

— 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

Le Traité de Génie Civil est une publication des Presses polytechniques et universitaires romandes, fondation scientifique dont le but est principalement la diffusion des travaux de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Le catalogue de ces publications peut être obtenu aux Presses polytechniques et universitaires romandes, CH-1015 Lausanne.

© 1990, Première édition

Nouvelle édition, revue et augmentée, ISBN 2-88074-330-3

© 1997, Presses polytechniques et universitaires romandes, CH-1015 Lausanne

Tous droits réservés. Reproduction, même partielle, interdite.

# Table des matières

Avant-propos .....	v
<b>1 Répercussions de l'aptitude au service sur la conception des structures .....</b>	<b>1</b>
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
<b>2 Eléments précontraints .....</b>	<b>13</b>
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 biaisée 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
<b>3</b>	<b>Contrôle de la fissuration .....</b>	<b>55</b>
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	Méthode 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
<b>4</b>	<b>Contrôle des flèches .....</b>	<b>127</b>
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 $\rho_m$ .....	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 $\phi$ .....	153
4.7.3	Influence du pourcentage d'armature tendue $\rho$ .....	154
4.7.4	Influence du rapport entre l'armature comprimée et tendue $\rho'/\rho$ .....	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
<b>5</b>	<b>Redistribution des efforts due aux effets différés et à la fissuration.....</b>	<b>191</b>
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 $\Phi$ et coefficient de fluage $\phi$ .....	201
5.5.5	Valeurs du coefficient de fluage $\phi$ .....	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 $\Phi$ et $R$ .....	208
5.7.3	Solution algébrique : méthode du module effectif ajusté ou équation de base.....	210
5.7.4	Coefficient de vieillissement $\chi$ .....	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
<b>6</b>	<b>Conception des bâtiments.....</b>	<b>251</b>
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
<b>7</b>	<b>Dalles .....</b>	<b>305</b>
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
<b>8</b>	<b>Murs.....</b>	<b>403</b>
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
<b>9</b>	<b>Colonnes .....</b>	<b>423</b>
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
<b>10 Semelles et radiers de fondation .....</b>		<b>471</b>
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
<b>11 Annexes .....</b>	<b>511</b>
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
<b>Notations .....</b>	<b>581</b>
<b>Index analytique.....</b>	<b>587</b>
<b>Présentation des auteurs .....</b>	<b>593</b>