

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

Volume 12

PONTS EN ACIER

Conception et dimensionnement
des ponts métalliques et mixtes acier-béton

Jean-Paul Lebet et Manfred A. Hirt



PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES

— Traité de Génie Civil —

de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne

Cet ouvrage fait partie d'une série d'une vingtaine de volumes qui sont publiés sous la direction de René Walther et Manfred Hirt, professeurs à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, dont la liste suivante, non exhaustive, présente le plan général de publication (voir l'état des parutions sur notre site web <http://www.ppur.org>).

1. ANALYSE DES STRUCTURES ET MILIEUX CONTINUS
Statique appliquée
2. ANALYSE DES STRUCTURES ET MILIEUX CONTINUS
Mécanique des structures
3. ANALYSE DES STRUCTURES ET MILIEUX CONTINUS
Mécanique des solides
4. ANALYSE DES STRUCTURES ET MILIEUX CONTINUS
Poutres et plaques
5. ANALYSE DES STRUCTURES ET MILIEUX CONTINUS
Coques
6. ANALYSE DES STRUCTURES ET MILIEUX CONTINUS
Méthode des éléments finis
7. DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES EN BÉTON
Bases et technologie
8. DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES EN BÉTON
Aptitude au service et éléments de structures
9. PONTS EN BÉTON
Généralités, conception et dimensionnement
10. CONSTRUCTION MÉTALLIQUE
Notions fondamentales et méthodes de dimensionnement
11. CHARPENTES MÉTALLIQUES
Conception et dimensionnement des halles et bâtiments
12. PONTS EN ACIER
Conception et dimensionnement des ponts métalliques et mixtes acier-béton
13. CONSTRUCTION EN BOIS
Matériau, technologie et dimensionnement
14. HYDRODYNAMIQUE
Une introduction
15. CONSTRUCTIONS HYDRAULIQUES
Ecoulements stationnaires
16. HYDRAULIQUE FLUVIALE
Ecoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple
17. BARRAGES
Conception, construction, contrôle
18. MÉCANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES
19. FOUILLES ET FONDATIONS
20. OUVRAGES ET TRAVAUX SOUTERRAINS
21. SYSTEMES ÉNERGÉTIQUES
Offre et demande d'énergie: méthodes d'analyse
22. AMÉNAGEMENTS ÉNERGÉTIQUES
23. ÉTUDES D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT
24. MATÉRIAUX
Constitution et lois de comportements rhéologiques
25. VOIES DE CIRCULATION

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, Rolex Learning Center, C. P. 119, CH-1015 Lausanne**

Première édition
ISBN 978-2-88074-765-7
© 2009, 2015 réimpression corrigée
Presses polytechniques et universitaires romandes, CH-1015 Lausanne
Tous droits réservés. Reproduction, même partielle, interdite.
Imprimé en Italie

Les auteurs et les Presses polytechniques et universitaires romandes remercient l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne pour le soutien apporté à la publication du Traité de Génie Civil.

Table des matières

Avant-propos	V
Table des matières	VII

INTRODUCTION AUX PONTS

1. Introduction	1
1.1 Objectifs de l'ouvrage	3
1.2 Structure et contenu	3
1.3 Documents de référence	5
1.3.1 Normes et recommandations	5
1.3.2 Autres références	6
1.4 Conventions	7
1.4.1 Terminologie et typographie	7
1.4.2 Axes	8
1.4.3 Notations et signes	9
1.4.4 Unités	9
2. Description des ponts	11
2.1 Introduction	13
2.2 Critères de classification des ponts	13
2.2.1 Utilisation	13
2.2.2 Géométrie	14
2.2.3 Système porteur	15
2.2.4 Type de dalle	17
2.2.5 Section transversale	18
2.2.6 Position de la dalle	19
2.2.7 Montage de la structure métallique	20
2.2.8 Mise en place de la dalle	21
2.3 Eléments structuraux	22
2.3.1 Superstructure	22
2.3.2 Infrastructure	25
2.4 Equipements	25
2.4.1 Appareils d'appuis	25
2.4.2 Joints de chaussée	26
2.4.3 Evacuation de l'eau	28
3. Historique des ponts métalliques et mixtes	29
3.1 Introduction	31
3.2 Histoire de la construction des ponts	31
3.3 Records de portée	42

CONCEPTION DES PONTS

4.	Bases pour la conception	45
4.1	Introduction	47
4.2	Elaboration d'un projet	48
4.2.1	Etudes préliminaires	48
4.2.2	Avant-projets	50
4.2.3	Projet définitif	51
4.2.4	Appel d'offres	51
4.2.5	Projet d'exécution	51
4.3	Données pour un projet de pont	52
4.3.1	Exigences d'utilisation	53
4.3.2	Données relatives à l'ouvrage	53
4.3.3	Données relatives au site	54
4.4	Qualités requises pour un pont	56
4.4.1	Fiabilité	56
4.4.2	Robustesse	56
4.4.3	Durabilité	58
4.4.4	Esthétique	58
4.4.5	Economie	61
4.5	Propriétés et choix des matériaux	63
4.5.1	Nuances et qualités d'acier	63
4.5.2	Soudabilité	66
4.5.3	Aciers thermomécaniques	67
4.5.4	Aciers utilisés pour la construction des ponts	68
4.5.5	Protection contre la corrosion des aciers	69
5.	Systèmes porteurs des ponts	75
5.1	Introduction	77
5.2	Transmission des charges	78
5.3	Structure porteuse longitudinale	80
5.3.1	Influence de la portée	81
5.3.2	Pont poutre à âme pleine ou en caisson	83
5.3.3	Pont poutre à treillis	86
5.3.4	Système statique longitudinal des ponts poutres	86
5.3.5	Courbure en plan	90
5.4	Structure porteuse transversale	91
5.4.1	Contreventement	91
5.4.2	Système statique transversal des ponts poutres	92
5.5	Sections transversales	94
5.5.1	Sections ouvertes	94
5.5.2	Sections fermées	96
5.6	Entretoises	97

5.6.1	Fonctions des entretoises	97
5.6.2	Types d'entretoise	98
5.7	Contreventements	100
5.7.1	Fonctions des contreventements	100
5.7.2	Formes de contreventement	101
6.	Détails de construction	105
6.1	Introduction	107
6.2	Détails de conception générale des ponts	108
6.3	Poutres à âme pleine	111
6.3.1	Soudures	111
6.3.2	Raidisseurs	114
6.4	Entretoises	119
6.4.1	Entretoises cadre	119
6.4.2	Entretoises en treillis	122
6.4.3	Diaphragmes	124
6.5	Contreventements	124
6.6	Poutres à treillis	125
6.7	Dalle orthotrope	127
6.8	Equipements	129
7.	Fabrication et montage de la structure métallique	131
7.1	Introduction	133
7.2	Fabrication en atelier	133
7.2.1	Réception et préparation des tôles	133
7.2.2	Réalisation des éléments porteurs	134
7.2.3	Soudures	134
7.2.4	Protection contre la corrosion	134
7.3	Transport	135
7.4	Assemblage sur le chantier	136
7.5	Montage de la structure métallique	138
7.5.1	Particularités du montage de la charpente métallique	138
7.5.2	Montage à la grue depuis le sol	139
7.5.3	Montage par encorbellement	141
7.5.4	Montage par lancement	144
7.5.5	Mise en place du pont complet ou de très grands éléments de pont	151
7.6	Tolérances	153
8.	Dalle des ponts mixtes	155
8.1	Introduction	157
8.2	Conception des dalles	157
8.2.1	Fonctions de la dalle	158

8.2.2	Dimensions générales	158
8.3	Détails de construction	160
8.3.1	Étanchéité et revêtement	160
8.3.2	Bordures et parapets	161
8.3.3	Liaison de la dalle aux poutres métalliques	162
8.4	Mise en place de la dalle en béton	164
8.4.1	Dalle coulée sur place	164
8.4.2	Dalle ripée	168
8.4.3	Dalle préfabriquée	170
8.4.4	Incidences de la mise en place de la dalle sur le dimensionnement	173
8.4.5	Influence de la méthode de montage de la dalle sur les sollicitations des piles	175
8.5	Fissuration de la dalle	176
8.5.1	Origines de la fissuration	176
8.5.2	Effets d'hydratation de la dalle en béton	177
8.5.3	Effets des étapes de bétonnage	180
8.6	Précontrainte longitudinale	183
8.6.1	Choix du système de précontrainte longitudinale	184
8.6.2	Approche simplifiée du calcul de la perte de précontrainte	187

ANALYSE ET DIMENSIONNEMENT

9.	Principes de dimensionnement	189
9.1	Introduction	191
9.2	Étapes de la vie d'un ouvrage et documents d'organisation	191
9.3	Elaboration du projet	193
9.3.1	Convention d'utilisation	193
9.3.2	Base du projet	194
9.3.3	Conception	196
9.3.4	Analyse structurale	197
9.3.5	Dimensionnement	198
9.4	Actions	199
9.5	Vérification de l'aptitude au service	201
9.5.1	Principe de la vérification	201
9.5.2	Cas de charges	201
9.5.3	Limites de service	202
9.6	Vérification de la sécurité structurale	204
9.6.1	Principe de la vérification	204
9.6.2	Cas de charges	205
9.6.3	Résistance ultime	206
10.	Charges et actions	209
10.1	Introduction	211
10.2	Charges permanentes et effets de longue durée	211

10.2.1	Poids propre de la structure porteuse	211
10.2.2	Poids propre des éléments non porteurs	213
10.2.3	Retrait, fluage, précontrainte	213
10.2.4	Tassement d'appui	213
10.2.5	Action des terres et de l'eau	214
10.3	Charges de trafic	214
10.3.1	Ponts-route	214
10.3.2	Autres types de ponts	217
10.4	Actions climatiques	218
10.4.1	Vent	218
10.4.2	Température	219
10.4.3	Neige	222
10.5	Charges pendant la construction	222
10.6	Actions accidentelles	223
10.6.1	Séisme	223
10.6.2	Choc	227
10.7	Forces de frottement et de rappel des appuis	231
10.7.1	Appuis glissants ou à rouleaux	231
10.7.2	Appuis déformables	231
11.	Efforts intérieurs des ponts poutres	233
11.1	Introduction	235
11.2	Modélisation d'un pont poutre	236
11.2.1	Modèle de la structure	236
11.2.2	Moment de flexion	239
11.2.3	Effort tranchant	240
11.2.4	Moment de torsion	241
11.3	Torsion	244
11.3.1	Rappels	245
11.3.2	Torsion uniforme	245
11.3.3	Torsion non uniforme	249
11.3.4	Torsion mixte	254
11.4	Ponts droits à section fermée	256
11.4.1	Comportement à la torsion	256
11.4.2	Calcul des efforts intérieurs	257
11.5	Ponts droits à section ouverte	259
11.5.1	Comportement à la torsion	259
11.5.2	Ligne de répartition transversale	260
11.5.3	Effets d'un contreventement	269
11.5.4	Calcul des efforts intérieurs	270
11.6	Ponts biais	272
11.6.1	Effet du biais	272
11.6.2	Section fermée	273
11.6.3	Section ouverte	277

11.7	Ponts courbes	281
11.7.1	Effet de la courbure	281
11.7.2	Equations différentielles	282
11.7.3	Section fermée	284
11.7.4	Section fermée – Méthode de calcul simplifiée	288
11.7.5	Section ouverte	292
12.	Poutres métalliques	295
12.1	Introduction	297
12.2	Résistance à un moment de flexion	298
12.2.1	Introduction	298
12.2.2	Flambage vertical de la semelle comprimée dans l'âme	299
12.2.3	Flambage par rotation de la semelle comprimée	301
12.2.4	Déversement de la poutre	302
12.2.5	Voilement de l'âme	308
12.2.6	Vérification de la sécurité structurale	312
12.2.7	Exemple numérique: résistance à un moment de flexion	313
12.3	Résistance à un effort tranchant	317
12.3.1	Introduction	317
12.3.2	Contribution pré-critique avant voilement élastique	318
12.3.3	Contribution post-critique après voilement élastique	319
12.3.4	Vérification de la sécurité structurale	326
12.3.5	Exemple numérique: Résistance à un effort tranchant	326
12.4	Résistance sous interaction d'efforts	327
12.4.1	Condition d'interaction	327
12.4.2	Vérification de la sécurité structurale	329
12.4.3	Exemple numérique: Résistance d'une poutre sous interaction d'efforts	329
12.5	Résistance aux charges concentrées	330
12.5.1	Résistance aux charges concentrées mobiles	331
12.5.2	Vérification de la sécurité structurale	333
12.6	Raidisseurs	333
12.6.1	Raidisseurs transversaux intermédiaires	334
12.6.2	Raidisseurs d'appuis intermédiaires	335
12.6.3	Raidisseurs d'appuis d'extrémité	336
12.6.4	Raidisseurs longitudinaux	338
12.7	Fatigue	340
12.7.1	Résistance à la fatigue	340
12.7.2	Vérification	341
12.7.3	Respiration de l'âme	344
12.8	Poutres en caisson	345
12.8.1	Différences entre poutres en caisson et poutres à âme pleine composées-soudées	345
12.8.2	Caisson sans raidisseur longitudinal	347
12.8.3	Caisson avec raidisseurs longitudinaux	347
12.8.4	Raidisseurs transversaux	349

13. Poutres mixtes	351
13.1 Introduction	353
13.2 Effets des actions particulières dans les ponts mixtes	354
13.2.1 Introduction	354
13.2.2 Retrait	354
13.2.3 Température	360
13.3 Calcul des efforts intérieurs	362
13.3.1 Principe	362
13.3.2 Sections résistantes	363
13.3.3 Influence de la fissuration	363
13.3.4 Largeur participante de la dalle	366
13.4 Résistance en section et vérification de la sécurité structurale	367
13.4.1 Classes de section et modèles de résistance	367
13.4.2 Résistance élastique	368
13.4.3 Résistance plastique	370
13.4.4 Vérification de la sécurité structurale à la flexion	374
13.4.5 Vérification de la sécurité structurale à l'effort tranchant et sous interaction d'efforts	376
13.5 Connexion acier-béton	376
13.5.1 Cisaillement longitudinal	376
13.5.2 Résistance des goujons	382
13.5.3 Nombre et disposition des goujons	383
13.5.4 Introduction d'un effort rasant concentré	386
13.6 Cisaillement longitudinal de la dalle	390
13.6.1 Cisaillement longitudinal dans l'épaisseur de la dalle	390
13.6.2 Cisaillement longitudinal autour des goujons	393
13.6.3 Interaction cisaillement longitudinal – flexion transversale	393
13.7 Vérification de l'aptitude au service	393
13.7.1 Contrainte de traction dans la poutre métallique	394
13.7.2 Déformations	394
13.7.3 Fissuration	395
13.7.4 Vibrations	396
14. Entretoises et contreventements	399
14.1 Introduction	401
14.2 Charges et actions	401
14.2.1 Rappel des fonctions des entretoises et des contreventements	401
14.2.2 Vent	402
14.2.3 Stabilisation au déversement	403
14.2.4 Effet de la courbure	404
14.2.5 Appuis temporaires pour les vérins	406
14.3 Sollicitations des entretoises	407

14.3.1	Pont à section transversale ouverte	407
14.3.2	Pont à section transversale fermée	411
14.4	Sollicitations des contreventements	417
14.4.1	Forces horizontales	417
14.4.2	Effet de la forme du contreventement	417
14.4.3	Contreventement d'un caisson ouvert	419
14.5	Dimensionnement	420
14.5.1	Sécurité structurale	420
14.5.2	Dimensions minimales	422
15.	Stabilité d'ensemble	425
15.1	Introduction	427
15.2	Actions à considérer	428
15.2.1	Actions permanentes	429
15.2.2	Charges utiles	429
15.2.3	Vent	429
15.2.4	Séisme	430
15.3	Stabilité au renversement	430
15.3.1	Phénomène	430
15.3.2	Vérification de la sécurité	430
15.3.3	Mesures	431
15.4	Soulèvement au droit des appuis	432
15.4.1	Phénomène	432
15.4.2	Vérification de la sécurité	433
15.4.3	Mesures	433
15.5	Stabilité longitudinale des ponts flottants	433
15.5.1	Phénomène	433
15.5.2	Vérification de la sécurité	435
15.5.3	Mesures	439

AUTRES TYPES DE PONTS

16.	Ponts-rails	441
16.1	Introduction	443
16.2	Conception	444
16.2.1	Système porteur longitudinal	444
16.2.2	Section transversale	447
16.2.3	Fatigue et assemblages	451
16.2.4	Détails de construction particuliers	452
16.2.5	Esthétique	453

16.3	Charges	454
16.3.1	Poids propre	454
16.3.2	Charges de trafic	455
16.3.3	Coefficient dynamique	456
16.3.4	Coefficient pour la classification des modèles de charge normalisés	456
16.3.5	Déraillement et choc	457
16.3.6	Effets aérodynamiques sur les parois antibruit	457
16.3.7	Température	458
16.4	Vérifications	458
16.4.1	Vérification de la sécurité structurale	458
16.4.2	Vérification de l'aptitude au service	459
17.	Ponts pour piétons et cyclistes	465
17.1	Introduction	467
17.2	Conception	467
17.2.1	Système porteur	467
17.2.2	Platelage	469
17.3	Charges et actions	471
17.3.1	Poids propre	471
17.3.2	Charge utile	471
17.4	Comportement dynamique	472
17.4.1	Introduction	472
17.4.2	Conception et mesures correctives	473
17.4.3	Analyse dynamique	474
17.4.4	Dimensionnement d'un amortisseur massique	482
17.4.5	Vérifications et valeurs limites	485
17.4.6	Application numérique	489
18.	Ponts arcs	493
18.1	Introduction	495
18.2	Forme et fonctionnement	496
18.2.1	Position du tablier	496
18.2.2	Système statique	496
18.2.3	Nombre d'arcs	497
18.2.4	Elancement	497
18.3	Conception et éléments de construction	498
18.3.1	Cheminement des charges	498
18.3.2	Arcs	498
18.3.3	Tablier	499
18.3.4	Suspentes	502
18.3.5	Contreventement	506
18.4	Montage	506

18.4.1	Haubanage	507
18.4.2	Demi-arc levé ou abaissé	507
18.4.3	Pont entier	508
18.4.4	Construction des arcs en prenant appui sur le tablier	509
18.5	Analyse structurale	510
18.5.1	Efforts intérieurs	510
18.5.2	Charge asymétrique et concentrée	511
18.5.3	Stabilité des arcs	514
18.6	Vérifications	518
18.6.1	Position des charges de trafic	518
18.6.2	Vérification de l'arc	520

APPLICATION NUMÉRIQUE

19.	Exemple d'un pont mixte	523
19.1	Introduction	525
19.2	Description de l'ouvrage	525
19.2.1	Utilisation	525
19.2.2	Profil en long et tracé en plan	526
19.2.3	Section transversale type et dalle en béton	526
19.2.4	Poutres maîtresses	526
19.2.5	Entretoises et raidisseurs	528
19.2.6	Contreventements	528
19.2.7	Connexion acier-béton	528
19.2.8	Fabrication et montage	528
19.2.9	Matériaux	529
19.3	Prédimensionnement	529
19.3.1	Hauteur de la poutre métallique	530
19.3.2	Actions	530
19.3.3	Dimensions des sections transversales	531
19.4	Situations de risque et actions	534
19.4.1	Situations de risque et états-limites	535
19.4.2	Actions	536
19.5	Analyse structurale	538
19.5.1	Positionnement transversal des charges de trafic	538
19.5.2	Positionnement longitudinal des charges de trafic	539
19.5.3	Efforts intérieurs	539
19.5.4	Fissuration et méthode de bétonnage	543
19.6	Vérification de la sécurité structurale	544
19.6.1	Définition des sections	545
19.6.2	Section en travée au montage	546
19.6.3	Section au milieu de la travée centrale au stade définitif	549

19.6.4	Section sur appui intermédiaire au stade définitif	550
19.6.5	Vérification des raidisseurs	556
19.7	Dimensionnement de la connexion acier-béton	558
19.7.1	Résistance élastique sur appui intermédiaire	558
19.7.2	Résistance plastique en travée	560
19.8	Sécurité à la fatigue	563
19.8.1	Semelle inférieure en travée	563
19.8.2	Semelle supérieure sur appui P2	565
19.8.3	Connexion acier-béton	566
19.8.4	Respiration de l'âme	567
19.9	Vérification de l'aptitude au service	568
19.9.1	Confort	568
19.9.2	Aspect	568
19.9.3	Aptitude au fonctionnement	570
	Index	571
	Notations	577
	Biographie des auteurs	582