

— 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 et Alain Nussbaumer

Nouvelle édition revue et adaptée aux nouvelles normes de structures



PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES

# CONSTRUCTION MÉTALLIQUE

**Notions fondamentales et méthodes de dimensionnement**

Manfred A. Hirt, Rolf Bez et Alain Nussbaumer

**Nouvelle édition revue et adaptée aux nouvelles normes de structures**

Dessins de Claudio Leonardi

Premier volume de la série consacrée au domaine de la construction métallique, ce livre traite de la conception et du dimensionnement des éléments principaux, des assemblages des structures porteuses en acier et il contient les notions de base utilisées dans les volumes 11 et 12.

Sous forme de chapitres modulaires, la matière est présentée de manière aussi générale que possible selon les méthodes de calcul élastique et plastique; le dimensionnement est basé sur les principes modernes de sécurité structurale et d'aptitude au service.

Les assemblages en tant qu'éléments de liaison indispensables sont traités en détail. Les phénomènes d'instabilité sont également abordés, surtout dans l'optique de la conception des structures métalliques. Un chapitre donne des informations nécessaires et utiles concernant le phénomène de fatigue. Assorti de nombreux exemples numériques, cet ouvrage est adapté aux nouvelles normes de structures porteuses SIA 260 à 264, qui reprennent les principes des Eurocodes. Les méthodes de calcul des Eurocodes 3 et 4 sont également brièvement expliquées, lorsqu'elles diffèrent de celles des normes suisses.

Cet ouvrage s'adresse aux étudiants des cycles bachelor et master ainsi qu'aux ingénieurs et architectes praticiens.

ISBN 2-88074-646-9



9 782880 746469 >

# Table des matières

AVANT-PROPOS .....	V
AVANT-PROPOS À LA DEUXIÈME ÉDITION.....	VII
TABLE DES MATIÈRES .....	IX

## PRINCIPES DE BASE

<b>1. Introduction .....</b>	<b>1</b>
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 .....	5
1.4.3 Notations et signes .....	6
1.4.4 Unités .....	6
1.5 Historique de la construction métallique .....	7
1.6 Concept de dimensionnement .....	7
1.6.1 Principes .....	7
1.6.2 Sécurité structurale .....	8
1.6.3 Aptitude au service .....	9
Références .....	10
<b>2. Principes de dimensionnement .....</b>	<b>11</b>
2.1 Introduction .....	13
2.2 Etapes de la vie d'un ouvrage et documents d'organisation .....	14
2.3 Elaboration du projet .....	16
2.3.1 Convention d'utilisation .....	16
2.3.2 Base du projet .....	18
2.3.3 Conception .....	21
2.3.4 Analyse structurale .....	22
2.3.5 Dimensionnement .....	23
2.4 Actions .....	27
2.4.1 Approche probabiliste .....	28
2.4.2 Approche avec des facteurs partiels .....	31
2.4.3 Valeur de calcul .....	32
2.4.4 Résumé des actions .....	33
2.5 Analyse d'une structure métallique .....	38
2.5.1 Modélisation de la structure .....	38
2.5.2 Calcul des effets d'actions .....	39
2.5.3 Calcul de la résistance .....	42

2.6	Vérification de l'aptitude au service . . . . .	44
2.6.1	Principe de la vérification . . . . .	44
2.6.2	Cas de charge . . . . .	45
2.6.3	Calcul des déplacements . . . . .	46
2.6.4	Limites de service . . . . .	47
2.7	Vérification de la sécurité structurale . . . . .	49
2.7.1	Principe de la vérification . . . . .	49
2.7.2	Cas de charge . . . . .	50
2.7.3	Résistance ultime . . . . .	51
	Références . . . . .	53
<b>3.</b>	<b>Matériaux . . . . .</b>	<b>55</b>
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 . . . . .	61
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 . . . . .	69
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
	Références . . . . .	85

## DIMENSIONNEMENT D'ÉLÉMENTS

<b>4.</b>	<b>Résistance en section . . . . .</b>	<b>87</b>
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 . . . . .	96

4.3.3	Flexion d'une section hybride . . . . .	99
4.3.4	Flexion gauche . . . . .	100
4.4	Résistance à un effort tranchant . . . . .	105
4.5	Résistance à un moment de torsion . . . . .	107
4.5.1	Modes de résistance à la torsion . . . . .	108
4.5.2	Torsion uniforme . . . . .	109
4.5.3	Torsion non uniforme . . . . .	117
4.5.4	Torsion mixte . . . . .	123
4.6	Résistance sous interaction d'efforts . . . . .	125
4.6.1	Principes . . . . .	125
4.6.2	Moment de flexion et effort normal . . . . .	126
4.6.3	Moment de flexion et effort tranchant . . . . .	132
4.6.4	Effort normal et effort tranchant . . . . .	136
4.6.5	Moment de flexion, effort normal et effort tranchant . . . . .	138
4.6.6	Interaction avec un moment de torsion . . . . .	138
4.7	Section mixte acier-béton . . . . .	143
4.7.1	Définitions . . . . .	143
4.7.2	Principes . . . . .	144
4.7.3	Résistance à un effort normal . . . . .	148
4.7.4	Résistance à un moment de flexion . . . . .	153
4.7.5	Résistance à un effort tranchant . . . . .	166
4.7.6	Résistance sous interaction d'efforts . . . . .	166
	Références . . . . .	167
<b>5.</b>	<b>Éléments fléchis . . . . .</b>	<b>169</b>
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 . . . . .	194

5.6.3	Dimensionnement d'une poutre ajourée alvéolaire .....	196
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 .....	210
5.8.4	Dimensionnement d'une poutre mixte .....	212
5.8.5	Effet du retrait .....	215
5.8.6	Calcul de la connexion .....	216
5.9	Éléments à parois minces .....	225
5.9.1	Domaines d'application et fabrication .....	225
5.9.2	Dimensionnement .....	226
	Références .....	227
<b>6.</b>	<b>Éléments comprimés .....</b>	<b>229</b>
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 étrépillonnées .....	256
6.4.1	Principes de dimensionnement .....	256
6.4.2	Ensemble de la barre .....	258
6.4.3	Membrures .....	260
6.4.4	Etrépillons .....	262
6.5	Poteaux mixtes .....	266
6.5.1	Hypothèses de base .....	266
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 .....	277
6.6.3	Effort normal .....	278
6.6.4	Effort normal et flexion uniaxiale .....	278
	Références .....	279

**DIMENSIONNEMENT D'ASSEMBLAGES**

<b>7.</b>	<b>Soudures .....</b>	<b>281</b>
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 .....	284
7.2.4	Assurance de qualité .....	285
7.3	Jointes soudés .....	286
7.3.1	Procédés de soudage .....	286
7.3.2	Types de joints et symboles .....	287
7.3.3	Déformations et contraintes résiduelles .....	289
7.3.4	Anomalies .....	290
7.3.5	Contrôle de qualité .....	291
7.3.6	Dispositions pratiques de construction .....	292
7.4	Résistance des joints soudés .....	294
7.4.1	Soudures complètement pénétrées .....	294
7.4.2	Cordons d'angle .....	294
7.4.3	Sollicitations composées .....	299
7.5	Annexe .....	300
	Références .....	300
<b>8.</b>	<b>Boulons .....</b>	<b>301</b>
8.1	Introduction .....	303
8.2	Principes de dimensionnement .....	304
8.2.1	Sécurité structurale .....	304
8.2.2	Aptitude au service .....	304
8.2.3	Résistance à la fatigue .....	305
8.2.4	Assurance de qualité .....	305
8.3	Boulons et rivets .....	305
8.3.1	Types et symboles .....	305
8.3.2	Mise en place .....	308
8.3.3	Dispositions pratiques de construction .....	310
8.4	Résistance des boulons .....	313
8.4.1	Mode de transmission des forces .....	313

8.4.2	Résistance à un effort de cisaillement . . . . .	313
8.4.3	Résistance à un effort de traction . . . . .	315
8.4.4	Résistance à une interaction entre cisaillement et traction . . . . .	316
8.5	Résistance des pièces assemblées . . . . .	317
8.5.1	Pression latérale . . . . .	318
8.5.2	Sections brutes . . . . .	320
8.5.3	Sections affaiblies . . . . .	321
8.6	Vérification d'un assemblage boulonné . . . . .	322
8.6.1	Principes . . . . .	322
8.6.2	Effet de la longueur de l'assemblage . . . . .	325
8.6.3	Effet de la dimension des trous . . . . .	326
8.7	Vérification d'un assemblage précontraint . . . . .	327
8.7.1	Principes . . . . .	327
8.7.2	Résistance au glissement . . . . .	329
8.7.3	Force de précontrainte . . . . .	330
8.7.4	Comportement sous un effort de traction . . . . .	332
8.7.5	Effet de la fatigue . . . . .	335
8.7.6	Force de levier . . . . .	336
8.7.7	Interaction entre cisaillement et traction . . . . .	337
8.8	Annexe . . . . .	339
	Références . . . . .	340
<b>9.</b>	<b>Assemblages . . . . .</b>	<b>341</b>
9.1	Introduction . . . . .	343
9.2	Principes de dimensionnement . . . . .	343
9.2.1	Rigidité . . . . .	344
9.2.2	Résistance . . . . .	345
9.2.3	Capacité de rotation . . . . .	345
9.3	Transmission d'un effort tranchant . . . . .	346
9.3.1	Conception et modélisation . . . . .	346
9.3.2	Couvre-joint d'âme boulonné . . . . .	347
9.3.3	Couvre-joint d'âme soudé et boulonné . . . . .	349
9.3.4	Attache par cornières . . . . .	350
9.4	Transmission d'un moment de flexion . . . . .	351
9.4.1	Conception et modélisation . . . . .	351
9.4.2	Couvre-joints boulonnés . . . . .	352
9.4.3	Plaques frontales . . . . .	354
9.4.4	Liaison entièrement soudée . . . . .	355
9.5	Interaction d'efforts . . . . .	355
9.5.1	Joint de poutre . . . . .	355
9.5.2	Liaison poutre-colonne . . . . .	355
9.6	Exemples numériques . . . . .	356
	Références . . . . .	357
		366

## THÉORIE DE LA STABILITÉ

<b>10.</b>	<b>Flambage . . . . .</b>	<b>367</b>
10.1	Introduction . . . . .	369
10.2	Théorie linéaire du flambage élastique . . . . .	370
10.2.1	Principes . . . . .	370
10.2.2	Cas particulier du flambage par flexion et torsion . . . . .	373
10.2.3	Cas particulier de la barre étrépillonnée . . . . .	375
10.3	Résistance ultime au flambage . . . . .	378
10.3.1	Principe du flambage par divergence . . . . .	378
10.3.2	Imperfections des barres industrielles . . . . .	379
10.3.3	Courbes de flambage européennes . . . . .	382
	Références . . . . .	385
<b>11.</b>	<b>Déversement . . . . .</b>	<b>387</b>
11.1	Introduction . . . . .	389
11.2	Théorie linéaire du déversement élastique . . . . .	389
11.2.1	Principe du déversement . . . . .	389
11.2.2	Déversement d'une poutre simple en flexion pure . . . . .	390
11.2.3	Moment critique de déversement élastique . . . . .	392
11.2.4	Influence des conditions d'appui . . . . .	394
11.2.5	Influence du type de chargement . . . . .	395
11.2.6	Influence du point d'application de la charge . . . . .	398
11.2.7	Influence des appuis intermédiaires . . . . .	399
11.3	Résistance ultime au déversement . . . . .	401
11.3.1	Principe de calcul du moment de déversement . . . . .	401
11.3.2	Calcul simplifié du moment critique de déversement élastique . . . . .	401
11.3.3	Calcul du moment de déversement . . . . .	405
	Références . . . . .	411
<b>12.</b>	<b>Voilement . . . . .</b>	<b>413</b>
12.1	Introduction . . . . .	415
12.2	Théorie linéaire du voilement élastique . . . . .	416
12.2.1	Contrainte critique de voilement élastique . . . . .	416
12.2.2	Coefficient de voilement . . . . .	417
12.2.3	Plaques munies de raidisseurs . . . . .	422
12.3	Résistance ultime au voilement . . . . .	428
12.3.1	Principes pour une plaque mince comprimée . . . . .	428
12.3.2	Largeur efficace et élancement limite . . . . .	430
	Références . . . . .	435

## FATIGUE

<b>13. Fatigue</b> .....	437
13.1 Introduction .....	439
13.2 Résistance à la fatigue .....	440
13.2.1 Paramètres influençant la durée de vie .....	440
13.2.2 Essais de fatigue .....	443
13.3 Théorie de la mécanique de la rupture .....	444
13.3.1 Théorie élastique .....	445
13.3.2 Propagation de la fissure .....	451
13.3.3 Calcul de la durée de vie .....	453
13.3.4 Paramètres influençant la durée de vie .....	456
13.3.5 Dimension critique d'une fissure .....	459
13.4 Sollicitations de fatigue .....	462
13.4.1 Structures soumises à des charges de fatigue .....	462
13.4.2 Contraintes dues aux charges .....	464
13.4.3 Histogramme des différences de contraintes .....	465
13.5 Effet des contraintes aléatoires .....	466
13.5.1 Cumul des dommages individuels .....	466
13.5.2 Cumul des dommages pour un histogramme de différences de contraintes .....	468
13.6 Courbes de résistance à la fatigue normalisées .....	471
13.6.1 Principes des courbes de résistance .....	471
13.6.2 Classement des détails de construction .....	475
13.6.3 Choix des détails de construction .....	476
13.6.4 Assurance de qualité .....	477
13.6.5 Traitements d'amélioration .....	478
13.7 Vérification de la sécurité à la fatigue .....	479
13.7.1 Principes .....	479
13.7.2 Vérification avec la limite de fatigue .....	480
13.7.3 Vérification avec le cumul des dommages .....	480
13.7.4 Vérification avec des facteurs de correction .....	482
Références .....	484
INDEX .....	487
NOTATIONS .....	490
BIOGRAPHIE DES AUTEURS .....	495