

Bibliographie

Le présent livre n'a pas la prétention d'être exhaustif. Plusieurs ouvrages de qualité traitent des diverses matières relatives au calcul des structures en insistant davantage sur tel ou tel aspect. Parmi ceux-ci, on peut citer :

[1] **Frey F.**, *Volumes 1 à 6 du Traité de génie civil de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.

Ces 6 volumes (1 : Statique appliquée, 2 : Mécanique des structures, 3 : Mécanique des solides, 4 : Structures en barres et poutres, 5 : Structures tridimensionnelles à parois minces, 6 : Méthode des éléments finis) constituent une référence unique en langue française en matière de mécanique des structures au sens général du terme. Ils sont très clairs, très détaillés dans les développements et les démonstrations mathématiques, très pédagogiques.

[2] **Samikian A.**, *Analyse et calcul des structures*, Gaëtan Morin Éditeur, Québec, 1984.

Cet ouvrage passe en revue un grand nombre de matières relatives au calcul des structures, y compris des rappels de résistance des matériaux et de statique ainsi que des sujets plus spécifiques comme les lignes d'influence ou les méthodes matricielles. Il propose un certain nombre d'exercices résolus et détaillés.

[3] **Studer M.A. et Frey F.**, *Introduction à l'analyse des structures*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1997.

Cet ouvrage très convivial parcourt les différents aspects fondamentaux de la statique, de la résistance des matériaux et de la stabilité des structures sur base d'explications très claires, d'un grand nombre d'illustrations et d'exercices résolus.

[4] **Salvarori M. et Heller R.**, *Structure et architecture*, Eyrolles Éditeur, Paris, 1976.

Sans passer par des calculs ou des démonstrations théoriques, ce livre passe en revue de manière très intuitive les différents aspects de la stabilité des structures et de la résistance des matériaux. Sans développements mathématiques et sur base d'illustrations et d'exemples particulièrement bien adaptés au sujet traité, il mène agréablement le lecteur d'un bout à l'autre du livre en traitant parfois des sujets très spécifiques tels que les structures à membranes, les coques ou les arcs.

[5] **Muttoni A.**, *L'art des structures, une introduction au fonctionnement des structures en architecture*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2004.

Cet ouvrage, très agréable à lire, traite des aspects classiques de la statique et de la mécanique des structures, avec un minimum de développements mathématiques. Sur une base très pédagogique, l'auteur guide le lecteur d'un bout à l'autre de son texte en suivant une ligne de conduite originale dictée entre autres par les principes de minimisation de la quantité de matière. Cet ouvrage contient notamment une bibliographie très complète relative non seulement à la mécanique des structures, mais aussi à l'approche intuitive des structures, à l'approche graphique, à

l'architecture, aux catégories de structures, aux ingénieurs ou architectes célèbres ou encore à l'histoire des structures.

[6] Clough R. et Penzien J. A., *Dynamics of Structures*, deuxième édition, C Berkeley, CA, 2004 – Computers and Structures, Inc..

Cet ouvrage, dédié au calcul dynamique des structures, a été traduit en français par Jean-Louis Claudon sous le titre "Dynamique des structures" (Editions Pluralis).

[7] Latteur P., *Le béton armé dans tous ses états*, éditions Academia-Bruylant, (2^e éd), Louvain-la-Neuve, 2001.

Ce recueil d'exercices et de résumés théoriques traite les aspects suivants du calcul des sections en béton armé selon, la méthode élastique, d'une part et la méthode aux états limites ultimes, d'autre part : compression simple, flexion simple, flexion composée.

Table des matières

Préface	5
Avant-propos	7
Chapitre 1. Bases	11
1. Préambule	13
2. La place du présent ouvrage dans le contexte général de la mécanique des structures appliquée aux constructions	13
3. Les catégories de structures planes	16
4. Les types d'appuis	17
5. Les dispositifs de libération d'efforts internes (ou coupures).....	19
6. La résolution des structures isostatiques.....	20
7. Loi de Hooke, élasticité linéaire du matériau	21
8. Efforts et contraintes	22
8.1. Les conventions de signes pour la représentation des efforts internes.....	22
8.2. Relation fondamentale entre le moment fléchissant et l'effort tranchant	22
8.3. Lien entre les efforts internes et les contraintes.....	23
8.4. Polygone des forces et Cremona	24
9. Le calcul des déplacements : le théorème de la force unité	25
10. Matériaux à comportement non linéaire et fissuration	28
11. Le flambement des éléments droits	29
12. Premier ordre, deuxième ordre, second ordre, p - δ , effet epsilon, P - Δ ,	33
12.1. Exemple préliminaire	33
12.2. Deuxième ordre, troisième ordre, ..., second ordre	34
12.3. Effet P - Δ (P -DELTA).....	34
12.4. Effet P - δ (P -delta), appelé aussi effet epsilon.....	35
13. Éléments finis, cartographies de contraintes.....	36
14. Le flambement d'ensemble	38
15. Comportement dynamique des structures.....	39
15.1. Le calcul des modes propres de vibration	43
15.2. Le calcul de la réponse temporelle de la structure à un spectre d'excitation	45
15.3. Le modèle de mécanique des fluides	47
15.4. Le modèle réduit	47
16. Exemples : résolution de quelques structures isostatiques simples	48

Chapitre 2. Détermination du degré d'hyperstaticité	61
1. Définition du degré d'hyperstaticité.....	63
2. Définition d'une barre (élément) et d'un nœud.....	64
3. Procédure intuitive de calcul du degré d'hyperstaticité.....	65
4. Procédure systématique de calcul du degré d'hyperstaticité	66
5. Hypostaticité et mécanismes.....	69
6. Avantages et inconvénients de l'hyperstaticité et de l'isostaticité	70
7. Exemples.....	71
Chapitre 3. Levée d'hyperstaticité : la méthode des forces	77
1. Avertissement.....	79
2. Le principe de superposition	79
3. La méthode des forces.....	80
4. Notations	81
5. Cas général d'une structure S^n de degré d'hyperstaticité $I_r = n$	82
6. Calcul du déplacement rectiligne ou angulaire dans une structure hypersta- tique : théorème de Pasternak.....	84
7. Quelques remarques.....	86
8. Exemples.....	87
Chapitre 4. Symétrie des structures	107
1. Introduction.....	109
2. Étude des structures à symétrie géométrique et symétrie des charges	111
3. Étude des structures à symétrie géométrique et antisymétrie des charges	115
4. Exemples.....	118
Chapitre 5. Les déplacements imposés	127
1. Introduction.....	129
2. Traitement des structures isostatiques.....	130
3. Traitement des structures hyperstatiques.....	130
3.1. <i>Preliminaire : généralisation de la méthode des forces</i>	130
3.2. <i>Premier cas : le système de coupures est associé au(x)</i> <i>déplacement(s) imposé(s)</i>	131
3.3. <i>Second cas : le système de coupures n'est pas associé au(x)</i> <i>déplacement(s) imposé(s)</i>	133
4. Extension de la notion de <i>déplacement imposé</i> à la notion de <i>matrice de rigidité</i>	134
5. Exemples.....	135

Chapitre 6. Les appuis élastiques	145
1. Introduction.....	147
2. Les types d'appuis élastiques.....	148
3. Généralisation de la notion d'appui élastique.....	150
4. Degré d'hyperstaticité des structures pourvues d'appuis élastiques.....	151
5. Traitement des structures isostatiques.....	151
5.1. Exemple 1.....	152
5.2. Exemple 2.....	153
6. Traitement des structures hyperstatiques.....	154
6.1. Première méthode : la barre équivalente (substitution)	154
6.2. Deuxième méthode : adaptation du système d'inconnues	155
6.3. Troisième méthode : prise en compte des appuis élastiques dans les structures isostatiques.....	156
7. Exemples.....	158
Chapitre 7. Les actions thermiques	169
1. Introduction.....	171
2. Effet de la température sur un élément de structure	172
2.1. L'élément subit une variation uniforme de température ΔT_{mij}	173
2.2. Les fibres extrêmes subissent par rapport à T_0 des écarts de température égaux en norme mais de signes opposés.....	174
2.3. Remarques importantes.....	175
3. Traitement des structures isostatiques.....	176
3.1. Cas d'une variation uniforme de température	176
3.2. Cas d'une variation différentielle de température entre les fibres extrêmes.....	177
4. Traitement des structures hyperstatiques.....	178
5. Exemples.....	179
Chapitre 8. Les treillis	187
1. Qu'est-ce qu'un treillis ?.....	189
2. Efforts et déformations dans les treillis	190
3. Peut-on se passer des articulations nodales ?.....	191
4. Calcul du degré d'hyperstaticité d'un treillis	194
5. Résolution des treillis isostatiques.....	194
6. Barres à effort nul.....	197
7. Résolution des treillis hyperstatiques.....	197
8. Le flambement des treillis	199
9. Exemples.....	201

Chapitre 9. Les éléments à faible courbure	215
1. La faible courbure.....	217
2. Les formules de Navier-Bresse.....	218
3. Le flambement des éléments à faible courbure	219
4. Exemples.....	221
Chapitre 10. Les éléments à forte courbure	237
1. Introduction.....	239
2. Les différences entre faible courbure et forte courbure.....	239
3. Caractéristiques de quelques sections courantes.....	241
4. Exemple	242
Chapitre 11. Les arcs funiculaires	247
1. Quel est l'intérêt d'un arc ?.....	249
2. La forme idéale des arcs et l'analogie avec les câbles	249
3. L'arc parabolique funiculaire.....	251
3.1. Les types d'arcs paraboliques	251
3.2. Justification de la géométrie parabolique.....	252
3.3. Expression des efforts de compression	253
3.4. Longueur totale d'un arc parabolique	254
3.5. Arc avec des appuis à des niveaux différents.....	254
3.6. Arc à "pattes d'éléphant".....	256
3.7. Flèche verticale à la clé de l'arc parabolique à trois rotules, de section constante, soumis à une charge uniformément distribuée.....	257
4. Considérations sur l'hyperstaticité des arcs funiculaires.....	261
5. La validité de l'hypothèse de charge uniformément répartie et la notion de chaînette.	262
6. Les arcs qui n'en sont pas.....	265
7. Généralités sur la statique des arcs.....	265
7.1. Les équations d'équilibre externe et le calcul des réactions d'appui.....	265
7.2. Constance de la composante horizontale de l'effort de compression	265
7.3. Tronçon soumis à l'effort de compression maximal.....	266
7.4. Arc infiniment élancé \Rightarrow effort de compression infini	266
7.5. Théorème d'analogie entre l'arc funiculaire et la poutre	267
8. Le flambement des arcs	268
9. Quel élancement L/H faut-il donner aux arcs ?	272
10. Exemples	273
Chapitre 12. Les arcs non funiculaires	289
1. Préambule : funiculaires, isostaticité et hyperstaticité.....	291

2.	Traitement de l'hyperstaticité : la notion de centre de masse élastique	294
3.	L'arc hyperstatique à deux articulations	297
4.	L'arc hyperstatique bi encastré.....	298
5.	Simplification des expressions	299
6.	Flambement des arcs non funiculaires	300
7.	Exemples.....	301
Chapitre 13. Les câbles.....		317
1.	Introduction.....	319
2.	Généralités sur la statique des câbles.....	320
2.1.	<i>La parabole et la chaînette.....</i>	<i>320</i>
2.2.	<i>Les équations d'équilibre externe et le calcul des réactions d'appui.....</i>	<i>321</i>
2.3.	<i>Constance de la composante horizontale de l'effort de traction</i>	<i>321</i>
2.4.	<i>Câble droit = effort infini.....</i>	<i>323</i>
2.5.	<i>Module d'élasticité selon la corde d'un câble très tendu.....</i>	<i>323</i>
2.6.	<i>Tronçon soumis à l'effort de traction maximal</i>	<i>324</i>
2.7.	<i>Théorème d'analogie avec la poutre.....</i>	<i>324</i>
2.8.	<i>Un câble peut-il reprendre de la compression ?</i>	<i>326</i>
2.9.	<i>Contrôle de la mise en tension dans un câble.....</i>	<i>327</i>
3.	Les situations rencontrées en pratique	329
4.	Les hypothèses simplificatrices.....	331
5.	Cas 1 : câble parabolique	334
5.1.	<i>Peut-on négliger le poids propre du câble ?.....</i>	<i>335</i>
5.2.	<i>Peut-on négliger l'extensibilité du câble ?.....</i>	<i>337</i>
6.	Cas 2 : câble inextensible en chaînette	339
7.	Cas 3 : câble extensible en chaînette.....	341
8.	Cas 4 : câble inextensible soumis à des charges ponctuelles.....	343
9.	Cas 5 : câble extensible soumis à des charges ponctuelles et à une charge répartie de type 2.....	346
10.	Cas 6 : câble précontraint soumis à effort transversal	348
11.	Exemples.....	351
Chapitre 14. Calcul numérique des ossatures par la méthode des déplacements.....		371
1.	Avant-propos	373
2.	Principe de la méthode	373
3.	La poutre continue chargée verticalement.....	378
3.1.	<i>Exemple illustratif.....</i>	<i>379</i>
3.1.1.	<i>Application numérique.....</i>	<i>382</i>
3.2.	<i>Prise en compte des charges réparties.....</i>	<i>384</i>
3.2.1.	<i>Application numérique.....</i>	<i>385</i>

3.3.	Récapitulation de la méthode appliquée aux poutres continues	388
4.	Le treillis plan	395
4.1.	Matrice de rigidité d'un élément de treillis oblique, exprimée dans le repère local (x,y)	395
4.2.	Matrice de rigidité d'un élément de treillis exprimée dans le repère global (X,Y)	396
4.3.	Récapitulatif de la méthode appliquée aux treillis 2D.....	397
4.4.	Exemple numérique	401
5.	L'ossature plane.....	407
5.1.	Récapitulation	407
Chapitre 15. Éléments d'optimisation structurale		413
Partie 1 : introduction		415
Partie 2 : optimisation des éléments comprimés et des éléments fléchis ...		423
1.	Optimisation des éléments comprimés	423
1.1.	Rappel : formule d'Euler et formule d'Euler corrigée (Rankine)	423
1.2.	Notion d'indicateur de flambement.....	423
1.3.	Quantification de l'importance du flambement sur la section.....	425
1.4.	Influence du type de matériau	428
1.5.	Influence du type de section transversale.....	430
2.	Optimisation des éléments fléchis	432
2.1.	Quantification de l'importance de la flexion sur la section.....	432
2.2.	Influence du type de matériau.....	434
2.3.	Influence du type de section transversale.....	436
Partie 3 : optimisation des structures :		
introduction à la théorie des indicateurs morphologiques		438
1.	Indicateurs morphologiques : historique	438
2.	Optimisation des structures soumises uniquement à l'effort normal : treillis, arcs funiculaires et câbles.....	440
2.1.	Étude préliminaire du poids propre et de la raideur d'une structure à deux barres.....	440
2.1.1.	Pas de prise en compte du flambement.....	441
2.1.2.	Prise en compte du flambement	443
2.1.3.	Exemple numérique	446
2.2.	Généralisation à un treillis quelconque	447
2.2.1.	Pas de prise en compte du flambement.....	449
2.2.2.	Prise en compte du flambement	451
2.2.3.	Exemple numérique	454
2.3.	Extension de la théorie aux arcs funiculaires paraboliques et aux câbles.....	455
2.3.1.	Exemple numérique	457

3.	Généralisation	459
Chapitre 16. Les lignes d'influence		465
1.	Introduction.....	467
2.	Qu'est-ce qu'une ligne d'influence ?	467
3.	Utilité pratique d'une ligne d'influence	469
4.	Le théorème de Müller-Breslau, ou comment tracer rapidement une ligne d'influence	472
5.	Lignes d'influence des structures hyperstatiques	474
6.	Lignes d'influence d'un déplacement.....	475
7.	Compléments	476
8.	Exemple	477
Bibliographie.....		479
Table des matières		481

Ingénieur civil des constructions diplômé de l'Université catholique de Louvain (UCL) en 1994, Pierre Latteur y débute son parcours professionnel au laboratoire du génie civil dans le domaine du contrôle des ouvrages d'art et de la mesure, tout en assurant l'enseignement des travaux pratiques de stabilité des constructions. A cette époque naît la version initiale du présent ouvrage, pour laquelle il reçoit en 1996 le prix de pédagogie de la Faculté des sciences appliquées.

Il participe alors à l'instrumentation et au contrôle de nombreux édifices parmi lesquels les centrales nucléaires de Dœl, de Chooz ou la cathédrale de Tournai. Ceci lui vaudra quelques années plus tard une récompense scientifique internationale pour le développement d'un dispositif de mesure des déplacements des ouvrages de grande taille.

Il mène ensuite de front une occupation d'assistant à l'UCL dans le domaine du béton armé et précontraint, son stage d'architecte au bureau Samyn and Partners et un poste de chargé de cours invité à l'École centrale des arts et métiers de Bruxelles (ECAM), où il enseignera durant cinq ans des compléments de calcul des structures.

Après un séjour de six mois à l'École polytechnique fédérale de Lausanne en 1999, pendant lequel il se consacre à ses recherches sur les indicateurs morphologiques, il devient dès 2000 ingénieur conseil au bureau Setesco de Bruxelles. Peu après, il présente sa thèse de doctorat à la Vrije Universiteit Brussel (VUB), thèse pour laquelle il est primé par l'Académie royale de Belgique.

En 2001, il est nommé chargé de cours à temps partiel à la Faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux où il préside le jury du génie rural dès 2003.

Aujourd'hui, il continue à mener en parallèle ses occupations académiques et sa carrière d'ingénieur conseil indépendant en s'impliquant activement dans des projets complexes tels que la gare de Leuven ou la Tour Dexia.

Il est aussi le concepteur du logiciel interactif de calcul des structures *ISSD*, utilisé dans plusieurs universités, écoles supérieures et bureaux d'études.



Enfin, Pierre Latteur est l'auteur de l'ouvrage *Le béton armé dans tous ses états*, paru en 2001 chez le même éditeur.