

Victor Davidovici

LA CONSTRUCTION EN ZONE SISMIQUE

Approche réglementaire

Modèles d'analyse des structures

Diagnostic des bâtiments existants

Exemples de calculs

L'auteur tient à exprimer ses remerciements à Richard Jouanne pour son soutien et son dévouement, lors de la préparation de cet ouvrage.

Pour toutes informations, vous pouvez vous adresser directement à Victor Davidovici par e-mail : victor.davidovici@wanadoo.fr

Attention au « photocopillage »

Nous alertons nos lecteurs sur la menace que représente, pour l'avenir de l'écrit, le développement massif du « photocopillage ».

Le Code de la propriété intellectuelle interdit expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est développée dans de nombreux cabinets, entreprises, administrations, organisations professionnelles et établissements d'enseignement, provoquant une baisse des achats de livres, de revues et de magazines. En tant qu'éditeur, nous vous mettons en garde pour que cessent de telles pratiques.

Aux termes de l'article L. 122-4 du Code de la propriété intellectuelle, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droits ou ayants cause est illicite ». L'article L. 122-2 et 3 a) du même code n'autorise que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective » et les « analyses et courtes citations », dans un but d'exemple et d'illustration, « sous réserve que soient indiqués clairement le nom de l'auteur et la source ». Toute représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, ne respectant pas la législation en vigueur, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle. Toutefois, l'autorisation d'effectuer des reproductions à finalité non commerciale par reprographie (photocopie, télécopie, copie papier réalisée par tout moyen) peut être obtenue auprès du Centre français d'exploitation du droit de copie, 3, rue Hautefeuille, 75006 Paris.

ISBN : 2.281.11180.6

© Groupe Moniteur (Éditions Le Moniteur), Paris, 1999

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