

Victor Davidovici

LA CONSTRUCTION EN ZONE SISMIQUE

Approche réglementaire

Modèles d'analyse des structures

Diagnostic des bâtiments existants

Exemples de calculs

TABLE DES MATIÈRES

Préface	5
Liste des sigles.....	14
Introduction : Démarche de la protection sismique	15
1 — Risque sismique	21
1.1 – Risque sismique en France métropolitaine et aux Antilles	21
1.2 – Réglementation parasismique	22
1.2.1 – Textes législatifs	22
1.2.2 – Textes techniques en vigueur et évolution prévisible	27
1.3 – Perception du séisme	27
1.3.1 – Ondes sismiques	27
1.3.2 – Notions d'intensité et de magnitude	32
1.4 – Comportement des bâtiments à l'action sismique	33
1.5 – Comportement des ouvrages enterrés	36
1.6 – Conséquences économiques	36
1.6.1 – Surcoût parasismique	36
1.6.2 – Facteurs diminuant le coût de la protection sismique	37
1.6.3 – Facteurs augmentant le coût de la protection sismique	37
2 — Réponses des structures	39
2.1 – Oscillations (modes de vibrations) des structures – Spectre de réponse	39
2.1.1 – Nature des structures	39
2.1.2 – Oscillations des structures	42
2.2 – Détermination de spectres de réponse	46
2.3 – Amortissement	50
2.4 – Accumulation et dissipation de l'énergie	55
2.5 – Coefficients de comportement	57
2.5.1 – Pourquoi un coefficient de comportement ?	57
2.5.2 – Contenu du coefficient de comportement	60
2.5.3 – Coefficients de comportement des structures en béton armé	61
2.5.4 – Coefficients de comportement des cheminées, tours ou mâts	65
2.5.5 – Coefficients de comportement des ossatures à base d'éléments en béton précontraint	66
2.5.6 – Coefficients de comportement des bâtiments avec murs en maçonnerie porteuse	67

2.5.7 – Coefficients de comportement des constructions métalliques	67
2.5.8 – Coefficients de comportement des structures couplées en acier et béton armé	70
2.5.9 – Coefficients de comportement des constructions en bois	70
2.6 – Coefficients de comportement dans le cas des installations classées	72
3 — Chargement sismique	73
3.1 – Paramètres du mouvement sismique	73
3.2 – Accélérogrammes	74
3.3 – Spectres de réponse	77
3.3.1 – Utilisation des spectres de réponse	77
3.3.2 – Spectres réglementaires – Règles PS 92	78
3.3.3 – Spectres pour les installations classées (arrêté du 10 mai 1993)	87
3.4 – Niveau d'application de l'action sismique	91
3.5 – Domaine de l'action sismique et de la réponse des bâtiments	91
3.6 – Statut de l'action sismique	95
3.7 – Bâtiments à risque normal : combinaisons d'actions sismiques	96
3.7.1 – Cas général	96
3.7.2 – Cas des bâtiments courants	97
3.7.3 – Cas des bâtiments réguliers	97
3.7.4 – Cas des portiques en béton armé avec remplissage en maçonnerie	97
3.7.5 – Cas des parois d'infrastructure de bâtiments	97
3.8 – Bâtiments à risque spécial : combinaisons d'actions sismiques	99
3.9 – Transfert de spectre/Spectre de plancher	99
4 — Éléments pour le calcul sismique	103
4.1 – Stratégie du calcul sismique	103
4.1.1 – Panorama des méthodes de calcul	103
4.1.2 – Méthodologie de calcul suivant les règles PS 92, pour les bâtiments « à risque normal »	104
4.1.3 – Méthodologie de calcul pour les installations classées « à risque spécial »	106
4.2 – Recueil des hypothèses pour le calcul sismique	107
4.2.1 – Site et sol	107
4.2.2 – Structure	112
4.2.3 – Charges	112
4.2.4 – Action sismique	112
4.3 – Formules pour le calcul des périodes propres	113
4.3.1 – Méthode de Rayleigh	114
4.3.2 – Masse concentrée au sommet d'une console de section constante	115
4.3.3 – Masse concentrée au sommet d'un poteau de section constante	117
4.3.4 – Masse répartie sur une console de section constante	118
4.3.5 – Masse concentrée au sommet d'une console de section constante et de masse non négligeable	118
4.3.6 – Masse unique située sur une poutre de section constante et de masse négligeable	118
4.3.7 – Poutres de section constante et de masse uniformément répartie	118
4.3.8 – Plaques rectangulaires d'épaisseur constante et de masse uniformément répartie	119

4.4 – Espacement entre blocs voisins	120
4.4.1 – Problématique	120
4.4.2 – Largeur des joints	121
4.4.3 – Prise en compte de l'entrechoquement	124
4.5 – Vérifications spécifiques	125
4.5.1 – Vérification de la stabilité d'ensemble	125
4.5.2 – Limites des déformations imposées	125
4.5.3 – Prise en compte des torsions d'axe vertical	125
4.5.4 – Prise en compte des effets du second ordre	128
4.5.5 – Infrastructures de grande longueur	129
5 — Modélisations	131
5.1 – Modélisation des structures	131
5.1.1 – Quelle modélisation pour quel résultat ?	131
5.1.2 – Représentation des éléments non structuraux	134
5.1.3 – Conseils de modélisation	134
5.2 – Modélisation des masses	141
5.3 – Modélisation de l'interaction sol-structure (ISS)	144
5.3.1 – Nécessité de modéliser le sol	144
5.3.2 – Modélisation du sol par un système de ressorts amortis	147
5.3.3 – Méthode Newmark-Rosenblueth	148
5.3.4 – Méthode de Deleuze	149
5.3.5 – Exemple de calcul de l'ISS	151
5.3.6 – Méthode simplifiée de Veletsos	159
5.4 – Modélisation de type brochette	163
5.4.1 – Rigidité des planchers	164
5.4.2 – Influence de la position des masses	164
5.4.3 – Calage de la brochette	166
5.4.4 – Différents modèles de brochettes	168
6 — Pratique de l'analyse modale	171
6.1 – Méthodologie de calcul	171
6.1.1 – Recherche des modes propres	171
6.1.2 – Sélection des modes utiles	173
6.1.3 – Prise en compte des modes négligés : les pseudo-modes	175
6.1.4 – Combinaisons des réponses modales	177
6.1.5 – Incidences du décollement du bâtiment sur le comportement dynamique	180
6.2 – Procédures de calcul	183
6.2.1 – Analyse dynamique 3-D/2-D : calcul direct des efforts	183
6.2.2 – Analyse statique 3-D. Brochette dynamique. Analyse statique équivalente 3-D	183
6.3 – Logiciel permettant la pratique de l'analyse modale	185
6.3.1 – Calcul statique équivalent	185
6.3.2 – Calcul de réponse spectrale	185
6.3.3 – Calcul de réponse transitoire	186
6.3.4 – Application aux bâtiments de grande hauteur	186
6.3.5 – Application aux bâtiments irréguliers	186
6.3.6 – Application aux ponts	186
6.3.7 – Cartes de ferrailage	186

7 — Analyse statique équivalente : méthodes simplifiées	191
7.1 — Conditions d'application	191
7.1.1 — Conditions générales	191
7.1.2 — Critères de régularité en plan	191
7.1.3 — Critères de régularité en élévation	194
7.1.4 — Cas particuliers	194
7.2 — Interaction sol-structure (hauteur de calcul)	194
7.3 — Méthode de calcul applicable aux bâtiments réguliers	196
7.3.1 — Périodes de vibration du mode fondamental	196
7.3.2 — Forces statiques équivalentes	197
7.4 — Méthode de calcul applicable aux bâtiments moyennement réguliers	198
7.4.1 — Périodes de vibration du mode fondamental	198
7.4.2 — Forces statiques équivalentes	199
8 — Calcul de bâtiments de faible hauteur (≤ 10 m)	201
8.1 — Méthode forfaitaire applicable aux bâtiments de faible hauteur ≤ 10 m	201
8.1.1 — Accélération nominale a_N	201
8.1.2 — Lecture spectrale $R_D(T)$	201
8.1.3 — Coefficient de comportement q	201
8.1.4 — Coefficient correctif d'amortissement p	202
8.1.5 — Coefficient topographique τ	202
8.2 — Application à un bâtiment contreventé par des voiles en béton armé	203
8.2.1 — Modèle A	207
8.2.2 — Modèle B	207
8.2.3 — Modèle C : analyse modale	207
8.3 — Incidence d'une transparence au rez-de-chaussée	209
8.4 — Incidence du changement de structure au dernier niveau	218
8.5 — Extension de la méthode forfaitaire aux bâtiments à 4 niveaux	219
8.5.1 — Calcul des forces statiques équivalentes par la méthode forfaitaire	219
8.5.2 — Analyse modale sur le modèle brochette	225
8.5.3 — Analyse modale sur le modèle 3-D	225
9 — Murs de soutènement	227
9.1 — Murs de soutènement déplaçables	229
9.1.1 — Méthode Mononobé-Okabé	229
9.1.2 — Méthode simplifiée de Seed	236
9.1.3 — Poussée dynamique passive due au terrain	236
9.1.4 — Poussée due à une surcharge sur le terre-plein	237
9.1.5 — Cas des sols saturés	237
9.2 — Parois d'infrastructure de bâtiments	239
9.2.1 — Méthode Mononobé-Okabé	239
9.2.2 — Poussée dynamique passive	241
9.2.3 — Poussée due à une surcharge sur le terre-plein	242
9.2.4 — Cas des sols saturés	242
10 — Analyse sismique de bâtiments existants	243
10.1 — Processus d'endommagement des bâtiments	243
10.1.1 — Indicateurs d'endommagement	243
10.1.2 — Scénarios d'effondrement	257

10.2 – Problématique	265
10.2.1 – La gestion de la résistance au séisme des bâtiments	267
10.2.2 – Pour une analyse appropriée : mieux connaître la demande	271
10.3 – Stratégie du renforcement	272
10.3.1 – Identifier les besoins et les difficultés techniques	272
10.3.2 – Avoir une vision d'ensemble	273
10.4 – Diagnostic – Constat de situation	274
10.4.1 – Historique de l'ouvrage, typologie	274
10.4.2 – Méthodologie	274
10.4.3 – Analyse des conséquences du diagnostic	278
10.5 – Thérapeutique – Actions correctives	280
10.5.1 – Renforcement à l'aide d'une nouvelle construction	280
10.5.2 – Renforcement par brélage	281
10.5.3 – Renforcement par voiles en béton armé	281
10.5.4 – Renforcement par panneaux de remplissage	284
10.5.5 – Renforcement par chemisage des poteaux et des poutres	285
10.5.6 – Renforcement par chaînages et/ou tirants	285
10.5.7 – Renforcement par treillis métalliques	287
10.5.8 – Renforcement par isolateurs	287
11 — Exemples de calculs	289
11.1 – Bâtiment d'habitation à 4 niveaux, avec voiles disposés en « peigne » : méthode simplifiée, analyse modale	289
11.1.1 – Méthode simplifiée	289
11.1.2 – Analyse modale	297
11.2 – Bâtiment d'habitation à 4 niveaux, avec voiles en béton armé : transmission au sol des efforts horizontaux	299
11.2.1 – Fondations sur pieux $\varnothing = 500$	302
11.2.2 – Fondations sur micropieux de type IV	302
11.3 – Bâtiment à usage de bureaux à 6 niveaux, avec portiques en béton armé. Choix du coefficient de comportement q	306
11.3.1 – Hauteur de calcul	306
11.3.2 – Charges	306
11.3.3 – Masses soumises à l'action sismique	306
11.3.4 – Choix du coefficient de comportement q	311
11.4 – Validation du coefficient de comportement q	314
11.5 – Bâtiment d'habitation à 11 niveaux, avec voiles en béton armé. Analyse modale sur un modèle 3-D et sur un modèle brochette	315
11.5.1 – Hauteur de calcul	315
11.5.2 – Charges	317
11.5.3 – Calcul direct des efforts	319
11.5.4 – Analyse statique 3-D. Brochette dynamique. Analyse statique équivalente 3-D	319
Bibliographie.....	323
Index	327