

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 *Struttura*, Accademia di Architettura, Mendrisio, 2004

ISBN 978-2-88074-980-4

Deuxième édition mise à jour

© Presses polytechniques et universitaires romandes, 2012, 2015

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

Les réseaux de câbles, les tentes et les membranes	61	Les coques à double courbure orientée vers le bas.....	106
Les systèmes de câbles dans l'espace.....	63	Les coques à courbure orientée vers le haut et vers le bas, les paraboloides hyperboliques.....	107
Les réseaux de câbles.....	64	Les surfaces à selle de singe.....	108
Les tentes et les membranes.....	65	Les coques quelconques composées.....	108
Les membranes pneumatiques.....	67	Les coques cylindriques.....	109
Les membranes pneumatiques à haute pression.....	68	Les réseaux d'arcs.....	110
Les arcs	69	Les arcs-et-câbles	111
Les structures sollicitées à la compression.....	71	La reprise de la composante horizontale de la poussée.....	113
Cas avec plusieurs charges et charges uniformément réparties: les arcs.....	72	L'arc avec tirant.....	114
L'arc parabolique.....	72	Les appuis fixes et les appuis mobiles.....	114
L'arc en forme de chaînette.....	72	Projet et analyse des arcs avec tirant.....	115
L'analogie entre câbles et arcs.....	73	La composition de câbles avec butons.....	116
L'influence des charges variables.....	73	La composition d'arcs et de câbles.....	117
L'instabilité des arcs.....	74	Les arcs-et-câbles.....	118
Procédés pour stabiliser les arcs.....	74	Stabilisation de l'arc et reprise des charges variables.....	118
Adjonction de barres stabilisatrices.....	74	Les arcs-et-câbles en porte-à-faux.....	119
L'introduction d'une poutre de raidissement.....	75	Les systèmes haubanés.....	120
Le raidissement de l'arc par augmentation de l'épaisseur.....	76		
La ligne d'action des efforts.....	76	Les treillis	123
Les lignes d'action possibles des efforts à l'intérieur d'un arc....	78	Solution du problème de la déformabilité et de la stabilité par l'adjonction de barres supplémentaires.....	125
Les arcs hyperstatiques et les arcs isostatiques.....	78	Les treillis.....	125
L'arc à trois articulations.....	79	Analyse des treillis.....	125
La forme optimale d'un arc à trois articulations.....	79	Systèmes labiles, isostatiques ou hyperstatiques.....	128
L'épaisseur nécessaire d'un arc à trois articulations sollicité seulement à la compression.....	81	Génération des treillis.....	129
Les arcs construits avec des matériaux résistant à la traction.....	81	L'analyse générale des treillis.....	130
Les arcs dont la forme ne correspond pas à celle du polygone funiculaire des charges permanentes.....	82	Membrure supérieure, membrure inférieure et diagonales.....	132
Les arcs à deux articulations, forme idéale.....	82	L'influence de la hauteur et de la portée sur les sollicitations dans les treillis.....	132
Les arcs à une articulation.....	83	Analyse complète d'un treillis.....	133
Les arcs sans articulation.....	83	Le moment de flexion.....	134
Les arcs à plein cintre en maçonnerie.....	84	La détermination des barres les plus sollicitées dans les membrures.....	135
		L'analyse spécifique de barres des membrures dans les treillis..	135
Les voûtes, les coupoles et les coques	87	L'analyse des diagonales et leur fonctionnement.....	137
L'arc comme élément d'une toiture.....	89	L'effort tranchant.....	137
Les voûtes en berceau.....	89	La détermination des diagonales les plus sollicitées.....	138
Les voûtes d'arêtes.....	91	La détermination des diagonales en traction et en compression.....	138
Les voûtes en éventail.....	92	L'analyse qualitative d'un treillis.....	139
Les voûtes en arc-de-cloître.....	94	Les configurations possibles des diagonales.....	139
Les coupoles.....	95	Diagonales en V.....	139
Le fonctionnement effectif des coupoles.....	95	Diagonales en N.....	140
Les coupoles avec une ouverture centrale pour le lanterneau....	96	Diagonales en X.....	140
Les coupoles métalliques.....	97	Diagonales en K.....	142
Les arcs croisés.....	97	Les formes des treillis.....	145
Les coupoles constituées par des arcs et anneaux.....	98	La forme et l'efficacité structurale.....	146
La forme des coupoles et les sollicitations.....	99	L'influence de la forme sur la rigidité de la structure.....	148
Les coupoles à forme conique.....	100	Les consoles avec plusieurs charges.....	149
Les hyperboloïdes de révolution.....	102	Les tours.....	150
La reprise de charges horizontales ou verticales quelconques ...	103	Les poutres réticulaires avec consoles.....	151
Les coupoles géodésiques.....	104	Les poutres Gerber.....	152
Les coupoles à réseau.....	104	Treillis pour d'autres formes structurales.....	153
Les coques et les coupoles quelconques.....	105		

Les treillis dans l'espace	155	Les dalles soutenues par des murs avec transmission	
La composition de treillis pour soutenir une toiture	157	des charges dans une direction	205
La grille de treillis	157	Le choix de l'épaisseur d'une dalle.....	206
Les treillis spatiaux	158	L'influence du type d'appui sur le comportement de la dalle ...	208
Les voûtes et les coupoles constituées de treillis	159	Dalles continues.....	209
		Le fonctionnement avec des charges concentrées.....	209
Les poutres	161	La transmission des charges dans plusieurs directions.....	209
Le treillis comme aide à la compréhension du fonctionnement		Les portées équivalentes pour les dalles qui partent	
des poutres	163	en deux directions.....	210
La sollicitation de la zone intermédiaire des poutres	163	Les dalles soutenues par des colonnes	211
La sollicitation de la zone tendue et de la zone comprimée	163	La dalle-champignon.....	212
Les poutres en béton armé.....	164	Les planchers-dalles sur colonnes	212
La flexion simple d'une poutre.....	165	Le choix de l'épaisseur des planchers-dalles	213
La flexion et la courbure	165		
La résistance des poutres sollicitées à la flexion.....	165	La stabilité des éléments comprimés	215
L'influence des dimensions d'une poutre		Les barres tendues et les barres comprimées.....	217
à section rectangulaire sur sa résistance.....	166	La résistance d'une barre comprimée	218
L'influence des dimensions d'une poutre		Comment rendre une colonne stable.....	219
à section rectangulaire sur sa rigidité	168	L'influence de la hauteur de la colonne sur la résistance	
Les sections les plus efficaces: sections en I	170	à la compression	220
L'influence des dimensions d'une poutre en I sur sa résistance		L'influence des conditions d'appui, la longueur critique.....	221
à la flexion et sur sa rigidité	170	L'influence de la rigidité du matériau sur la charge critique	
Le comportement d'une poutre en I avec les ailes verticales.....	171	de flambage d'une colonne	224
L'efficacité d'une section	172	L'influence de la dimension de la section	225
La forme, la section et l'efficacité structurale.....	172	L'influence de la forme de la section	226
Les poutres simples avec charges concentrées		Le choix des sections	227
et avec charges uniformément réparties.....	174	Le voilement	227
Consoles	175	Colonnes en treillis et en Vierendeel	228
Les poutres avec consoles	176	Colonnes à section variable	228
Les poutres Gerber.....	178		
Les poutres continues	179	Annexes	229
Les poutres bi-encastées.....	180	Annexe 1: La détermination analytique de la courbe funiculaire	
Les zones plus ou moins sollicitées dans les poutres	181	dans le cas du câble soumis à une charge	
		uniformément répartie	231
Les cadres	183	Annexe 2: L'expression analytique des conditions d'équilibre..	232
Les cadres à deux articulations	185	Annexe 3: L'effort normal, l'effort tranchant et le moment	
Les cadres à trois articulations	186	de flexion.....	234
La forme et la sollicitation	187		
Les cadres à travées multiples	189	Glossaire	237
Les cadres superposés	191		
Les cadres à étages et à travées multiples	192	Bibliographie	249
Les poutres Vierendeel.....	192		
		Crédits photo	255
Les poutres-cloisons et les voiles	195		
Les poutres-cloisons.....	197	Index	259
Les voiles sur plusieurs étages	197		
Les voiles dans l'espace	199	i-structures	267
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		