



Sous la direction de **Victor Davidovici**
avec **Dominique Corvez**
Alain Capra
Shahrokh Ghavamian
Véronique Le Corvec
et **Claude Saintjean**

Pratique du calcul sismique

Guide d'application de l'Eurocode 8



COLLECTION
EUROCODE

afnor
ÉDITIONS

EYROLLES

Table des matières

CHAPITRE 1. Actions sismiques et réponses des structures

	1
1.1 Modes de vibration des structures.....	2
1.1.1 Pourquoi étudier les modes de vibration des structures.....	2
1.1.2 Typologie des modes de vibration	5
1.1.3 Étude de l'oscillateur simple	7
1.2 Représentation de l'action sismique	11
1.2.1 Généralités	11
1.2.2 Spectre de réponse	11
1.2.2.1 Détermination du spectre de réponse	11
1.2.2.2 Spectres réglementaires et de calcul	17
1.2.2.3 Déplacement de calcul du sol	20
1.2.3 Accélérogrammes	21
1.2.3.1 Accélérogrammes artificiels.....	21
1.2.3.2 Accélérogrammes naturels	21
1.3 Réponse dissipative des structures aux actions sismiques.....	21
1.3.1 Accumulation et dissipation de l'énergie.....	22
1.3.2 Amortissement des structures	24
1.3.2.1 Caractérisation de l'amortissement d'une structure	24
1.3.2.2 Composition du coefficient d'amortissement d'une structure	25
1.3.2.3 Amortissement et coefficient de comportement	26
1.3.2.4 Valeurs communes de l'amortissement	27
1.3.2.5 Valeurs particulières de l'amortissement	29
1.3.2.6 Commentaires sur l'amortissement des structures	30
1.3.3 Classes de ductilité	31
1.3.3.1 Ductilité locale et globale.....	31
1.3.3.2 Trois classes de ductilité	32
1.3.3.3 Cas des structures en béton.....	33
1.3.3.4 Cas des structures en acier.....	34

1.4	Coefficient de comportement	34
1.4.1	Notion de coefficient de comportement	34
1.4.1.1	<i>Pourquoi un coefficient de comportement</i>	35
1.4.1.2	<i>Contenu du coefficient de comportement</i>	38
1.4.2	Coefficients de comportement pour les bâtiments en béton.....	39
1.4.2.1	<i>Types de structures</i>	40
1.4.2.2	<i>Évaluation du coefficient de comportement</i>	41
1.4.2.3	<i>Cas particulier de structures superposées de nature différente</i>	44
1.4.2.4	<i>Spécificité des coefficients de comportement des composants préfabriqués</i>	47
1.4.3	Coefficients de comportement des constructions métalliques	48
1.4.3.1	<i>Pour un comportement de structure faiblement dissipatif</i>	48
1.4.3.2	<i>Pour un comportement de structure dissipatif</i>	49
1.4.3.3	<i>Synthèse</i>	49
1.4.3.1	<i>Types de structures</i>	50
1.4.3.2	<i>Évaluation du coefficient de comportement pour les constructions métalliques</i>	53
1.4.4	Coefficients de comportement des structures mixtes en acier-béton ...	54
1.4.4.1	<i>Types de structures</i>	54
1.4.4.2	<i>Coefficients associés</i>	56
1.4.5	Coefficients de comportement des bâtiments en bois	57
1.4.6	Coefficients de comportement des bâtiments en maçonnerie porteuse	58
1.4.6.1	<i>Types de structures</i>	58
1.4.6.2	<i>Coefficients de comportement retenus</i>	59
1.4.7	Coefficients de comportement pour les éléments non structuraux	60
1.4.8	Coefficients de comportement pour installations classées et ouvrages stratégiques	60
CHAPITRE 2.	Méthodes de calcul	61
2.1	Stratégie de calcul sismique	61
2.2	Modélisations	65
2.2.1	Modélisation de la structure (un bon modèle est un modèle utile)	65
2.2.1.1	<i>Quelle modélisation pour quel résultat ?</i>	67
2.2.1.2	<i>Représentation des éléments structuraux secondaires et non structuraux</i>	70
2.2.1.3	<i>Recommandations pour la modélisation</i>	72
2.2.1.4	<i>Prise en compte des torsions d'axe vertical</i>	80
2.2.1.5	<i>Hauteur de calcul, enfoncement du bâtiment</i>	83
2.2.2	Modélisation des masses	85
2.2.3	Modélisation de l'interaction sol-structure (ISS)	89
2.2.3.1	<i>Nécessité de modéliser le sol</i>	89
2.2.3.2	<i>Caractéristiques dynamiques des sols</i>	93
2.2.3.3	<i>Modélisation du sol par un système de ressorts amortis</i>	100

2.2.3.4	<i>Méthode Newmark-Rosenblueth</i>	101
2.2.3.5	<i>Méthode de Deleuze</i>	103
2.3	Méthode d'analyse par forces latérales	106
2.3.1	Conditions de régularité	106
2.3.1.1	<i>Conditions générales</i>	106
2.3.1.2	<i>Critères de régularité en plan</i>	106
2.3.1.3	<i>Critères de régularité en élévation</i>	108
2.3.1.4	<i>Cas d'un soubassement rigide</i>	110
2.3.2	Analyse par forces latérales	111
2.3.2.1	<i>Conditions d'application</i>	111
2.3.2.2	<i>Périodes de vibration du mode fondamental</i>	111
2.3.2.3	<i>Effort tranchant à la base et distribution des forces</i>	112
2.4	Méthode d'analyse modale	114
2.4.1	Méthodologie de calcul	114
2.4.2	Recherche des modes propres	115
2.4.3	Sélection des modes utiles	117
2.4.3.1	<i>Les masses modales effectives</i>	118
2.4.3.2	<i>Les énergies de déformation</i>	118
2.4.4	Prise en compte des modes négligés : les pseudo-modes	120
2.4.5	Combinaisons des réponses modales	124
2.4.5.1	<i>Combinaison arithmétique</i>	125
2.4.5.2	<i>Combinaison quadratique (superposition quadratique)</i>	125
2.4.5.3	<i>Combinaison quadratique complète (CQC)</i>	126
2.4.6	Analyse statique 3-D → brochette dynamique → analyse statique équivalente 3-D	127
2.4.6.1	<i>Modélisation 3-D, calcul statique, calcul des modes propres</i>	129
2.4.6.2	<i>Définition et calage du modèle brochette</i>	129
2.4.6.3	<i>Analyse dynamique de la brochette</i>	129
2.4.6.4	<i>Calcul statique équivalent de la structure réelle</i>	129
2.4.7	Incidence du décollement du bâtiment	130
2.5	Calcul des périodes propres	133
2.5.1	Méthode de Rayleigh	134
2.5.2	Structures préfabriquées	136
2.5.3	Bâtiments industriels	137
2.5.4	Masse répartie sur une console de section constante	139
2.5.5	Masse concentrée au sommet d'une console de section constante et de masse non négligeable	139
2.5.6	Masse unique située sur une poutre de section constante et de masse négligeable	140
2.5.7	Poutres de section constante et de masse uniformément répartie	141
2.5.8	Plaques rectangulaires d'épaisseur constante et de masse uniformément répartie	141
2.6	Validation du comportement dynamique	142

CHAPITRE 3. Approche non-linéaire : <i>pushover</i>	145
3.1 Historique.....	145
3.2 Rappel de la méthode de <i>pushover</i>	146
3.3 Méthode de calcul	148
3.3.1 Modélisation de la structure et prise en compte des comportements non linéaires	149
3.3.1.1 <i>Modèle éléments finis</i>	149
3.3.1.2 <i>Lois de comportement</i>	151
3.3.1.3 <i>Interaction sol-structure</i>	152
3.3.2 Établissement de la courbe de comportement (<i>pushover</i>).....	152
3.3.3 Conversions dans le diagramme accélération/déplacement A/D	153
3.3.4 Prise en compte de la dissipation d'énergie de la structure	154
3.3.5 Recherche du point de fonctionnement	156
3.3.6 Critères de ruine	157
3.3.7 Applications spécifiques	157
3.4 Applications	158
3.4.1 Cas du diagnostic sismique d'un bâtiment tertiaire en béton armé	158
3.4.1.1 <i>Géométrie et modélisation de la structure</i>	158
3.4.1.2 <i>Éléments de réponse de la structure</i>	161
3.4.2 Cas de l'évaluation des marges sismiques d'un bâtiment industriel	164
 CHAPITRE 4. Calcul du ferrailage à partir des éléments finis	 169
4.1 Introduction	169
4.2 Éléments de membrane	170
4.2.1 Définition	170
4.2.2 Calcul des armatures.....	170
4.2.2.1 <i>Première démonstration</i>	171
4.2.2.2 <i>Seconde démonstration et compléments</i>	172
4.2.2.3 <i>Précautions d'emploi</i>	173
4.2.3 Exemple de calcul.....	174
4.2.3.1 <i>Armatures verticales</i>	175
4.2.3.2 <i>Armatures horizontales</i>	175
4.3 Éléments de coque.....	175
4.3.1 Définitions	175

4.3.2	Méthode générale	177
4.3.2.1	<i>Principe de la méthode</i>	177
4.3.2.2	<i>Remarque</i>	178
4.3.2.3	<i>Vérification du béton</i>	178
4.3.2.4	<i>Traitement des combinaisons</i>	180
4.3.3	Méthode simplifiée	180
4.3.3.1	<i>Définition des paramètres z et e</i>	181
4.3.3.2	<i>Calcul des efforts dans les membranes</i>	182
4.3.4	Armatures transversales des éléments de coque	182
4.3.4.1	<i>Définitions</i>	182
4.3.4.2	<i>Données réglementaires</i>	183
4.3.4.3	<i>Procédure de calcul</i>	184
4.3.4.4	<i>Interprétation des cartes de ferrailage des coques</i>	185
4.4	Prise en compte du séisme	185
4.4.1	Combinaisons quadratiques	186
4.4.1.1	<i>Cas d'un seul paramètre</i>	186
4.4.1.2	<i>Cas de deux paramètres</i>	186
4.4.2	Utilisation pratique des combinaisons quadratiques	187
4.4.2.1	<i>Méthode de calcul enveloppe</i>	187
4.4.2.2	<i>Méthode du polygone</i>	187
4.4.2.3	<i>Combinaison quadratique signée</i>	188
4.4.3	Application de l'Eurocode 8	188
4.4.3.1	<i>Combinaison des modes</i>	188
4.4.3.2	<i>Combinaison des directions du séisme</i>	189
4.4.4	Cas des éléments de membrane	189
4.4.4.1	<i>Calcul de la section A_x</i>	190
4.4.4.2	<i>Calcul de la section A_y</i>	191
4.4.4.3	<i>Calcul de la compression maximale</i>	191
4.4.5	Éléments de coque - méthode approchée	191
4.4.6	Éléments de coque - méthode générale	191
4.4.6.1	<i>Transformation des données</i>	191
4.4.6.2	<i>Sélection des couples (N, M) représentatifs</i>	192
4.4.6.3	<i>Calcul en flexion composée</i>	192
4.4.6.4	<i>Calcul des armatures</i>	192
4.5	Cas particuliers de ferrailage	192
4.5.1	Méthode rigoureuse	192
4.5.1.1	<i>Cas général</i>	192
4.5.1.2	<i>Cas particulier du ferrailage orthogonal</i>	193
4.5.1	Méthode approchée	193
4.6	Conclusion	194

CHAPITRE 5. Pratique des logiciels de calcul

sur ordinateur 195

5.1	Modélisation informatique	195
5.1.1	Modélisation 3-D	195
5.1.1.1	<i>Précision du maillage et taille optimale des éléments</i>	195
5.1.1.2	<i>Modélisation des linteaux</i>	197
5.1.1.3	<i>Exploitation des résultats</i>	197
5.1.2	Modélisation « brochette »	199
5.1.3	Prise en compte de l'inertie fissurée dans les modèles	199
5.1.4	Prise en compte de l'interaction sol-structure	201
5.1.5	Prise en compte du décollement des fondations	202
5.2	Exemples de calcul	203
5.2.1	Présentation du bâtiment	203
5.2.1.1	<i>Géométrie</i>	203
5.2.1.2	<i>Hypothèses sismiques</i>	204
5.2.1.3	<i>Hypothèses concernant les charges</i>	204
5.2.2	Méthodologie des calculs	204
5.2.2.1	<i>Étape 1 - constitution du modèle</i>	204
5.2.2.2	<i>Étape 2 - vérification du modèle</i>	205
5.2.2.3	<i>Étape 3 - calcul des modes propres</i>	205
5.2.2.4	<i>Étape 4 - application du spectre de calcul</i>	205
5.3	Modélisation à l'aide du logiciel Hercule	206
5.3.1	Étape 1 - constitution du modèle	206
5.3.2	Étape 2 - vérification du modèle	207
5.3.3	Étape 3 - calcul des modes propres	207
5.3.4	Étape 4 - application du spectre	208
5.3.5	Étape 5 - édition des torseurs sismiques à la base du bâtiment	209
5.3.6	Étape 6 - édition des torseurs à la base des voiles	209
5.3.7	Étape 7 - calcul du ferrailage des voiles	210
5.3.7.1	<i>Géométrie du voile</i>	210
5.3.7.2	<i>Calcul de la section des chaînages</i>	210
5.3.7.3	<i>Calcul des armatures d'effort tranchant</i>	210
5.3.7.4	<i>Vérification du non-glissement au niveau des reprises de bétonnage à la base du voile</i>	211
5.4	Modélisation à l'aide du logiciel Advance Design	212
5.4.1	Étape 1 - constitution du modèle	212
5.4.2	Étape 2 - vérification du modèle	213
5.4.3	Étape 3 - calcul des modes propres	214
5.4.4	Étape 2 - application du spectre	215
5.4.5	Étape 5 - édition des torseurs sismiques à la base du bâtiment	215

5.4.6	Étape 6 - édition des torseurs à la base des voiles.....	216
5.4.7	Étape 7 - calcul du ferrailage des voiles	217
5.4.7.1	<i>Calcul de la section des chaînages</i>	217
5.4.7.2	<i>Calcul des armatures d'effort tranchant</i>	217
5.4.7.3	<i>Vérification du non-glissement au niveau des reprises de bétonnage à la base du voile.....</i>	218
5.5	Modélisation à l'aide du logiciel Robot Structural Analysis Professional (ex-Robot Millenium)	218
5.5.1	Étape 1 - constitution du modèle	218
5.5.2	Étape 2 - vérification du modèle	219
5.5.3	Étape 3 - calcul des modes propres	220
5.5.4	Étape 4 - application du spectre	221
5.5.5	Étape 5 - édition des torseurs sismiques à la base du bâtiment	222
5.5.6	Étape 6 - édition des torseurs à la base des voiles	222
5.5.7	Étape 7 - calcul du ferrailage des voiles	223
5.5.7.1	<i>Calcul de la section des chaînages</i>	223
5.5.7.2	<i>Calcul des armatures d'effort tranchant.....</i>	223
5.5.7.3	<i>Vérification du non-glissement au niveau des reprises de bétonnage à la base du voile</i>	224
5.6	Modélisation à l'aide du logiciel Epicentre	225
5.6.1	Étape 1 - constitution du modèle	225
5.6.2	Étape 2 - vérification du modèle	225
5.6.3	Étape 3 - calcul des modes propres	226
5.6.3.1	<i>Vérification des charges statiques.....</i>	226
5.6.3.2	<i>Descente de charges statiques</i>	226
5.6.3.3	<i>Tableaux des modes propres et des masses participantes</i>	227
5.6.4	Étape 4 - application du spectre	228
5.6.5	Étape 5 - édition des torseurs sismiques à la base du bâtiment	228
5.6.6	Étape 6 - édition des torseurs à la base des voiles	229
5.6.7	Étape 7 - calcul du ferrailage des voiles	229
5.6.7.1	<i>Calcul de la section des chaînages</i>	229
5.6.7.2	<i>Calcul des armatures d'effort tranchant</i>	230
5.6.7.3	<i>Vérification du non-glissement au niveau des reprises de bétonnage à la base du voile</i>	230
5.7	Modélisation à l'aide du logiciel Hercule - prise en compte de l'interaction sol-structure	231
5.7.1	Hypothèses concernant le sol	231
5.7.2	Détermination des ressorts de sol	231
5.7.3	Calcul des modes propres	232
5.7.4	Étape 4 - application du spectre	233
5.7.5	Étape 5 - édition des torseurs sismiques.....	233
5.7.6	Étape 6 - édition des torseurs à la base des voiles	234

5.7.7	Étape 7 - calcul du ferrailage des voiles	235
5.7.7.1	<i>Calcul de la section des chaînages</i>	235
5.7.7.2	<i>Calcul des armatures d'effort tranchant</i>	235
5.7.7.3	<i>Vérification du non-glissement au niveau des reprises de bétonnage à la base du voile</i>	235
5.8	Modélisation à l'aide du logiciel Hercule - modèle brochette	236
5.8.1	Calage de la brochette	236
5.8.1.1	<i>Étape 1 - application d'une charge horizontale de 10 000 kN répartie sur le plancher haut</i>	236
5.8.1.2	<i>Étape 2 - détermination des caractéristiques géométriques des barres de la brochette</i>	237
5.8.1.3	<i>Étape 3 - vérifications du modèle</i>	237
5.8.2	Calcul des efforts sismiques à la base du bâtiment	238
5.8.3	Calcul des accélérations à chaque niveau du bâtiment	239
5.8.4	Ajustement des accélérations	239
5.8.5	Injection des accélérations dans le modèle 3-D et édition des efforts ..	240
5.8.6	Calcul du ferrailage des voiles	240
5.8.6.1	<i>Calcul de la section des chaînages</i>	240
5.8.6.2	<i>Calcul des armatures d'effort tranchant</i>	241
5.8.6.3	<i>Vérification du non-glissement au niveau des reprises de bétonnage à la base du voile</i>	241
	Bibliographie	243