
			Ligne 2 (valve)	7	0,1	A	0,20547	0,02055				
		Système pompe incendie .OU.	Pompe	48	0,3	A	0,20547	0,06164	0,09981			
			Valve de contrôle	7	0,1	A	0,20547	0,02055				
			Raccord pompier	7	0,1	A	0,20547	0,02055				

Tableau-A XV-6 Calcul de l'IFP pour le système de protection incendie – Bâtiment administratif (HRDP) et niveau de dommage « Étendu »

S2	S3	S4	Nom du CFO	SRI	CS	Sensibilité	P	IPR	IFP -Sol B			
									S4	S3	S2	S1
Système de détection et d'alarme .OU.	Système de gestion des urgences .OU.			9	0,1	A	0,04205	0,00421	0,00421	0,00421	0,00421	0,05758
			Ordinateur	25	0,3	D	0	0				
			Panneau annonciateur principal	32	0,3	D	0	0				
			Panneau secondaire	32	0,3	D	0	0				
			Téléphone d'appel général	7	0,1	D	0	0				
	Système de gicleurs à air .OU.		Tuyauterie	57	0,5	D	0	0	0	0		
			Panneau de détection et de gestion	38	0,3	D	0	0				
Système de réponse .OU.	Système de gicleurs .OU.		Extincteur portatif	38	0,3	A	0,04205	0,01262	0,01262	0,0536	0,0536	
			Tête de gicleurs	57	0,5	A	0,04205	0,02103	0,02103			
			Tuyauterie	57	0,5	D	0	0	0			
		Système d'eau (réseau de ville) .ET.	Ligne 1 (valve)	7	0,1	A	0,04205	0,00421	1,8E-05			
			Ligne 2 (valve)	7	0,1	A	0,04205	0,00421				
		Système pompe incendie .OU.	Pompe	48	0,3	A	0,04205	0,01262	0,0209			
			Valve de contrôle	7	0,1	A	0,04205	0,00421				
			Raccord pompier	7	0,1	A	0,04205	0,00421				

Tableau-A XV-7 Calcul de l'IFP pour le système électrique – Bâtiment administratif (HRDP) et niveau de dommage « Faible »

S2	S3	S4	Nom du CFO	SRI	CS	S	P	IPR	IFP - Sol B			
									S4	S3	S2	S1
Alimentation de secours .OU.				0	FAUX*	D	0,0092	0	0	0	0,1955787	0,2872584
	Système de génératrices	Génératrices .ET.	Génératrice 1	37	0,3	A	0,3717	0,11151	0	0,1945018		
			Génératrice 2	FAUX	FAUX	A	0,3717	0				
			Génératrice 3	FAUX	FAUX	A	0,3717	0				
		.OU.	Support de batteries	62	0,5	D	0,0092	0,00461	0,1933456			
			Contrôle des génératrices	62	0,5	D	0,0092	0,00461				
			Réservoir de combustible	72	0,5	A	0,3717	0,18585				
			Plateau de câbles	27	0,3	D	0,0092	0,002768	0,0027682	0,0027682		
Réseau de ville			Plateau de câbles	27	0,3	D	0,0092	0,002768	0,0027682	0,0027682	0,1139698	
			Disjoncteur	FAUX	FAUX	A	0,3717	0	0	0		
	Système de contrôle		Unité de contrôle de l'alimentation	24	0,3	A	0,3717	0,11151	0,1115102	0,1115102		
		Panneaux de contrôle ET	Panneau 1	67	0,5	D	0,0092	0,00461	0			
			Panneau 2	FAUX	FAUX	D	0,0092	0				
	Interface du réseau ET		Transformateur 1	25	0,3	A	0,3717	0,11151	0	0		
			Transformateur 2	FAUX	FAUX	A	0,3717	0				

*CFO non considéré dans le calcul

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abo El Ezz, A. 2013. « Probabilistic seismic vulnerability and risk assessment of stone masonry structures ». École de technologie supérieure. < http://espace.etsmtl.ca/1168/1/ABO_EL_EZZ_Ahmad.pdf >.

Adams, J., G. Rogers, S. Halchuk, D. McCormack et J. Cassidy. 2002. « The case for an advanced national earthquake monitoring system for Canada's cities at risk ». In., p. 369. Earthquake Engineering Research Institute.

Allemang, R.J. 2003. « The modal assurance criterion–twenty years of use and abuse ». *Sound and vibration,* vol. 37, n° 8, p. 14-23.

Arboleda, C.A. 2006. « Vulnerability assessment of the operation of health care facilities during disaster events ». Ph.D. United States Purdue University, 194 p. <http://proquest.umi.com/pqdlink?did=1221708271&Fmt=7&clientId=46962&RQT=309&VName=PQD >. Consulté le 2 août 2011.

Arboleda, C.A., D.M. Abraham et R. Lubitz. 2007. « Simulation as a Tool to Assess the Vulnerability of the Operation of a Health Care Facility ». *Journal of performance of constructed facilities,* vol. 21, p. 302.

Arboleda, C.A., D.M. Abraham, J.P.P. Richard et R. Lubitz. 2006. « Impact of interdependencies between infrastructure systems in the operation of health care facilities during disaster events ». In *Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering* (Montréal, June 14-16), p. 3020-3029.

Arboleda, C.A., D.M. Abraham, J.P.P. Richard et R. Lubitz. 2009. « Vulnerability assessment of health care facilities during disaster events ». *Journal of Infrastructure Systems,* vol. 15, n° 3, p. 149-161.

ASCE/SEI. 2003. *Seismic Evaluation of Existing Buildings*. 446 p.

Asgarian, A. 2012. « Impact of seismic retrofit and presence of terra cotta masonry walls on the dynamic properties of a hospital building in Montreal, Canada ». M.Eng. Montreal, McGill University (Canada), 156 p. In ProQuest Dissertations & Theses Full Text. < http://search.proquest.com/docview/1265826178?accountid=27231 >.

ASHRAE. 2013. *HVAC design manual for hospitals and clinics* (2013), Second edition. Atlanta, Ga.: American Society of Heating Refrigerating Air-Conditioning Engineers 314 p.

ASSSM. 2003. *Rapport annuel de gestion*. Montréal: Agence de la santé et des services sociaux de Montréal.

ASSSM. 2014. « Bilan positif de la simulation d'un « CODE ORANGE » au CUSM ». In *Bâtir un réseau en santé*. < https://agence.santemontreal.qc.ca/detail/article/bilan-positif-de-la-simulation-dun-code-orange-au-cusm/ >.

ATC. 1997. *NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*. FEMA-273. Washington D.C.: Federal Emergency Management Agency, 435 p.

ATC. 2008. *Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage: State-of-the-Art and Practice Report*. ATC-69: Federal Emergency Management Agency.

ATC. 2011. *Seismic Performance Assessment of Buildings – Methodology (75% Draft)*. ATC-58. Redwood City, California: Applied Technology Council, 266 p.

Atkinson, G.M. 2009. « Earthquake time histories compatible with the 2005 National building code of Canada uniform hazard spectrum ». *Canadian Journal of Civil Engineering,* vol. 36, n° 6, p. 991-1000.

Atkinson, G.M. et M. Macias. 2009. « Predicted ground motions for great interface earthquakes in the Cascadia subduction zone ». *Bulletin of the Seismological Society of America,* vol. 99, n° 3, p. 1552.

Botting, R. et A. Buchanan. 2000. « Building design for fire after earthquake ». In *12th World Conference on Earthquake Engineering*. (Auckland, New Zealand) Vol. Paper no. 1569, p. 8.

Boudreault, M. 2013. « Une approche actuarielle de la gestion et de la modélisation des risques de séismes et d'ouragans ». In *La gestion des risques majeurs*. p. 477-522. Coll. « FidRisk Collection ». Cowansville (Qué.): Yvon Blais.

Boutin, C., S. Hans, E. Ibraim et P. Roussillon. 2005. « In situ experiments and seismic analysis of existing buildings. Part II: Seismic integrity threshold ». *Earthquake engineering & structural dynamics,* vol. 34, n° 12, p. 1531-1546.

Bozorgnia, Y. et V.V. Bertero. 2004. *Earthquake engineering from engineering seismology to performance-based engineering*. Boca Raton: CRC Press.

Cajka, M. et J. Drysdale. 1996. *Rapport des intensités du séisme du Saguenay (Québec) du 25 novembre 1988*. Dossier public 3279, 1996. Ottawa: Commission géologique du Canada.

Calvi, G.M., R. Pinho, G. Magenes, J.J. Bommer, L.F. Restrepo-Vélez et H. Crowley. 2006. « Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30

years ». *ISET Journal of Earthquake Engineering Technolology,* vol. 43, n° 3, p. 75-104.

CAN/CSA. 1993. *Centrale d'alimentation en oxygène médical avec concentrateur, pour réseaux de canalisation des gaz médicaux ininflammables*. CAN/CSA-Z305.6-92. Rexdale, Ont.: Association canadienne de normalisation, 47 p.

CAN/CSA. 2003. *Modules d'alimentation pour gaz médicaux*. CAN/CSA-Z305.8-03. Mississauga, Ont.: Association canadienne de normalisation, 31 p.

CAN/CSA. C2011. *Lignes directrices en matière de diminution des risques sismiques concernant les composants fonctionnels et opérationnels des bâtiments (CFO)*. CAN/CSA-S832-R11. Mississauga: Association canadienne de normalisation, 108, viii p.

Cappai, J., G. Dunlop-Brière, M. Li, R. Shapiro et G. McClure. 2010. *Évaluation du risque sismique des composants fonctionnels et opérationnels*. Structural Engineering Series Report No. 2010-01 Montréal: Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University

Chaudhuri, S.R. et M. Shinozuka. 2009. « Enhancement of Sustainability of Nonstructural Systems in Critical Facilities ». *Safety, Reliability and Risk Structures, Infrastructures and Engineering Systems,* vol. 25, n° 2010, p. 2322-2329.

Chaudhuri, S.R. et M. Shinozuka. 2010. « Enhancement of seismic sustainability of critical facilities through system analysis ». *Probabilistic Engineering Mechanics,* vol. 25, n° 2, p. 235-244.

Chery, W. 2005. « Étude des modifications au code national du bâtiment 2005 et au code de béton 2004 sur la conception sismique des murs de refend couplés ». Montréal, École de technologie supérieure, xv, 137 f. p. < http://espace.etsmtl.ca/id/eprint/329 http://proquest.umi.com/pqdweb?did=913543941&sid=2&Fmt=2&clientId=46962&RQT=309&VName=PQD >.

Chiauzzi, L., A. Masi, M. Mucciarelli, J.F. Cassidy, K. Kutyn, J. Traber, C. Ventura et F. Yao. 2012. « Estimate of fundamental period of reinforced concrete buildings: code provisions vs. experimental measures in Victoria and Vancouver (BC, Canada) ». In *15th World Conference on Earthquake Engineering*. (September 24-28, 2012) Vol. 3033, p. 10.

Chong, W.H. et T.T. Soong. 2000. *Sliding fragility of unrestrained equipment in critical facilities*. Coll. « Technical Report MCEER », Technical Report MCEER-00-0005. Buffalo: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 103 p.

Chopra, A.K. 2001. «Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering», *Englewood, NJ.: Prentice-Hall, Third edition, 876 pages*.

Chouinard, L.E. et P. Rosset. 2007. « Seismic site effects and seismic risk in the Montreal area–The influence of marine clays ». In *9th Canadian Conference on Earthquake Engineering*. p. 512-521.

Chouinard, L.E., P. Rosset, A. De la Puente, R. Madriz, D. Mitchell et J. Adams. 2004. « Seismic Hazard Analysis for Montreal ». In *Canada 13th World Conference on Earthquake Engineering*. (Vancouver, B.C., August 1-6), p. 12.

Cole, D. 2006. « Three contexts of planning and decision analysis for disaster mitigation in hospitals : Taiwan, Vancouver, and Los Angeles ». Master of Arts in Planning. Vancouver, University of British Columbia, 177 p. < http://circle.ubc.ca/handle/2429/17642 >.

Craig, R.R. et A.J. Kurdila. 2006. «Fundamentals of structural dynamics». New Jersey: *John Wiley & Sons, Second Edition, 728 pages*.

Cremona, C., F. de Souza Barbosa et A. Alvandi. 2003. « Identification modale sous excitation ambiante: Application à la surveillance des ponts ». *Mécanique & Industries,* vol. 4, n° 3, p. 259-271.

CSA. 2014. *Seismic risk reduction of operational and functional components (OFCs) of buildings*. CAN/CSA-S832-14. Mississauga: CSA Group, 125 p.

CUSM. 2014a. « Hôpital général de Montréal ». Montréal (Qué.): Centre universitaire de santé McGill. < http://cusm.ca/new-muhc/page/hopital-general-montreal >. Consulté le 15 mai 2014.

CUSM. 2014b. « Simulation Code orange ». < http://cusm.ca/newsroom/article/simulation-code-orange >.

Dahl, H., M.S. Lund, K. Stølen, V. Meduri, M. Felici, A. Tedeschi, V. Normand, B. Fontan, F. Innerhofer-Oberperfler, F. Massacci et E. Chiarani. 2009. *D5.1 Evaluation of existing methods and principles*. Coll. « Work Package 5 », D5.1: Secure Change, Seventh Framework Program, 59 p.

Davenport, P.N. 2004. « Review of seismic provisions of historic New Zealand loading codes ». In *2004 NZSEE Conference*. p. 19-21.

Davidovici, V. 2007. « Conception et réalisation d'hôpitaux en zone sismique ». En ligne. < http://www.ihf.fr/ >. Consulté le 5 décembre 2010.

Davies, R.D., R. Retamales, G. Mosqueda et A. Filiatrault. 2011. *Experimental Seismic Evaluation, Model Parameterization, and Effects of Cold-Formed Steel-Framed Gypsum Partition Walls on Seismic Performance of an Essential Facility*. Coll. « NEES Nonstructural - Simulation of the Seismic Performance of Nonstructural Components », Technical Report MCEER-11-0005. Buffalo, NY: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER), 198 p. < http://www.nees-nonstructural.org/documents/reports/10-0004.pdf >.

De Serres, A. 2013. « Évolution des fondements conceptuels du risque et de l'incertitude ». In *La gestion des risques majeurs*. p. 33-87. Coll. « FidRisk Collection ». Cowansville (Qué.): Yvon Blais.

Decarel, Dessau, SH&G, AgNEW PECKHAM et ArCOP. 1998a. *Évaluation des immeubles existants*. Montréal: Centre universitaire hospitalier McGill, CUSM.

Decarel, Dessau, SH&G, AGNEW PECKHAM et ARCOP. 1998b. *The MGH: evaluattion of existing facilities*. Montréal: MUHC. Planning group, 176 p.

DFCM. 2013. « Guidelines for seismic restraint of nonstructural components ». En ligne: Utah Department of Administrative Services, 5 p. < http://dfcm.utah.gov/ >.

Dhillon, B.S. (1996). 1999. *Design reliability fundamentals and applications* (1999). Boca Raton, FL: CRC Press.

Dueñas-Osorio, L.A. 2005. « Interdependent response of networked systems to natural hazards and intentional disruptions ». Ph.D. Thesis. Atlanta Georgia Institute of Technology, 199 p. <https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/7546/duenasosorio_leonardo_a_200512_phd.pdf?sequence=1 >.

Dueñas-Osorio, L.A., J.I. Craig et B.J. Goodno. 2004. « Probabilistic response of interdependent infrastructure networks ». In *2nd Annual meting of the Asian-pacific network of centers for earthquake engineering research (ANCER)*. (Honolulu, July), p. 28-30.

Dunand, F. 2005. « Pertinence du bruit de fond sismique pour la caractérisation dynamique et l'aide au diagnostic sismique des structures de génie civil ». Grenoble, Université Joseph Fourier - Grenoble I, 146 p.

EERI. 2009. *The Mw 7.6 Western Sumatra earthquake of September 30, 2009*. en ligne. Coll. « EERI Special Earthquake Report - Learning from earthquake ». Oakland: Earthquake Engineering Research Institute. < http://www.eeri.org/site/images/eeri_newsletter/2010_pdf/Chile10_insert.pdf >. Consulté le 12 juillet 2010.

Rapport-Gratuit.com

EERI. 2010. *The Mw 8.8 Chile earthquake of February 27, 2010*. en ligne. Coll. « EERI Special Earthquake Report - Learning from earthquake ». Oakland: Earthquake Engineering Research Institute. < http://www.eeri.org/site/images/eeri_newsletter/2010_pdf/Chile10_insert.pdf >. Consulté le 12 juillet 2010.

Eidinger, J.S.E. 2009. *Fragility of Non-structural Components for FEMA Benefit Cost Analysis*. R88.02.01 Rev. 0.: G&E Engineering Systems Inc., 159 p.

Ezell, B.C., J.V. Farr et I. Wiese. 2000. « Infrastructure risk analysis model ». *Journal of Infrastructure Systems,* vol. 6, n° 3, p. 114-117.

Fathali, S. 2006. *Experimental Seismic Performance Evaluation of ASHRAE-Type Isolation / Restraint Systems*. 1 p. <https://mceer.buffalo.edu/meetings/2006annualmeeting/2006student/2006_posters/05fathali.pdf >.

FEMA. 1994. *Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage: A Practical Guide*. Washington, D.C.: Wiss, Janey, Elstner Associates, Inc.

FEMA. 2000. « Commentary for the seismic rehabilitation of buildings, FEMA-356 ». *Washington DC: Federal Emergency Management Agency*.

FEMA. 2003. *Incremental seismic rehabilitation of hospital buildings: Providing protection to people and buildings*. Coll. « Risk management series », FEMA-396. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency.

FEMA. 2005. *Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures*. FEMA-440. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency.

FEMA. 2011. *Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage - A Practical Guide*. FEMA E-74. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency.

FEMA. 2012. *Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model Hazus-MH MR4 Technical manual*. Washington D.C.: Federal Emergency Management Agency, 712 p.

Filiatrault, A., A. Aref, M. Bruneau, M. Constantinou, G. Lee, A. Reinhorn et A. Whittaker. 2003. *MCEER's Research on The Seismic Response Modification of Structural and Non-Structural Systems and Components in Hospitals*. Coll. « Seismic Retrofit of Acute Care Facilities », 25 p.

Filiatrault, A. et T. Sullivan. 2014. « Performance-based seismic design of nonstructural building components: The next frontier of earthquake engineering ». *Earthquake Engineering and Engineering Vibration,* vol. 13, n° 1, p. 17-46.

Fondation Historica. 2010. « L'encyclopédie canadienne ». En ligne. < http://thecanadianencyclopedia.com/index.cfm?PgNm=TCESubjects&Params=F1 >. Consulté le 2 novembre 2010.

Foo, S., N. Naumoski et M. Saatcioglu. 2001. *Aléas sismiques, codes du bâtiment et opinions d'atténuation des risques pour les immeubles canadiens*. En ligne. D82-73/2002F-IN Ministre des Travaux publics et Services gouvernementaux, 76 p. < http://publications.gc.ca/collections/collection_2008/ps-sp/D82-73-2002F.pdf >. Consulté le 21 août 2014.

Galy, B.R. 2009. « Effets de la catégorisation sismique des sites sur l'évaluation de la vulnérabilité sismique des ponts de la ville de Québec ». École de technologie supérieure. < http://espace.etsmtl.ca/47/1/GALY_Bertrand.pdf >.

Galy, B.R. 2013. « Méthodes de conception et étude du comportement sismique des fondations superficielles sur sol naturel et traité, considérant l'interaction sol-structure». École de technologie supérieure. < http://espace.etsmtl.ca/1224/1/GALY_Bertrand.pdf >.

Galy, B.R. 2014. « Communication personnelle ».

Ghobarah, A. 2001. « Performance-based design in earthquake engineering: state of development ». *Engineering structures,* vol. 23, n° 8, p. 878-884.

Ghobarah, A. 2004. « On drift limits associated with different damage levels ». In *International workshop on performance-based seismic design*. p. 321-334. Dept. of Civil Engineering, McMaster University.

Gilles, D. 2011. « In situ dynamic characteristics of reinforced concrete shear wall buildings». Thèse de doctorat en génie civil. Montreal, McGill University, 269 p. <<http://digitool.library.mcgill.ca/R/?func=dbin-jump-full&object_id=100313&local_base=GEN01-MCG02>> >. Consulté le 2 août 2011.

Gouin, P. 2001. *Tremblements de terre historiques au Québec : de 1534 à mars 1925, identifiés et interprétés à partir des textes originaux contemporains = Historical earthquakes felt in Quebec : from 1534 to March 1925, as revealed by the local contemporary literature*. Coll. « Historical earthquakes felt in Quebec ». Montréal: Guérin, vii, 1491 p.

Guenay, S. et K.M. Mosalam. 2013. « PEER performance-based earthquake engineering methodology, revisited ». *Journal of Earthquake Engineering,* vol. 17, n° 6, p. 829-858.

Gupta, A.K. et H. Krawinkler. 1999. *Seismic demands for the performance evaluation of steel moment resisting frame structures*. No 132. Stanford, CA: The John A. Blume

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Earthquake Engineering Center, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, 368 p.

Halchuk, S. 2002. *Personal communication*.

Hall, F. et R. Greeno. 2011. *Building services handbook*, 6th. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann, 694 p.

Hanna, J.A. 1995. *Disaster Planning for Health Care Facilities*, Third Edition, revised and Expanded. Ottawa (Ont.): CHA Press, 372 p.

Hans, S., C. Boutin, E. Ibraim et P. Roussillon. 2005. « In situ experiments and seismic analysis of existing buildings. Part I: experimental investigations ». *Earthquake engineering & structural dynamics,* vol. 34, n° 12, p. 1513-1529.

Holmes, W.T. 2002. « Background and history of the seismic hospital program in California ». In *Proceedings of the 7th US National Conference on Earthquake Engineering*. (Boston (Ma), July 21-25), p. 21-25.

Holmes, W.T. et L. Burkett. 2006. « Seismic vulnerability of hospitals based on historical performance in California ». In *8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*. (San Francisco (CA), April 18–22, 2006).

HRDP. 2005. « Rapport interne ».

HRDP. 2013. « Hôpital Rivière-des-Prairies ». En ligne. Montréal (Qué.): Hôpital Rivière-des-Praires, Université de Montréal. < http://hrdp.qc.ca/fr/hopital >. Consulté le 15 mai 2013.

Huveners, E.M.P. 2009. « Circumferentially adhesive bonded glass panes for bracing steel frames in facades ». In *Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven*, sous la dir. de University Press Facilities, Eindhoven University of Technology. p. 215. Netherlands

IRC-CNRC-RBQ. 2008. *Code de construction du Québec. Chapitre 1, Bâtiment, et Code national du bâtiment : Canada 2005 (modifié)*, 2e éd.. Coll. « Bâtiment, et Code national du bâtiment - Canada 2005 (modifié) ». Ottawa: Institut de recherche en construction, Régie du bâtiment du Québec, Conseil national de recherches du Canada 2 v. (f. mobiles) p.

IRC-CNRC. 2010a. *Code national du bâtiment*. Ottawa: Institut de recherche en construction, Conseil national de recherches du Canada.

IRC-CNRC. 2010b. *Guide de l'utilisateur, CNB 2010 : commentaires sur le calcul des structures (partie 4 de la division B)*, 3e éd.. Coll. « Guide de l'utilisateur, Code

national du bâtiment 2010 ». Ottawa: Conseil national de recherche du Canada, 1 v. (pag. multiple) p.

Isograph Ltd. 2011. *Reliability Workbench.*(Version 11.0.27.0). California: Isograph Ltd.

Ivanovic, S.S., M.D. Trifunac et M.I. Todorovska. 2000. « Ambient vibration tests of structures—a review ». *ISET Journal of Earthquake Technology,* vol. 37, n° 4, p. 165-197.

Johnson, G.S., R.E. Sheppard, M.D. Quilici, S.J. Eder et C.R. Scawthorn. 1999. *Seismic Reliability Assessment of Critical Facilities: A Handbook, Supporting Documentation, and Model Code Provisions*. Coll. « Technical Report MCEER », MCEER-99-0008. Buffalo, NY: Multidisciplinary center for earthquake engineering research (MCEER), 364 p.

Karbassi, A. et M.-J. Nollet. 2008. « Development of an index assignment procedure compatible with the regional seismicity in the province of Quebec for the rapid visual screening of existing buildings ». *Canadian Journal of Civil Engineering,* vol. 35, n° 9, p. 925-937.

Kélada, J. 1998. « L'AMDEC ». En ligne. Montréal: École des hautes tudes commerciales (HEC) - Centre d'étude en qualité totale, 17 p. < neumann.hec.ca/sites/cours/6-510-96/AMDEC.pdf >. Consulté le 5 mai 2013.

Kircher, C.A., A.A. Nassar, O. Kustu et W.T. Holmes. 1997. « Development of building damage functions for earthquake loss estimation ». *Earthquake Spectra*. Vol. 13, n° 4, p. 663-682.

Lamontagne, M. 2002. « An overview of some significant eastern Canadian earthquakes and their impacts on the geological environment, buildings and the public ». *Natural hazards,* vol. 26, n° 1, p. 55-68.

Lamontagne, M. 2008. *Les dommages dus aux tremblements de terre dans la région de Québec entre 1608 et 2007*. Dossier public 5547. Ottawa: Commission géologique du Canada, 22 p.

LeBoeuf, D. et M.J. Nollet. 2006. *Microzonage et vulnérabilité sismique de la ville de Québec - Rapport réalisé pour la ville de Québec*. Ville de Québec, (QC): Université Laval, École de technologie supérieure, 79p.

Limnios, N. 1991. *Arbres de défaillance*. Coll. « Série Diagnostic et Maintenance ». Paris: Hermès, 183 p.

Madriz, R.A. 2005. « Seismic microzonation of the Island of Montreal ». M.Eng. Montreal, McGill University (Canada), 122-122 p. p. In ProQuest Dissertations & Theses Full Text. < http://search.proquest.com/docview/305362923?accountid=27231 >.

McGavin, G.L. 1981. *Earthquake protection of essential building equipment: design, engineering, installation*. John Wiley & Sons, 464 p.

Meade, C. et J. Kulick. 2007. *SB 1953 and the Challenge of Hospital Seismic Safety in California*. Sacramento, CA: The California Health Care Foundation, 62 p.

Merrit, F.S. et J.T. Ricketts. 2001. *Building design and construction handbook*, 6th Ed.: McGraw Hill, 1721 p.

Mestar, M. 2014. « Procédure multi-niveaux pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique des écoles dans l'est canadien ». École de technologie supérieure. < http://espace.etsmtl.ca/1286/1/MESTAR_Mohammed.pdf >.

Michel, C. 2007. « Vulnérabilité sismique de l'échelle du bâtiment à celle de la ville: Apport des techniques expériementales in situ, Application à Grenoble ». Grenoble, Université Joseph Fourier - Grenoble I, 210 p.

Michel, C., P. Guéguen et P.-Y. Bard. 2007. « Comparaison entre calculs de vulnérabilité sismique et propriétés dynamiques mesurées ». In *7ème Colloque National AFPS 2007 – École Centrale Paris*. (Paris), p. 10.

Michel, C., P. Guéguen et P.-Y. Bard. 2008. « Dynamic parameters of structures extracted from ambient vibration measurements: an aid for the seismic vulnerability assessment of existing buildings in moderate seismic hazard regions ». *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* vol. 28, n° 8, p. 593-604.

Micromed S.p.A. 2011. *Grilla software.* < http://www.tromino.eu/ >.

Microsoft Corporation. 2015. « Cartes Bing ». < http://www.bing.com/maps/ >. Consulté le 19 janvier 2015.

MIL-STD-1629A. 1980. *Procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis*. Washington D.C. : U.S. Department of Defense.

Mirshafiei, F., G. McClure et D. Lignos. 2013. « Seismic Assessment of Irregular Low-Rise Buildings Based on a 3-Dimensional Simplified Method ». In *CSCE 2013 Annual Conference*. (Montreal, May 29th-June 1st), p. 10. Canadian Society for Civil Engineering

Mitchell, D., P. Paultre, R. Tinawi, M. Saatcioglu, R. Tremblay, K. Elwood, J. Adams et R. DeVall. 2010. « Evolution of seismic design provisions in the National building code of Canada ». *Canadian Journal of Civil Engineering,* vol. 37, n° 9, p. 1157-1170.

Mitchell, D., R. Tinawi et T. Law. 1990a. « Les dommages dus au tremblement de terre du Saguenay du 25 novembre 1988 ». *Canadian Journal of Civil Engineering,* vol. 17, n° 3, p. 366-394.

Mitchell, D., R. Tinawi et R.G. Redwood. 1990b. « Damage to buildings due to the 1989 Loma Prieta earthquake-a Canadian code perspective ». *Canadian Journal of Civil Engineering,* vol. 17, n° 5, p. 813-834.

Moehle, J. et G.G. Deierlein. 2004. « A framework methodology for performance-based earthquake engineering ». In *Proceedings of the 13th World conference on earthquake engineering*. (Vancouver, B.C., August 1-6), p. 3812-3814.

Mousavi, S., A. Bagchi et V.K.R. Kodur. 2008. « Review of post-earthquake fire hazard to building structures ». *Canadian Journal of Civil Engineering,* vol. 35, n° 7, p. 689-698.

Myrtle, R.C., S.F. Masri, R.L. Nigbor et J.P. Caffrey. 2005. « Classification and prioritization of essential systems in hospitals under extreme events ». *Earthquake Spectra,* vol. 21, n° 3, p. 779-802.

Naeim, F. 2005. « Earthquake Engineering-From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering ». *Earthquake Spectra,* vol. 21, n° 2, p. 609-611.

NCREE. 2010. *The M_L 6.4 Taiwan Earthquake of March 04, 2010*. en ligne. Coll. « Reconnaissance activities »: National Center for Research on Earthquake Engineering. < http://www.eeri.org/site/images/eeri_newsletter/2010_pdf/Chile10_insert.pdf >. Consulté le 12 juillet 2010.

NEES. 2015. « NEES Nonstructural - Simulation of the Seismic Performance of Nonstructural Components ». < http://www.nees-nonstructural.org/ >.

NRC-CNRC. 2010. « Code national du bâtiment du Canada ». *Code national du bâtiment du Canada.*, p. v.

OCFMQS. 2011. *HVAC Design Manual for New, Replacement, Addition, and Renovation of Existing VA Facilities*. Washington DC: Office of Construction & Facilities Management Facilities Quality Service 284 p.

Ordonez, G.A. 2004. *SHAKE2000, A computer program for the 1-D analysis of geotechnical earthquake engineering problems, User's Manual*. 366 p.

OSHA. 2006. *History of Health Care Facility Evacuations* Coll. « Emergency Preparedness: Healthcare Facility Evacuation Planning », 46C6-HT40: University of California at San Diego, 60 p. < https://www.osha.gov/dte/grant_materials/fy06/46j6-ht40/1-history-evac.ppt >.

Paultre, P. 2005. « Dynamique des structures ». *Lavoisier, first edition, 702 pages*.

Paultre, P., G. Lefebvre, J.-P. Devic et G. Côté. 1993. « Statistical analyses of damages to buildings in the 1988 Saguenay earthquake ». *Canadian Journal of Civil Engineering,* vol. 20, n° 6, p. 988-998.

Perrow, C. 1984. *Normal accidents: Living with High-Risk Technologies*. New York Basic Books, 386 p.

Pinto, P.E., A. Lupoi et P. Franchin. 2011a. *D.2.8 Definition of system components and the formulation of system function to evaluate the performance of critical facilities*. Coll. « Work Package 2 – Task 2.1: Development of the general methodology of the systemic vulnerability », D2.8/No 244061: Aristotle University of Thessaloniki, Seventh Framework Program, 26 p.

Pinto, P.E., A. Lupoi et P. Franchin. 2011b. *D.3.10 Fragility functions for elements within health care facilities*. Coll. « WP3 – Fragility functions of elements at risk », D3.10/No 244061 Aristotle University of Thessaloniki, Seventh Framework Program, 50 p.

Pitilakis, K., A. Anastasiadis, M. Alexoudi et S. Argyroudis. 2005. « An Integrated Seismic Risk Management System for Hospital Facility Networks ». Online. Aristotle University of Thessaloniki, , 11 p. < http://www.qualityinhealth.gr/index.php/88-e-congress >.

Porter, K.A. 2003. « An overview of PEER's performance-based earthquake engineering methodology ». In *Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP9)*. p. 6-9. Civil Engineering Risk and Reliability Association (CERRA) San Francisco, California.

Porter, K.A., J.L. Beck et R.V. Shaikhutdinov. 2002a. *Investigation of sensitivity of building loss estimates to major uncertain variables for the Van Nuys testbed*. Coll. « PEER Report 2002/03 », 2002/0, 41 p.

Porter, K.A., J.L. Beck et R.V. Shaikhutdinov. 2002b. « Sensitivity of building loss estimates to major uncertain variables ». *Earthquake Spectra,* vol. 18, n° 4, p. 719-743.

Porter, K.A., E. Johnson, M. Zadeh, C. Scawthorn et S.J. Eder. 1993. *Seismic Vulnerability of Equipment in Critical Facilities: Life-Safety and Operational Consequences*. Coll.

« Technical Report NCEER », NCEER-93-0022. Buffalo, NY: National center for earthquake engineering research (NCEER), 368 p.

Porter, K.A., G.S. Johnson, R.E. Sheppard et R. Bachman. 2010. « Fragility of mechanical, electrical, and plumbing equipment ». *Earthquake Spectra,* vol. 26, n° 2, p. 451-472.

Porter, K.A., R. Kennedy et R. Bachman. 2007. « Creating fragility functions for performance-based earthquake engineering ». *Earthquake Spectra,* vol. 23, n° 2, p. 471-489.

Porter, K.A., A.S. Kiremidjian et J.S. LeGrue. 2001. « Assembly-based vulnerability of buildings and its use in performance evaluation ». *Earthquake Spectra,* vol. 17, n° 2, p. 291-312.

Porter, K.A., S. Krishnan et X. Xu. 2006. *Analysis of Simultaneous Operational Failure of Critical Facilities due to Earthquake, for a California Utlity*. EERL 2006-01. Pasadena, Ca: California Institute of Techonology, 99 p.

Rainer, J.H., D.E. Allen et A.M. Jablonski. 1992. *Manuel de sélection des bâtiments en vue de leur évaluation sismique*. NRCC 36943F. Ottawa: Institut de recherche en construction - Conseil national de recherches Canada, 90 p.

Rausand, M. 2005. *Chapter 3: System Analysis - Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis*. Department of Production and Quality Engineering - Norwegian University of Science and Technology, 46 p.

Recknagel, H., E. Sprenger et J.-L. Cauchepin. 1995. *Manuel pratique du génie climatique* (1995), 2. Chauffage et production d'eau chaude sanitaire, 3e éd. Coll. « Le Recknagel ». Paris: Pyc, 2 v. p.

Reinhorn, A., K.-R. Ryu et G. Maddaloni. 2010. *Modeling and Seismic Evaluation of Nonstructural components: Testing Frame for Experimental Evaluation of Suspended Ceiling Systems*. Coll. « NEES Nonstructural - Simulation of the Seismic Performance of Nonstructural Components », Technical Report MCEER-10-0004. Buffalo, NY: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER), 165 p. < http://www.nees-nonstructural.org/documents/reports/10-0004.pdf >.

Reinoso, E. et E. Miranda. 2006. « Rapid estimation of displacement and acceleration demands in high-rise buildings during moderate earthquakes ». In *8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*. (San Francisco (CA) USA), sous la dir. de EERI, NCEE Vol. Paper No. 1426, p. 10.

Reitherman, R. 2000. « Application of Earthquake Engineering Information in Hospital Emergency Response and Recovery ». *Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering*.

Reitherman, R. 2008. *International aspects of the history of earthquake engineering*. Technical report, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, USA.

Rinaldi, S.M., J.P. Peerenboom et T.K. Kelly. 2001. « Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies ». *Control Systems, IEEE,* vol. 21, n° 6, p. 11-25.

RNC. 2013. *Les zones sismiques dans l'Est du Canada*. En ligne. Canada: Ressources naturelles Canada. < http://www.seismescanada.rncan.gc.ca/zones/eastcan-fra.php >. Consulté le 20 décembre 2013.

Robert, B. et L. Morabito. 2011. *Reducing Vulnerability of Critical Infrastructures - Methodological Manual*. Montréal (Qc): Presses internationales Polytechnique, 68 p.

Robert, R. 2006. *L'AMDEC, un outil de priorisation des interventions d'amélioration continue*. Centre de productique intégrée du Québec inc., 25 p.

Robert, N.H. et L. Morabito. 2013. « Risques majeurs et interdépendances entre les systèmes essentiels ». In *La gestion des risques majeurs*. p. 189-223. Coll. « FidRisk Collection ». Cowansville (Qué.): Yvon Blais.

Ronaldo, L., B. Nandini et H.D. Cihan. 2011. « Postearthquake Recovery of a Water Distribution System: Discrete Event Simulation Using Colored Petri Nets ». *Journal of Infrastructure Systems,* vol. 17, n° March 2011, p. 25-34.

Rosset, P. et L. Chouinard. 2009. « Characterization of site effects in Montreal, Canada ». *Natural hazards,* vol. 48, n° 2, p. 295-308.

Rosset, P., A. De la Puente, R. Madriz, L. Chouinard, D. Mitchell et J. Adams. 2003. *Identification of site effects in the Montreal Urban Community, Canada :Pilot study and methodological developments*. Coll. « Open File Report »: Geological Survey of Canada, 70 p.

Saatcioglu, M., M. Shooshtari et S. Foo. 2013. « Seismic screening of buildings based on the 2010 National Building Code of Canada ». *Canadian Journal of Civil Engineering,* vol. 40, n° 5, p. 483-498.

Sassun, K.P., W.D.L. Finn et T. Sullivan. 2014. « A parametric Investigation into the Seismic behaviour of Window Glazong Systems ». In *The 14th International ROSE Seminar and 2nd UME School Seminar*. (Pavia, 15 - 16 May 2014).

Scawthorn, C. 2011. *Water supply in regard to Fire Following Earthquake*. PEER Report 2011/08. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, Seismic Safety Commission 124 p.

Scawthorn, C., J.M. Eidinger et A.J. Schiff. 2005. *Fire following earthquake*. National Fire Protection Association, American Society of Civil Engineers Publications.

Schultz, C.H., K.L. Koenig et R.J. Lewis. 2003. « Implications of hospital evacuation after the Northridge, California, earthquake ». *The New England journal of medicine*. En ligne. Vol. 348, n° 14, p. 1349-1355. < http://www.nejm.org/doi/pdf/10.1056/NEJMsa021807 >.

Seed, H.B., C. Ugas et J. Lysmer. 1976. « Site-dependent spectra for earthquake-resistant design ». *Bulletin of the Seismological Society of America,* vol. 66, n° 1, p. 221-243.

Sezen, H., K.J. Elwood, A.S. Whittaker, K.M. Mosalam, J.W. Wallace et J.F. Stanton. 2000. *Structural engineering reconnaissance of the August 17, 1999 earthquake: Kocaeli (Izmit), Turkey*. Coll. « University of California, Berkeley », 154 p.

Shinozuka, M., M. Grigoriu, A.R. Ingraffea, S.L. Billington, P. Feenstra, T.T. Soong, A.M. Reinhorn et E. Margakis. 2000. « Development of fragility information for structures and nonstructural components ». *MCCER2000*.

Singh, M.P., L.M. Moreschi, L.E. Suarez et E.E. Matheu. 2006a. « Seismic design forces. I: Rigid nonstructural components ». *Journal of Structural Engineering,* vol. 132, p. 1524-1532.

Singh, M.P., L.M. Moreschi, L.E. Suarez et E.E. Matheu. 2006b. « Seismic design forces. II: Flexible nonstructural components ». *Journal of Structural Engineering,* vol. 132, p. 1533-1542.

Soong, T.T., A.S. Kao et A. Vender. 1999. *Nonstructural damage database*. MCEER-99-0014. Buffalo, N.Y.: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER).

StatPoint Technologies, I. 2009. *StatGraphics Centurion XVI.*

Strand, C.L. 2006. « One Hundred Years of Experience with Gas Systems and Fires Following Earthquakes ». In *Eight National Conference on Earthquake Engineering*. (San Francisco, April 18-22, 2006), p. 18-22. EERI, the Seismological Society of America (SSA), and the California Governor's Office of Emergency Services (OES).

SVIBS. 2011a. *Artemis Extractor.* Danemark: Structural Vibration Solutions A/S. < http://www.svibs.com/solutions/papers.aspx >.

Rapport-Gratuit.com

SVIBS. 2011b. *Artemis Modal 1.5*. Danemark: Structural Vibration Solutions A/S. < http://www.svibs.com/solutions/papers.aspx >.

Taaffe, K.M., R. Kohl et D.L. Kimbler. 2005. « Hospital evacuation: issues and complexities ». In *2005 Winter Simulation Conference*. (Orlando, Fl, 4-5 December), p. 943-950.

Taghavi, S. et E. Miranda. 2003. *Response Assessment of Nonstructural Building Elements*. PEER Report 2003/05: Pacific Earthquake Engineering Research Center 84 p.

Talon, A. 2006. « Evaluation des scénarii de dégradation des produits de construction ». Thèse de doctorat en génie en ligne. Clermont-Ferrand, Ecole doctorale Sciences pour l'ingénieur de Clermont-Ferrand, Université Blaise Pascal – Clermont II, 240, A-64 p. < http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/69/50/40/PDF/2006CLF21668.pdf >. Consulté le 18 mai 2012.

Tecsult, AECOM et EMS. 2010. *Rehausse sismique des bâtiments des hôpitaux de La Malbaie et de Baie-Saint-Paul*. Coll. « Rapport technique: Structure et génie civil », EMS : S09-127, TECSULT/AECOM : 0519015. Québec, 22 p.

The MathWorks Inc. 2011. *Matlab.* Natick, MA

Tischer, H. 2012. « Rapid seismic vulnerability assessment of school buildings in Québec ». Ph.D. Thesis. Montreal, McGill University, 229 p. < http://digitool.library.mcgill.ca>.

Tokas, C. 2007. « California's Hospital Seimic Retrofit Program ». In *Symposium on Seismic regulations and Challenges for Protecting Building Equipment, Components and Operation*. (Buffalo, October 12, 2007), p. 27. University at Buffalo Department of Civil, Structural and Environmental Engineering (CSEE), MCEER, UB's Structural Engineering and Earthquake Simulation Laboratory (SEESL), and the George E. Brown, Jr. Network for Earthquake Engineering Simulation (NEES).

USGS. 2013. « Historic World Earthquakes ». In *Earthquake Hazards Program*. Online. < http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/historical.php/ >. Consulté le 25 novembre 2013.

Ventura, C. 2012. *Course/Workshop on Operational Modal Analysis*. Montreal: University of British Columbia (UBC), Structural Vibration Solutions, University McGill, People Discovery Innovation.

Ventura, C.E. et T. Horyna. 1997. « Structural assessment by modal analysis in western Canada ». In *IMAC XV - 15th International Modal Analysis Conference*. (Orlando, Fl., February 3-6), p. 101-105. Society of Experimental Mechanics (SEM).

Vesely, N.H., F.F. Goldberg, N.H. Roberts et D.F. Haasl. 1981. *Fault tree handbook*. NUREG-0492. Washington, DC: Systems and Reliability Resarch, US Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research, 211 p.

Vision 2000 Committee. 1995. *Performance based seismic engineerig of buildings*. Sacramento, Californie: Structural Engineers Association of California (SEAOC).

Whitney, D.J., A. Dickerson et M.K. Lindell. 2001. « Nonstructural seismic preparedness of Southern California hospitals ». *Earthquake Spectra,* vol. 17, n° 1, p. 153-171.

Yao, C. et Y. Tu. 2012. « The generation of earthquake damage probability curves for building facilities in Taiwan ». In *Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*. (Tokyo, Japan, March 1-4, 2012), p. 993-1004.

Yao, G. et K. Kuo. 2002. « A study on seismic evaluation and seismic damage analysis on functional and operational components–hospital for example ». In *Proceedings of the Second Japan-Taiwan workshop on lifeline performance and disaster mitigation*. (Kobe, Japan), p. 158-169.

Yavari, S., S.E. Chang et K.J. Elwood. 2010. « Modeling Post-Earthquake Functionality of Regional Health Care Facilities ». *Earthquake Spectra,* vol. 26, n° 3, p. 869.

Youance, S., M.J. Nollet et G. McClure. 2015. « Effect of critical sub-system failures on the post-earthquake functionality of buildings: A case study for Montreal hospitals ». Soumis à la Revue canadienne de génie civil.

Youance, S., M.-J. Nollet et G. McClure. 2012. « Post-earthquake functionality of critical facilities: A hospital case study ». In 15th World Conference on Earthquake Engineering. (Lisboa, September 24-28, 2012), p. 10.

Youance, S., M.-J. Nollet et G. McClure. 2013. « Analyse de la défaillance fonctionnelle des composants non-structuraux d'un système de protection incendie d'un hôpital sous l'effet d'un séisme ». In CSCE 2013 Annual Conference. (Montreal, May 29th-June 1st), p. 10. Canadian Society for Civil Engineering

Youance, S., M.-J. Nollet et G. McClure. 2014. « Criticality analysis for post-earthquake functionality assessment of hospitals in montreal ». In CSCE 2014 Annual Conference. (Halifax, May 28 to 31), p. 10. Canadian Society for Civil Engineering

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES