

— Traité de Génie Civil —
de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne

Volume 4

Analyse des structures et milieux continus

STRUCTURES EN BARRES ET POUTRES

Pierino Lestuzzi et Léopold Pflug



PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES

Traité de Génie Civil

Volume 4

Cet ouvrage fait partie d'une série d'une vingtaine de volumes qui sont publiés sous la direction de René Walther et Manfred A. Hirt, professeurs à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, dont la liste suivante, non exhaustive, présente le plan général de publication (voir l'état des parutions sur notre site web <http://www.ppur.org>).

1. ANALYSE DES STRUCTURES ET MILIEUX CONTINUS
Statique appliquée
2. ANALYSE DES STRUCTURES ET MILIEUX CONTINUS
Mécanique des structures
3. ANALYSE DES STRUCTURES ET MILIEUX CONTINUS
Mécanique des solides
4. ANALYSE DES STRUCTURES ET MILIEUX CONTINUS
Structures en barres et poutres
5. ANALYSE DES STRUCTURES ET MILIEUX CONTINUS
Coques
6. ANALYSE DES STRUCTURES ET MILIEUX CONTINUS
Méthode des éléments finis
7. DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES EN BÉTON
Bases et technologie
8. DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES EN BÉTON
Aptitude au service et éléments de structures
9. PONTS EN BÉTON
Généralités, conception et dimensionnement
10. CONSTRUCTION MÉTALLIQUE
Notions fondamentales et méthodes de dimensionnement
11. CHARPENTES MÉTALLIQUES
Conception et dimensionnement des halles et bâtiments
12. PONTS EN ACIER
Conception et dimensionnement des ponts métalliques et mixtes acier-béton
13. CONSTRUCTION EN BOIS
Matériau, technologie et dimensionnement
14. HYDRODYNAMIQUE
Une introduction
15. CONSTRUCTIONS HYDRAULIQUES
Écoulements stationnaires
16. HYDRAULIQUE FLUVIALE
Écoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple
17. BARRAGES
Du projet à la mise en service
18. MÉCANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES
19. FOUILLES ET FONDATIONS
20. OUVRAGES ET TRAVAUX SOUTERRAINS
21. SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES
Offre et demande d'énergie; méthodes d'analyse
22. AMÉNAGEMENTS ÉNERGÉTIQUES
23. ÉTUDES D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT
24. MATÉRIAUX
Constitution et lois de comportements rhéologiques
25. VOIES DE CIRCULATIONS

Le Traité de Génie Civil est une publication des Presses polytechniques et universitaires romandes, fondation scientifique dont le but est principalement la diffusion des travaux de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Le catalogue de ces publications peut être obtenu aux **Presses polytechniques et universitaires romandes**, CH-1015 Lausanne

Première édition

ISBN 978-2-88074-683-4

© Presses polytechniques et universitaires romandes, 2014

EPFL, Rolex Learning Center, CP 119, CH-1015 Lausanne

Tous droits réservés. Reproduction, même partielle, interdite.

Imprimé en Italie

Les auteurs et les Presses polytechniques et universitaires romandes remercient l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne pour le soutien apporté à la publication du Traité de Génie Civil.

Table des matières

Avant-propos	V
Table des matières	VII
1. Introduction	1
1.1 Contenu	3
1.2 Objectifs	3
1.2.1 Illustration	3
1.2.2 Modélisation	4
1.3 Lectorat et structure de l'ouvrage	5
1.4 Limitations	7
1.5 Remerciements	7
1.6 Références	7
2. Considérations de base	9
2.1 Isostaticité et hyperstaticité	11
2.1.1 Implications	12
2.1.2 Détermination du degré d'hyperstaticité	13
2.2 Hypothèses	14
2.3 Conventions	15
2.3.1 Représentation des moments de flexion	15
2.3.2 Signe du moment de flexion	16
2.3.3 Signe de l'effort tranchant	17
2.3.4 Représentation des efforts tranchants	18
2.3.5 Effort normal	18
2.4 Détermination des déplacements	18
2.4.1 Travaux virtuels	18
2.4.2 Exemple explicatif	20
2.4.3 Ressorts	21
2.4.4 Exemple	22
2.5 Charges	23
2.5.1 Forces	23
2.5.2 Tassement d'appui	23
2.5.3 Variation de température	23
2.5.4 Charges sismiques	24
2.6 Références	25
3. Méthodes de résolution	27
3.1 Méthode des forces et méthode des déplacements	29
3.2 Principe des méthodes de résolution	29
3.2.1 Méthode des forces	29

3.2.2	Méthode des déplacements	31
3.2.3	Conditions de compatibilité cinématique et d'équilibre	32
3.3	Résolution	35
3.3.1	Système fondamental	35
3.3.2	Méthode des forces	35
3.3.3	Méthode des déplacements	36
3.3.4	Procédure générale	37
3.3.5	Exemple 1: poutre continue sur trois appuis	37
3.3.6	Signes et sens positif	44
3.3.7	Visualisation avec le tableau synoptique	45
3.3.8	Relations de cause à effet	46
3.3.9	Exemple 2: poutre continue sur quatre appuis	49
3.3.10	Propriétés du système d'équations	53
3.4	Détermination des efforts intérieurs	54
3.4.1	Efforts tranchants	54
3.4.2	Moments de flexion	54
3.4.3	Exemple 1: poutre continue sur trois appuis	55
3.4.4	Exemple 2: poutre continue sur quatre appuis	58
3.5	Cas de charge particuliers	61
3.5.1	Tassement d'appui	61
3.5.2	Variation de température	63
3.6	Comparaison des méthodes	65
3.6.1	Différences et similitudes entre les méthodes	65
3.6.2	Inconnues	66
3.7	Résumé et synthèse	68
3.8	Références	69
3.9	Exercices	69
3.10	Exemples	70
3.10.1	Poutre continue sur trois appuis: autre résolution	70
3.10.2	Poutre continue sur 4 appuis: détermination des coefficients a_{ij}	73
3.10.3	Poutre continue sur 3 appuis: généralisation	76
4.	Structures courantes	79
4.1	Introduction	81
4.2	Poutres continues	81
4.2.1	Résolution par la méthode des forces	81
4.2.2	Résolution par la méthode des déplacements	82
4.2.3	Exemple: poutre continue sur cinq appuis équidistants	83
4.2.4	Conséquences pratiques	87
4.3	Cadres plans	90
4.3.1	Cadres tenus latéralement	91
4.3.2	Cadres non tenus latéralement	98
4.4	Poutres à treillis	109
4.4.1	Méthode des forces	110

4.4.2	Méthode des déplacements.	111
4.4.3	Exemple: poutre simple, intérieurement hyperstatique	113
4.5	Résumé et synthèse.	114
4.6	Références.	115
4.7	Exercices.	115
4.8	Exemples.	116
4.8.1	Cadre plan tenu latéralement soumis à un moment concentré.	116
4.8.2	Cadre simple bi-encasté soumis à une charge horizontale	119
4.8.3	Cadre multiple non tenu soumis à un tassement d'appui	123
5.	Cas particuliers	127
5.1	Introduction.	129
5.2	Utilisation de la symétrie	129
5.2.1	Méthode des forces.	129
5.2.2	Méthode des déplacements.	133
5.3	Appuis élastiques	137
5.3.1	Méthode des forces.	137
5.3.2	Méthode des déplacements.	143
5.4	Barres	146
5.4.1	Méthode des déplacements.	147
5.5	Rotules	148
5.5.1	Méthode des déplacements.	148
5.5.2	Méthode des forces.	151
5.6	Précontrainte.	152
5.6.1	Moments primaires.	153
5.6.2	Moments d'ordre hyperstatique (secondaires).	154
5.7	Calcul des déplacements.	155
5.8	Résumé et synthèse.	157
5.9	Références.	158
5.10	Exercices.	158
5.11	Exemple. Poutre continue élastiquement appuyée, rigidités différentes	159
6.	Lignes d'influence.	161
6.1	Introduction.	163
6.2	Structures isostatiques	163
6.2.1	Détermination des réactions d'appui par les travaux virtuels	164
6.2.2	Lignes d'influence	164
6.3	Détermination par la procédure cinématique	165
6.3.1	Poutres continues	165
6.3.2	Cadres.	166
6.4	Détermination à l'aide de la méthode des forces	168
6.4.1	Poutre continue sur quatre appuis	169
6.5	Détermination à l'aide de logiciels.	170
6.5.1	Poutre continue élastiquement appuyée.	171
6.5.2	Poutre encastree-appuyée.	174

6.6	Exemples	171
6.7	Résumé et synthèse	176
6.8	Références	177
6.9	Exercices	177
7.	Stabilité élastique.	179
7.1	Limite de validité de la théorie du <i>premier ordre</i>	181
7.2	Extension de la méthode de résolution en présence d'effort normal.	183
	7.2.1 Exemple introductif.	183
	7.2.2 Principe de résolution	185
7.3	Extension des coefficients en présence d'effort normal	185
	7.3.1 Coefficients B, D et F	185
	7.3.2 Adaptation de la matrice de rigidité	186
	7.3.3 Variation des coefficients en fonction du paramètre j	187
	7.3.4 Variation des relations entre les coefficients en fonction du paramètre j	188
7.4	Méthode de résolution	189
	7.4.1 Cas fondamental d' <i>Euler</i>	189
	7.4.2 Cadre constitué d'un poteau et d'une traverse	191
	7.4.3 Contrôle avec le principe <i>des deux gendarmes</i>	194
	7.4.4 Cadre constitué d'un poteau et d'une traverse, non tenu latéralement	195
7.5	Généralisation du cas fondamental d' <i>Euler</i>	198
	7.5.1 Représentation des solutions sous forme analytique.	198
	7.5.2 Cas général tenu latéralement	202
	7.5.3 Généralisation du cadre formé d'un poteau et d'une traverse, non tenu latéralement	205
	7.5.4 Cas général non tenu.	208
	7.5.5 Utilisation pratique de la longueur critique de flambage	212
7.6	Poutres continues.	212
7.7	Cadres	215
	7.7.1 Cadre symétrique bi-encasté non tenu latéralement	215
	7.7.2 Modes de flambage des cadres	216
	7.7.3 Cadre asymétrique bi-encasté non tenu latéralement	217
	7.7.4 Cadres multiples	221
7.8	Estimation à l'aide d'une force perturbatrice	224
	7.8.1 Exemple	224
7.9	Résumé et synthèse	226
7.10	Références	227
7.11	Exercices	227
7.12	Détermination des coefficients en présence d'effort normal.	228
8.	Annexes.	233
8.1	Equations des déformées pour les cas fondamentaux	235
8.2	Tables des coefficients de stabilité	236
	Index	245