



Pierino Lestuzzi et Marc Badoux

# ÉVALUATION PARASISMIQUE DES CONSTRUCTIONS EXISTANTES

Bâtiments en maçonnerie et en béton armé

Presses polytechniques et universitaires romandes

# Table des matières

Avant-propos .....	V
Table des matières .....	VII
<b>1 Introduction .....</b>	<b>1</b>
1.1 Contexte, enjeux et significations .....	3
1.2 Objectifs et contenu .....	3
1.2.1 Méthode basée sur les déformations .....	4
1.3 Public et organisation .....	4
1.4 Limitations .....	6
1.5 Références .....	6
1.6 Lectures complémentaires .....	6
1.7 Remerciements .....	7
1.8 Notations .....	8
1.8.1 Conventions .....	8
1.8.2 Majuscules latines .....	8
1.8.3 Minuscules latines .....	10
1.8.4 Majuscules grecques .....	11
1.8.5 Minuscules grecques .....	12
1.8.6 Notations originales de l'EC8 .....	13
<b>2 Microzonage sismique .....</b>	<b>15</b>
2.1 Introduction .....	17
2.1.1 Effet de site .....	17
2.1.2 Sollicitations sismiques habituelles des normes (EC8 et SIA 261) .....	18
2.1.3 Mesures .....	19
2.2 Exemples de microzonage .....	20
2.2.1 Site de l'EPFL à Ecublens .....	20
2.2.2 Bâle .....	22
2.2.3 Yverdon-les-Bains .....	25
2.3 Utilisation des spectres de réponse de microzonage .....	27
2.3.1 Validité de la méthode des forces de remplacement .....	28
2.3.2 Validité de la règle des déplacements égaux .....	30
2.3.3 Accélération spectrale minimale .....	34
2.4 Résumé et synthèse .....	34

2.5	Références .....	35
2.6	Lectures complémentaires .....	36
2.7	Annexes: Spectres de réponse élastiques de microzonages .....	36
2.8	Annexe 1: Spectres de réponse élastiques du microzonage de l'EPFL .....	37
2.9	Annexe 2: Spectres de réponse élastiques du microzonage d'Yverdon-les-Bains .....	38
2.10	Annexe 3: Spectres de réponse élastiques du microzonage de la vallée du Rhône .....	41
2.11	Annexe 4: Spectres de réponse élastiques du microzonage de Lausanne .....	44
2.12	Annexe 5: Spectres de réponse élastiques du microzonage de Payerne .....	47
2.13	Annexe 6: Spectres de réponse élastiques du microzonage de Sion .....	50
2.14	Annexe 7: Spectres de réponse élastiques du microzonage de Viège .....	53
2.15	Annexe 8: Spectres de réponse élastiques du microzonage de Brig .....	55
2.16	Annexe 9: Spectres de réponse élastiques du microzonage de Lucerne .....	57
<b>3</b>	<b>Evaluation basée sur le risque .....</b>	<b>59</b>
3.1	Introduction .....	61
3.2	Le séisme dans les normes SIA .....	61
3.3	Neufs et existants: des approches différentes .....	62
3.4	Existants: approche basée sur le risque .....	63
	3.4.1 Risque individuel acceptable .....	63
	3.4.2 Courbe du risque individuel en fonction du facteur de conformité .....	69
	3.4.3 Coût de sauvetage d'une vie humaine .....	70
	3.4.4 Principe de proportionnalité .....	72
3.5	Appréciation de la sécurité parasismique .....	74
3.6	Exemple de calcul des coûts de sauvetage .....	75
3.7	Evaluation sismique d'un parc immobilier .....	77
3.8	Résumé et synthèse .....	78
3.9	Références .....	78
3.10	Lectures complémentaires .....	79
<b>4</b>	<b>Méthode basée sur les déformations .....</b>	<b>81</b>
4.1	Introduction .....	83
	4.1.1 Avantage de la méthode basée sur les déformations .....	83
	4.1.2 Principe général de la méthode basée sur les déformations .....	84
4.2	Spectre de réponse au format ADRS .....	85
	4.2.1 Définition du spectre de réponse .....	85
	4.2.2 Spectres de réponse de l'accélération et du déplacement .....	86
	4.2.3 Spectres de norme au format ADRS .....	88
	4.2.4 Spectres de microzonage .....	90
4.3	Méthode du spectre de capacité .....	92
	4.3.1 Oscillateur simple linéaire .....	92
	4.3.2 Oscillateur multiple linéaire .....	93

4.3.3	Oscillateur simple non linéaire .....	96
4.3.4	Détermination du déplacement cible (demande en déplacement, selon l'EC8) .....	97
4.3.5	Oscillateurs multiples non linéaires .....	99
4.3.6	Commentaires .....	99
4.4	Exemples numériques .....	101
4.4.1	Bâtiment régulier de cinq étages .....	102
4.4.2	Comportement linéaire .....	102
4.4.3	Comportement non linéaire .....	103
4.5	Résumé et synthèse .....	104
4.6	Références .....	105
4.7	Lecture complémentaire .....	106
4.8	Annexe 1: Détermination du déplacement cible (notations de l'EC8) .....	107
4.9	Annexe 2: Spectres de réponse élastiques de microzonages au format ADRS .....	109
4.9.1	Microzonage spectral d'Yverdon-les-bains .....	109
4.9.2	Microzonage spectral de la Vallée du Rhône .....	110
4.9.3	Microzonage spectral de Lausanne .....	111
4.9.4	Microzonage spectral de Payerne .....	112
4.9.5	Microzonage spectral de Sion .....	113
4.9.6	Microzonage spectral de Viège .....	114
4.9.7	Microzonage spectral de Brig .....	115
4.9.8	Microzonage spectral de Lucerne .....	116
<b>5</b>	<b>Constructions en maçonnerie .....</b>	<b>117</b>
5.1	Introduction .....	119
5.1.1	Planchers rigides .....	119
5.1.2	Planchers flexibles .....	120
5.2	Résistance latérale de la maçonnerie non armée dans son plan .....	120
5.2.1	Résistance mécanique de la maçonnerie de briques .....	120
5.2.2	Résistance mécanique de la maçonnerie de pierres naturelles .....	121
5.2.3	Résistance latérale des refends selon la norme suisse SIA 266 .....	122
5.2.4	Autres modèles (formules simplifiées de l'EC8) .....	123
5.2.5	Refend comprenant plusieurs étages .....	124
5.2.6	Maçonnerie portant seulement verticalement et maçonnerie non porteuse .....	125
5.3	Résistance de la maçonnerie non armée hors de son plan .....	125
5.3.1	Elancement transversal limite .....	126
5.3.2	Vérification explicite de la résistance hors plan .....	126
5.4	Courbe de capacité de bâtiments avec planchers rigides .....	129
5.4.1	Capacité de déformation de la maçonnerie dans son plan .....	129
5.4.2	Mécanisme d'étage .....	131
5.4.3	Effet cadre .....	132
5.4.4	Détermination du déplacement élastique .....	133
5.4.5	Détermination du déplacement ultime .....	135
5.4.6	Courbe de capacité globale .....	135

5.4.7	Oscillateur simple équivalent .....	136
5.4.8	Limitation relative au nombre d'étages .....	137
5.4.9	Prise en compte de la torsion .....	138
5.5	Exemple: bâtiment en maçonnerie non armée avec planchers rigides .....	140
5.5.1	Système de stabilisation horizontale et caractéristiques principales .....	140
5.5.2	Hypothèses .....	142
5.5.3	Modélisation initiale .....	142
5.5.4	Comparaison avec les résultats de la méthode basée sur les forces .....	146
5.5.5	Modélisation avec effet cadre .....	147
5.5.6	Déplacement ultime des refends sur la base de la capacité de déformation alternative .	151
5.5.7	Vérification des refends à la base du dernier étage .....	152
5.5.8	Vérification explicite de la résistance hors plan .....	154
5.5.9	Résumé et discussion des résultats .....	155
5.6	Résumé et synthèse .....	157
5.7	Références .....	158
5.8	Lectures complémentaires .....	159
5.9	Annexe 1: Propriétés mécaniques de la maçonnerie .....	160
<b>6</b>	<b>Constructions en béton armé .....</b>	<b>163</b>
6.1	Introduction .....	165
6.1.1	Limitations d'application de la méthode basée sur les déformations .....	165
6.1.2	Méthodes classiques basées sur les forces .....	166
6.2	Définitions .....	167
6.2.1	Rotation de la corde .....	167
6.2.2	Portée de cisaillement .....	168
6.3	Relation moment-courbure .....	168
6.3.1	Propriétés mécaniques du béton .....	169
6.3.2	Propriétés mécaniques de l'acier d'armature .....	170
6.3.3	Courbure de plastification .....	171
6.3.4	Expressions simplifiées de la courbure nominale de plastification .....	172
6.3.5	Courbure ultime .....	172
6.4	Courbe de capacité .....	173
6.4.1	Détermination de la rotation élastique de la corde .....	173
6.4.2	Détermination du déplacement de plastification .....	174
6.4.3	Détermination de la rotation ultime de la corde .....	174
6.4.4	Détermination du déplacement ultime .....	176
6.4.5	Facteur partiel pour la capacité de déformation .....	177
6.4.6	Courbe de capacité globale .....	177
6.4.7	Oscillateur simple équivalent .....	178
6.4.8	Déplacements au sommet .....	179
6.4.9	Vérification de la résistance à l'effort tranchant .....	180
6.4.10	Prise en compte de la torsion .....	182
6.4.11	Constructions mixtes .....	182

6.5	Ductilité .....	182
6.5.1	Ductilité globale d'un ensemble d'éléments .....	183
6.6	Exemple numérique .....	184
6.6.1	Hypothèses .....	185
6.6.2	Evaluation selon la méthode basée sur les déformations .....	185
6.6.3	Evaluation selon la méthode classique basée sur les forces .....	190
6.6.4	Armature réduite et spectre de réponse de microzonage .....	192
6.6.5	Discussion des résultats .....	195
6.7	Résumé et synthèse .....	196
6.8	Références .....	198
6.9	Lectures complémentaires .....	199
6.10	Annexe 1: Propriétés mécaniques du béton .....	200
6.11	Annexe 2: Propriétés mécaniques de l'acier d'armature .....	201
6.12	Annexe 3: ductilité globale de refends individuels .....	202
<b>7</b>	<b>Constructions en acier .....</b>	<b>205</b>
7.1	Introduction .....	207
7.2	Méthodes d'analyse .....	207
7.2.1	Méthode basée sur les déformations .....	207
7.2.2	Méthodes classiques basées sur les forces .....	208
7.3	Exemple de bâtiments existants en acier: le système CROCS .....	208
7.4	Système de contreventement à liaisons excentrées .....	210
7.5	Exemple numérique: bâtiment GC de l'EPFL .....	211
7.5.1	Analyse selon la méthode basée sur les forces .....	215
7.6	Références .....	218
7.7	Lecture complémentaire .....	218
7.8	Annexe 1: Désignation des aciers de construction .....	219
	<b>Index.....</b>	<b>221</b>

# ÉVALUATION PARASISMIQUE DES CONSTRUCTIONS EXISTANTES

Bâtiments en maçonnerie et en béton armé

Pierino Lestuzzi et Marc Badoux

L'évaluation parasismique des constructions existantes est plus exigeante que le dimensionnement des constructions neuves. En effet, il est primordial de cerner au mieux le comportement sismique réel des structures existantes afin notamment d'éviter de coûteux renforcements superflus. Des méthodes d'analyse sophistiquées, comme la méthode basée sur les déformations, sont donc nécessaires.

Cet ouvrage, destiné aux ingénieurs de structures et aux étudiants avancés en génie civil, expose les fondements de cette méthode, et explique en détail son application aux bâtiments en maçonnerie et aux bâtiments en béton armé. Il s'articule autour d'une approche novatrice basée sur la notion de risque, et tout particulièrement dédiée à l'évaluation parasismique des constructions existantes. De nombreux exemples numériques illustrent l'exposé.



**Pierino Lestuzzi** est ingénieur civil de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) et docteur en sciences techniques de l'École polytechnique fédérale de Zurich (EPFZ). Il est maître d'enseignement et de recherche au laboratoire d'informatique et de mécanique appliquées à la construction (IMAC) à l'EPFL. Son domaine d'expertise est centré sur le génie parasismique, mais il enseigne également la statique et la dynamique des structures aux étudiants de génie civil. Il préside par ailleurs la commission de la norme SIA 261 (Actions sur les structures porteuses), et travaille en tant que spécialiste sismique au bureau « Résonance Ingénieurs-Conseils SA » à Carouge (Suisse).

**Marc Badoux** est né en 1961 et a étudié le génie civil à l'École polytechnique fédérale de Zurich. En 1987, il obtient le titre de docteur de l'Université du Texas à Austin pour une thèse dans le domaine du renforcement parasismique des structures existantes. Il a ensuite travaillé comme projeteur dans des bureaux d'ingénierie en Suisse et aux Etats-Unis. Nommé professeur assistant à l'Institut des structures de l'École polytechnique fédérale de Lausanne en 1997, il oriente son activité de recherche dans le domaine du génie parasismique et de la gestion du risque. Il participe notamment à l'élaboration des nouvelles normes suisses pour la conception, la construction et l'évaluation parasismique des structures et initie l'enseignement du génie parasismique à l'EPFL. En 2003, il complète sa formation technique par un EMBA de l'IMD-Lausanne et rejoint les Transports Publics Lausannois pour diriger la réalisation d'une nouvelle ligne de métro.

Presses polytechniques et universitaires romandes

