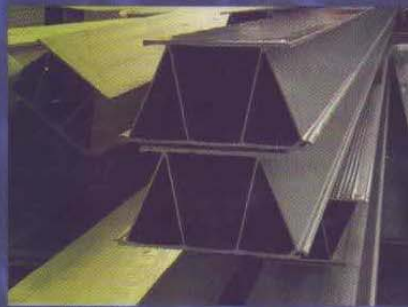


Denis Beaulieu

# Calcul des charpentes d'aluminium



Les Presses  
de l'aluminium

Vue A - APRAL

# TABLE DES MATIÈRES

## CHAPITRE I – INTRODUCTION

1.1	Généralités	1
1.2	Contenu du volume	2
1.3	Système international d'unités (si)	3
1.4	Historique	5
1.5	Caractéristiques et débouchés de l'aluminium	6

## CHAPITRE II – L'ALUMINIUM ET SES PROPRIÉTÉS

2.1	Introduction	9
2.2	Production de l'aluminium	9
2.2.1	Le minerai	9
2.2.2	Traitement du minerai	10
2.2.3	Réduction de l'alumine	11
2.2.4	Préparation des alliages	13
2.2.5	Coulée de l'aluminium	14
2.2.6	Recyclage de l'aluminium	14
2.3	Transformation de l'aluminium	14
2.3.1	Vue d'ensemble	14
2.3.2	Laminage	15
2.3.3	Extrusion	17
2.3.4	Forgeage	19
2.3.5	Moulage	20
2.3.6	Disponibilité des produits	21
2.4	Les alliages	22
2.4.1	Désignation des alliages	22
2.4.2	Désignation des états des alliages	23
2.4.3	Caractéristiques et utilisation des alliages	28
2.5	Considérations métallurgiques	31
2.5.1	Introduction	31
2.5.2	Structure cristalline de l'aluminium	31
2.5.3	Ajout d'éléments d'alliage	33
2.5.4	Effets de l'écrouissage	34
2.5.5	Éléments d'alliage et écrouissage combinés	35
2.5.6	Comparaison des propriétés des séries d'aluminium	36
2.5.7	Traitements thermiques des séries 2000, 6000 et 7000	37
2.5.8	Recristallisation	45
2.5.9	Combinaison de traitements thermiques et de travail à froid	46
2.5.10	Recuit	47

2.5.11	Relaxation des contraintes résiduelles	48
2.5.12	Stabilisation	49
2.5.13	Réfrigération	50
2.5.14	Traitements thermiques, temps et températures	50
2.6	Influence du soudage	51
2.6.1	Effets du soudage sur les propriétés	51
2.6.2	Effets du soudage sur les alliages non traitables thermiquement	51
2.6.3	Effets du soudage sur les alliages traités thermiquement	53
2.6.4	Moyens de limiter la réduction des propriétés	55
2.7	Finition et traitement des surfaces	57
2.7.1	Introduction	57
2.7.2	Fini naturel	58
2.7.3	Procédés mécaniques	58
2.7.4	Procédés chimiques	59
2.7.5	Procédés électrolytiques	60
2.7.6	Procédés organiques	62
2.7.7	Placage	63
2.7.8	Protection des surfaces	63
2.8	Propriétés physiques	65
2.8.1	Introduction	65
2.8.2	Densité	65
2.8.3	Coefficient de dilatation thermique	65
2.8.4	Conductibilité thermique	66
2.8.5	Capacité thermique massique	66
2.8.6	Conductivité électrique	66
2.8.7	Module d'élasticité	66
2.8.8	Coefficient de Poisson	68
2.8.9	Module de Coulomb	68
2.8.10	Résumé des propriétés physiques	68
2.9	Propriétés mécaniques	69
2.9.1	Introduction	69
2.9.2	Résistance en traction et ductilité	69
2.9.3	Résistances nominales	73
2.9.4	Résistance à la fatigue	77
2.9.5	Dureté	79
2.9.6	Résilience	80
2.10	Influence de la température sur les propriétés mécaniques	81
2.11	Tenue au feu	86
2.11.1	Introduction	86
2.11.2	Limite élastique	87
2.11.3	Module d'élasticité	88
2.11.4	Dilatation thermique	89
2.11.5	Capacité thermique massique	89
2.11.6	Conductibilité thermique	89
2.11.7	Autres considérations	89
2.12	Influence de la vitesse d'application des contraintes sur les propriétés mécaniques	91

2.13	Soudabilité	91
2.13.1	Introduction	91
2.13.2	Couche d'oxyde	92
2.13.3	Problèmes de fusion	94
2.13.4	Fissuration à chaud	95
2.13.5	Conséquences de la conductibilité thermique	101
2.13.6	Déformations	101
2.13.7	Soudage par groupes d'alliages	102
2.13.8	Matériaux d'apport	103
2.13.9	Préchauffage et application de la chaleur	105
2.13.10	Formation de dépôts noirs	108
2.14	Tenue à la corrosion	108
2.14.1	Introduction	108
2.14.2	Principaux paramètres	109
2.14.3	Couche d'oxyde naturelle	109
2.14.4	Influence du pH	109
2.14.5	Formes de corrosion	110
2.14.6	La corrosion généralisée	111
2.14.7	La corrosion par piqûres	111
2.14.8	La corrosion transcristalline et la corrosion intercristalline	113
2.14.9	La corrosion feuilletante	114
2.14.10	La corrosion sous contrainte	115
2.14.11	La corrosion filiforme	116
2.14.12	La corrosion à la ligne d'eau	116
2.14.13	La corrosion sous dépôt	118
2.14.14	L'érosion	118
2.14.15	La corrosion galvanique	119
2.14.16	Contact de l'aluminium avec les matériaux de construction	126
2.14.17	Influence des traitements thermiques	128
2.14.18	Influence des soudures	129
2.14.19	Dispositions constructives	130
2.14.20	Tenue à la corrosion des alliages	130
2.14.21	Les protections	133
2.15	Autres propriétés et caractéristiques	133
<b>CHAPITRE III – PRINCIPES DE CALCUL</b>		
3.1	Introduction	139
3.2	Élaboration d'un projet	139
3.2.1	Équipe de conception	139
3.2.2	Étude préliminaire	140
3.2.3	Critères de performance	142
3.2.4	Conceptualisation	145
3.2.5	Analyse et optimisation	146
3.2.6	Préparation des plans et devis	147
3.2.7	Appel d'offres, fabrication et érection	148
3.3	Classification des charges	149
3.3.1	Introduction	149
3.3.2	Définitions	149

## CALCUL DES CHARPENTES D'ALUMINIUM

3.3.3	Classification selon la réponse structurale	149
3.3.4	Classification selon la variation de l'intensité des charges dans le temps	150
3.3.5	Classification des charges en fonction de la variabilité de leur position dans les structures	152
3.4	Calcul aux états limites	153
3.4.1	États limites	153
3.4.2	Charges d'utilisation et charges pondérées	153
3.4.3	Probabilité de rupture	154
3.4.4	Coefficients de calcul	157
3.4.5	Règles fondamentales	158
3.5	Définition des coefficients utilisés dans le calcul aux états limites	159
3.5.1	Introduction	159
3.5.2	Calcul des bâtiments	160
3.5.3	Calcul des ponts	166
3.5.4	Calcul des autres types de structure	170
3.6	Calcul aux contraintes admissibles	174
3.7	États limites d'utilisation	176
3.7.1	Introduction	176
3.7.2	Déformations	176
3.7.3	Vibration des planchers	179
3.7.4	Vibration des structures	184
3.7.5	Limites d'élançement	190
3.8	Considérations de stabilité	191
3.8.1	Mise au point	191
3.8.2	Classification	192
3.8.3	Instabilité élastique et effet $P-\delta$	194
3.8.4	Instabilité globale de type $P-\Delta$	198
3.8.5	Méthode exacte d'analyse $P-\Delta$	201
3.8.6	Méthode du facteur d'amplification	202
3.8.7	Méthode des charges horizontales fictives	206
3.8.8	Méthode des contreventements fictifs	208
3.8.9	Méthode des poteaux fictifs	209
3.9	Exemples de calcul	210
3.9.1	Exemple 3.1 – États limites	211
3.9.2	Exemple 3.2 – Effets du deuxième ordre	216
<b>CHAPITRE IV – PIÈCES EN TRACTION</b>		
4.1	Introduction	235
4.2	Classification et utilisation des pièces en traction	235
4.2.1	Les câbles	236
4.2.2	Les tubes	236
4.2.3	Les barres et les plaques	238
4.2.4	Les profilés à section ouverte et à section composée	238
4.3	Comportement des pièces tendues en aluminium	239

4.4	Section nette effective	242
4.4.1	Influence des assemblages	242
4.4.2	Section nette effective des assemblages boulonnés	243
4.4.3	Excentricités dans les assemblages boulonnés	248
4.4.4	Section effective des pièces soudées	254
4.5	Modes de mise hors service	260
4.6	Exemples de calcul	263
4.6.1	Exemple 4.1 – Résistance d'une plaque boulonnée	263
4.6.2	Exemple 4.2 – Résistance d'une cornière boulonnée	265
4.6.3	Exemple 4.3 – Résistance de tubes soudés	269
4.6.4	Exemple 4.4 – Résistance d'un profilé à section composée soudée, assemblé par boulonnage	272
<b>CHAPITRE V – PIÈCES ET PAROIS EN COMPRESSION</b>		
5.1	Introduction	277
5.2	Modes de rupture	280
5.3	Approches à la normalisation	287
5.4	Variables influençant la résistance	291
5.4.1	Les alliages	291
5.4.2	La géométrie de la section des pièces	293
5.4.3	Les variations d'épaisseur des parois	294
5.4.4	Les défauts de rectitude	294
5.4.5	Les contraintes résiduelles (soudage)	294
5.4.6	Le degré de retenue aux extrémités des pièces	301
5.5	Voilement des parois minces	306
5.5.1	Élancement normalisé	306
5.5.2	Contrainte de flambement normalisée	308
5.5.3	Épaisseur effective	312
5.5.4	Parois retenues sur les deux bords	314
5.5.5	Parois retenues sur un seul bord	317
5.5.6	Parois avec bord raidi	319
5.6	Flambement des pièces	321
5.6.1	Contrainte limite	321
5.6.2	Élancement normalisé et contrainte de flambement	324
5.6.3	Résistance pondérée en compression	324
5.6.4	Flambement en flexion	324
5.6.5	Flambement en torsion	325
5.6.6	Flambement en flexion-torsion	328
5.6.7	Formulation générale	329
5.7	Calcul des pièces à section composée	331
5.7.1	Introduction	331
5.7.2	Résistance des pièces groupées et des pièces avec traverses de liaison	333
5.7.3	Résistance des pièces à doubles cornières	334
5.7.4	Résistance des pièces triangulées	335

5.8	Flambement des panneaux plats raidis	336
5.8.1	Définitions	336
5.8.2	Voilement des parois et des feuilles raidies	338
5.8.3	Flambement global du panneau	340
5.9	Flambement des parois courbes et des tubes	341
5.9.1	Définitions	341
5.9.2	Flambement des tubes sous sollicitations axiales	342
5.9.3	Flambement des parois courbes sous sollicitations axiales	343
5.9.4	Résistance à la compression radiale	344
5.10	Flambement des panneaux sandwich	345
5.10.1	Définitions	345
5.10.2	Résistance du panneau au flambement	346
5.10.3	Contrainte de flambement de la peau	347
5.10.4	Adhérence entre la peau et le noyau	348
5.11	Pièces en torsion	348
5.11.1	Introduction	348
5.11.2	Couples de résistance à la torsion pure et au gauchissement	349
5.11.3	Centre de torsion et moment d'inertie polaire	355
5.11.4	Résumé des propriétés géométriques de torsion	356
5.11.5	Résistance des pièces à la torsion	360
5.12	Exemples de calcul	361
5.12.1	Exemple 5.1 – Moment d'inertie de torsion	361
5.12.2	Exemple 5.2 – Résistance d'une paroi	362
5.12.3	Exemple 5.3 – Résistance d'un profilé en I	369
5.12.4	Exemple 5.4 – Résistance d'un profilé tubulaire	371
5.12.5	Exemple 5.5 – Élancement de cornières	373
5.12.6	Exemple 5.6 – Résistance d'une pièce monosymétrique à section composée	376
5.12.7	Exemple 5.7 – Résistance d'une paroi raidie et d'une paroi courbe	379

## CHAPITRE VI – PIÈCES EN FLEXION SIMPLE ET EN FLEXION COMPOSÉE

6.1	Introduction	387
6.2	Résistance des sections fléchies	390
6.2.1	Comportement général de la section	390
6.2.2	Classification des pièces fléchies	395
6.2.3	Résistance de la section	397
6.3	Résistance des pièces fléchies	398
6.3.1	Résistance au déversement	398
6.3.2	Poutres dont l'aile en traction est retenue latéralement	401
6.3.3	Poutres libres de déverser (moment uniforme)	405
6.3.4	Poutres libres de déverser (gradient de flexion)	407
6.4	Poutres libres de déverser (autres cas)	411
6.4.1	Coefficient $\omega_2$	411
6.4.2	Charges appliquées sur la poutre entre les supports latéraux	414
6.4.3	Conditions de retenue latérale	416
6.4.4	Porte-à-faux	417

6.4.5	Supports latéraux intermédiaires	420
6.4.6	Sections unisymétriques	421
6.5	Résistance au cisaillement des panneaux plats	424
6.5.1	Introduction	424
6.5.2	Contrainte de flambement en cisaillement	425
6.5.3	Flux de cisaillement aux frontières	427
6.5.4	Résistance au cisaillement des âmes raidies	428
6.5.5	Calcul des raidisseurs	432
6.5.6	Interaction flexion-cisaillement	434
6.6	Écrasement et flambement vertical de l'âme	435
6.6.1	Panneaux plats	435
6.6.2	Feuillards formés à froid	437
6.7	Interaction flexion-traction	437
6.7.1	Résistance de la section	437
6.7.2	Résistance de la pièce	439
6.8	Interaction compression-flexion	439
6.8.1	Introduction	439
6.8.2	Résistance de la section aux appuis	440
6.8.3	Résistance de la pièce sans effet de torsion	441
6.8.4	Résistance globale de la pièce avec effet de torsion	445
6.8.5	Résistance des pièces triangulées	446
6.9	Résistance au cisaillement de divers types d'éléments	448
6.9.1	Pièces comprimées et fléchies	448
6.9.2	Panneaux plats à raidisseurs multiples	449
6.9.3	Parois courbes et tubes	450
6.9.4	Panneaux sandwich plats	451
6.10	Poutres mixtes aluminium-béton	451
6.11	Exemples de calcul	458
6.11.1	Exemple 6.1 – Section tubulaire fléchie	458
6.11.2	Exemple 6.2 – Poutre en I sur plusieurs appuis	460
6.11.3	Exemple 6.3 – Plaque en porte-à-faux	468
6.11.4	Exemple 6.4 – Pièce triangulée comprimée et fléchie	471
6.11.5	Exemple 6.5 – Poteau-poutre de section en I	476
6.11.6	Exemple 6.6 – Profilé en T en traction et flexion	480
6.11.7	Exemple 6.7 – Paroi raidie et paroi courbe en cisaillement	485
6.11.8	Exemple 6.8 – Poutre assemblée	488
<b>CHAPITRE VII – ASSEMBLAGES MÉCANIQUES</b>		
7.1	Introduction	499
7.1.1	Généralités	499
7.1.2	Classification des assemblages	500
7.1.3	États limites	504
7.2	Dispositions constructives	505
7.2.1	Excentricité des assemblages	505
7.2.2	Combinaison de connecteurs mécaniques et de soudures	505
7.2.3	Disposition des connecteurs	506

7.3	Résistance des boulons et des rivets	509
7.3.1	Caractéristiques	509
7.3.2	Propriétés mécaniques	513
7.3.3	Traction	515
7.3.4	Cisaillement	517
7.3.5	Traction et cisaillement combinés	518
7.4	Résistance au glissement	520
7.4.1	Serrage contrôlé des boulons	520
7.4.2	Définition des états limites	523
7.4.3	Recommandations pour le calcul	524
7.4.4	Traction et cisaillement combinés	526
7.5	Résistance des pièces	527
7.5.1	Résistance à la pression diamétrale	527
7.5.2	Assemblages à recouvrement non raidis	530
7.5.3	Bords obliques	531
7.5.4	Ruptures sur la section nette	532
7.6	Assemblages concentriques en cisaillement	533
7.6.1	Comportement général	533
7.6.2	Assemblages par contact	534
7.6.3	Assemblages antiglisement	535
7.6.4	Assemblages pour le transfert d'un effort tranchant	535
7.7	Assemblages excentriques en cisaillement	537
7.7.1	Analyse élastique classique	537
7.7.2	Analyse élastique	541
7.7.3	Analyse à l'état limite ultime	543
7.7.4	Assemblages antiglisement	544
7.8	Assemblages concentriques en traction	546
7.8.1	Choix des connecteurs	546
7.8.2	Définition de l'effet de levier	546
7.8.3	Effet de levier dans les assemblages en acier	549
7.8.4	Adaptation de la méthode aux assemblages en aluminium	552
7.8.5	Calcul des assemblages concentriques en traction	554
7.9	Assemblages concentriques en traction et en cisaillement	555
7.9.1	Assemblages par contact	555
7.9.2	Assemblages antiglisement	556
7.10	Assemblages excentriques en traction	557
7.10.1	Caractéristiques des assemblages	557
7.10.2	Analyse élastique	558
7.11	Assemblages vissés	561
7.11.1	Caractéristiques des vis et états limites	561
7.11.2	Arrachement des vis	562
7.11.3	Déboutonnage de la plaque en contact avec la tête de la vis	564
7.11.4	Inclinaison de la vis	565
7.11.5	Résistance pondérée des vis en traction	565
7.11.6	Résistance pondérée des vis en cisaillement	565

7.12	Autres modes de connexion mécanique	566
7.12.1	Introduction	566
7.12.2	Les rivets spéciaux	567
7.12.3	Les procédés industriels à répétition	569
7.12.4	L'emboîtement	570
7.12.5	Le collage	570
7.13	Exemples de calcul	574
7.13.1	Exemple 7.1 – Assemblage concentrique en cisaillement	574
7.13.2	Exemple 7.2 – Assemblage excentrique en cisaillement (pièces en T)	579
7.13.3	Exemple 7.3 – Assemblage excentrique en cisaillement (plaques)	583
7.13.4	Exemple 7.4 – Assemblage concentrique en traction et en cisaillement	588
7.13.5	Exemple 7.5 – Assemblage excentrique en traction	592
7.13.6	Exemple 7.6 – Voilement d'une plaque rivetée	595
7.13.7	Exemple 7.7 – Tôles vissées	597

## CHAPITRE VIII – ASSEMBLAGES SOUDÉS

8.1	Généralités sur le soudage	603
8.1.1	Résistance des pièces et des assemblages soudés	603
8.1.2	Normes sur le soudage	604
8.1.3	Types de joints soudés et types de soudures	605
8.1.4	Procédés de soudage	610
8.1.5	Positions de soudage	611
8.1.6	Représentation symbolique des soudures	612
8.1.7	Classification des assemblages soudés	612
8.2	Conception des assemblages soudés	616
8.2.1	Caractéristiques du soudage de l'aluminium	616
8.2.2	Soudures d'angle	618
8.2.3	Cales	622
8.2.4	Soudures à rainure	622
8.2.5	Goujons	627
8.3	Procédés de soudage à l'arc	629
8.3.1	Soudage avec électrode réfractaire (GTAW)	629
8.3.2	Soudage avec électrode consommable (GMAW)	630
8.3.3	Soudage plasma (PAW)	633
8.3.4	Sélection du procédé de soudage	633
8.4	Autres procédés de soudage	634
8.4.1	Soudage par friction	635
8.4.2	Soudage par faisceau d'électrons	637
8.4.3	Soudage par faisceau laser	638
8.4.4	Soudage par résistance	639
8.4.5	Soudage à la molette	639
8.4.6	Soudage par étincelage	640
8.4.7	Soudage par ultrasons	640
8.4.8	Soudage par explosion	640
8.4.9	Le brasage	641

8.5	Résistance des soudures à rainure	642
8.5.1	Résistance en traction	643
8.5.2	Résistance en compression	643
8.5.3	Résistance en cisaillement	643
8.5.4	Résistance des soudures à rainure à bords tombés	644
8.5.5	Résistance des soudures de goujons	645
8.6	Assemblages concentriques avec soudure d'angle	645
8.7	Assemblages soudés excentriques en torsion	651
8.7.1	Approximation de l'analyse à l'état limite ultime	652
8.7.2	Analyse élastique classique	654
8.7.3	Analyse élastique	656
8.7.4	Analyse à l'état limite ultime	659
8.8.	Assemblages soudés excentriques en flexion	660
8.8.1	Flexion dans le plan $x-y$	660
8.8.2	Flexion dans le plan $y-z$	663
8.9	Assemblages pour le transfert d'un effort tranchant	663
8.9.1	Assemblages à cornières jumelées	665
8.9.2	Consoles d'appui non raidies	666
8.10	Exemples de calcul	668
8.10.1	Exemple 8.1 – Soudures à rainure	668
8.10.2	Exemple 8.2 – Assemblage concentrique avec soudures d'angle	671
8.10.3	Exemple 8.3 – Calcul d'un couvre-joint et d'une cale	673
8.10.4	Exemple 8.4 – Assemblage excentrique en torsion	676
8.10.5	Exemple 8.5 – Assemblage excentrique en flexion (plan $x-y$ )	681
8.10.6	Exemple 8.6 – Assemblage excentrique en flexion (plan $y-z$ )	685

## CHAPITRE IX – FATIGUE

9.1	Introduction	689
9.1.1	Le phénomène de fatigue	689
9.1.2	Importance de la fatigue	690
9.1.3	Paramètres à prendre en compte	691
9.1.4	Différence de contraintes	692
9.1.5	Essais de fatigue	693
9.2	Mécanismes de la rupture par fatigue	695
9.2.1	Théorie élastique	695
9.2.2	Propagation de la fissure	697
9.2.3	Calcul de la durée de vie	699
9.2.4	Paramètres influençant la durée de vie	701
9.2.5	Dimension critique d'une fissure	704
9.3	Paramètres de la tenue en fatigue	706
9.3.1	Caractéristiques du matériau	706
9.3.2	Caractéristiques des soudures	708
9.3.3	Contraintes résiduelles	710
9.3.4	Dispositions constructives	712
9.3.5	Sollicitations	723
9.3.6	Contraintes nominales et contraintes locales	727

9.3.7	Frottement	729
9.3.8	Épaisseur des plaques	729
9.3.9	Corrosion	730
9.3.10	Température	732
9.4	Résistance à la fatigue	734
9.4.1	Étapes de calcul	734
9.4.2	Méthodes de calcul	735
9.4.3	Sollicitation à amplitude constante	737
9.4.4	Sollicitation à amplitude variable	739
9.4.5	Influence de $R$ et de $\sigma_m$	748
9.4.6	Méthode du point critique	752
9.5	Méthodes d'intervention	754
9.5.1	Inspection	755
9.5.2	Amélioration	756
9.5.3	Prévention	759
9.5.4	Réparation et renforcement	760
9.6	Approche à la normalisation	761
9.6.1	Recommandations canadiennes	762
9.6.2	Recommandations américaines	765
9.6.3	Recommandations européennes	769
9.7	Exemples de calcul	774
9.7.1	Exemple 9.1 – Analyse d'un portique de signalisation aérienne	774
9.7.2	Exemple 9.2 – Méthode du point critique	778
9.7.3	Exemple 9.3 – Assemblage boulonné	790
9.7.4	Exemple 9.4 – Assemblage soudé	794
9.7.5	Exemple 9.5 – Cumul de dommages	797
<b>INDEX DES NOTIONS ET DES TERMES</b>		<b>805</b>