

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

Volume 10

CONSTRUCTION MÉTALLIQUE

Notions fondamentales et méthodes de dimensionnement

Manfred A. Hirt
Rolf Bez



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.**

Première édition

ISBN 2-88074-249-8

© 1994, Presses polytechniques et universitaires romandes, CH-1015 Lausanne
Tous droits réservés. Reproduction, même partielle, interdite.

Photo de couverture

Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (photo R. Bez)

Table des matières

AVANT-PROPOS	V
TABLE DES MATIÈRES	VII

PRINCIPES DE BASE

1. Introduction	1
1.1 Objectifs de l'ouvrage	3
1.2 Structuration et contenu	3
1.3 Documents de référence	4
1.4 Conventions	5
1.4.1 Terminologie et typographie	5
1.4.2 Axes	6
1.4.3 Notations et signes	6
1.4.4 Unités	7
1.5 Historique de la construction métallique	7
1.6 Concept de dimensionnement	8
1.6.1 Principes	8
1.6.2 Sécurité structurale	9
1.6.3 Aptitude au service	9
2. Principes de dimensionnement	11
2.1 Introduction	13
2.2 Buts et moyens	14
2.2.1 Buts à atteindre	14
2.2.2 Aptitude au service et plan d'utilisation	15
2.2.3 Sécurité structurale et plan de sécurité	16
2.2.4 Documentation pour le maître de l'ouvrage	16
2.3 Aptitude au service	17
2.3.1 Exigences	17
2.3.2 Etats d'utilisation	17
2.3.3 Plan d'utilisation	18
2.3.4 Vérification par le calcul	20
2.4 Sécurité structurale	24
2.4.1 Exigences	24
2.4.2 Situations de risque	25
2.4.3 Plan de sécurité	27
2.4.4 Vérification par le calcul	29
2.4.5 Approche probabiliste	30
2.4.6 Approche avec des facteurs partiels	34
2.5 Charges et actions	41
2.5.1 Poids propre de la structure porteuse	41

2.5.2	Poids propre des éléments non porteurs	41
2.5.3	Charges utiles dans les bâtiments	42
2.5.4	Neige	43
2.5.5	Vent	44
2.5.6	Température	45
2.5.7	Actions accidentelles	46
2.6	Analyse d'une structure	47
2.6.1	Modélisation de la structure	47
2.6.2	Calcul des efforts intérieurs	49
2.6.3	Calcul de la résistance	50
3.	Matériaux	55
3.1	Introduction	57
3.2	Elaboration de l'acier et produits des aciéries	58
3.2.1	Elaboration de l'acier	58
3.2.2	Traitements thermiques et mécaniques	60
3.2.3	Produits laminés à chaud	62
3.2.4	Produits façonnés à froid	66
3.2.5	Profilés tubulaires	66
3.2.6	Imperfections des produits laminés	67
3.2.7	Contraintes résiduelles	68
3.3	Caractéristiques des matériaux de construction	70
3.3.1	Acier de construction	70
3.3.2	Aluminium	74
3.3.3	Aciers d'armature et de précontrainte	76
3.3.4	Béton	77
3.4	Caractéristiques du matériau des moyens d'assemblage	80
3.4.1	Rivets	81
3.4.2	Boulons	81
3.4.3	Soudures	82
3.4.4	Éléments de connexion acier-béton	83
3.4.5	Autres moyens d'assemblage	84

DIMENSIONNEMENT D'ÉLÉMENTS

4.	Résistance en section	87
4.1	Introduction	89
4.2	Résistance à un effort normal	90
4.3	Résistance à un moment de flexion	93
4.3.1	Flexion simple	93
4.3.2	Flexion d'une section monosymétrique	97
4.3.3	Flexion d'une section hybride	99
4.3.4	Flexion gauche	100
4.4	Résistance à un effort tranchant	106
4.5	Résistance à un moment de torsion	108
4.5.1	Modes de résistance à la torsion	108

4.5.2	Torsion uniforme.....	109
4.5.3	Torsion non uniforme	118
4.5.4	Torsion mixte	124
4.6	Résistance sous interaction d'efforts.....	126
4.6.1	Principes	126
4.6.2	Moment de flexion et effort normal	127
4.6.3	Moment de flexion et effort tranchant.....	133
4.6.4	Effort normal et effort tranchant.....	137
4.6.5	Moment de flexion, effort normal et effort tranchant.....	139
4.6.6	Interaction avec un moment de torsion	139
4.7	Section mixte acier-béton.....	144
4.7.1	Définitions.....	144
4.7.2	Principes	145
4.7.3	Résistance à un effort normal	149
4.7.4	Résistance à un moment de flexion.....	154
4.7.5	Résistance à un effort tranchant	167
4.7.6	Résistance sous interaction d'efforts	167
5.	Eléments fléchis.....	169
5.1	Introduction.....	171
5.2	Principes de dimensionnement	172
5.2.1	Aptitude au service	172
5.2.2	Sécurité structurale.....	175
5.2.3	Sécurité à la fatigue	179
5.3	Profilés laminés	179
5.3.1	Domaine d'application.....	179
5.3.2	Dimensionnement.....	180
5.4	Profilés avec semelles de renfort	183
5.4.1	Domaine d'application.....	183
5.4.2	Dimensionnement de la semelle de renfort.....	183
5.4.3	Longueur de la semelle de renfort.....	184
5.5	Poutres composées à âme pleine.....	186
5.5.1	Domaines d'application et fabrication.....	186
5.5.2	Principes de dimensionnement	188
5.5.3	Dimensionnement de la liaison entre l'âme et les semelles	189
5.6	Poutres ajourées.....	192
5.6.1	Domaines d'application et fabrication.....	192
5.6.2	Calcul des efforts intérieurs	193
5.6.3	Dimensionnement d'une poutre ajourée alvéolaire.....	195
5.6.4	Dimensionnement d'une poutre ajourée cellulaire.....	198
5.7	Poutres à treillis.....	202
5.7.1	Domaines d'application et fabrication.....	202
5.7.2	Hypothèses de calcul	203
5.7.3	Prédimensionnement	204
5.7.4	Longueur de flambage des barres comprimées	205
5.8	Poutres mixtes acier-béton	208
5.8.1	Introduction	208
5.8.2	Largeur participante du béton.....	209

5.8.3	Situations à considérer	211
5.8.4	Dimensionnement d'une poutre mixte.....	212
5.8.5	Effet du retrait.....	215
5.8.6	Calcul de la connexion.....	217
5.9	Éléments à parois minces	225
5.9.1	Domaines d'application et fabrication.....	225
5.9.2	Dimensionnement.....	227
6.	Éléments comprimés.....	229
6.1	Introduction.....	231
6.2	Principes de dimensionnement	231
6.2.1	Rappel de la théorie du flambage.....	231
6.2.2	Sécurité structurale.....	236
6.2.3	Aptitude au service	237
6.3	Profilés laminés	237
6.3.1	Effort normal.....	238
6.3.2	Effort normal et moment de flexion selon l'axe fort.....	240
6.3.3	Effort normal et moment de flexion selon l'axe faible.....	251
6.3.4	Effort normal et flexion gauche.....	252
6.3.5	Flambage par flexion et torsion.....	253
6.4	Barres étrésillonnées.....	256
6.4.1	Principes de dimensionnement	256
6.4.2	Ensemble de la barre.....	258
6.4.3	Membrures	259
6.4.4	Etrésillons.....	262
6.5	Poteaux mixtes.....	265
6.5.1	Hypothèses de base.....	265
6.5.2	Effort normal.....	267
6.5.3	Effort normal et flexion uniaxiale	270
6.5.4	Effort normal et flexion gauche.....	275
6.6	Éléments à parois minces	276
6.6.1	Introduction	276
6.6.2	Voilement local	276
6.6.3	Effort normal	277
6.6.4	Effort normal et flexion uniaxiale	278

DIMENSIONNEMENT D'ASSEMBLAGES

7.	Soudures	281
7.1	Introduction.....	283
7.2	Principes de dimensionnement	284
7.2.1	Sécurité structurale.....	284
7.2.2	Résistance à la fatigue	284
7.2.3	Rupture fragile	285
7.2.4	Assurance de qualité	285

7.3	Joint s soudés	286
7.3.1	Procédés de soudage	287
7.3.2	Types de joints et symboles	288
7.3.3	Déformations et contraintes résiduelles	290
7.3.4	Anomalies	291
7.3.5	Contrôle de qualité	291
7.3.6	Dispositions pratiques de construction	293
7.4	Résistance des joints soudés	294
7.4.1	Soudures complètement pénétrées	294
7.4.2	Cordons d'angle	295
7.4.3	Sollicitations composées	300
8.	Boulons	303
8.1	Introduction	305
8.2	Principes de dimensionnement	306
8.2.1	Sécurité structurale	306
8.2.2	Aptitude au service	306
8.2.3	Résistance à la fatigue	307
8.2.4	Assurance de qualité	307
8.3	Boulons et rivets	307
8.3.1	Types et symboles	307
8.3.2	Mise en place	311
8.3.3	Dispositions pratiques de construction	313
8.4	Résistance des boulons	315
8.4.1	Mode de transmission des forces	315
8.4.2	Résistance à un effort de cisaillement	316
8.4.3	Résistance à un effort de traction	318
8.4.4	Résistance à une interaction entre cisaillement et traction	319
8.5	Résistance des pièces assemblées	320
8.5.1	Pression latérale	321
8.5.2	Sections brutes et nettes	323
8.6	Vérification d'un assemblage boulonné	324
8.6.1	Principes	324
8.6.2	Effet de la longueur de l'assemblage	326
8.6.3	Effet de la dimension des trous	327
8.7	Vérification d'un assemblage précontraint	328
8.7.1	Principes	328
8.7.2	Résistance au glissement	331
8.7.3	Force de précontrainte	332
8.7.4	Comportement sous un effort de traction	333
8.7.5	Effet de la fatigue	336
8.7.6	Force de levier	337
8.7.7	Interaction entre cisaillement et traction	338
9.	Assemblages	343
9.1	Introduction	345

X9.2	Principes de dimensionnement	346
9.2.1	Rigidité	346
9.2.2	Résistance	347
9.2.3	Capacité de rotation	347
9.3	Transmission d'un effort tranchant	348
9.3.1	Conception et modélisation	348
9.3.2	Couvre-joint d'âme boulonné	349
9.3.3	Couvre-joint d'âme soudé et boulonné	351
9.3.4	Attache par cornières	352
9.4	Transmission d'un moment de flexion	353
9.4.1	Conception et modélisation	353
9.4.2	Couvre-joints boulonnés	354
9.4.3	Plaques frontales	356
9.4.4	Liaison entièrement soudée	356
9.5	Interaction d'efforts	357
X9.5.1	Joint de poutre	357
9.5.2	Liaison poutre-colonne	358
9.6	Exemples numériques	359

THÉORIE DE LA STABILITÉ

10.	Flambage	369
10.1	Introduction	371
10.2	Théorie linéaire du flambage élastique	372
10.2.1	Principes	372
10.2.2	Cas particulier du flambage par flexion et torsion	375
10.2.3	Cas particulier de la barre étré sillonnée	377
10.3	Résistance ultime au flambage	380
10.3.1	Principe du flambage par divergence	380
10.3.2	Imperfections des barres industrielles	381
10.3.3	Courbes de flambage européennes	384
11.	Déversement	389
11.1	Introduction	391
11.2	Théorie linéaire du déversement élastique	391
11.2.1	Principe du déversement	391
11.2.2	Déversement d'une poutre simple en flexion pure	392
11.2.3	Moment critique de déversement élastique	394
11.2.4	Influence des conditions d'appui	396
11.2.5	Influence du type de chargement	398
11.2.6	Influence du point d'application de la charge	400
11.2.7	Influence des appuis intermédiaires	402
11.3	Résistance ultime au déversement	403
11.3.1	Principe de calcul du moment de déversement	403
11.3.2	Calcul simplifié du moment critique de déversement élastique	403
11.3.3	Calcul du moment de déversement	408

12.	Voilement	415
12.1	Introduction.....	417
12.2	Théorie linéaire du voilement élastique.....	418
	12.2.1 Contrainte critique de voilement élastique.....	418
	12.2.2 Coefficient de voilement.....	420
	12.2.3 Plaques munies de raidisseurs.....	424
12.3	Résistance ultime au voilement.....	430
	12.3.1 Principes.....	430
	12.3.2 Largeur efficace et élancement limite.....	432
FATIGUE		
13.	Fatigue	439
13.1	Introduction.....	441
13.2	Résistance à la fatigue.....	442
	13.2.1 Paramètres influençant la durée de vie.....	442
	13.2.2 Essais de fatigue.....	445
13.3	Théorie de la mécanique de la rupture.....	446
	13.3.1 Théorie élastique.....	446
	13.3.2 Propagation de la fissure.....	453
	13.3.3 Calcul de la durée de vie.....	455
	13.3.4 Paramètres influençant la durée de vie.....	458
	13.3.5 Dimension critique d'une fissure.....	461
13.4	Sollicitations de fatigue.....	464
	13.4.1 Structures soumises à des charges de fatigue.....	464
	13.4.2 Contraintes dues aux charges.....	466
	13.4.3 Histogramme des différences de contraintes.....	467
13.5	Effet des contraintes aléatoires.....	468
	13.5.1 Cumul des dommages individuels.....	468
	13.5.2 Cumul des dommages pour un histogramme de différences de contraintes.....	470
13.6	Courbes de résistance à la fatigue normalisées.....	473
	13.6.1 Principes des courbes de résistance.....	473
	13.6.2 Classement des détails de construction.....	476
	13.6.3 Choix des détails de construction.....	478
	13.6.4 Assurance de qualité.....	479
	13.6.5 Traitements d'amélioration.....	479
13.7	Vérification de la sécurité à la fatigue.....	480
	13.7.1 Principes.....	480
	13.7.2 Vérification avec la limite de fatigue.....	481
	13.7.3 Vérification avec le cumul des dommages.....	482
	13.7.4 Vérification avec des facteurs de correction.....	483
	INDEX.....	489
	NOTATIONS.....	493
	BIOGRAPHIE DES AUTEURS.....	498