

— 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

Nouvelle édition revue et adaptée aux nouvelles normes de structures



PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES

Table des matières

AVANT-PROPOS	V
TABLE DES MATIÈRES	VII
CONCEPTION	
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	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
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	17
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	Éléments 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 forces 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.	Éléments 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	Éléments protecteurs (étanchéité, isolation, pare-vapeur)	155
5.3.3	Éléments 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	182
5.6.1	Tolérances dimensionnelles	182
5.6.2	Déformations	183

DIMENSIONNEMENT

6.	Principes de dimensionnement, charges et actions	185
6.1	Introduction	187
6.2	Bases de construction et principes de dimensionnement	187
6.2.1	Étapes de la vie d'un ouvrage et documents d'organisation	187
6.2.2	Elaboration du projet	189
6.2.3	Vérification de l'aptitude au service	191
6.2.4	Vérification de la sécurité structurale	193
6.3	Charges permanentes	196
6.3.1	Poids propre de la structure porteuse	196
6.3.2	Poids des éléments non porteurs	197
6.4	Charges pendant la construction	198
6.5	Charges utiles dans les bâtiments	199
6.5.1	Catégories habitation, bureaux, réunion et vente, toiture	199
6.5.2	Catégories de surfaces accessibles aux véhicules	200
6.5.3	Catégorie entreposage et fabrication	200
6.5.4	Silos et réservoirs	201
6.6	Effets climatiques	201
6.6.1	Neige	201
6.6.2	Vent	202
6.6.3	Température	206
6.7	Actions dues aux ponts roulants	207
6.7.1	Introduction	207
6.7.2	Charges verticales	208
6.7.3	Effets dynamiques des ponts roulants	208
6.7.4	Forces horizontales	209
6.7.5	Effets de fatigue	211
6.8	Actions accidentelles	212
6.8.1	Choc	213
6.8.2	Incendie	214
6.8.3	Séisme	215

6.9	Exemples numériques	219
6.9.1	Système porteur d'une halle industrielle	219
6.9.2	Charges et actions sur la halle industrielle	221
6.9.3	Système porteur d'un bâtiment à étages	224
6.9.4	Charges et actions sur le bâtiment à étages	226
7.	Toitures et façades métalliques	231
7.1	Introduction	233
7.2	Tôles profilées	234
7.2.1	Matériaux	234
7.2.2	Actions et situations de risque	235
7.2.3	Résistance en section	236
7.2.4	Calcul des efforts intérieurs	245
7.2.5	Vérification de la sécurité structurale	250
7.2.6	Vérification de l'aptitude au service	251
7.3	Panneaux sandwichs	254
7.3.1	Composition et matériaux	254
7.3.2	Actions et situations de risque	256
7.3.3	Résistance en section	257
7.3.4	Détermination des efforts intérieurs et des déplacements	261
7.3.5	Vérification de la sécurité structurale	265
7.3.6	Vérification de l'aptitude au service	266
7.4	Assemblages	267
7.4.1	Notions de base	267
7.4.2	Actions à considérer	269
7.4.3	Résistance des assemblages	269
7.4.4	Dimensionnement	272
7.5	Exemples numériques	272
7.5.1	Dimensionnement d'une tôle profilée	272
7.5.2	Dimensionnement d'un panneau sandwich	274
7.5.3	Calcul des attaches de la tôle de la toiture (support d'étanchéité)	277
8.	Pannes et ossature de façade	281
8.1	Introduction	283
8.2	Pannes	283
8.2.1	Fonction des pannes	283
8.2.2	Actions et situations de risque	283
8.2.3	Système statique	285
8.2.4	Calcul des efforts intérieurs	287
8.2.5	Résistance en section	288
8.2.6	Vérification de la sécurité structurale	289
8.2.7	Vérification de l'aptitude au service	294

8.3	Ossature de façade	295
8.3.1	Fonctions de l'ossature de façade	295
8.3.2	Charges à considérer	295
8.3.3	Système statique	296
8.3.4	Vérification de la sécurité structurale	296
8.3.5	Vérification de l'aptitude au service	298
8.4	Exemples numériques	298
8.4.1	Dimensionnement d'une panne	298
8.4.2	Dimensionnement d'une filière	302
8.4.3	Dimensionnement d'un plateau de bardage	307
9.	Dalles mixtes	311
9.1	Introduction	313
9.1.1	Tôles profilées	313
9.1.2	Connexion entre la tôle et le béton	314
9.1.3	Actions à considérer	315
9.2	Dimensionnement de la tôle profilée	316
9.2.1	Calcul des efforts intérieurs	316
9.2.2	Résistance et rigidité des sections	317
9.2.3	Vérifications de la tôle profilée	317
9.3	Dimensionnement de la dalle mixte	318
9.3.1	Calcul des efforts intérieurs	318
9.3.2	Résistance en section	319
9.3.3	Vérification de la sécurité structurale	326
9.3.4	Vérification de l'aptitude au service	327
9.4	Exemple numérique: dimensionnement d'une dalle mixte	331
10.	Sommiers et solives	341
10.1	Introduction	343
10.2	Assemblages	343
10.2.1	Assemblages articulés	343
10.2.2	Assemblages rigides	346
10.3	Poutres en profilés laminés et poutres composées à âme pleine	347
10.3.1	Actions à considérer	347
10.3.2	Système statique et calcul des efforts intérieurs	347
10.3.3	Effet de la semi-rigidité des assemblages	348
10.3.4	Introduction des forces concentrées	350
10.3.5	Vérification de la sécurité structurale	353
10.3.6	Vérification de l'aptitude au service	357
10.4	Poutres avec ouvertures dans l'âme	360
10.4.1	Résistance ultime au cisaillement	361

10.4.3	Renforcements	363
10.4.4	Calcul de la flèche	364
10.5	Poutres mixtes acier-béton	364
10.5.1	Introduction	364
10.5.2	Résistance en section	367
10.5.3	Comportement des poutres mixtes	367
10.5.4	Calcul des efforts intérieurs	372
10.5.5	Connexion acier-béton	377
10.5.6	Résistance des connecteurs	385
10.5.7	Cisaillement longitudinal de la dalle	388
10.5.8	Vérification de la sécurité structurale	391
10.5.9	Vérification de l'aptitude au service	395
10.6	Vibrations des planchers	402
10.6.1	Perception humaine	402
10.6.2	Fréquence d'oscillation	404
10.6.3	Accélération maximale	404
10.6.4	Amortissement	405
10.6.5	Vérifications	405
10.7	Exemples numériques	406
10.7.1	Dimensionnement des solives	406
10.7.2	Dimensionnement des sommiers en poutre simple	413
10.7.3	Dimensionnement des sommiers continus sur trois travées	419
10.7.4	Vérification de la vibration d'un plancher	429
11.	Cadres de halles	433
11.1	Introduction	435
11.2	Comportement structural d'un cadre	436
11.2.1	Influence de la rigidité des éléments	436
11.2.2	Situations élémentaires d'un cadre	437
11.2.3	Imperfections	439
11.2.4	Effets des non-linéarités	442
11.2.5	Classification des cadres	444
11.3	Calcul statique des cadres	447
11.3.1	Actions et situations de risque	447
11.3.2	Méthodes de calcul	449
11.3.3	Méthode élastique	450
11.3.4	Méthode plastique	451
11.3.5	Choix d'une méthode de calcul	460
11.4	Stabilité élastique des cadres	461
11.4.1	Introduction	461
11.4.2	Rappel de la théorie du flambage	461
11.4.3	Cadre idéal soumis à des forces nodales	463
11.4.4	Cadre idéal soumis à des forces non nodales	465

11.4.5	Évaluation des longueurs de flambage	466
11.4.6	Effet d'un contreventement de toiture	470
11.4.7	Effet des imperfections géométriques	476
11.5	Procédure de dimensionnement	476
11.5.1	Prédimensionnement	476
11.5.2	Méthodes de détermination des efforts intérieurs	477
11.5.3	Calcul des efforts intérieurs au premier ordre	478
11.5.4	Calcul des efforts intérieurs au second ordre	479
11.5.5	Vérification de la sécurité structurale	483
11.5.6	Vérification de l'aptitude au service	483
11.6	Exemple de calcul statique d'un cadre	484
11.6.1	Classification du cadre	484
11.6.2	Calcul des efforts intérieurs	488
12.	Eléments de cadre	493
12.1	Introduction	495
12.2	Traverses en profil à double té	495
12.2.1	Types de traverse	495
12.2.2	Sécurité structurale	496
12.2.3	Aptitude au service	501
12.3	Fermes à treillis	502
12.3.1	Types de ferme à treillis	502
12.3.2	Efforts intérieurs	504
12.3.3	Sécurité structurale	510
12.3.4	Aptitude au service	516
12.3.5	Vérification des nœuds	518
12.4	Montants de cadre de halle	524
12.4.1	Montants de section constante	525
12.4.2	Montants composés	529
12.4.3	Montants à section variable	534
12.5	Angles de cadre	540
12.5.1	Principes	540
12.5.2	Angle de cadre articulé	541
12.5.3	Angle de cadre rigide	542
12.6	Pieds de montant	549
12.6.1	Principes	549
12.6.2	Transmission des efforts dans le béton	551
12.6.3	Pieds de montant articulés	556
12.6.4	Pieds de montant encastrés	557
12.7	Exemples numériques	562
12.7.1	Vérification d'une traverse	562
12.7.2	Vérification d'un montant	566
12.7.3	Vérification d'un angle de cadre	569

12.7.4	Vérification d'un pied de poteau articulé	572
12.7.5	Vérification d'un pied de poteau articulé avec liste de centrage	574
12.7.6	Vérification d'un pied de poteau encastré	575
13.	Ossatures de bâtiments à étages	579
13.1	Introduction	581
13.2	Comportement structural d'un cadre	582
13.2.1	Classification des cadres	582
13.2.2	Imperfections	582
13.3	Calcul statique des cadres	583
13.3.1	Système global	583
13.3.2	Juxtaposition d'éléments structuraux	583
13.4	Longueur de flambage	584
13.4.1	Mode de flambage à nœuds fixes	584
13.4.2	Mode de flambage à nœuds déplaçables	587
13.4.3	Rigidité des poutres et des pieds de poteau	587
13.5	Poteaux métalliques	588
13.5.1	Profils en double té	588
13.5.2	Profils creux	588
13.5.3	Sections pleines	591
13.6	Poteaux mixtes	595
13.6.1	Profils enrobés de béton	595
13.6.2	Profils creux remplis de béton	596
13.6.3	Influence de l'effort tranchant	598
13.7	Cadres à nœuds semi-rigides	598
13.7.1	Comportement des nœuds	598
13.7.2	Modélisation du nœud	601
13.7.3	Classification des nœuds	603
13.7.4	Calcul statique des cadres à nœuds semi-rigides	604
13.8	Exemples numériques	606
13.8.1	Dimensionnement d'un poteau métallique	606
13.8.2	Dimensionnement d'un poteau mixte	608
13.8.3	Méthode de dimensionnement des sommiers mixtes à nœuds semi-rigides	611
13.8.4	Exemple de dimensionnement d'un sommier mixte semi-continu	613
14.	Contreventements	617
14.1	Introduction	619
14.2	Systèmes de contreventement	619
14.2.1	Actions et systèmes statiques	619
14.2.2	Cheminement des efforts horizontaux	621
14.3	Contreventements triangulés	627

14.3.1	Treillis plans	627
14.3.2	Treillis non plans.	630
14.3.3	Excentricités des barres de contreventement	631
14.3.4	Effets dus à la dilatation thermique.	633
14.3.5	Inertie équivalente.	634
14.4	Contreventements en tôle profilée.	635
14.4.1	Effet diaphragme.	635
14.4.2	Panneau	637
14.4.3	Diaphragme sans interaction avec les cadres	643
14.4.4	Diaphragme en interaction avec les cadres.	646
14.4.5	Stabilisation des pannes	650
14.5	Exemples numériques	653
14.5.1	Calcul d'un contreventement triangulé.	653
14.5.2	Calcul d'un contreventement en tôle profilée.	658
	Annexes	664
A 14.1	Coefficients a tenant compte de l'effet des pannes intermédiaires.	664
A 14.2	Coefficients b tenant compte du nombre d'attaches tôle-panne par largeur utile de plaque	664
A 14.3	Constante K du profil tenant compte du mode de fixation de la tôle	665
15.	Voies de roulement de ponts roulants	667
15.1	Introduction	669
15.1.1	Engins de manutention	669
15.1.2	Ponts roulants	670
15.1.3	Classification des ponts roulants.	673
15.2	Détails de construction et tolérances.	674
15.2.1	Rails de roulement	674
15.2.2	Joints de poutres	675
15.2.3	Tolérances	676
15.3	Cheminement des forces	676
15.3.1	Charges verticales.	679
15.3.2	Forces transversales	681
15.3.3	Forces longitudinales	683
15.4	Aptitude au service de la voie de roulement	684
15.4.1	Calcul des déplacements de la poutre de roulement.	684
15.4.2	Valeurs indicatives de flèches et vérification	685
15.5	Sécurité structurale de la poutre de roulement	686
15.5.1	Contraintes dans la poutre de roulement.	686
15.5.2	Participation du rail à la résistance	689
15.5.3	Calcul de la fixation du rail.	689
15.5.4	Effets des forces concentrées	691
15.6	Sécurité à la fatigue	694
15.6.1	Principe de vérification.	694

15.6.2	Calcul des efforts intérieurs et des contraintes.	695
15.6.3	Résistance à la fatigue	696
15.7	Exemples numériques.	698
15.7.1	Prédimensionnement	699
15.7.2	Vérification de la sécurité structurale.	700
15.7.3	Vérification de la sécurité à la fatigue	705
15.7.4	Calcul de la fixation du rail	707
15.7.5	Introduction des forces.	708
	INDEX	711
	NOTATIONS	715
	CRÉDITS DES ILLUSTRATIONS.	720
	BIOGRAPHIE DES AUTEURS	721