

— 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

# 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>Eléments 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	Eléments à parois minces . . . . .	225
5.9.1	Domaines d'application et fabrication . . . . .	225
5.9.2	Dimensionnement . . . . .	226
	Références . . . . .	227
<b>6.</b>	<b>Eléments 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	Eléments 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> .....	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 .....	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> .....	301
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 . . . . .	356
9.6	Exemples numériques . . . . .	357
	Références . . . . .	360

## THÉORIE DE LA STABILITÉ

<b>10. Flambage</b> .....	367
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 étré sillonnée .....	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. Déversement</b> .....	387
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. Voilement</b> .....	413
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> .....	43
13.1 Introduction .....	43
13.2 Résistance à la fatigue .....	44
13.2.1 Paramètres influençant la durée de vie .....	44
13.2.2 Essais de fatigue .....	44
13.3 Théorie de la mécanique de la rupture .....	44
13.3.1 Théorie élastique .....	44
13.3.2 Propagation de la fissure .....	45
13.3.3 Calcul de la durée de vie .....	45
13.3.4 Paramètres influençant la durée de vie .....	45
13.3.5 Dimension critique d'une fissure .....	45
13.4 Sollicitations de fatigue .....	46
13.4.1 Structures soumises à des charges de fatigue .....	46
13.4.2 Contraintes dues aux charges .....	46
13.4.3 Histogramme des différences de contraintes .....	46
13.5 Effet des contraintes aléatoires .....	46
13.5.1 Cumul des dommages individuels .....	46
13.5.2 Cumul des dommages pour un histogramme de différences de contraintes .....	46
13.6 Courbes de résistance à la fatigue normalisées .....	47
13.6.1 Principes des courbes de résistance .....	47
13.6.2 Classement des détails de construction .....	47
13.6.3 Choix des détails de construction .....	47
13.6.4 Assurance de qualité .....	47
13.6.5 Traitements d'amélioration .....	47
13.7 Vérification de la sécurité à la fatigue .....	47
13.7.1 Principes .....	47
13.7.2 Vérification avec la limite de fatigue .....	48
13.7.3 Vérification avec le cumul des dommages .....	48
13.7.4 Vérification avec des facteurs de correction .....	48
Références .....	48
INDEX .....	48
NOTATIONS .....	49
BIOGRAPHIE DES AUTEURS .....	49