

L'art des structures

Aurelio Muttoni

Une introduction au fonctionnement des structures en architecture

Deuxième édition mise à jour



Les auteurs et l'éditeur remercient l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne pour le soutien apporté à la publication de cet ouvrage.

Parus chez le même éditeur:

Introduction à l'analyse des structures
Marc-André Studer et François Frey
Conception des charpentes métalliques
Manfred A. Hirt et Michel Crisinel

Traité de Génie Civil
Analyse des structures et milieux continus
Vol. 1 *Statique appliquée*, François Frey
Vol. 2 *Mécanique des structures*, François Frey
Vol. 3 *Mécanique des solides*, François Frey
Vol. 5 *Coques*, François Frey et Marc-André Studer
Vol. 6 *Méthode des éléments finis*, François Frey et Jaroslav Jirousek

Mise en page réalisée par Recto Verso, Delley

Les Presses polytechniques et universitaires romandes sont une fondation scientifique dont le but est principalement la diffusion des travaux de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, ainsi que d'autres universités et écoles d'ingénieurs francophones. Le catalogue de leurs publications peut être obtenu par courrier aux Presses polytechniques et universitaires romandes, EPFL – Rolex Learning Center, CH-1015 Lausanne, par e-mail à ppur@epfl.ch, par téléphone au (0)21 693 41 40, ou par fax au (0)21 693 40 27.

www.ppur.org

Cet ouvrage est la traduction française du livre *Strutture*, Accademia di Architettura, Mendrisio, 2004

ISBN 978-2-88074-980-4

Deuxième édition mise à jour

© Presses polytechniques et universitaires romandes, 2012

© Presses polytechniques et universitaires romandes, 2004, 2005, 2010 pour la première édition

Tous droits réservés.

Reproduction, même partielle, sous quelque forme
ou sur quelque support que ce soit, interdite sans l'accord écrit de l'éditeur.

Imprimé en Italie

Avant-propos	XI	Le point d'application d'une force et l'équilibre	30
		L'angle de frottement	31
		Le diagramme de Cremona	31
		Les forces et les efforts	32
Introduction	1	Les câbles	35
Le parcours des structures	2	Le schéma structural	37
Qu'est-ce qu'une structure porteuse?	4	La portée ℓ et la flèche f	37
Le but d'une structure	4	Les appuis	38
Structure et architecture	5	Le sens de l'effort sur le sous-système	38
		L'influence de la charge	39
Forces et équilibre, efforts, résistance et rigidité	7	L'influence de la géométrie	39
Les charges qui agissent sur une structure	9	Le rapport ℓ/f	40
Les forces de gravitation et la loi de gravitation de Newton	9	L'influence de la position de la charge	40
La force de gravitation à la surface de la terre	10	La charge dans une direction quelconque	41
Le vecteur force, le point d'application et la ligne d'action	10	Le câble avec deux charges verticales	41
Le sous-système	11	Le câble de la résultante	42
Les conditions d'équilibre de deux forces	11	Le câble avec deux charges non verticales	42
Les forces qui agissent sur la surface de contact entre deux sous-systèmes: action = réaction	12	Le câble avec plusieurs charges non verticales	43
La transmission d'une force et l'effort	13	Les charges parallèles non symétriques	44
L'effort de compression et sa quantification	13	Le câble auxiliaire	44
La sollicitation du matériau: la contrainte de compression	14	Le centre de gravité	45
La sollicitation de traction	15	Le polygone funiculaire	45
La contrainte de traction	16	Les charges réparties	45
L'effet de la sollicitation de traction: allongement	16	Le câble sollicité par des charges uniformément réparties	45
L'effet de la sollicitation de compression: raccourcissement	16	La chaînette	47
Le comportement linéaire et le comportement élastique	17	Les ponts suspendus	47
La rigidité	17	Les applications en architecture	48
La rigidité d'une structure sollicitée à la traction ou à la compression	18	Les appuis: piles, ancrages et autres éléments	49
La rigidité du matériau	18	Le dimensionnement des câbles	49
La phase élastique et la phase plastique	19	La section du câble en fonction de l'élancement ℓ/f	49
La contrainte d'écoulement et la résistance	20	La quantité de matériau en fonction de l'élancement ℓ/f	50
Le comportement mécanique de l'acier	20	Les déplacements causés par la variation d'intensité des charges	50
Le module d'élasticité E	20	Les déplacements causés par les charges permanentes	51
La contrainte d'écoulement f_y	21	Les déplacements dus aux charges variables	51
La résistance à la rupture f_t	21	Les déplacements causés par les variations de température	52
La déformation à la rupture ϵ	21	L'effet des déplacements horizontaux des appuis sur la géométrie du câble	52
La traction et la compression	22	La variation de la configuration des charges	52
La fragilité et la ductilité	22	Les déplacements provoqués par des charges variables	53
Le béton	23	Procédés pour limiter les déplacements provoqués par les charges variables	53
La roche	23	L'augmentation de la charge permanente	54
Le bois	24	La solution avec câble de prétension: poutre de câbles	54
Une comparaison des matériaux	24	La solution avec câble porteur et câbles stabilisateurs	56
La rigidité et la résistance	24	Le câble avec poutre de raidissement	57
Le dimensionnement	26	Le câble avec rigidité flexionnelle	58
Le critère de l'état limite de service	26	Les systèmes avec des câbles combinés	59
Le critère de l'état limite ultime	27	Les systèmes haubanés	59
Les facteurs de charge	27	Les réseaux de câbles, les tentes et les membranes	61
Les charges majorées et l'effort de dimensionnement	27	Les systèmes de câbles dans l'espace	63
Les facteurs de résistance	27	Les réseaux de câbles	64
La résistance de dimensionnement	28	Les tentes et les membranes	65
La fatigue	29	Les membranes pneumatiques	67
L'équilibre de plus de deux forces dans le plan et dans l'espace	29	Les membranes pneumatiques à haute pression	68
La première condition d'équilibre	30		
Polygone des forces	30		
La seconde condition d'équilibre	30		

Les structures sollicitées à la compression	71
Cas avec plusieurs charges et charges uniformément réparties: les arcs	72
L'arc parabolique	72
L'arc en forme de chaînette	72
L'analogie entre câbles et arcs	73
L'influence des charges variables	73
L'instabilité des arcs	74
Procédés pour stabiliser les arcs	74
Adjonction de barres stabilisatrices	74
L'introduction d'une poutre de raidissement	75
Le raidissement de l'arc par augmentation de l'épaisseur	76
La ligne d'action des efforts	76
Les lignes d'action possibles des efforts à l'intérieur d'un arc	78
Les arcs hyperstatiques et les arcs isostatiques	78
L'arc à trois articulations	79
La forme optimale d'un arc à trois articulations	79
L'épaisseur nécessaire d'un arc à trois articulations sollicité seulement à la compression	81
Les arcs construits avec des matériaux résistant à la traction	81
Les arcs dont la forme ne correspond pas à celle du polygone funiculaire des charges permanentes	82
Les arcs à deux articulations, forme idéale	82
Les arcs à une articulation	83
Les arcs sans articulation	83
Les arcs à plein cintre en maçonnerie	84

Les voûtes, les coupoles et les coques

87

L'arc comme élément d'une toiture	89
Les voûtes en berceau	89
Les voûtes d'arêtes	91
Les voûtes en éventail	92
Les voûtes en arc-de-cloître	94
Les coupoles	95
Le fonctionnement effectif des coupoles	95
Les coupoles avec une ouverture centrale pour le lanterneau	96
Les coupoles métalliques	97
Les arcs croisés	97
Les coupoles constituées par des arcs et anneaux	98
La forme des coupoles et les sollicitations	99
Les coupoles à forme conique	100
Les hyperboloïdes de révolution	102
La reprise de charges horizontales ou verticales quelconques ...	103
Les coupoles géodésiques	104
Les coupoles à réseau	104
Les coques et les coupoles quelconques	105
Les coques à double courbure orientée vers le bas	106
Les coques à courbure orientée vers le haut et vers le bas, les paraboloides hyperboliques	107
Les surfaces à selle de singe	108
Les coques quelconques composées	108
Les coques cylindriques	109
Les réseaux d'arcs	110

La reprise de la composante horizontale de la poussée	113
L'arc avec tirant	114
Les appuis fixes et les appuis mobiles	114
Projet et analyse des arcs avec tirant	115
La composition de câbles avec butons	116
La composition d'arcs et de câbles	117
Les arcs-et-câbles	118
Stabilisation de l'arc et reprise des charges variables	118
Les arcs-et-câbles en porte-à-faux	119
Les systèmes haubanés	120

Les treillis

123

Solution du problème de la déformabilité et de la stabilité par l'adjonction de barres supplémentaires	125
Les treillis	125
Analyse des treillis	125
Systèmes labiles, isostatiques ou hyperstatiques	128
Génération des treillis	129
L'analyse générale des treillis	130
Membrure supérieure, membrure inférieure et diagonales	132
L'influence de la hauteur et de la portée sur les sollicitations dans les treillis	132
Analyse complète d'un treillis	133
Le moment de flexion	134
La détermination des barres les plus sollicitées dans les membrures	135
L'analyse spécifique de barres des membrures dans les treillis ...	135
L'analyse des diagonales et leur fonctionnement	137
L'effort tranchant	137
La détermination des diagonales les plus sollicitées	138
La détermination des diagonales en traction et en compression	138
L'analyse qualitative d'un treillis	139
Les configurations possibles des diagonales	139
Diagonales en V	140
Diagonales en N	140
Diagonales en X	142
Diagonales en K	145
Les formes des treillis	146
La forme et l'efficacité structurale	148
L'influence de la forme sur la rigidité de la structure	149
Les consoles avec plusieurs charges	150
Les tours	151
Les poutres réticulaires avec consoles	152
Les poutres Gerber	153
Treillis pour d'autres formes structurales	

Les treillis dans l'espace

155

La composition de treillis pour soutenir une toiture	157
La grille de treillis	157
Les treillis spatiaux	158
Les voûtes et les coupoles constituées de treillis	159

Les poutres	161
Le treillis comme aide à la compréhension du fonctionnement des poutres	163
La sollicitation de la zone intermédiaire des poutres	163
La sollicitation de la zone tendue et de la zone comprimée	163
Les poutres en béton armé.....	164
La flexion simple d'une poutre.....	165
La flexion et la courbure.....	165
La résistance des poutres sollicitées à la flexion.....	165
L'influence des dimensions d'une poutre à section rectangulaire sur sa résistance.....	166
L'influence des dimensions d'une poutre à section rectangulaire sur sa rigidité.....	168
Les sections les plus efficaces: sections en I	170
L'influence des dimensions d'une poutre en I sur sa résistance à la flexion et sur sa rigidité	170
Le comportement d'une poutre en I avec les ailes verticales	171
L'efficacité d'une section	172
La forme, la section et l'efficacité structurale.....	172
Les poutres simples avec charges concentrées et avec charges uniformément réparties.....	174
Consoles	175
Les poutres avec consoles	176
Les poutres Gerber.....	178
Les poutres continues	179
Les poutres bi-encastées.....	180
Les zones plus ou moins sollicitées dans les poutres	181
Les cadres	183
Les cadres à deux articulations	185
Les cadres à trois articulations	186
La forme et la sollicitation	187
Les cadres à travées multiples	189
Les cadres superposés	191
Les cadres à étages et à travées multiples	192
Les poutres Vierendeel	192
Les poutres-cloisons et les voiles	195
Les poutres-cloisons.....	197
Les voiles sur plusieurs étages	197
Les voiles dans l'espace	199
Les structures plissées	200
Les planchers nervurés, les grilles de poutres et les dalles	201
La composition de poutres pour soutenir une surface plane.....	203
Les grilles de poutres.....	204
Les dalles	205
Les dalles soutenues par des murs avec transmission des charges dans une direction	205
Le choix de l'épaisseur d'une dalle.....	206
L'influence du type d'appui sur le comportement de la dalle.....	208
Dalles continues.....	209
Le fonctionnement avec des charges concentrées.....	209

La transmission des charges dans plusieurs directions.....	209
Les portées équivalentes pour les dalles qui partent en deux directions.....	210
Les dalles soutenues par des colonnes	211
La dalle-champignon.....	212
Les planchers-dalles sur colonnes	212
Le choix de l'épaisseur des planchers-dalles	213
La stabilité des éléments comprimés	215
Les barres tendues et les barres comprimées.....	217
La résistance d'une barre comprimée	218
Comment rendre une colonne stable	219
L'influence de la hauteur de la colonne sur la résistance à la compression	220
L'influence des conditions d'appui, la longueur critique	221
L'influence de la rigidité du matériau sur la charge critique de flambage d'une colonne	224
L'influence de la dimension de la section	225
L'influence de la forme de la section	226
Le choix des sections.....	227
Le voilement	227
Colonnes en treillis et en Vierendeel	228
Colonnes à section variable	228
Annexes	229
Annexe 1: La détermination analytique de la courbe funiculaire dans le cas du câble soumis à une charge uniformément répartie	231
Annexe 2: L'expression analytique des conditions d'équilibre ..	232
Annexe 3: L'effort normal, l'effort tranchant et le moment de flexion.....	234
Glossaire	237
Bibliographie	249
Crédits photo	255
Index	259
i-structures	267