

ino Lestuzzi et Marc Badoux

28 3es

GÉNIE PARASISMIQUE

Conception et dimensionnement des bâtiments

Presses polytechniques et universitaires romandes

Les auteurs et l'éditeur remercient l'École polytechnique fédérale de Lausanne pour le soutien apporté à la publication de cet ouvrage.

La collection «Génie civil» est dirigée par le professeur Manfred A. Hirt

Séismes et construction

Eléments pour non-spécialistes

P. Lestuzzi

Introduction à l'analyse des structures

M.-A. Studer et F. Frey

L'art des structures

Une introduction au fonctionnement des structures en architecture

A. Muttoni

Conception des charpentes métalliques

M. A. Hirt et M. Crisinel

Dynamique des avalanches

Ch. Ancey (sous la direction de)

Géologie

Bases pour l'ingénieur

A. Parriaux

Les Presses polytechniques et universitaires romandes sont une fondation scientifique dont le but est principalement la diffusion des travaux de l'École polytechnique fédérale de Lausanne ainsi que d'autres universités et écoles d'ingénieurs.

Le catalogue de leurs publications peut être obtenu par courrier aux Presses polytechniques et universitaires romandes, EPFL – Rolex Learning Center, CH-1015 Lausanne, par E-Mail à ppur@epfl.ch, par téléphone au (0)21 693 41 40, ou par fax au (0)21 693 40 27.

www.ppur.org

Première édition

ISBN 978-2-88074-747-3

© Presses polytechniques et universitaires romandes, 2008, 2011

Tous droits réservés.

Reproduction, même partielle, sous quelque forme

ou sur quelque support que ce soit, interdite sans l'accord écrit de l'éditeur.

Imprimé en Espagne

Table des matières

AVANT-PROPOS	VII
1. Introduction	1
1.1 Contexte, enjeux et significations	3
1.2 Objectifs et contenu	3
1.2.1 Particularités de l'action sismique	4
1.2.2 Dimensionnement en capacité	6
1.3 Public et organisation	8
1.4 Références	10
1.5 Remerciements	10
2. Eléments de sismologie	11
2.1 Introduction	13
2.1.1 Développement historique de la sismologie	13
2.1.2 Cause des séismes	14
2.1.3 Distribution géographique des séismes	15
2.1.4 Mécanismes de rupture des failles	17
2.1.5 Les différents types d'ondes	19
2.1.6 Propagation des ondes sismiques	19
2.2 Mesure des mouvements du sol	21
2.2.1 Sismographe	21
2.2.2 Accélérométrie	22
2.2.3 Détermination des paramètres d'un séisme	24
2.3 Quantifications des séismes à la source et au lieu d'enregistrement	26
2.3.1 Magnitudes et grandeurs associées	26
2.3.2 Définition de l'intensité	29
2.3.3 Echelles d'intensité	29
2.3.4 Sismicité et catalogues de séismes	31
2.3.5 Caractérisation des événements sismiques	32
2.3.6 Effets des tremblements de terre	33
2.4 Aléa sismique	33
2.4.1 Risque sismique	33
2.4.2 Méthode d'analyse déterministe du danger sismique	34
2.4.3 Méthode d'analyse probabiliste du danger sismique	34
2.4.4 Cartes d'aléa probabiliste	39
2.4.5 Microzonage sismique	41
2.5 Conclusion: la prévention du risque sismique	42
2.6 Etude de cas: le séisme de Boumerdes	43

2.7	Résumé et synthèse	47
2.8	Références	49
2.9	Lectures complémentaires	49
3.	Réponse sismique des structures	51
3.1	Introduction	53
3.2	Les structures face aux séismes	53
3.2.1	Types de dégâts	54
3.2.2	Dégât, endommagement	59
3.2.3	Gravité (EMS-98)	60
3.2.4	Effet sur les éléments non structuraux (éléments non porteurs, équipements, etc.)	61
3.3	Etude de cas: exemple du séisme de Kocaeli	62
3.3.1	Le séisme de Kocaeli	62
3.3.2	Dégâts aux immeubles résidentiels et commerciaux	62
3.3.3	Répartition des dégâts	67
3.3.4	Divers	70
3.3.5	Enseignements	70
3.4	Vulnérabilité sismique	71
3.4.1	Facteurs de vulnérabilité	71
3.4.2	Classes de vulnérabilité EMS-98	72
3.4.3	Courbes de vulnérabilité (ou de fragilité)	73
3.5	Comportement sismique des structures: observation post-sismique	75
3.6	Comportement sismique des structures: méthodes expérimentales	76
3.6.1	Essais dynamiques	76
3.6.2	Essais statiques-cycliques	82
3.6.3	Essais pseudo-dynamiques	85
3.7	Résumé et synthèse	87
3.8	Références	88
3.9	Lectures complémentaires	89
4.	Conception des bâtiments	91
4.1	Introduction	93
4.2	Enjeux de la conception	94
4.3	Forme du bâtiment	94
4.3.1	Forme en plan	95
4.3.2	Forme en élévation	97
4.4	Système de contreventement	101
4.4.1	Refends (voiles)	101
4.4.2	Cadres (portiques)	103
4.4.3	Contreventements triangulés	105
4.4.4	Systèmes mixtes	105
4.5	Disposition des éléments de contreventement	107

4.6	Diaphragmes	109
4.7	Fondations	110
4.7.1	Fondations superficielles	110
4.7.2	Fondations profondes	110
4.7.3	Isolation sismique	111
4.8	Éléments non porteurs	111
4.8.1	Cloisons souples	112
4.8.2	Cloisons rigides	112
4.8.3	Façades	113
4.8.4	Faux-plafonds et corps d'éclairage	113
4.8.5	Installations internes et équipements	113
4.9	Implantation de l'ouvrage	114
4.9.1	Sous-sol	114
4.9.2	Environnement construit	114
4.10	Exemple de conception parasismique	114
4.11	Résumé et synthèse	116
4.12	Références	118
4.13	Lectures complémentaires	118
5.	Analyse sismique des bâtiments	119
5.1	Introduction	121
5.1.1	Equation du mouvement	122
5.1.2	Masse	123
5.1.3	Amortissement	124
5.1.4	Force de réaction	124
5.1.5	Accélération du sol	124
5.2	Systèmes linéaires à un degré de liberté (oscillateurs simples linéaires)	124
5.2.1	Définitions	124
5.2.2	Méthodes de résolutions	125
5.3	Systèmes linéaires à plusieurs degrés de liberté (oscillateurs multiples linéaires)	126
5.3.1	Définitions et équation de base	126
5.3.2	Analyse modale	127
5.3.3	Amortissement	129
5.4	Méthode du spectre de réponse	130
5.5	Méthode des forces de remplacement	132
5.5.1	Accélération spectrale	133
5.5.2	Force globale de remplacement	135
5.5.3	Répartition de la force de remplacement sur la hauteur	136
5.5.4	Répartition horizontale de la force de remplacement	136
5.6	Systèmes non linéaires	140
5.6.1	Modèles hystérétiques	140
5.6.2	Reproduction d'essais dynamiques par les modèles hystérétiques	142
5.6.3	Résolution	144

5.6.4	Simulation non linéaire par un supplément d'amortissement visqueux	145
5.6.5	Autres modèles	147
5.7	Analyse de la réponse sismique des structures	147
5.7.1	Déformations engendrées par les séismes.	148
5.7.2	Approche numérique: séismes naturels	149
5.7.3	Approche numérique: séismes artificiels	150
5.7.4	Approche expérimentale: essais dynamiques	153
5.7.5	Règle des déplacements égaux	156
5.8	Exemples numériques	157
5.8.1	Bâtiment régulier de cinq étages	157
5.8.2	Répartition horizontale des forces d'étage	160
5.9	Résumé et synthèse	163
5.10	Références	165
5.11	Lectures complémentaires	166
5.12	Annexe 1: Méthodes de résolution	167
5.13	Annexe 2: Oscillateur linéaire à cinq masses (matrices développées)	170
5.14	Annexe 3: Exemple de répartition horizontale de la force de remplacement	174
5.15	Annexe 4: Modèle Takeda et modèle Q	176
5.16	Annexe 5: Reproduction d'essais dynamiques par les modèles hystérétiques	178
5.17	Annexe 6: Séismes artificiels	181
6.	Dimensionnement des bâtiments	187
6.1	Introduction	189
6.2	Détermination des efforts de dimensionnement	190
6.2.1	Règle des déplacements égaux	190
6.2.2	Coefficient de comportement structural	191
6.2.3	Dimensionnement avec les coefficients de comportement	192
6.3	Dimensionnement conventionnel	193
6.4	Dimensionnement en capacité.	193
6.4.1	Principes du dimensionnement en capacité	193
6.4.2	Premier pas du dimensionnement en capacité	194
6.4.3	Garantie du mécanisme et de la ductilité	195
6.4.4	Ductilité.	196
6.4.5	Surrésistance	199
6.4.6	Caractéristiques des matériaux	199
6.5	Dimensionnement selon les normes suisses SIA.	201
6.5.1	Aléa sismique	202
6.5.2	Spectres de réponse élastique	202
6.5.3	Classes de sols de fondation	204
6.5.4	Spectres de dimensionnement.	205
6.5.5	Classes d'ouvrages	206
6.5.6	Facteurs d'importance.	207
6.5.7	Coefficient de comportement	207

6.5.8	Mesures constructives	208
6.5.9	Sécurité structurale et aptitude au service	209
6.5.10	Force de remplacement	210
6.5.11	Éléments non porteurs	211
6.6	Dimensionnement selon l'Eurocode 8	212
6.6.1	Classes de sol de fondation	212
6.6.2	Spectres de réponse	212
6.6.3	Coefficients d'importance	214
6.6.4	Combinaison des composantes	214
6.6.5	Limitation des déplacements entre étages	214
6.7	Dimensionnement selon les normes canadiennes CNBC	214
6.7.1	Le séisme dans le CNBC	215
6.7.2	Aléa sismique	215
6.7.3	Sols de fondation	216
6.7.4	Spectres de réponse élastique	217
6.7.5	Coefficient de priorité parasismique (I_E)	219
6.7.6	Force statique équivalente	219
6.7.7	Distribution de la force statique équivalente sur la hauteur	219
6.7.8	Coefficient de mode supérieur M_v	220
6.7.9	Facteurs de modification de force	220
6.7.10	Moment de renversement	221
6.7.11	Aptitude au service	222
6.8	Exemples numériques	222
6.8.1	Bâtiment régulier de cinq étages	222
6.8.2	Bâtiment irrégulier	225
6.9	Résumé et synthèse	227
6.10	Références	228
6.11	Lectures complémentaires	229
7.	Constructions en béton armé	231
7.1	Introduction	233
7.2	Dimensionnement conventionnel	233
7.3	Dimensionnement en capacité des refends en béton armé	234
7.4	Exemple numérique	248
7.4.1	Dimensionnement selon le concept du comportement non ductile (conventionnel)	249
7.4.2	Dimensionnement selon le concept du comportement ductile (en capacité)	252
7.4.3	Comparaison et discussion des résultats	258
7.5	Résumé et synthèse	259
7.6	Références	260
7.7	Lecture complémentaire	260
7.8	Annexe 1: Abaque de prédimensionnement	261

8.	Constructions en maçonnerie	263
8.1	Introduction	265
8.2	Résistance latérale de la maçonnerie non armée	266
	8.2.1 Résistance mécanique de la maçonnerie	266
	8.2.2 Résistance latérale des refends selon la norme suisse SIA 266	267
	8.2.3 Autres modèles (formules simplifiées)	273
	8.2.4 Refend comprenant plusieurs étages	275
8.3	Résistance de la maçonnerie non armée hors de son plan	277
	8.3.1 Elancement transversal limite	277
	8.3.2 Modèles élaborés	278
8.4	Capacité de déformation de la maçonnerie dans son plan	278
8.5	Maçonnerie portant seulement verticalement et maçonnerie non porteuse	278
8.6	Maçonnerie ductile	279
	8.6.1 Armature de la maçonnerie ductile	279
8.7	Exemples: résistance latérale des refends en maçonnerie	280
	8.7.1 Refend peu élancé de quatre étages	281
	8.7.2 Refend élancé de deux étages	284
	8.7.3 Refend élancé de trois étages	286
	8.7.4 Comparaison SIA 266 – Formules simplifiées	289
	8.7.5 Synthèse et recommandations d'utilisation	292
8.8	Exemple: bâtiment en maçonnerie non armée	292
	8.8.1 Système de stabilisation horizontale	293
	8.8.2 Caractéristiques principales	294
	8.8.3 Hypothèses	294
	8.8.4 Modélisation	295
	8.8.5 Caractéristiques mécaniques de la maçonnerie	295
	8.8.6 Force de remplacement	295
	8.8.7 Sollicitations des refends au rez-de-chaussée	297
	8.8.8 Résistance latérale des refends au rez-de-chaussée selon les formules simplifiées	297
	8.8.9 Résistance latérale des refends au rez dans le sens longitudinal selon SIA 266	298
	8.8.10 Sollicitations des refends à la base du dernier étage	300
	8.8.11 Résistance latérale à la base du dernier étage selon les formules simplifiées	301
	8.8.12 Vérification de la déformation des refends de 2.4 m de long	301
	8.8.13 Répartition modifiée des refends dans le sens transversal	302
	8.8.14 Bâtiment de quatre étages	304
	8.8.15 Résistance latérale des refends au rez dans le sens longitudinal selon la norme SIA 266	306
	8.8.16 Discussion des résultats	309
8.9	Résumé et synthèse	310
8.10	Références	310
8.11	Lecture complémentaire	311

9.	Constructions en acier et en bois	313
9.1	Introduction	315
9.2	Constructions en acier	315
9.2.1	Dimensionnement	315
9.2.2	Particularités des constructions en acier pour la stabilisation latérale	316
9.2.3	Dimensionnement conventionnel (non ductile)	317
9.2.4	Dimensionnement en capacité (ductile)	317
9.3	Constructions en bois	319
9.3.1	Dimensionnement	319
9.3.2	Types de structures (A à D)	320
9.3.3	Dimensionnement non ductile	320
9.3.4	Dimensionnement ductile	320
9.4	Références	322
9.5	Lectures complémentaires	322
	INDEX	323