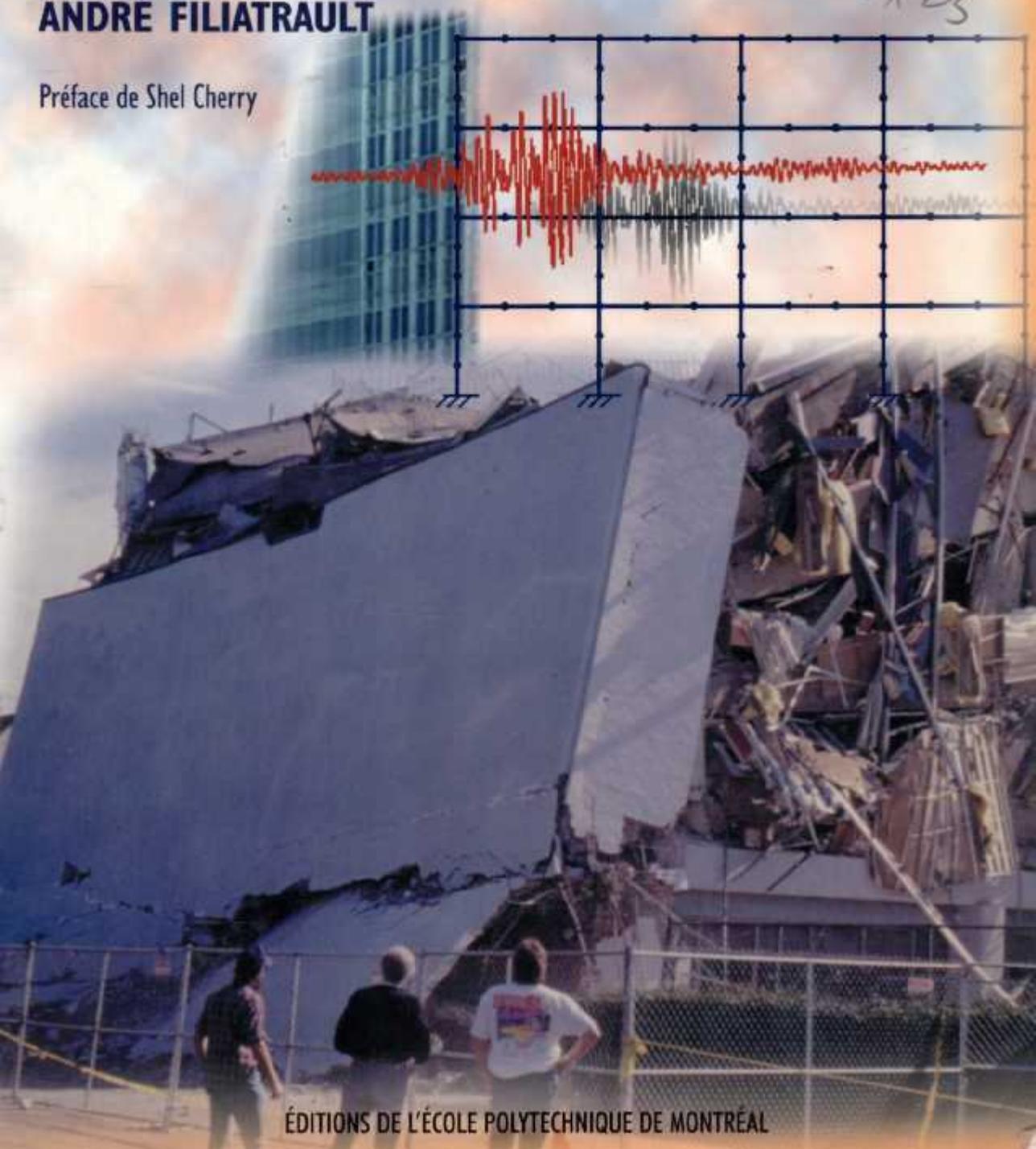


# ÉLÉMENTS DE GÉNIE PARASISMIQUE et de calcul dynamique des structures

ANDRÉ FILIATRAULT

Préface de Shel Cherry

18x23



ÉDITIONS DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

## DIFFUSION

**Diffusion exclusive, Amérique du Nord :**      **Diffusion exclusive, Europe et Afrique :**

Coopoly  
École Polytechnique de Montréal  
Campus de l'Université de Montréal  
C.P. 6079, succursale Centre-ville  
Montréal (Québec)  
CANADA  
H3C 3A7  
Tél. : (514) 340-4067  
Télécopieur : (514) 340-4543  
Serveur WEB : <http://www.polymtl.ca>

Technique et Documentation -  
Lavoisier, S.A.  
11, rue Lavoisier  
F 75384 Paris Cedex 08  
FRANCE  
Tél. : (33) (1) 42.65.39.95  
Télécopieur : (33) (1) 47.40.67.02  
Télex : TDL 632 020 F  
Minitel : 36.14 LAVOISIER  
Serveur WEB : <http://www.Lavoisier.fr>

*Éléments de génie parasismique et de calcul dynamique des structures*  
André Filiatrault

Révision linguistique : Constance Forest  
Typographie et montage : Claire Bertin  
Page de couverture : Daniel Viens et Chantal Fauteux

Tous droits réservés  
© Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, 1996

On ne peut reproduire ni diffuser aucune partie du présent ouvrage, sous quelque forme ou par quelque procédé que ce soit, sans avoir obtenu au préalable l'autorisation écrite de l'éditeur.

Dépôt légal : 3<sup>e</sup> trimestre 1996  
Bibliothèque nationale du Québec  
Bibliothèque nationale du Canada

ISBN 2-553-00575-X  
Imprimé au Canada  
1 2 3 4 5 2000 99 98 97 96

# TABLE DES MATIÈRES

Préface	v
Foreword	ix
Avant-propos	xiii
<b>Chapitre 1 - Notions préliminaires</b>	<b>1</b>
1.1 Bref historique du génie parasismique	1
1.2 Développement du génie parasismique au Canada	2
1.3 Rôle des outils informatiques en génie parasismique	4
1.4 Rôle du laboratoire en génie parasismique	4
1.4.1 Importance de la recherche parasismique expérimentale	4
1.4.2 Essai quasi-statique	5
1.4.3 Essai pseudo-dynamique	5
1.4.4 Essai sur table vibrante	6
1.5 Références	6
<b>Chapitre 2 - Éléments de sismologie et de sismicité</b>	<b>9</b>
2.1 Considérations générales	9
2.2 Causes des séismes	9
2.2.1 Séismes naturels	9
2.2.2 Séismes induits	10
2.3 Théorie tectonique des plaques terrestres	11
2.4 Théorie élastique de Reid	12
2.5 Mécanismes de rupture des failles terrestres	13
2.6 Terminologie et définitions des ondes sismiques	14
2.7 Localisation de l'épicentre d'un séisme	17
2.8 Échelle d'intensité Mercalli modifiée	19
2.9 Échelle de magnitude de Richter	19
2.10 Évolution des échelles de magnitude	25
2.10.1 Échelle de magnitude des ondes de surface ( $M_s$ )	25
2.10.2 Échelle de magnitude des ondes de volume ( $m_b$ )	26
2.10.3 Échelle de magnitude du moment sismique ( $M_w$ )	26
2.10.4 Échelle de magnitude de Nuttli ( $m_n$ )	27

2.11	Relations entre les échelles de magnitude . . . . .	27
2.12	Paramètres sismiques pour l'analyse structurale . . . . .	30
2.12.1	Amplitude du mouvement du sol . . . . .	31
2.12.2	Contenu en fréquences de l'accélérogramme au sol . . . . .	31
2.12.3	Durée du séisme . . . . .	32
2.13	Relations d'atténuation . . . . .	32
2.13.1	Relations de Milne et Davenport (1969) . . . . .	32
2.13.2	Relations de Milne (1977) . . . . .	33
2.13.3	Relations de Hasegawa, Basham et Berry (1981) . . . . .	34
2.13.4	Relations d'Atkinson (1984) . . . . .	34
2.13.5	Relations de Nuttli-Herrman (1984-87) . . . . .	35
2.13.6	Relations de Boore et Atkinson (1987) . . . . .	36
2.13.7	Relations de Toro et McGuire (1987) . . . . .	38
2.13.8	Relations d'Atkinson et Boore (1990) . . . . .	39
2.13.9	Relations de Boore et Joyner (1991) . . . . .	42
2.13.10	Discussion . . . . .	44
2.14	Modèle de propagation des ondes élastiques . . . . .	46
2.14.1	Rappel mathématique . . . . .	46
2.14.2	Équations déformations-déplacements . . . . .	48
2.14.3	Équations contraintes-déformations . . . . .	48
2.14.4	Équations du mouvement . . . . .	49
2.14.5	Équations de propagation des ondes-p . . . . .	50
2.14.6	Équations de propagation des ondes-s . . . . .	51
2.15	Sismicité et sismotectonique du Canada . . . . .	51
2.15.1	Situation dans l'est du Canada . . . . .	52
	· Ouest du Québec . . . . .	52
	· Région de Charlevoix . . . . .	54
	· Région du Bas-Saint-Laurent . . . . .	55
	· Discussion . . . . .	55
2.15.2	Situation dans l'ouest du Canada . . . . .	55
	· Région de la Reine-Charlotte . . . . .	57
	· Région au large de la côte du Pacifique . . . . .	57
	· Région continentale . . . . .	57
2.15.3	Différences et similarités entre les séismes de l'est et de l'ouest du Canada . . . . .	57
	· Période de retour . . . . .	58
	· Atténuation des ondes sismiques . . . . .	58
	· Mécanisme de rupture tectonique . . . . .	58
2.16	Références . . . . .	59
2.17	Exercices . . . . .	62

<b>Chapitre 3 - Éléments d'analyse probabiliste de l'aléa sismique</b> . . . . .	67
3.1 Définition d'un séisme de calcul . . . . .	67
3.2 Modèle de sismicité . . . . .	68
3.2.1 Description . . . . .	68
3.2.2 Modélisation pour le Canada . . . . .	71
3.3 Modèle d'atténuation . . . . .	74
3.3.1 Description . . . . .	74
3.3.2 Modélisation pour le Canada . . . . .	75
3.4 Méthode d'analyse probabiliste de l'aléa sismique . . . . .	75
3.4.1 Description . . . . .	75
3.4.2 Illustration pour une source sismogénique très large . . . . .	76
3.4.3 Probabilité au dépassement d'un niveau de sismicité donné . . . . .	83
3.4.4 Application générale de la méthode probabiliste pour le Canada . . . . .	84
3.5 Références . . . . .	88
3.6 Exercices . . . . .	89
<b>Chapitre 4 - Éléments d'analyse dynamique des structures</b> . . . . .	95
4.1 Considérations générales . . . . .	95
4.1.1 Raison du calcul dynamique . . . . .	95
4.1.2 Exemples de chargements dynamiques . . . . .	96
4.1.3 Degrés de liberté dynamique (DDL) . . . . .	98
4.1.4 Distinction entre la masse et le poids . . . . .	99
4.1.5 Deuxième loi de Newton . . . . .	101
4.1.6 Étapes de l'analyse dynamique . . . . .	102
4.1.7 Calcul dynamique et mécanique appliquée . . . . .	103
4.2 Analyse dynamique d'une structure simple à un degré de liberté dynamique . . . . .	104
4.2.1 Modèle mathématique . . . . .	105
4.2.2 Exemples de coefficients de rigidité latérale . . . . .	106
4.2.3 Équations du mouvement . . . . .	108
· Chargement dynamique quelconque . . . . .	108
· Excitation à la base (problème sismique) . . . . .	109
4.2.4 Vibration libre . . . . .	111
· Système non amorti . . . . .	111
· Système amorti . . . . .	113
· Décrément logarithmique . . . . .	120
· Exemples d'application . . . . .	121

4.2.5	Vibration forcée . . . . .	126
	· Vibration sous une impulsion de courte durée . . . . .	126
	· Vibration sous une charge dynamique quelconque; intégrale de Duhamel . . . . .	127
	· Exemples d'application . . . . .	129
	· Estimation de l'amortissement par la méthode de la demi-bande . . . . .	136
4.3	Concept des spectres de réponse sismique élastique . . . . .	138
4.3.1	Définition . . . . .	138
4.3.2	Propriétés des spectres de réponse sismique . . . . .	139
4.3.3	Calcul des réponses spectrales exactes . . . . .	140
4.3.4	Pseudo-spectres de réponse sismique . . . . .	143
4.3.5	Comparaison entre les réponses spectrales exactes et les réponses pseudo-spectrales . . . . .	144
4.3.6	Représentation tripartite des réponses pseudo- spectrales . . . . .	144
4.4	Spectres simplifiés de calcul . . . . .	150
4.4.1	Motivation . . . . .	150
4.4.2	Spectre moyen de Housner (1959) . . . . .	150
4.4.3	Spectre de calcul de Newmark et Hall (1969) . . . . .	150
4.4.4	Spectre de calcul moyen du Code national du bâtiment du Canada . . . . .	154
4.4.5	Spectres de réponse pour planchers . . . . .	155
4.5	Application des spectres de réponse dans le Code national du bâtiment du Canada . . . . .	156
4.6	Exemple d'application des spectres de réponse . . . . .	157
4.7	Analyse dynamique «exacte» d'une structure linéaire à plusieurs degrés de liberté . . . . .	159
4.7.1	Considérations générales . . . . .	159
4.7.2	Équations du mouvement pour un système à plusieurs degrés de liberté dynamique . . . . .	159
	· Chargement dynamique quelconque . . . . .	159
	· Excitation à la base (problème sismique) . . . . .	161
4.7.3	Évaluation de la matrice de rigidité . . . . .	163
4.7.4	Évaluation de la matrice de masse . . . . .	164
4.7.5	Évaluation de la matrice d'amortissement . . . . .	166
4.7.6	Exemples d'application . . . . .	166

4.7.7	Vibrations libres d'un système non amorti . . . . .	170
	· Calcul des fréquences naturelles . . . . .	170
	· Exemples d'application . . . . .	172
	· Calcul des modes de vibration . . . . .	176
	· Exemples d'application . . . . .	177
	· Matrice des fréquences et matrice modale . . . . .	184
	· Normalisation des modes de vibration . . . . .	185
	· Conditions d'orthogonalité des modes de vibration . . . . .	186
	· Méthode de Rayleigh . . . . .	188
	· Exemple d'application . . . . .	192
4.7.8	Analyse modale - méthode des modes normaux . . . . .	192
	· Stratégie . . . . .	192
	· Coordonnées normales . . . . .	193
	· Découplage des équations du mouvement . . . . .	193
	· Conditions nécessaires pour la matrice d'amortissement . . . . .	195
	· Effets des conditions initiales . . . . .	199
4.7.9	Spécialisation de l'analyse modale dans le calcul sismique . . . . .	201
4.7.10	Sommaire de l'analyse modale . . . . .	203
4.7.11	Exemple d'application . . . . .	206
4.8	Analyse sismique approximative - Méthode spectrale . . . . .	210
4.8.1	Motivation . . . . .	210
4.8.2	Calcul des réponses modales maximales . . . . .	212
4.8.3	Nombre de modes à considérer . . . . .	214
4.8.4	Combinaisons statistiques des réponses modales maximales . . . . .	214
	· Motivation . . . . .	214
	· Combinaison de la racine carrée de la somme des carrés (SRSS) . . . . .	214
	· Combinaison quadratique complète (CQC) . . . . .	215
	· Combinaison de la double somme (DSC) . . . . .	216
	· Combinaison de Humar . . . . .	216
	· Combinaison de Gupta . . . . .	217
	· Remarques finales sur les combinaisons statistiques . . . . .	217
4.8.5	Sommaire de l'analyse sismique spectrale . . . . .	218
4.8.6	Exemple d'application . . . . .	220
4.9	Introduction à l'analyse dynamique non linéaire d'une structure à plusieurs degrés de liberté dynamique . . . . .	226
4.9.1	Concept de base . . . . .	226
4.9.2	Équations incrémentales du mouvement . . . . .	227

4.9.3	Méthode de l'accélération moyenne constante . . . . .	231
4.9.4	Méthode de l'accélération linéaire . . . . .	233
4.9.5	Algorithme de Newmark-Beta . . . . .	235
4.9.6	Intégration des équations du mouvement . . . . .	235
4.9.7	Sommaire de l'analyse non linéaire pas à pas dans le temps . . . . .	237
4.9.8	Stabilité et précision des résultats numériques . . . . .	239
4.10	Références . . . . .	239
4.11	Exercices . . . . .	241

<b>Chapitre 5 - Éléments de dynamique des sols</b> . . . . .	<b>251</b>	
5.1	Considérations générales . . . . .	251
5.2	Réponse sismique d'un dépôt de sol : analyse avec masses concentrées . . . . .	252
5.2.1	Description . . . . .	252
5.2.2	Précision des résultats . . . . .	256
5.3	Détermination des paramètres physiques des sols . . . . .	257
5.3.1	Modélisation du comportement réel d'une couche de sol . . . . .	257
5.3.2	Détermination du module de cisaillement des sols par des essais <i>in situ</i> . . . . .	261
5.3.3	Détermination du module de cisaillement des sols par des essais en laboratoire . . . . .	262
5.3.4	Détermination de la résistance ultime en cisaillement des sols . . . . .	263
5.3.5	Détermination de l'amortissement visqueux équivalent . . . . .	264
5.4	Sommaire de l'analyse linéaire équivalente avec masses concentrées . . . . .	268
5.5	Exemple d'application . . . . .	272
5.6	Perte de capacité portante et liquéfaction des sols . . . . .	278
5.6.1	Description du phénomène . . . . .	278
5.6.2	Explication physique du phénomène de liquéfaction . . . . .	279
5.6.3	Estimation du potentiel de liquéfaction à partir d'essais en laboratoire . . . . .	280
5.6.4	Estimation du potentiel de liquéfaction à partir d'essais <i>in situ</i> . . . . .	280
5.6.5	Coefficient de sécurité contre la liquéfaction . . . . .	285
5.6.6	Estimation du niveau équivalent de contraintes de cisaillement dynamiques . . . . .	285

5.6.7	Techniques pour augmenter la résistance à la liquéfaction . . . . .	286
	· Changements fonctionnels . . . . .	287
	· Traitement du sol liquéfiable . . . . .	287
	· Changements structuraux . . . . .	288
	· Contrôle des pressions interstitielles . . . . .	288
5.6.8	Capacité portante résiduelle des sables après liquéfaction . . . . .	289
5.7	Introduction au phénomène d'interaction sol-structure . . . . .	290
5.7.1	Description de l'interaction sol-structure . . . . .	290
5.7.2	Techniques d'analyses de l'interaction sol-structure . . . . .	291
5.7.3	Remarques finales sur l'interaction sol-structure . . . . .	294
5.8	Références . . . . .	294
5.9	Exercices . . . . .	296
<b>Chapitre 6 - Éléments de conception parasismique des bâtiments au Canada</b>		<b>303</b>
6.1	Concept de ductilité . . . . .	303
6.2	Concept des spectres de réponse sismique inélastique . . . . .	310
6.3	Critère énergétique d'un système avec courte période initiale . . . . .	312
6.4	Principes et objectifs du calcul parasismique au Canada . . . . .	314
6.5	Paramètres sismiques inclus dans le Code national du bâtiment du Canada (CNBC, 1995) . . . . .	315
6.6	Méthode statique du Code national du bâtiment du Canada (CNBC, 1995) . . . . .	320
6.6.1	Formule du cisaillement à la base . . . . .	320
6.6.2	Répartition du cisaillement à la base . . . . .	326
6.6.3	Moments de renversement . . . . .	326
6.6.4	Calcul aux états limites . . . . .	327
6.6.5	Exemple d'application . . . . .	328
6.6.6	Exigences particulières . . . . .	330
6.6.7	Calcul des déformations . . . . .	331
6.6.8	Calcul des fondations . . . . .	334
6.7	Analyse des effets de torsion selon le Code national du bâtiment du Canada (CNBC, 1995) . . . . .	334
6.7.1	Cause de l'effet de torsion sur des structures non uniformes . . . . .	334

6.7.2	Calcul de la position du centre de rigidité ( <i>CR</i> ) . . . . .	335
	· Critère des rigidités relatives . . . . .	335
	· Critère de la rotation nulle à l'étage . . . . .	336
	· Critère de la rotation nulle à tous les étages . . . . .	336
	· Critère du centre de cisaillement . . . . .	336
	· Commentaires . . . . .	336
6.7.3	Prise en compte de l'effet de la torsion dans le Code national du bâtiment du Canada (CNBC, 1995) . . . . .	337
	· Méthode statique . . . . .	337
	· Méthode dynamique . . . . .	338
6.7.4	Prise en compte de l'effet de torsion sans calcul explicite de la position du centre de rigidité . . . . .	338
6.7.5	Exemple de calcul de l'effet de torsion pour un bâtiment de trois étages au Canada . . . . .	339
	· Description du bâtiment . . . . .	339
	· Calcul des charges latérales . . . . .	341
	· Analyse avec calcul de la position du <i>CR</i> . . . . .	343
	· Analyse sans calcul de la position du <i>CR</i> . . . . .	347
6.7.6	Remarque finale sur la torsion . . . . .	350
6.8	Concepts pratiques de calcul parasismique des bâtiments . . . . .	351
6.8.1	Objectif de l'analyse sismique . . . . .	351
6.8.2	Analyse statique . . . . .	351
6.8.3	Analyse spectrale simplifiée . . . . .	351
6.8.4	Analyse non linéaire . . . . .	352
6.8.5	Détails particuliers de modélisation dynamique des bâtiments . . . . .	355
	· Module effectif d'élasticité des structures en béton armé . . . . .	355
	· Propriétés des sections pour les structures en béton armé . . . . .	356
	· Extensions rigides . . . . .	357
	· Distribution des masses . . . . .	357
	· Fondations flexibles . . . . .	357
	· Orientation de l'excitation à la base . . . . .	358
	· Excitations concourantes à la base . . . . .	358
6.9	Principes de construction pour assurer un bon comportement sismique . . . . .	358
6.9.1	Simplicité et symétrie . . . . .	359
6.9.2	Élévation du bâtiment . . . . .	360
6.9.3	Continuité et uniformité . . . . .	360

6.9.4	Choix des matériaux de construction . . . . .	361
6.9.5	Contrôle des modes d'effondrement . . . . .	362
6.10	Ductilité : commentaire final . . . . .	363
6.11	Références . . . . .	364
6.12	Exercices . . . . .	366

<b>Chapitre 7 - Éléments de détails spéciaux relatifs au calcul parasismique des bâtiments en béton armé au Canada . . . . .</b>		<b>369</b>
7.1	Considérations générales . . . . .	369
7.2	Calcul de la ductilité en courbure d'une section en béton armé . . . . .	371
7.2.1	Ductilité en courbure d'une section armée en tension seulement . . . . .	371
7.2.2	Ductilité en courbure d'une section armée en tension et en compression . . . . .	373
7.3	Influence du confinement sur la ductilité en courbure . . . . .	376
7.4	Influence d'une force axiale sur la ductilité en courbure . . . . .	378
7.5	Exemple de calcul du diagramme moment-courbure pour une poutre et un poteau . . . . .	380
7.6	Exigences de la norme canadienne sur le béton armé relatives au calcul parasismique des ossatures ductiles résistant aux moments ( $R=4$ ) . . . . .	387
7.6.1	Définition des différents niveaux de résistance en flexion . . . . .	387
	· Résistance pondérée en flexion . . . . .	388
	· Résistance nominale en flexion . . . . .	388
	· Résistance probable en flexion . . . . .	388
7.6.2	Exigences générales . . . . .	389
7.6.3	Exigences pour les poutres . . . . .	389
7.6.4	Exigences pour les poteaux . . . . .	392
7.6.5	Exigences pour les joints poutre-poteau . . . . .	395
7.6.6	Exemple de conception parasismique d'un assemblage poutre-poteau . . . . .	397
	· Description du bâtiment étudié . . . . .	397
	· Charges de calcul . . . . .	399
	· Calcul des efforts internes . . . . .	399
	· Calcul des déplacements interétages . . . . .	403
	· Conception préliminaire des poutres et des poteaux . . . . .	404
	· Conception parasismique des poutres . . . . .	406
	· Conception parasismique des poteaux . . . . .	410
	· Conception parasismique du joint poutre-poteau . . . . .	414
7.6.7	Comportement réel de l'assemblage conçu . . . . .	418

7.7	Références	419
7.8	Exercices	420
<b>Chapitre 8 - Éléments de détails spéciaux relatifs au calcul parasismique des bâtiments en acier au Canada</b>		
	<b>des bâtiments en acier au Canada</b>	<b>425</b>
8.1	Considérations générales	425
8.2	Exigences de la norme canadienne sur l'acier relatives au calcul parasismique des ossatures ductiles résistant aux moments ( $R=4$ )	426
8.2.1	Exigences générales	426
8.2.2	Exigences pour les poutres	427
8.2.3	Exigences pour les poteaux	428
8.2.4	Exigences pour les zones de panneau	428
8.2.5	Exigences pour les joints poutre-poteau	430
8.2.6	Exemple de conception d'un assemblage ductile résistant aux moments	430
8.3	Exigences de la norme canadienne sur l'acier relatives au calcul parasismique des ossatures à ductilité nominale résistant aux moments ( $R=3$ )	437
8.4	Exigences de la norme canadienne sur l'acier relatives au calcul parasismique des ossatures ductiles à contreventement ( $R=3$ )	437
8.4.1	Dégradation des boucles d'hystérésis d'ossatures métalliques contreventées	437
8.4.2	Exigences générales pour la résistance globale du système	440
8.4.3	Exigences pour les contreventements	441
8.4.4	Exigences pour les assemblages	443
8.4.5	Exigences pour les autres membrures	443
8.5	Exigences de la norme canadienne sur l'acier relatives au calcul parasismique des ossatures contreventées avec ductilité nominale ( $R=2$ )	444
8.6	Introduction aux ossatures ductiles à contreventement excentré	444
8.7	Références	445
<b>Chapitre 9 - Éléments de calcul énergétique et introduction aux systèmes parasismiques non conventionnels</b>		
	<b>systèmes parasismiques non conventionnels</b>	<b>447</b>
9.1	Considérations générales	447
9.2	Équation de balance énergétique	448
9.3	Énergie sismique relative en rapport avec l'énergie sismique absolue	453
9.4	Représentation énergétique d'un séisme	456

9.5	Système d'isolation à la base	457
9.6	Système contreventé à friction	459
9.7	Étude comparative entre le système d'isolation à la base et le système contreventé à friction	462
9.8	Références	465

<b>Annexe A - Manuel d'utilisation du programme RESAS (Réponses spectrales des accélérogrammes sismiques)</b>		<b>467</b>
A.1	Généralités	467
A.2	Équipement nécessaire	467
A.3	Installation et mise en marche	467
A.4	Principales touches à l'écran	468
A.5	Fonctions et fenêtres	468
A.6	Exemple	470

<b>Annexe B - Glossaire des termes scientifiques propres au génie parasismique</b>		<b>471</b>
--	--	------------