

CALCUL DES CHARPENTES D'ACIER

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

Tous professeurs de génie civil

cisc  icca

Institut canadien de la construction en acier

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.

Mise en pages: Thérèse Gadbois, Éditions l'Ardoise
et Danielle Motard

Illustrations: Jean Parent, Schéma-Graphe

Crédits photographiques, couverture (de haut en bas)

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

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

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

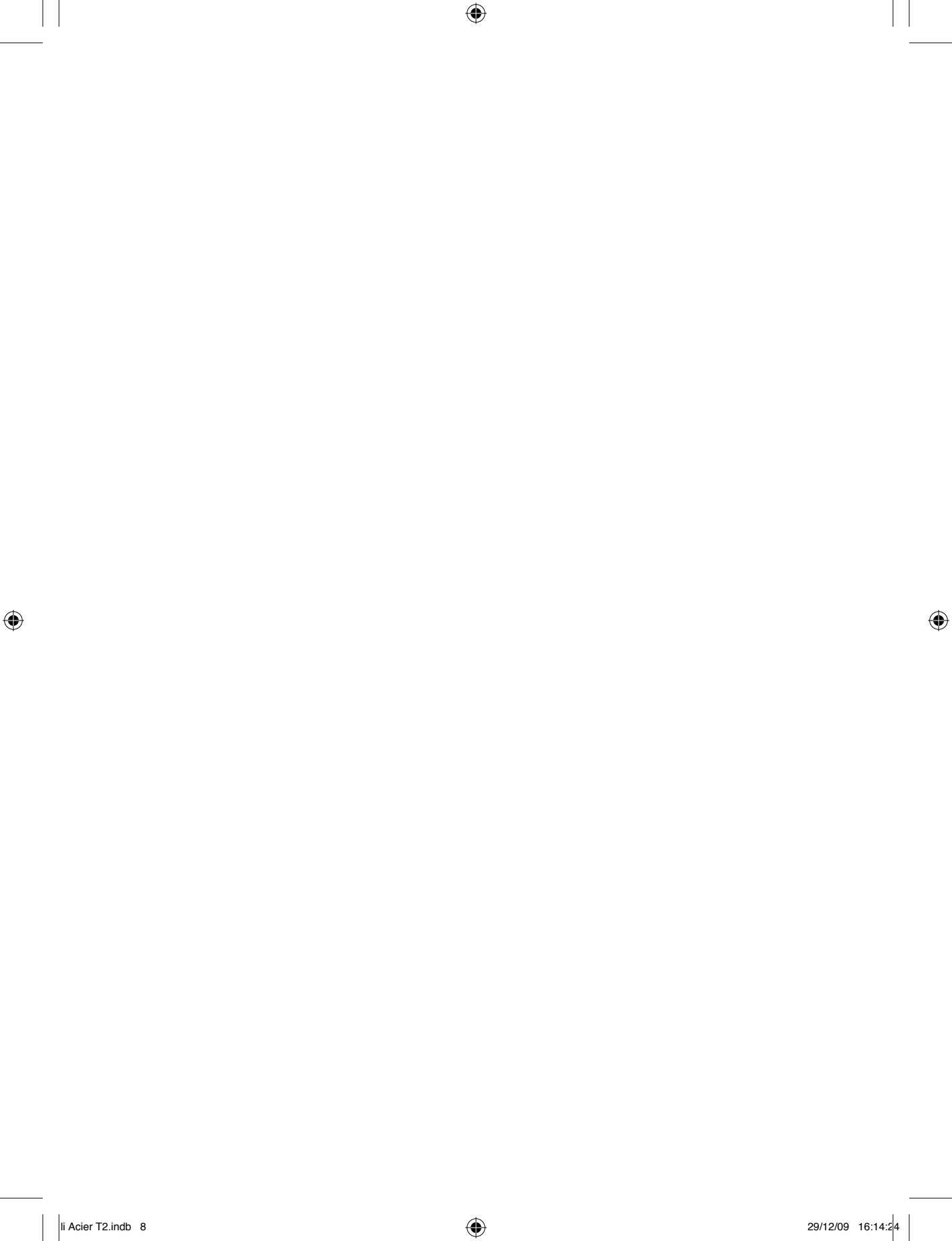
Pont du boulevard Monk, Montréal, Québec
Gracieuseté de AXOR Experts-Conseils inc. et de la Ville de Montréal



© Institut canadien de la construction en acier
janvier 2010
Imprimé au canada

ISBN 978-0-88811-147-0

Ce volume est dédié à la mémoire
de notre très cher collègue et ami,
André Picard†,
qui nous a brusquement
quittés en avril 2008.



PRÉFACE

En 2003, cinq professeurs de l'Université Laval, de l'École Polytechnique et de l'Université d'Alberta ont collaboré pour offrir aux ingénieurs en structure, aux enseignants et aux fabricants le premier volume d'une série de manuels de référence en français consacrés à la conception des charpentes d'acier. Le premier volume, intitulé « Calcul des charpentes d'acier », avait été précédé de deux ouvrages rédigés par André Picard et Denis Beaulieu, de l'Université Laval. Pendant 22 ans, ces ouvrages ont servi de références à l'enseignement en français dans les écoles de génie canadiennes, mais aussi aux ingénieurs en structure et aux fabricants spécialisés dans l'acier de charpente. En fournissant un aperçu général des normes canadiennes de calcul de l'acier de charpente, ces deux ouvrages se sont rapidement imposés comme des références incontournables dans le domaine de l'ingénierie des structures.

Initialement prévue en deux volumes, la série est publiée en trois volumes afin de traiter de manière approfondie et complète les sujets indispensables au domaine actuel de la conception. Malheureusement, l'un des deux auteurs à l'origine de la série, le professeur André Picard, est décédé en 2008 avant la publication du deuxième volume. Cette série doit beaucoup à son dévouement envers l'enseignement et l'industrie canadienne de l'acier de charpente, et nous lui en sommes profondément reconnaissants.

Le Tome 1, qui contient des renseignements actualisés sur l'acier de charpente et ses propriétés ainsi que des critères de calcul élémentaires, restera une source indispensable pour les étudiants de premier cycle en génie qui étudient le calcul des charpentes d'acier et leur servira d'outil de référence lorsqu'ils commenceront à exercer la profession d'ingénieur en structure.

Le Tome 2, qui traite en profondeur des propriétés matérielles de l'acier (métallurgie, soudabilité, corrosion), de la conception de poutres mixtes acier-béton utilisées dans les bâtiments et les ponts, et de poutres assemblées pour les bâtiments et qui présente des notions avancées sur le calcul des assemblages, des raidisseurs et des goussets, de même que sur la rupture fragile et la fatigue, sera à la fois un outil de référence précieux pour les ingénieurs praticiens et un ouvrage de base utile pour les cours de cycle supérieur sur le calcul des charpentes d'acier.

Le Tome 3, avec ses chapitres consacrés à la conception parasismique des structures de bâtiment, aux ponts en acier, aux bâtiments industriels et aux profilés laminés à froid, réunira une somme de connaissances sans précédent au Canada dans le

domaine de la conception. Ce volume offrira aux ingénieurs en structure une ressource inestimable et constituera un précieux manuel de référence pour les professeurs de cycle supérieur qui enseignent des cours spécialisés.

Les connaissances et le dévouement démontrés par les auteurs dans la réalisation de ces trois volumes sont un témoignage de leur professionnalisme en tant que pédagogues. Ils méritent nos plus sincères félicitations pour ce remarquable accomplissement.

Michael I. Gilmor, P.Eng.
Conseil canadien de la construction en acier

Juin 2009

AVANT-PROPOS

Ce volume, publié en trois 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. L'histoire se répète avec la présente édition puisqu'elle sera publiée en trois tomes comportant près de 2000 pages. Les encouragements et commentaires reçus de nombreux utilisateurs des deux premières éditions 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. En compte final, ces additions ont forcé les auteurs à considérer la publication de l'ouvrage en trois tomes. Le premier, publié en décembre 2003 et comportant sept chapitres, est surtout destiné à la formation de premier cycle en génie, alors que les deux autres, comportant respectivement cinq et quatre chapitres, sont plus adaptés aux études supérieures. L'ensemble constitue un outil de référence très utile pour les praticiens oeuvrant 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 avoir accès sur demande à la version électronique des figures, des tableaux et de certaines équations, permettant l'enseignement du contenu du volume.

En écrivant le tome II du volume, nous avons voulu fournir dans le chapitre VIII (le premier chapitre du deuxième tome) un complément d'information sur l'acier et ses propriétés, qui est la suite logique du chapitre II du premier tome. Les principaux sujets couverts sont la composition, les traitements thermiques, la soudabilité et la tenue à la corrosion de l'acier. Le chapitre IX est consacré à l'étude et au calcul des poutres mixtes acier-béton utilisées dans les bâtiments et les ponts. Le chapitre X est consacré à l'étude des poutres assemblées dans les bâtiments, alors que l'étude des poutres assemblées utilisées dans les ponts sera traitée dans le dernier tome du volume. Le chapitre XI est la suite logique et le complément tant attendu du chapitre IV sur le calcul des assemblages. Tous les types d'assemblages non concentriques boulonnés et soudés, les raidisseurs, les goussets et les assemblages de pied de poteau y sont traités avec beaucoup d'attention. Le chapitre XII, enfin, couvre en profondeur les problématiques de la rupture fragile et de la fatigue de l'acier.

Les chapitres XIII à XVI, portant respectivement sur la conception parasismique des structures de bâtiment, les ponts en acier, les bâtiments industriels et les profilés laminés à froid, sont des chapitres nouveaux et très spécialisés qui devraient répondre à plusieurs interrogations de la part des concepteurs de charpentes d'acier. Ils feront l'objet du tome III du volume.

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 deuxième volume de la série, particulièrement son président, M. E. Whalen, ainsi que Mme Sylvie Boulanger et M. Charles Albert. Des remerciements tout particuliers sont adressés à Mme Thérèse Gadbois des Éditions l'Ardoise et Mme Danielle Motard, graphiste, pour la saisie du texte et la mise en page, 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
3760, 14^e Avenue, Bureau 200
Markham, Ontario, Canada L3R 3T7
Téléphone : 905-946-0864
Télécopieur : 905-946-8574
<http://www.cisc-icca.ca>

Bureau du Québec de l'ICCA :

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



TABLE DES MATIÈRES

TOME I

CHAPITRE I – INTRODUCTION ET BASES DE CALCUL

CHAPITRE II – L'ACIER ET SES PROPRIÉTÉS

CHAPITRE III – PIÈCES EN TRACTION

CHAPITRE IV – CALCUL DES ASSEMBLAGES

CHAPITRE V – PIÈCES EN COMPRESSION PURE

CHAPITRE VI – PIÈCES FLÉCHIES

CHAPITRE VII – PIÈCES EN COMPRESSION-FLEXION

PRÉFACE	ix
AVANT-PROPOS	xi
MISE AU POINT	xiii
CHAPITRE VIII COMPLÉMENTS D'INFORMATION SUR L'ACIER ET SES PROPRIÉTÉS	
8.1 Introduction	1
8.2 Structure cristalline du fer	1
8.2.1 Arrangements atomiques de base	1
8.2.2 Structure en grains	5
8.2.3 Déformation et rupture	7
8.2.4 Défauts dans les cristaux	10

xv

8.3	Composition et traitements thermiques de l'acier	12
8.3.1	Classement des aciers	12
8.3.2	Diagramme de phases Fer-Carbone	14
8.3.3	Influence de la vitesse de refroidissement	17
8.3.4	Influence de la composition chimique et trempabilité	18
8.3.5	Traitements thermiques	21
8.4	Soudabilité	27
8.4.1	Introduction	27
8.4.2	Aciers soudables de diverses nuances	29
8.4.3	Transfert de chaleur	30
8.4.4	Vitesses de refroidissement	33
8.4.5	Zone affectée thermiquement par le soudage	36
8.4.6	Fissuration par l'hydrogène	38
8.4.7	Précautions pour éviter la fissuration	42
8.4.8	Arrachement lamellaire	50
8.4.9	Composition chimique de la zone de fusion	52
8.4.10	Solidification de la zone de fusion	56
8.4.11	Traitement de relaxation des contraintes	60
8.4.12	Résilience de la zone de fusion et de la ZAT	60
8.5	Tenue à la corrosion	61
8.5.1	Introduction	61
8.5.2	Principes de base	62
8.5.3	Réactions électrochimiques	63
8.5.4	Potentiels d'équilibre	65
8.5.5	Cinétique de la corrosion	69
8.5.6	Passivation	71
8.5.7	Corrosion liée à la métallurgie des métaux	73
8.5.8	Corrosion liée à l'environnement	75
8.5.9	Corrosion généralisée (uniforme)	82
8.5.10	Corrosion galvanique	83
8.5.11	Corrosion par piqûres	86
8.5.12	Corrosion caverneuse (sous dépôt)	87
8.5.13	Corrosion intergranulaire (tanscristalline)	89
8.5.14	Corrosion sous contraintes	91
8.5.15	Fragilisation par l'hydrogène	93
8.5.16	Corrosion par érosion et corrosion par cavitation	93
8.5.17	Corrosion par frottement	95
8.5.18	Fatigue et corrosion	95
8.5.19	Protections contre la corrosion	96

CHAPITRE IX POUTRES MIXTES

9.1	Introduction	103
9.1.1	Définition	103
9.1.2	Charpentes de planchers mixtes	105
9.1.3	Modes de construction des poutres mixtes	107
9.1.4	Action mixte totale ou partielle	112
9.2	Caractéristiques de la dalle de béton	113
9.2.1	Épaisseur efficace de la dalle	113
9.2.2	Largeur efficace de la dalle	115
9.2.3	Armature de la dalle de béton	118
9.3	Liaison dalle de béton-poutre d'acier	120
9.3.1	Généralités	120
9.3.2	Résistance des goujons	121
9.3.3	Nombre de goujons et espacement longitudinal	127
9.4	État limite ultime de résistance à la flexion	129
9.4.1	Axe neutre plastique et axe neutre élastique	129
9.4.2	Hypothèses de calcul	131
9.4.3	Action mixte totale	131
9.4.4	Action mixte totale : axe neutre dans la dalle de béton	133
9.4.5	Action mixte totale : axe neutre dans l'aile de la section d'acier	135
9.4.6	Action mixte totale : axe neutre dans l'âme de la section d'acier	138
9.4.7	Action mixte partielle	140
9.5	Résistance limite en flexion : autres cas	144
9.5.1	Profondeur de l'âme en compression (h_c)	145
9.5.2	Poutre mixte avec âme élancée (zone de flexion positive)	147
9.5.3	Poutre mixte dans une zone de flexion négative	152
9.6	Cisaillement longitudinal de la dalle de béton	158
9.7	États limites d'utilisation : flèches	161
9.7.1	Calcul des flèches : généralités	161
9.7.2	Propriétés de la section mixte	162
9.7.3	Prise en compte du fluage du béton	166
9.7.4	Prise en compte du retrait du béton	170
9.8	États limites d'utilisation : Vibrations	173
9.8.1	Généralités	173
9.8.2	Vibrations d'un tablier de pont	173
9.8.3	Vibrations d'un plancher	176
9.9	Dimensionnement des poutres mixtes	187
9.10	Charpentes de planchers alvéolées	194
9.10.1	Généralités	194
9.10.2	Dimensionnement	195
9.10.3	Analyse du comportement d'une poutre Vierendeel	197

CHAPITRE X POUTRES ASSEMBLÉES

10.1	Introduction	203
10.1.1	Utilisation des poutres assemblées	203
10.1.2	Principes de calcul	206
10.1.3	Modes de rupture	208
10.2	Étude du cisaillement	209
10.2.1	Voilement élastique d'une paroi sollicitée en cisaillement pur	209
10.2.2	Voilement inélastique d'une paroi sollicitée en cisaillement pur	212
10.2.3	Plastification et écrouissage	212
10.2.4	Contribution du champ de tension	213
10.2.5	Règles de calcul pour le cisaillement	222
10.3	Étude de la flexion	225
10.3.1	Comportement général	225
10.3.2	Voilement de l'aile en compression	227
10.3.3	Voilement horizontal de l'âme fléchie	227
10.3.4	Enfoncement de l'âme	231
10.4	Autres modes de mise hors service	234
10.4.1	Interaction flexion-cisaillement	234
10.4.2	Plastification de l'âme aux appuis et sous les charges concentrées	237
10.4.3	Flambement vertical de l'âme dû aux charges appliquées	238
10.5	Calcul des raidisseurs	242
10.5.1	Raidisseurs porteurs	242
10.5.2	Raidisseurs transversaux	245
10.5.3	Raidisseurs longitudinaux	254
10.6	Choix des sections	260
10.6.1	Profondeur de la poutre	260
10.6.2	Poids propre de la poutre	262
10.6.3	Épaisseur de l'âme	263
10.6.4	Section des ailes	263
10.6.5	Vérification de la résistance de la section	264
10.7	Exemple de calcul d'une poutre de bâtiment	265

CHAPITRE XI COMPLÉMENTS AU CALCUL DES ASSEMBLAGES

11.1	Introduction	287
11.2	Assemblages boulonnés excentriques en cisaillement	288
11.2.1	Analyse élastique	289
11.2.2	Analyse non linéaire	297
11.2.3	Calculs pratiques à l'aide de tables	304
11.2.4	État limite de glissement	306

11.3	Assemblages boulonnés excentriques en traction	308
11.3.1	Analyse élastique	310
11.3.2	Analyse à l'état limite ultime	319
11.4	Assemblages soudés excentriques en torsion	333
11.4.1	Analyse élastique	334
11.4.2	Analyse non linéaire	341
11.4.3	Calculs pratiques à l'aide de tables	347
11.5	Assemblages soudés excentriques en flexion	349
11.5.1	Analyse à l'état limite ultime	349
11.5.2	Consoles d'appui non raidies	353
11.5.3	Consoles d'appui raidies	358
11.6	Calcul des raidisseurs	368
11.6.1	Voilement et plastification d'un raidisseur	368
11.6.2	Raidissement d'un poteau dans un assemblage rigide	370
11.6.3	Raidissement de l'âme d'un poteau pour le transfert de flexion	376
11.7	Calcul des goussets	383
11.7.1	Généralités	383
11.7.2	Modes de rupture du gousset (efforts intérieurs)	386
11.7.3	Efforts en périphérie d'un gousset	397
11.8	Assemblages pour le transfert de flexion	411
11.8.1	Généralités	411
11.8.2	Calcul sismique d'un assemblage	415
11.9	Assemblages de pieds de poteaux	425
11.9.1	Considérations pratiques	425
11.9.2	Résistance du béton et des tiges d'ancrage	430
11.9.3	Effort normal et effort tranchant	434
11.9.4	Calcul des plaques d'assise : premier cas	439
11.9.5	Calcul des plaques d'assise : deuxième et troisième cas	444
11.10	Comportement des assemblages	451
11.10.1	Rigidité d'un assemblage	451
11.10.2	Analyse des structures avec assemblages partiellement rigides	455

CHAPITRE XII RUPTURE FRAGILE ET FATIGUE

12.1	Introduction	463
12.2	Rupture fragile	464
12.2.1	Généralités	464
12.2.2	Mécanismes de rupture	464

12.3	Mécanique de la rupture	467
12.3.1	Perturbation du champ de contraintes autour d'une anomalie	468
12.3.2	Définition du paramètre géométrique β	472
12.3.3	Évaluation du facteur d'intensité de contraintes	481
12.3.4	Corollaire du principe de superposition	483
12.3.5	Fissures multiples	488
12.3.6	Cinq exemples	490
12.4	Résilience ou ténacité d'une rupture	498
12.4.1	Généralités	498
12.4.2	Mesure de la résilience	499
12.4.3	Facteurs influençant la résilience et la ténacité d'une rupture	505
12.5	Fatigue	512
12.5.1	Terminologie et concepts de base	512
12.5.2	Mécanisme de fissuration due à la fatigue	515
12.5.3	Formation d'une fissure et propagation	519
12.5.4	Influence de la contrainte moyenne	524
12.5.5	Évaluation de la croissance d'une fissure par intégration	526
12.5.6	Interaction des chargements et ralentissement d'une fissure	528
12.6	Règles de calcul concernant la fatigue	534
12.6.1	Généralités	534
12.6.2	Variabilité des résultats des essais de fatigue et probabilité de rupture	537
12.6.3	Classement des détails de construction pour les calculs de fatigue	538
12.7	La fatigue sous des amplitudes de contraintes variables	551
12.7.1	Historique des contraintes et cumul des cycles	551
12.7.2	Cumul des dommages dus à la fatigue	555
12.8	Quelques considérations sur les calculs de fatigue	560
12.8.1	Différentes approches pour la prise en compte de la fatigue	560
12.8.2	Résistance à la fatigue des assemblages boulonnés	563
12.8.3	Résistance à la fatigue des assemblages soudés	565
12.8.4	Améliorations des détails de construction	569
12.8.5	Fatigue causée par des distorsions imposées	572
12.9	Quelques considérations concernant la fabrication	575
12.9.1	Qualité de la fabrication	576
12.9.2	Précautions lors de l'exécution des soudures	576
12.10	Impact des conditions environnementales	579
12.10.1	Effet de la corrosion sur la résistance à la fatigue	579
12.10.2	Effet de l'agressivité de l'environnement	581
12.10.3	Effet de la fréquence du chargement cyclique	582
12.10.4	Effet de la température	582
12.10.5	Mesures préventives	583

12.11 Réparation de fissures de fatigue	584
12.11.1 Points à considérer lors de la réparation d'une structure	584
12.11.2 Forage de trous pour ralentir la progression des fissures	585
12.11.3 Technique d'expansion d'un trou jusqu'à la plastification en périphérie	587
12.11.4 Surchargement	588
12.11.5 Traitements d'amélioration des soudures	588
12.11.6 Amélioration des soudures par martelage	591
12.11.7 Recouvrement des fissures	593
12.11.8 La fatigue générée par le frottement	595
12.12 Détection des fissures	596
12.12.1 Généralités	596
12.12.2 Détection des imperfections et des fissures de surface	596
12.12.3 Détection des imperfections et des fissures noyées	598
12.12.4 Fiabilité des techniques d'inspection non destructive	600
INDEX DES NOTIONS ET DES TERMES	607

TOME III

**CHAPITRE XIII – CONCEPTION PARASISMIQUE
DES STRUCTURES DE BÂTIMENT**

CHAPITRE XIV – PONTS EN ACIER

CHAPITRE XV – BÂTIMENTS INDUSTRIELS

CHAPITRE XVI – PROFILÉS LAMINÉS À FROID

