

— Traité de Génie Civil —
de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne

Volume 8

DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES EN BÉTON

Aptitude au service et éléments de structures

Renaud Favre • Jean-Paul Jaccoud
Olivier Burdet • Hazem Charif



PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES

Table des matières

Avant-propos	v
1 Répercussions de l'aptitude au service sur la conception des structures	1
1.1 Introduction	2
1.2 Choix des dimensions	2
1.3 Joints de dilatation	5
1.4 Propriétés du béton	7
1.5 Précontrainte	10
2 Eléments précontraints	13
2.1 Généralités	14
2.1.1 Précontrainte dans les poutres et les dalles	14
2.1.2 Forces agissant sur le câble	15
2.1.3 Prise en compte de la précontrainte dans les vérifications réglementaires	17
2.2 Charges équivalentes à la précontrainte	18
2.2.1 Simplification des forces agissant sur le câble	18
2.2.2 Force de précontrainte	21
2.2.3 Forces agissant sur le béton – charges équivalentes	22
2.2.4 Application à une poutre simple	23
2.2.5 Notion de balancement	25
2.2.6 Application à une poutre continue sur deux travées	26
2.2.7 Moments primaires et secondaires	28
2.2.8 Précontrainte sans effort normal	30
2.2.9 Résumé de l'effet de la précontrainte	30
2.3 Exemples d'application de la méthode des charges équivalentes	31
2.3.1 Poutre continue précontrainte	31
2.3.2 Câble chapeau	32
2.3.3 Poutre arquée	32
2.3.4 Poutre continue : précontrainte pour prévenir un tassement d'appui	34
2.3.5 Poutre bi-encastée – précontrainte rectiligne	35
2.3.6 Poutre continue – précontrainte rectiligne	36
2.3.7 Balancement d'une force excentrée agissant sur une console	36
2.3.8 Balancement dans un pont construit par encorbellement	38
2.4 Charges équivalentes dans les dalles	40
2.4.1 Disposition des câbles dans les planches-dalles précontraints	40
2.4.2 Précontrainte répartie	41
2.4.3 Précontrainte par bandes d'appui	43
2.4.4 Tracés réels des câbles	45
2.4.5 Exemple d'une dalle biaise précontrainte	46

2.5	Concept de la compensation des déformations	47
2.5.1	Limites de la méthode du balancement	47
2.5.2	Compensation des déformations	48
2.5.3	Critères pour le choix de la précontrainte	49
2.6	Tracé des câbles de précontrainte	50
2.6.1	Raccordements paraboliques	50
2.6.2	Influence du tracé des câbles sur les charges équivalentes	51
	Références	54
3	Contrôle de la fissuration	55
3.1	Fissuration des structures en béton	56
3.1.1	Diverses causes et périodes d'apparition des fissures	56
3.1.2	Dépassement de la résistance du béton à la traction	58
3.1.3	Motifs du contrôle de la fissuration et valeurs limites des ouvertures de fissures	66
3.1.4	Moyens pour réduire la fissuration	72
3.2	Bases expérimentales et théoriques	78
3.2.1	Comportement global d'un tirant de béton armé à l'état fissuré	78
3.2.2	Comportement local au voisinage d'une fissure : mécanisme d'adhérence	80
3.2.3	Estimation de l'ouverture des fissures	87
3.2.4	Facteurs d'influence prépondérants	93
3.2.5	Principes du dimensionnement de l'armature minimale	98
3.3	Méthodes réglementaires de contrôle de la fissuration	106
3.3.1	Principes généraux	106
3.3.2	Contrôle selon la norme SIA 162	107
3.3.3	Contrôle selon les normes européennes	112
3.4	Exemples pratiques	116
3.4.1	Dalle de bâtiment tenue à ses deux extrémités	116
3.4.2	Mur de galerie en tranchée couverte	119
3.4.3	Tablier de pont en béton précontraint	120
3.4.4	Dalle de toiture-terrasse	123
	Références	125
4	Contrôle des flèches	127
4.1	Introduction	128
4.2	Déformations instantanées et déformations à long terme	128
4.3	Limitation des déformations	130
4.3.1	Motifs	130
4.3.2	Moyens	131
4.3.3	Valeurs limites	131
4.4	Comportement global des structures fissurées	132
4.5	Modélisation	133
4.5.1	Courbures : notions fondamentales	135

4.5.2	Courbures en stades I et II : $1/r_1, 1/r_2$	136
4.5.3	Courbure moyenne $1/r_m$	137
4.6	Calcul des déformations	140
4.6.1	Méthode générale	140
4.6.2	Pourcentage moyen d'armature tendue ρ_m	142
4.6.3	Méthodes simplifiées pour le calcul des flèches	144
4.6.4	Supplément de flèche w_{cs} dû au retrait	152
4.7	Etude paramétrique : influence sur les courbures	152
4.7.1	Influence de la résistance à la traction f_{ct}	153
4.7.2	Influence du coefficient de fluage ϕ	153
4.7.3	Influence du pourcentage d'armature tendue ρ	154
4.7.4	Influence du rapport entre l'armature comprimée et tendue ρ'/ρ	154
4.8	Réduction des flèches grâce aux bétons à hautes performances (BHP)	155
4.8.1	Propriétés améliorées	155
4.8.2	Comparaison entre les BHP et les bétons ordinaires	157
4.8.3	Adaptation de la méthode SIA 162 / Code Modèle CEB-FIP 1990 aux BHP	158
4.9	Exemples numériques	159
4.9.1	Poutre simple	159
4.9.2	Dalle unidirectionnelle continue	164
4.9.3	Poutre bi-encastree	171
4.9.4	Dalle nervurée	178
4.9.5	Dalle-champignon	181
	Références	188
5	Redistribution des efforts due aux effets différés et à la fissuration	191
5.1	Introduction	192
5.2	Déformations du béton	193
5.3	Déformation instantanée et module d'élasticité	194
5.4	Retrait	195
5.4.1	Types de retrait	196
5.4.2	Effets du retrait	196
5.4.3	Valeurs des retraits	198
5.5	Fluage	199
5.5.1	Types de fluage	199
5.5.2	Effets du fluage	199
5.5.3	Paramètres affectant le fluage	200
5.5.4	Fonction de fluage Φ et coefficient de fluage ϕ	201
5.5.5	Valeurs du coefficient de fluage ϕ	203
5.5.6	Principe de superposition du fluage	204
5.6	Relaxation	205
5.6.1	Relaxation intrinsèque	205
5.6.2	Fonction de relaxation R et coefficient de relaxation r	206
5.6.3	Relaxation des aciers	207

5.7	Analyses des effets différés	208
5.7.1	Bases du problème	208
5.7.2	Interdépendance entre Φ et R	208
5.7.3	Solution algébrique : méthode du module effectif ajusté ou équation de base	210
5.7.4	Coefficient de vieillissement χ	214
5.7.5	Solution numérique pas-à-pas de l'équation intégrale	215
5.8	Analyse des sections	216
5.8.1	Effets initiaux	217
5.8.2	Effets différés	219
5.8.3	Applications	223
5.9	Analyse des systèmes viscoélastiques linéaires	231
5.9.1	Méthode des forces généralisée pour la prise en compte des effets différés	231
5.9.2	Applications	235
5.9.3	Enseignements pratiques	245
	Références	249
6	Conception des bâtiments	251
6.1	Facteurs déterminants pour la conception	253
6.1.1	Contraintes fonctionnelles et architecturales	253
6.1.2	Problème des joints	261
6.1.3	Parkings en sous-sol	264
6.1.4	Moyens d'assurer une bonne qualité de conception	269
6.2	Reprise des charges verticales et horizontales	275
6.2.1	Principes	275
6.2.2	Système de reprise des charges verticales	279
6.2.3	Système de reprise des charges horizontales	281
6.3	Analyse des systèmes porteurs courants	282
6.3.1	Descente des charges	283
6.3.2	Actions horizontales	286
6.3.3	Sollicitation des murs de contreventement	297
	Références	303
7	Dalles	305
7.1	Conception des dalles	306
7.1.1	Classification des dalles	306
7.1.2	Choix du système	308
7.1.3	Choix des dimensions	309
7.2	Théorie d'élasticité	310
7.2.1	Equation différentielle de Lagrange	310
7.2.2	Résolution de l'équation différentielle	315
7.2.3	Planchers-dalles et dalles champignon	324
7.2.4	Problèmes particuliers	332

7.3	Comportement et mécanismes de résistance d'une dalle	342
7.3.1	Phases successives du comportement d'une dalle en flexion	343
7.3.2	Résistance à la flexion et à la torsion	344
7.3.3	Effort tranchant	350
7.3.4	Poinçonnement	352
7.4	Théorie de plasticité	371
7.4.1	Mécanismes de ruine – rotules plastiques et lignes de rupture	372
7.4.2	Méthodes de calcul	373
7.4.3	Calcul des dalles par la méthode des lignes de rupture	376
7.4.4	Résolution	379
7.4.5	Exemples	381
7.4.6	Planchers-dalles et dalles-champignons	385
7.4.7	Calcul des dalles par la méthode statique	392
7.5	Dalles précontraintes	393
7.5.1	Technologie des dalles précontraintes	396
7.5.2	Précontrainte avec adhérence	399
7.5.3	Précontrainte sans adhérence	399
	Références	401
8	Murs	403
8.1	Introduction	404
8.1.1	Mode de fonctionnement des divers types de murs	404
8.1.2	Méthodes d'analyse	404
8.2	Poutres-cloisons	406
8.2.1	Analyse élastique	406
8.2.2	Analyse plastique	406
8.2.3	Disposition de l'armature	411
8.2.4	Exemple	411
8.3	Murs de contreventement	413
8.3.1	Sécurité structurale	414
8.3.2	Aptitude au service	415
8.3.3	Exemple	416
	Références	421
9	Colonnes	423
9.1	Introduction	424
9.1.1	Généralités	424
9.1.2	Stabilité transversale d'un bâtiment	424
9.1.3	Distinction entre colonnes chargées de manière centrée ou excentrée	425
9.1.4	Problématique d'un dimensionnement basé sur un diagramme d'interaction $M_R - N_R$	427
9.1.5	Flambage, instabilité et élancement des colonnes	427

9.1.6	Choix d'une méthode de dimensionnement	431
9.2	Calcul selon la théorie du second ordre.....	432
9.2.1	Calcul de la longueur de flambage selon l'Eurocode 2.....	432
9.2.2	Calcul non linéaire des colonnes élancées.....	435
9.2.3	Exemple de calcul d'une pile de pont élancée	436
9.2.4	Méthode simplifiée de calcul selon l'Eurocode 2	439
9.2.5	Courbes de flambage pour colonnes bi-articulées selon la norme SIA 162.....	440
9.3	Capacité portante des colonnes frettées subissant des rotations imposées importantes.....	442
9.3.1	Capacité de déformation	444
9.3.2	Dimensionnement de la section de la colonne	446
9.3.3	Calcul et détails de construction de l'armature transversale (étriers)	451
9.3.4	Exemple numérique	454
9.4	Vérification de l'aptitude au service.....	457
9.4.1	Principes de vérification	457
9.4.2	Estimation des rotations imposées.....	460
9.4.3	Exemple numérique	463
9.5	Frettage de zones de béton fortement comprimées	464
9.5.1	Principe d'action de l'armature transversale	464
9.5.2	Loi contrainte-déformation du béton fretté	465
9.5.3	Exemple d'application	469
	Références.....	469
10	Semelles et radiers de fondation	471
10.1	Rappels géotechniques.....	472
10.1.1	Généralités	472
10.1.2	Etude de la capacité portante	474
10.1.3	Etude de l'aptitude au service.....	478
10.2	Conception des fondations.....	479
10.2.1	Interaction sol-structure	479
10.2.2	Conception d'ensemble.....	480
10.2.3	Vérification par le calcul	482
10.3	Vérification au poinçonnement.....	482
10.4	Les semelles isolées	483
10.4.1	Types de semelles	483
10.4.2	Dimensionnement	485
10.5	Les semelles continues et les radiers	492
10.5.1	Introduction.....	492
10.5.2	Dimensionnement	494
10.6	Exemple numérique	502
10.6.1	Introduction.....	502
10.6.2	Répartition des contraintes au sol.....	503
10.6.3	Vérification au poinçonnement du radier pour une colonne intérieure.....	503
10.6.4	Calcul des moments totaux pour un champ.....	505
10.6.5	Répartition de l'armature	507

Références	509
11 Annexes	511
A.3 Contrôle de la fissuration.....	514
A.4 Contrôle des flèches.....	521
A.5 Redistribution des sollicitations due aux effets différés et à la fissuration	544
A.6 Conception des bâtiments	554
A.7 Dalles	557
A.9 Colonnes	572
A.10 Semelles et radiers de fondation.....	580
Notations	581
Index analytique.....	587
Présentation des auteurs	593