

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

Volume 11

CHARPENTES MÉTALLIQUES

Conception et dimensionnement des halles et bâtiments

Manfred A. Hirt et Michel Crisinel



PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES

Table des matières

AVANT-PROPOS	V
TABLE DES MATIÈRES	VII
1. Introduction	1
1.1 Objectifs de l'ouvrage	3
1.2 Structure et contenu	3
1.3 Documents de référence	4
1.3.1 Normes et recommandations	4
1.3.2 Autres références	5
1.4 Conventions	7
1.4.1 Terminologie et typographie	7
1.4.2 Axes	7
1.4.3 Notations et signes	8
1.4.4 Unités	8
1.5 Bref historique des charpentes métalliques	9
1.5.1 XVIII ^e et XIX ^e siècles	9
1.5.2 Première moitié du XX ^e siècle	13
1.5.3 Deuxième moitié du XX ^e siècle	15
2. Bases de la conception	23
2.1 Introduction	25
2.2 Propriétés du matériau acier et de ses produits	25
2.2.1 Caractéristiques mécaniques	25
2.2.2 Résistance aux températures élevées	26
2.2.3 Résistance à la corrosion	26
2.2.4 Caractéristiques d'isolation thermique et phonique	28
2.2.5 Coût	28
2.3 Phases d'un projet d'ossature métallique	28
2.3.1 Etude du projet	28
2.3.2 Fabrication et montage	31
2.3.3 Utilisation future	31
2.4 Critères de conception	33
2.4.1 Nombre et position des points porteurs	33
2.4.2 Hauteur de plancher à disposition	34
2.4.3 Joints de dilatation	34
2.4.4 Système statique	35
2.4.5 Sections des profilés	36

2.4.6	Assemblages	36
2.4.7	Stabilisation de l'ossature	37
2.4.8	Montage et transport	38
2.4.9	Eléments de second œuvre et circulations intérieures	39
2.5	Protection contre l'incendie	40
2.5.1	Objectifs et mesures de protection	40
2.5.2	Résistance au feu	41
2.5.3	Conception de la sécurité incendie	42
2.5.4	Conclusion	43
2.6	Protection contre la corrosion	44
2.6.1	Choix du système de protection	44
2.6.2	Protection par revêtements	44
2.6.3	Conception des détails	46
2.6.4	Conclusion	47
3.	Systèmes porteurs des halles	49
3.1	Introduction	51
3.2	Structures porteuses formées de plans	51
3.2.1	Types de structure	51
3.2.2	Cheminement des charges et décomposition de la structure	52
3.2.3	Cadres en profils à double té	55
3.2.4	Fermes à treillis	62
3.2.5	Autres types de traverse	62
3.2.6	Montants de cadre (ou poteaux)	64
3.3	Stabilisation des halles	66
3.3.1	Systèmes de contreventements	67
3.3.2	Transmission des efforts horizontaux	70
3.3.3	Limitation des déformations	70
3.3.4	Stabilité des éléments porteurs	74
3.3.5	Types d'élément de stabilisation	74
3.3.6	Contreventements situés dans les toitures non horizontales	79
3.4	Structures en shed	80
3.4.1	Sheds indépendants de la structure porteuse principale	82
3.4.2	Sheds intégrés à la structure porteuse	82
3.4.3	Stabilisation des halles en shed	84
3.5	Structures spatiales	87
3.5.1	Grilles de poutres	88
3.5.2	Treillis spatiaux	89
3.5.3	Surfaces courbes	92
3.5.4	Structures plissées	94
3.6	Structures particulières	95
3.6.1	Structures suspendues	95
3.6.2	Structures tendues	96
3.6.3	Structures à membrane	97

4.	Systèmes porteurs des bâtiments	101
4.1	Introduction	103
4.2	Systèmes porteurs usuels	103
4.2.1	Ossatures articulées	103
4.2.2	Ossatures à noyau central	105
4.2.3	Ossatures en cadres rigides	108
4.2.4	Structures en tubes	112
4.2.5	Disposition des éléments porteurs verticaux	113
4.2.6	Contreventements	115
4.3	Systèmes porteurs particuliers	118
4.3.1	Structure à treillis alternés	118
4.3.2	Bâtiments à portiques	119
4.3.3	Bâtiments-ponts	120
4.4	Planchers	121
4.4.1	Fonctions et composition	121
4.4.2	Systèmes de poutraison	122
4.4.3	Types de poutres	125
4.4.4	Types de dalles	128
4.5	Poteaux et suspentes	134
4.5.1	Types de poteaux	134
4.5.2	Types de suspentes	137
4.6	Assemblages	137
4.6.1	Assemblages solive-sommier	137
4.6.2	Assemblages poutre-poteau	140
4.6.3	Joints de poteau	141
4.6.4	Pieds de poteau	143
4.6.5	Assemblages entre éléments métalliques et murs en béton	143
5.	Eléments secondaires	149
5.1	Introduction	151
5.2	Enveloppe	152
5.2.1	Fonctions principales	152
5.2.2	Fonctions de la toiture	153
5.2.3	Fonctions de la façade	153
5.3	Toiture	154
5.3.1	Composition et types de toiture	154
5.3.2	Eléments protecteurs (étanchéité, isolation, pare-vapeur)	155
5.3.3	Eléments porteurs (les pannes)	157
5.3.4	Toitures plates	160
5.3.5	Toitures inclinées	162
5.3.6	Eclairage zénithal	164

5.4	Façades de halle	167
5.4.1	Composition	167
5.4.2	Ossature de façade	167
5.4.3	Bardage simple peau (sans ou avec isolation)	170
5.4.4	Bardage double peau	170
5.4.5	Panneau sandwich	171
5.5	Façades de bâtiment	172
5.5.1	Types de façade	172
5.5.2	Façades lourdes	173
5.5.3	Façades légères	177
5.6	Tolérances et déformations	180
5.6.1	Tolérances dimensionnelles	181
5.6.2	Déformations	182
6.	Principes de dimensionnement, charges et actions	185
6.1	Introduction	187
6.2	Principes de dimensionnement	187
6.2.1	Buts à atteindre	187
6.2.2	Aptitude au service	190
6.2.3	Sécurité structurale	191
6.3	Charges permanentes	193
6.3.1	Poids propre de la structure porteuse	193
6.3.2	Poids des éléments non porteurs	194
6.4	Charges pendant la construction	194
6.5	Charges utiles dans les bâtiments	195
6.5.1	Locaux habitables, commerciaux ou administratifs	196
6.5.2	Entrepôts, locaux de fabrication, archives et silos	196
6.5.3	Parkings et surfaces accessibles au trafic	197
6.6	Actions climatiques	197
6.6.1	Neige	197
6.6.2	Vent	199
6.6.3	Température	201
6.7	Actions dues aux ponts roulants	202
6.7.1	Introduction	202
6.7.2	Charges verticales	203
6.7.3	Effets dynamiques des ponts roulants	203
6.7.4	Forces horizontales	204
6.7.5	Effets de fatigue	206
6.8	Actions accidentelles	207
6.8.1	Généralités	207
6.8.2	Choc	208
6.8.3	Incendie	209
6.8.4	Séisme	210

6.9	Exemples numériques	212
6.9.1	Système porteur d'une halle industrielle	212
6.9.2	Charges et actions sur la halle industrielle	214
6.9.3	Système porteur d'un bâtiment à étages	218
6.9.4	Charges et actions sur le bâtiment à étages	220
Annexe		223
A 6.1	Règles empiriques de prédimensionnement	223
7.	Toitures et façades métalliques	225
7.1	Introduction	227
7.2	Tôles profilées	228
7.2.1	Matériaux	228
7.2.2	Actions et situations de risque	229
7.2.3	Résistance en section	230
7.2.4	Calcul des efforts intérieurs	239
7.2.5	Vérification de la sécurité structurale	244
7.2.6	Vérification de l'aptitude au service	245
7.3	Panneaux sandwichs	247
7.3.1	Composition et matériaux	247
7.3.2	Actions et situations de risque	249
7.3.3	Résistance en section	250
7.3.4	Détermination des efforts intérieurs et des déplacements	255
7.3.5	Vérification de la sécurité structurale	258
7.3.6	Vérification de l'aptitude au service	260
7.4	Assemblages	260
7.4.1	Notions de base	260
7.4.2	Actions à considérer	262
7.4.3	Résistance des assemblages	263
7.4.4	Dimensionnement	266
7.5	Exemples numériques	266
7.5.1	Dimensionnement d'une tôle profilée	266
7.5.2	Dimensionnement d'un panneau sandwich	268
7.5.3	Calcul des attaches de la tôle de la toiture (support d'étanchéité)	271
8.	Pannes et ossature de façade	275
8.1	Introduction	277
8.2	Pannes	277
8.2.1	Fonction des pannes	277
8.2.2	Actions et situations de risque	277
8.2.3	Système statique	279

8.2.4	Calcul des efforts intérieurs	281
8.2.5	Résistance en section	282
8.2.6	Vérification de la sécurité structurale	283
8.2.7	Vérification de l'aptitude au service	288
8.3	Ossature de façade	289
8.3.1	Fonctions de l'ossature de façade	289
8.3.2	Charges à considérer	289
8.3.3	Système statique	290
8.3.4	Vérification de la sécurité structurale	290
8.3.5	Vérification de l'aptitude au service	292
8.4	Exemples numériques	292
8.4.1	Dimensionnement d'une panne	292
8.4.2	Dimensionnement d'une filière	296
8.4.3	Dimensionnement d'un plateau de bardage	301
9.	Dalles mixtes	305
9.1	Introduction	307
9.1.1	Tôles profilées	307
9.1.2	Connexion entre la tôle et le béton	308
9.1.3	Actions à considérer	309
9.2	Dimensionnement de la tôle profilée	310
9.2.1	Calcul des efforts intérieurs	310
9.2.2	Résistance et rigidité des sections	311
9.2.3	Vérifications de la tôle profilée	311
9.3	Dimensionnement de la dalle mixte	312
9.3.1	Calcul des efforts intérieurs	312
9.3.2	Résistance en section	313
9.3.3	Vérification de la sécurité structurale	320
9.3.4	Vérification de l'aptitude au service	321
9.4	Exemple numérique: dimensionnement d'une dalle mixte	325
10.	Sommiers et solives	333
10.1	Introduction	335
10.2	Assemblages	335
10.2.1	Assemblages articulés	335
10.2.2	Assemblages rigides	338
10.3	Poutres en profilés laminés et poutres composées à âme pleine	339
10.3.1	Actions et situations de risque	339
10.3.2	Système statique et calcul des efforts intérieurs	339
10.3.3	Effet de la semi-rigidité des assemblages	340
10.3.4	Introduction des forces concentrées	342

10.3.5	Vérification de la sécurité structurale	345
10.3.6	Vérification de l'aptitude au service	349
10.4	Poutres avec ouvertures dans l'âme	352
10.4.1	Résistance ultime au cisaillement	353
10.4.2	Résistance ultime à la flexion	354
10.4.3	Renforcements	355
10.4.4	Calcul de la flèche	356
10.5	Poutres mixtes acier-béton	356
10.5.1	Introduction	356
10.5.2	Résistance en section	359
10.5.3	Comportement des poutres mixtes	359
10.5.4	Calcul des efforts intérieurs	364
10.5.5	Connexion acier-béton	369
10.5.6	Résistance des connecteurs	377
10.5.7	Cisaillement longitudinal de la dalle	380
10.5.8	Vérification de la sécurité structurale	382
10.5.9	Vérification de l'aptitude au service	387
10.6	Vibrations des planchers	393
10.6.1	Perception humaine	394
10.6.2	Fréquence d'oscillation	395
10.6.3	Accélération maximale	396
10.6.4	Amortissement	397
10.6.5	Vérifications	397
10.7	Exemples numériques	397
10.7.1	Dimensionnement des solives	397
10.7.2	Dimensionnement des sommiers en poutre simple	403
10.7.3	Dimensionnement des sommiers continus sur trois travées	410
10.7.4	Vérification de la vibration d'un plancher	420
11.	Cadres de halles	423
11.1	Introduction	425
11.2	Comportement structural d'un cadre	426
11.2.1	Influence de la rigidité des éléments	426
11.2.2	Situations élémentaires d'un cadre	427
11.2.3	Imperfections	429
11.2.4	Effets des non-linéarités	432
11.2.5	Classification des cadres	434
11.3	Calcul statique des cadres	436
11.3.1	Actions et situations de risque	436
11.3.2	Méthodes de calcul	439
11.3.3	Méthode élastique	440
11.3.4	Méthode plastique	441
11.3.5	Choix d'une méthode de calcul	450

11.4	Stabilité élastique des cadres	451
11.4.1	Introduction	451
11.4.2	Rappel de la théorie du flambage	451
11.4.3	Cadre idéal soumis à des forces nodales	453
11.4.4	Cadre idéal soumis à des forces non nodales	455
11.4.5	Évaluation des longueurs de flambage	456
11.4.6	Effet d'un contreventement de toiture	460
11.4.7	Effet des imperfections géométriques	466
11.5	Procédure de dimensionnement	466
11.5.1	Prédimensionnement	466
11.5.2	Méthodes de calcul des efforts intérieurs	467
11.5.3	Calcul des efforts intérieurs au premier ordre	468
11.5.4	Calcul des efforts intérieurs au second ordre	469
11.5.5	Vérification de la sécurité structurale	473
11.5.6	Vérification de l'aptitude au service	474
11.6	Exemple de calcul statique d'un cadre	474
11.6.1	Classification du cadre	474
11.6.2	Calcul des efforts intérieurs	479
12.	Éléments de cadre	485
12.1	Introduction	487
12.2	Traverses en profil à double té	487
12.2.1	Types de traverse	487
12.2.2	Sécurité structurale	488
12.2.3	Aptitude au service	493
12.3	Fermes à treillis	494
12.3.1	Types de ferme à treillis	494
12.3.2	Efforts intérieurs	496
12.3.3	Sécurité structurale	502
12.3.4	Aptitude au service	508
12.3.5	Vérification des nœuds	510
12.4	Montants de cadre de halle	516
12.4.1	Montants de section constante	517
12.4.2	Montants composés	521
12.4.3	Montants à section variable	527
12.5	Angles de cadre	533
12.5.1	Principes	533
12.5.2	Angle de cadre articulé	534
12.5.3	Angle de cadre rigide	536
12.6	Pieds de montant	543
12.6.1	Principes	543
12.6.2	Transmission des efforts dans le béton	545
12.6.3	Pieds de montant articulés	550
12.6.4	Pieds de montant encastrés	551

12.7	Exemples numériques	555
12.7.1	Vérification d'une traverse	555
12.7.2	Vérification d'un montant	559
12.7.3	Vérification d'un angle de cadre	562
12.7.4	Vérification d'un pied de poteau articulé	565
12.7.5	Vérification d'un pied de poteau articulé avec liste de centrage	566
12.7.6	Vérification d'un pied de poteau encastré	568
13.	Ossatures de bâtiments à étages	571
13.1	Introduction	573
13.2	Comportement structural d'un cadre	574
13.2.1	Classification des cadres	574
13.2.2	Imperfections	574
13.3	Calcul statique des cadres	575
13.3.1	Système global	575
13.3.2	Juxtaposition d'éléments structuraux	575
13.4	Longueur de flambage	576
13.4.1	Mode de flambage à nœuds fixes	576
13.4.2	Mode de flambage à nœuds déplaçables	579
13.4.3	Rigidité des poutres et des pieds de poteau	579
13.5	Poteaux métalliques	580
13.5.1	Profils en double té	580
13.5.2	Profils creux	580
13.5.3	Sections pleines	583
13.6	Poteaux mixtes	587
13.6.1	Profils enrobés de béton	587
13.6.2	Profils creux remplis de béton	588
13.7	Cadres à nœuds semi-rigides	590
13.7.1	Comportement des nœuds	590
13.7.2	Modélisation du nœud	593
13.7.3	Classification des nœuds	595
13.7.4	Calcul statique des cadres à nœuds semi-rigides	596
13.8	Exemples numériques	597
13.8.1	Dimensionnement d'un poteau métallique	597
13.8.2	Dimensionnement d'un poteau mixte	600
13.8.3	Méthode de dimensionnement des sommiers mixtes à nœuds semi-rigides	602
13.8.4	Exemple de dimensionnement d'un sommier mixte semi-continu	605
14.	Contreventements	609
14.1	Introduction	611
14.2	Systèmes de contreventement	611

14.2.1	Actions et systèmes statiques	611
14.2.2	Cheminement des efforts horizontaux	613
14.3	Contreventements triangulés	619
14.3.1	Treillis plans	619
14.3.2	Treillis non plans	622
14.3.3	Excentricités des barres de contreventement	623
14.3.4	Effets dus à la dilatation thermique	625
14.3.5	Inertie équivalente	626
14.4	Contreventements en tôle profilée	627
14.4.1	Effet diaphragme	627
14.4.2	Panneau	629
14.4.3	Diaphragme sans interaction avec les cadres	635
14.4.4	Diaphragme en interaction avec les cadres	638
14.4.5	Stabilisation des pannes	642
14.5	Exemples numériques	645
14.5.1	Calcul d'un contreventement triangulé	645
14.5.2	Calcul d'un contreventement en tôle profilé	649
	Annexes	655
A14.1	Coefficients α tenant compte de l'effet des pannes intermédiaires	655
A14.2	Coefficients β tenant compte du nombre d'attaches tôle-panne par largeur utile de plaque	655
A14.3	Constante K du profil tenant compte du mode de fixation de la tôle	656
15.	Voies de roulement de ponts roulants	659
15.1	Introduction	661
15.1.1	Engins de manutention	661
15.1.2	Ponts roulants	662
15.1.3	Classification des ponts roulants	665
15.2	Détails de construction et tolérances	666
15.2.1	Rails de roulement	666
15.2.2	Joints de poutres	667
15.2.3	Tolérances	668
15.3	Cheminement des charges	668
15.3.1	Charges verticales	671
15.3.2	Forces transversales	673
15.3.3	Forces longitudinales	675
15.4	Aptitude au service de la voie de roulement	676
15.4.1	Calcul des déplacements de la poutre de roulement	676
15.4.2	Valeurs indicatives de flèches et vérification	677
15.5	Sécurité structurale de la poutre de roulement	678
15.5.1	Contraintes dans la poutre de roulement	678
15.5.2	Participation du rail à la résistance	681

15.5.3	Calcul de la fixation du rail	681
15.5.4	Effets des forces concentrées	683
15.6	Sécurité à la fatigue	686
15.6.1	Principe de vérification	686
15.6.2	Calcul des efforts intérieurs et des contraintes	687
15.6.3	Résistance à la fatigue	688
15.7	Exemples numériques	690
15.7.1	Prédimensionnement	691
15.7.2	Vérification de la sécurité structurale	692
15.7.3	Vérification de la sécurité à la fatigue	697
15.7.4	Calcul de la fixation du rail	700
15.7.5	Introduction des forces	700
INDEX		705
NOTATIONS		709
CRÉDITS DES ILLUSTRATIONS		714
BIOGRAPHIE DES AUTEURS		715