

CALCUL DES CHARPENTES D'ACIER

par

Denis Beaulieu, Ph.D., ing.
Université Laval

André Picard, Ph.D., ing.
Université Laval

Robert Tremblay, Ph.D., ing.
École Polytechnique

Gilbert Grondin, Ph.D., ing.
Université de l'Alberta

Bruno Massicotte, Ph.D., ing.
École Polytechnique

professeurs de génie civil



Institut canadien de la construction en acier

Droits d'auteur © 2003

Institut canadien de la construction en acier

Mise en pages : Thérèse Gadbois, Éditions l'Ardoise

Graphisme : Jean Parent, Schéma-Graphe

Crédits photographiques, couverture (de haut en bas)

Passerelles de la Seigneurie, Saint-Georges-de-Beauce, QC
Gracieuseté de Paul Baillargeon, architecte, et de
La Corporation Rendez-Vous à la Rivière

Bureau de CTV, Toronto, ON
Gracieuseté de M & G Steel Ltd.

Bureau de Motorola, Markham, ON
Gracieuseté de l'ICCA (Institut canadien de la construction en acier)

Pont du boulevard Monk, Montréal, QC
Gracieuseté de AXOR Experts-Conseils inc. et de la Ville de Montréal

Tous droits réservés. Ce livre ne peut être reproduit en tout ou en partie, de quelque façon que ce soit, sans la permission écrite de l'éditeur.

Deuxième édition

Premier tirage, novembre 2005

Deuxième tirage revu, août 2008

ISBN 978-0-88811-127-2

Imprimé au Canada



PRÉFACE

En 1981, deux jeunes professeurs de l'Université Laval ont inauguré une ère nouvelle dans l'enseignement du génie au Canada. Le livre *Calcul aux états limites des charpentes d'acier*, écrit par André Picard et Denis Beaulieu, s'est rapidement imposé comme le principal manuel d'enseignement des charpentes d'acier dans les universités francophones. En même temps, les praticiens l'ont reconnu comme un outil de référence indispensable.

En écrivant dix ans plus tard *Calcul des charpentes d'acier*, Picard et Beaulieu ont franchi une autre étape. Ce volume plus complet a dépassé l'édition précédente comme manuel pour les étudiants de premier cycle. De plus, son contenu additionnel a répondu aux besoins des étudiants de deuxième cycle, tout en recevant l'accueil favorable des professionnels.

Vingt-deux ans après leur succès initial, André Picard et Denis Beaulieu contribuent une fois de plus à la formation en charpentes d'acier dans les universités francophones canadiennes. Il ont invité trois auteurs, Bruno Massicotte, Gilbert Grondin et Robert Tremblay – une nouvelle génération d'enseignants et de chercheurs compétents – à collaborer à la rédaction de nouveaux livres et manuels de référence.

Un nouvel ouvrage en deux tomes représente le fruit de leur effort conjoint. Dans le tome 1, notamment, le chapitre sur l'acier et ses propriétés a été largement augmenté. Le tome 2, d'autre part, propose des approches pratiques pour le calcul sismique, la fatigue, la rupture fragile, la métallurgie, la soudabilité et la corrosion, ainsi que des nouveaux chapitres sur les ponts en acier, les bâtiments industriels et les profilés laminés à froid. Ce matériel inédit intéressera à la fois les étudiants et les praticiens.

Destiné aux étudiants de premier cycle, le tome 1 offre une mise à jour des notions fondamentales du calcul des charpentes d'acier, alors que le tome 2 traite des sujets plus avancés pour les étudiants de deuxième cycle et les chercheurs qui désirent approfondir leurs connaissances en construction métallique. Les ingénieurs voudront sûrement ajouter ces deux volumes à leur bibliothèque.

L'ouvrage laisse transparaître la richesse des connaissances des auteurs et leur engagement, voire vocation pour l'enseignement. Ils méritent toutes nos félicitations pour l'excellent travail accompli.

Hugh A. Krentz, P.Eng.

Fondation pour la formation en charpentes d'acier

Juin 2003

AVANT-PROPOS

Ce volume, publié en deux tomes, est destiné aux ingénieurs praticiens, aux étudiants et étudiantes en génie, ainsi qu'à nos collègues de l'enseignement collégial et universitaire. Notre premier objectif est de mettre à leur disposition un outil de travail en langue française permettant de résoudre les principaux problèmes posés par le calcul d'une charpente d'acier selon les plus récentes normes canadiennes et, à l'occasion, étrangères. L'utilisation de cet ouvrage nécessite des connaissances dans le domaine de la résistance des matériaux et de l'analyse des structures.

Lors de la révision du premier volume publié en 1981, il a fallu modifier le texte de façon tellement substantielle qu'il en a résulté un tout nouveau volume, publié en 1991. Il en fut de même avec la présente édition. Les encouragements et les commentaires reçus de nombreux utilisateurs des deux premiers volumes nous ont motivés à aller plus loin dans les développements théoriques et à présenter un texte nouveau ou plus complet sur plusieurs sujets.

De plus, les auteurs des deux premières éditions ont senti que le temps était venu de préparer la relève en invitant des collègues plus jeunes à contribuer à la rédaction du nouveau volume dans des domaines relevant de leurs compétences : analyse sismique, calcul des bâtiments industriels, calcul des ponts, calcul des charpentes constituées de profilés formés à froid, rupture fragile et fatigue. Ces additions ont forcé les auteurs à considérer la publication de l'ouvrage en deux tomes. Le premier est surtout destiné à la formation de premier cycle en génie, alors que le deuxième est plus adapté aux études supérieures. L'ensemble constitue un outil de référence pour les praticiens œuvrant dans le domaine de l'ingénierie des structures.

Les professeurs qui décideront d'utiliser ce volume pour leurs cours, pourront facilement sélectionner les chapitres, les sections et les sous-sections qui conviennent, selon leur plan de cours. Pour les assister dans la préparation et la présentation de leurs cours, ils pourront disposer d'un fichier électronique permettant l'enseignement du contenu du volume.

En écrivant ce volume, nous avons voulu, dans le premier chapitre, apprendre ou rappeler au lecteur les principes fondamentaux du calcul aux états limites et de l'analyse des structures, et présenter les principaux systèmes de résistance aux charges de gravité et aux charges latérales, utilisés dans les charpentes d'acier. Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des propriétés et des caractéristiques

fondamentales de l'acier, alors que les sujets plus spécialisés, tels les aspects métallurgiques, la soudabilité et la tenue à la corrosion de l'acier sont reportés au chapitre VIII. Le troisième chapitre est consacré à l'étude des pièces travaillant en traction. Le chapitre suivant traite des caractéristiques des boulons et des soudures et du calcul des assemblages concentriques boulonnés ou soudés. Le calcul des assemblages plus complexes, des raidisseurs et des goussets est reporté au chapitre XI. Dans les trois chapitres suivants, qui complètent le premier tome, nous reprenons l'étude de chacune des diverses pièces susceptibles de faire partie d'une charpente d'acier, soit, dans l'ordre, les poteaux, les poutres et les poteaux-poutres. Les poutres particulières, telles les poutres mixtes et les poutres assemblées sont traitées dans les chapitres IX et X. Les chapitres XII et XIII, portant respectivement sur la conception parasismique des charpentes et sur la fatigue et la rupture par fragilité, sont des chapitres nouveaux et très spécialisés qui devraient répondre à plusieurs interrogations de la part des concepteurs de charpentes d'acier. Ces derniers trouveront aussi très utiles les trois derniers chapitres du volume qui portent respectivement sur le calcul des ponts, des bâtiments industriels et des charpentes comprenant des profilés formés à froid.

Les auteurs se sont efforcés de présenter les concepts théoriques de façon claire et détaillée, l'objectif étant de bien faire comprendre ces concepts aux étudiants et étudiantes, et de fournir au lecteur plus expérimenté réponse à ses interrogations. D'autre part, l'ingénieur a souvent besoin d'équations pratiques qui lui permettent de dégrossir le problème posé et de faire un bon choix préliminaire des pièces de la charpente. Dans la mesure du possible, nous avons mis l'accent sur le calcul pratique, que nous avons illustré de nombreux exemples numériques.

Nous remercions l'Institut canadien de la construction en acier qui a bien voulu publier ce volume, particulièrement son président, M. Mike Gilmor, et M. Hugh Krentz. Des remerciements tout particuliers sont adressés à M^{me} Thérèse Gadbois des Éditions l'Ardoise, pour la saisie du texte et la mise en page, à M. Paul Bourque des Éditions l'Ardoise, pour le traitement des photos, et à M. Jean Parent de Schéma Graphe, pour la réalisation des figures. Enfin, nous tenons à remercier nos épouses pour leur patience et leurs encouragements.

Les auteurs

MISE AU POINT

Depuis plusieurs années, l'Institut canadien de la construction en acier (ICCA) contribue aux efforts déployés par les grandes universités canadiennes et les autres institutions d'enseignement, en leur fournissant subventions à la recherche, bourses d'étude, photographies, CD-R, programmes d'ordinateur, livres de référence et documentation diverse. L'intérêt de l'ICCA à cet égard ne se dément pas et c'est avec fierté qu'il publie ce volume.

L'ICCA décline toute responsabilité quant au contenu de ce livre et des erreurs ou omissions qui pourraient résulter de l'utilisation des données contenues dans cette publication. Toutes les suggestions visant à améliorer les éditions subséquentes seront envoyées aux auteurs et seront considérées lors des prochains tirages ou des prochaines éditions.

Siège social de l'ICCA :

Institut canadien de la construction en acier
200 - 3760, 14e Avenue
Markham, ON L3R 3T7
Téléphone : 905.946.0864
Télécopieur : 905.946.8574
Internet : <http://www.cisc-icca.ca>

Bureau du Québec de l'ICCA :

Institut canadien de la construction en acier – Québec
202 - 2555, rue des Nations
Saint-Laurent, QC H4R 3C8
Téléphone : 514.332.8894
Télécopieur : 514.332.8895
Internet : <http://quebec.cisc-icca.ca>

TABLE DES MATIÈRES

Tome I

CHAPITRE I – INTRODUCTION ET BASES DE CALCUL

1.1	Généralités	1
1.2	Système international d'unités (SI)	2
1.3	Calcul aux états limites	3
1.3.1	Définition des états limites	3
1.3.2	Charges d'utilisation et charges pondérées	4
1.3.3	Probabilité de rupture	5
1.3.4	Règles fondamentales	10
1.4	Charges et coefficients pour les bâtiments	11
1.4.1	Définition antérieure des charges	11
1.4.2	Pondération et combinaison des charges	13
1.4.3	Pondération des résistances	15
1.4.4	Nouvelle définition des charges	17
1.4.5	Pondération et combinaison des charges	17
1.4.6	Exemple de calcul	21
1.5	Charges et coefficients pour les ponts routiers	25
1.5.1	Définition des charges	25
1.5.2	Charges routières	26
1.5.3	Amplification des efforts : effets dynamiques	28
1.5.4	Application des charges routières	29
1.5.5	Pondération et combinaison des charges	29
1.5.6	Pondération des résistances	30
1.6	Méthodes de calcul des efforts dus aux charges	31
1.6.1	Analyse élastique des structures	32
1.6.2	Analyse plastique des structures	34
1.6.3	Analyse sismique des structures : méthodes spectrales	38
1.6.4	Analyse sismique des structures : méthode statique incrémentale	46
1.6.5	Analyse sismique des structures : méthode dynamique temporelle	49
1.7	Considérations de stabilité	52
1.7.1	Définition des états limites de stabilité	52
1.7.2	Voilement des parois d'une section	52
1.7.3	Flambement et déversement des pièces	53
1.7.4	Stabilité globale des charpentes	55

1.8	Systèmes de résistance aux charges de gravité dans les bâtiments	56
1.8.1	Charpente de plancher conventionnelle	56
1.8.2	Système Gerber	58
1.8.3	Charpente de plancher mixte conventionnelle	59
1.8.4	Charpente de plancher mixte alvéolée	60
1.8.5	Poteaux et ossatures de planchers dans les bâtiments multiétagés	61
1.8.6	Nouveaux systèmes de planchers	63
1.9	Systèmes de résistance aux charges latérales dans les bâtiments	63
1.9.1	Introduction	63
1.9.2	Comportement des diaphragmes pour des bâtiments d'un seul étage	71
1.9.3	Contreventements en treillis concentriques	81
1.9.4	Contreventements en treillis excentriques	84
1.9.5	Refends	86
1.9.6	Cadres à nœuds rigides	88
1.10	Systèmes de résistance aux charges de gravité dans les ponts	92
1.10.1	Types de systèmes structuraux	92
1.10.2	Particularités des ossatures courantes	95
1.10.3	Choix du système structural	98
1.10.4	Culées, piles et tours	100
1.11	Systèmes de résistance aux charges latérales dans les ponts	103
1.11.1	Nature des charges latérales	103
1.11.2	Contreventements, entretoises et diaphragmes intermédiaires	103
1.11.3	Contreventements horizontaux	105
1.11.4	Diaphragmes d'appui	106
1.11.5	Appareils d'appui	106
1.11.6	Cheminement des forces latérales	107
1.12	Conception et réalisation d'un projet de bâtiment en acier	108
1.12.1	Rôle de l'équipe pluridisciplinaire	108
1.12.2	Rôle du groupe d'études en charpente	110
1.12.3	Exécution d'un projet à déroulement accéléré	113
1.13	Calcul préliminaire de la charpente d'un bâtiment	114
1.13.1	Introduction	114
1.13.2	Description du projet	114
1.13.3	Évaluation de la charge permanente	116
1.13.4	Évaluation des autres charges	118
1.13.5	Choix et dimensionnement préliminaire du système de résistance aux charges de gravité	120
1.13.6	Choix et dimensionnement préliminaire du système de résistance aux charges latérales	140
1.13.7	Vérification du dimensionnement préliminaire	148

CHAPITRE II – L'ACIER ET SES PROPRIÉTÉS

2.1	Introduction	157
2.2	Production de l'acier	158
2.2.1	Généralités	158
2.2.2	Historique	159
2.2.3	Traitement du minerai de fer	160
2.2.4	Production de la fonte de première fusion	160
2.2.5	Procédé d'affinage de l'acier	162
2.2.6	Coulée en lingot et coulée continue	165
2.2.7	Transformation des produits semi-finis	169
2.2.8	Caractéristiques des produits laminés	169
2.3	Composition chimique de l'acier	175
2.3.1	Introduction	175
2.3.2	Éléments d'alliage	176
2.3.3	Classification générale des aciers	180
2.3.4	Aciers non alliés	180
2.3.5	Aciers faiblement alliés	183
2.3.6	Aciers alliés	184
2.4	Produits sidérurgiques de construction	186
2.4.1	Les profilés laminés et les tubes	186
2.4.2	Les profilés soudés standardisés	190
2.4.3	Autres produits	192
2.4.4	Dimensions et propriétés géométriques des sections	194
2.4.5	Classification des profilés laminés	196
2.5	Propriétés physiques	198
2.5.1	Introduction	198
2.5.2	Principales propriétés physiques de l'acier	198
2.6	Propriétés mécaniques	201
2.6.1	Introduction	201
2.6.2	Résistance en traction et ductilité	201
2.6.3	Adaptation plastique	204
2.6.4	Résistance à la fatigue	207
2.6.5	Dureté	208
2.6.6	Résilience	208
2.6.7	Autres propriétés	211
2.7	Nuances d'acier	212
2.7.1	Nuances canadiennes	212
2.7.2	Nuances américaines	215
2.7.3	Composition chimique des aciers de construction	217

2.8	Tenue au feu	220
2.8.1	Introduction	220
2.8.2	Variation des propriétés en fonction de la température	220
2.8.3	Facteurs de réduction de la résistance mécanique	225
2.8.4	Protection contre les incendies	230
2.8.5	Réutilisation de l'acier après un feu	238
2.9	Avantages des charpentes d'acier	239

CHAPITRE III – PIÈCES EN TRACTION

3.1	Introduction	243
3.1.1	Définition	243
3.1.2	Comportement des pièces tendues	243
3.2	Types de pièces et utilisations	245
3.2.1	Câbles	245
3.2.2	Barres et plaques	247
3.2.3	Tubes	249
3.2.4	Profilés et sections composées	252
3.3	Définition de l'aire de la section d'une pièce en traction	252
3.3.1	Généralités	252
3.3.2	Calcul de l'aire de la section brute	255
3.3.3	Calcul de l'aire de la section nette	255
3.4	Excentricités et décalage en cisaillement	259
3.4.1	Excentricités	259
3.4.2	Définition du décalage en cisaillement	261
3.4.3	Décalage en cisaillement dans les pièces boulonnées	263
3.4.4	Décalage en cisaillement dans les pièces soudées	265
3.4.5	Résistance à la déchirure en traction et cisaillement combinés	270
3.5	Modes de mise hors service et normes	272
3.5.1	États limites ultimes	272
3.5.2	États limites d'utilisation	273
3.6	Exemples de calcul	274
3.7	Calcul des bielles	291

CHAPITRE IV – CALCUL DES ASSEMBLAGES

4.1	Introduction	295
4.1.1	Composantes d'un assemblage	295
4.1.2	Boulonnage versus soudage	295
4.1.3	Efforts à considérer dans le calcul d'un assemblage	297
4.2	Assemblages boulonnés	298
4.2.1	Classification des assemblages boulonnés	298
4.2.2	Propriétés géométriques et mécaniques des boulons	303

4.2.3	Installation et dispositions pratiques de construction	304
4.2.4	Assemblages par contact et assemblages antiglisement	306
4.3	Résistance d'un boulon et résistance au glissement	307
4.3.1	Résistance d'un boulon à la traction	307
4.3.2	Résistance d'un boulon au cisaillement	308
4.3.3	Résistance d'un boulon à la traction et au cisaillement combinés	310
4.3.4	Résistance au glissement	310
4.4	Résistance des pièces boulonnées	311
4.4.1	Résistance à la pression diamétrale	312
4.4.2	Résistance à la traction et au cisaillement	314
4.5	Assemblages soudés	319
4.5.1	Définitions	319
4.5.2	Types de joints soudés et types de soudures	321
4.5.3	Classification des assemblages soudés	325
4.5.4	Représentation symbolique des soudures	327
4.5.5	Dispositions pratiques de construction	328
4.6	Résistance de la soudure et du métal de base	331
4.6.1	Résistance des soudures à rainure et de la surface de fusion	331
4.6.2	Résistance des soudures d'angle et de la surface de fusion	333
4.6.3	Résistance des pièces soudées hors de la surface de fusion	336
4.6.4	Renforcement d'assemblages	338
4.7	Assemblages boulonnés concentriques en cisaillement	341
4.7.1	Calcul du nombre de boulons	341
4.7.2	Assemblages pour transférer un effort tranchant	346
4.7.3	Joints de montage	359
4.8	Assemblages soudés concentriques	366
4.8.1	Calcul de la soudure d'angle	366
4.8.2	Étude de quelques configurations de cordons de soudure d'angle	370
4.9	Assemblages boulonnés concentriques en traction	372
4.9.1	Étude de l'effet de levier	372
4.9.2	Calcul du nombre de boulons	377
4.10	Assemblages boulonnés concentriques en traction et en cisaillement	381
4.10.1	Assemblages par contact	381
4.10.2	Assemblages antiglisement	384

CHAPITRE V – PIÈCES EN COMPRESSION PURE

5.1	Introduction	387
5.1.1	Définition	387
5.1.2	Modes de rupture	390
5.1.3	Contraintes résiduelles	393

5.2	Comportement en plasticité	396
5.3	Comportement en stabilité	398
5.3.1	Voilement des parois minces comprimées	398
5.3.2	Voilement des parois très élancées	400
5.3.3	Instabilité élastique d'une pièce droite	405
5.3.4	Instabilité élastique d'une pièce avec défauts de rectitude	409
5.3.5	Instabilité inélastique	411
5.4	Comportement général des pièces comprimées	414
5.4.1	Influence des contraintes résiduelles	414
5.4.2	Influence des défauts de rectitude	415
5.4.3	Influence de la retenue aux extrémités des pièces	416
5.5	Concept de longueur effective	418
5.5.1	Introduction	418
5.5.2	Fondements théoriques	419
5.5.3	Longueurs effectives dans les cadres à joints rigides	424
5.5.4	Adaptation de la méthode des nomogrammes	429
5.5.5	Généralisation de la méthode des nomogrammes	436
5.5.6	Longueurs effectives dans les treillis et autres structures	437
5.6	Supports latéraux	441
5.6.1	Définitions	441
5.6.2	Stabilité de la structure	443
5.6.3	Rigidité et résistance des supports latéraux	445
5.6.4	Cumul des efforts	452
5.7	Résistance au flambement en flexion	453
5.7.1	Élancement pour le flambement en flexion	453
5.7.2	Équations de calcul	457
5.7.3	Choix des sections	461
5.7.4	Exemples de calcul	464
5.8	Résistance au flambement en flexion-torsion	474
5.8.1	Formulation générale	474
5.8.2	Élancement pour la torsion	477
5.8.3	Exemples de calcul	479
5.9	Calcul des pièces à section composée	487
5.9.1	Disposition des boulons et des soudures	488
5.9.2	Profilés laminés groupés	489
5.9.3	Pièces composées triangulées	491
5.9.4	Pièces composées avec tôles perforées	498
5.9.5	Pièces composées avec traverses de liaison	499
5.10	Calcul des poteaux mixtes	503
5.10.1	Généralités	503
5.10.2	Avantages des poteaux mixtes	505

5.10.3	Profilés tubulaires remplis de béton	505
5.10.4	Profilés ouverts noyés dans le béton	509
5.10.5	Profilés ouverts partiellement recouverts de béton	511

CHAPITRE VI – PIÈCES FLÉCHIES

6.1	Introduction	523
6.1.1	Flexion symétrique et torsion	523
6.1.2	Relation moment-courbure	526
6.2	Résistance de la section d'une poutre	531
6.2.1	Flexion plastique d'une section bisymétrique	531
6.2.2	Flexion plastique d'une section unisymétrique	533
6.2.3	Flexion plastique d'une section hybride	536
6.2.4	Flexion plastique et effort normal	540
6.2.5	Flexion plastique biaxiale	546
6.2.6	Flexion biaxiale et effort normal	549
6.3	Voilement des sections à parois minces	550
6.3.1	Classification des sections pour la flexion	550
6.3.2	Voilement d'une paroi mince : théorie générale	552
6.3.3	Élancements limites pour les parois des sections travaillant en compression pure	557
6.3.4	Élancements limites pour les sections travaillant en flexion	559
6.3.5	Voilement d'une paroi raidie	568
6.4	Déversement d'une poutre	573
6.4.1	Description du phénomène	574
6.4.2	Rigidité torsionnelle d'une section	574
6.4.3	Déversement élastique : cas fondamental	582
6.5	Déversement élastique : autres cas	585
6.5.1	Influence du type de chargement et du point d'application de la charge	585
6.5.2	Influence des conditions de retenue latérale	590
6.5.3	Poutres en porte-à-faux	596
6.5.4	Sections unisymétriques	600
6.6	Déversement inélastique	606
6.6.1	Généralités	606
6.6.2	Zone de transition entre déversement élastique et plastification	607
6.6.3	Longueur critique L_p	610
6.7	Résistance pondérée en flexion : M_r	612
6.7.1	Rupture par voilement	612
6.7.2	Rupture par déversement	614
6.7.3	Dimensionnement : choix des sections	617
6.8	Calcul des supports latéraux	619

6.9	Résistances à l'effort tranchant et aux charges concentrées	628
6.9.1	Résistance à l'effort tranchant	628
6.9.2	Résistance aux charges concentrées	631
6.10	Flexion et torsion	634
6.11	Renforcement des poutres	642
6.11.1	Généralités	642
6.11.2	Dimensionnement des renforts	644
6.11.3	Liaison des renforts à la poutre	645
6.12	États limites d'utilisation	650
CHAPITRE VII – PIÈCES EN COMPRESSION-FLEXION		
7.1	Introduction	655
7.2	Résistance de la section	657
7.2.1	Voilement des parois minces	657
7.2.2	Interaction des efforts sur la section	658
7.2.3	Normes sur la résistance de la section	661
7.3	Considérations de stabilité	663
7.3.1	Définitions	663
7.3.2	Effets $P - \delta$	666
7.3.3	Compléments d'information sur le concept de longueur effective	677
7.4	Effets $P - \Delta$	690
7.4.1	Définitions	690
7.4.2	Charges horizontales fictives minimales	692
7.4.3	Charpentes contreventées et non contreventées	694
7.4.4	Méthode exacte d'analyse du deuxième ordre	699
7.4.5	Méthode du facteur d'amplification	700
7.4.6	Méthode des charges horizontales fictives	703
7.4.7	Méthode des contreventements fictifs	705
7.4.8	Méthode des poteaux fictifs	707
7.5	Résistance des pièces comprimées et fléchies	715
7.5.1	Interaction des efforts sur la pièce	715
7.5.2	Approche à la normalisation	721
7.5.3	Profilés en I fléchis selon l'axe fort	726
7.5.4	Profilés en I fléchis selon l'axe faible	732
7.5.5	Flexion biaxiale des sections en I de classes 1 et 2	734
7.5.6	Simplification des équations	736
7.5.7	Règles de calcul pour la compression-flexion	737
7.6	Exemples de calcul	739

7.7	Analyse non linéaire de la flexion biaxiale	768
7.7.1	Profils en I de classes 1 et 2	768
7.7.2	Profils tubulaires carrés de classes 1 et 2	774
7.8	Choix des sections	775
7.8.1	Calcul de C_f^*	776
7.8.2	Calcul de C_{fX}^{**}	778
7.8.3	Méthode de calcul	779
7.9	Résistance des pièces tendues et fléchies	782
INDEX DES NOTIONS ET DES TERMES		789

Tome II

CHAPITRE VIII – COMPLÉMENTS D'INFORMATION SUR L'ACIER ET SES PROPRIÉTÉS

CHAPITRE IX – POUTRES MIXTES

CHAPITRE X – POUTRES ASSEMBLÉES

CHAPITRE XI – COMPLÉMENTS AU CALCUL DES ASSEMBLAGES

CHAPITRE XII – CONCEPTION PARASISMIQUE DES STRUCTURES DE BÂTIMENT

CHAPITRE XIII – RUPTURE FRAGILE ET FATIGUE

CHAPITRE XIV – PONTS EN ACIER

CHAPITRE XV – BÂTIMENTS INDUSTRIELS

CHAPITRE XVI – PROFILÉS LAMINÉS À FROID

