

SCIENCES SUP



Cours et exercices corrigés

L3 • Master • Écoles d'ingénieurs



INTRODUCTION À LA MÉCANIQUE DES MATÉRIAUX ET DES STRUCTURES

531-18.1

Michel Dupeux

DUNOD

AVANT-PROPOS

Ce livre puise son origine dans un enseignement de Mécanique des Matériaux dont j'ai eu la responsabilité de 1984 à 2003 en première année de l'ancienne École nationale supérieure d'électrochimie et d'électrometallurgie de Grenoble (ENSEEG). Cet enseignement s'appuyait – dans le cadre d'une pédagogie active qui serait trop longue à exposer ici – sur un polycopié autosuffisant que les étudiants avaient à travailler avant le cours, les travaux dirigés et les travaux pratiques. Ce document polycopié a toujours eu beaucoup de succès auprès des élèves, anciens élèves, autres étudiants, doctorants (voire collègues de travail !) qui m'en réclamaient chaque année des exemplaires supplémentaires, ce qui m'a convaincu qu'il répondait à un besoin réel.

Avec de multiples remaniements, compléments et remises en formes, j'ai donc rédigé le présent ouvrage en conservant l'objectif initial d'initiation à la mécanique des matériaux et des structures pour débutants ou non-spécialistes. Tout ingénieur, tout concepteur, dans quelque discipline que ce soit, a en effet besoin un jour ou l'autre au cours de sa carrière d'avoir une idée de ce qui est raisonnable en matière de tenue mécanique d'une structure et de la manière dont on peut aborder ce type de problème.

Le titre et le contenu de l'ouvrage reflètent la volonté de ne pas séparer « structure » et « matériau », mais de les faire « travailler ensemble » comme ils le font dans la réalité concrète.

La démarche mise en œuvre au fil de la lecture procède de la visite guidée et commentée, avec participation progressive aux activités, analogue à celle que ferait un professionnel en stage de longue durée dans une entreprise de construction mécanique : passage en formation et mise à l'épreuve au Labo d'essais des matériaux, puis au Bureau d'Études, puis au Service de Calcul... Elle vise à l'acquisition d'une « boîte à outils » de base : langage pour communiquer, concepts pour discuter et raisonner, théories plus élaborées, exercices pour mettre en œuvre, y compris des outils numériques, le tout débouchant sur des compétences concrètes. L'objectif ultime est de faire acquérir une représentation mentale correcte et opérationnelle d'un état de contrainte tensoriel et de la réponse qu'est susceptible de lui opposer le matériau sollicité.

La progression est étayée par de nombreux exemples, des exercices, des illustrations abondantes, y compris des portraits des grands noms de la mécanique, pour montrer que derrière le « théorème d'Untel », il y a eu un individu qui s'est assez passionné pour que son nom passe à la postérité ; par la même occasion, on en retire une idée de la chronologie des différentes étapes des progrès dans ce domaine. On ne s'étonnera donc pas non plus de l'ancienneté de certaines références bibliographiques : comme en littérature, on ne saurait passer à côté des « classiques » !

Tout a été fait pour permettre une lecture à plusieurs niveaux, le novice pouvant laisser de côté certains développements mathématiques en faisant confiance au résultat avant de poursuivre ; l'essentiel est ici d'intégrer la signification physique des effets évoqués. Pour ceux qui voudront

aller plus loin, l'excellent ouvrage : LEMAÎTRE J., BOUCARD P.-A., HILD F. – *Résistance mécanique des solides : matériaux et structures* – Dunod, Paris, 2007, constituera un second marche-pied idéal avant des volumes plus spécialisés.

Outre tous les étudiants dont les questions m'ont obligé à réfléchir à la formulation de toutes ces notions de base, mes remerciements vont aux Professeurs F. DURAND, puis B. BAUDELET, qui m'avaient précédé dans ma charge d'enseignement à l'ENSEEG, ainsi qu'à tous les nombreux collègues et intervenants qui ont participé avec moi à cette expérience pédagogique d'une vingtaine d'années. Je dois une mention particulière à A. DESCHAMPS, M. VERON, J.-M. TERRIEZ et J. LAURENCIN pour leurs contributions à certains chapitres du polycopié d'origine. Pour l'auteur comme pour le lecteur, ce livre débute une autre expérience pédagogique, différente dans la forme, mais que j'espère tout aussi passionnante.

Bonne lecture !

Michel DUPEUX

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	V
--------------	---

PARTIE I

Matériaux, structures, essais mécaniques

Chapitre 1 - Introduction	1
1.1 Qu'est-ce qu'un « matériau » ?	1
1.2 Qu'est-ce qu'une « structure » ?	2
1.3 Le dimensionnement des structures	3
1.4 Un cas simple : le barreau en traction	4
1.5 Différents types de contraintes et de déformations	7
Chapitre 2 - L'essai de traction	15
2.1 Dispositif expérimental	15
2.2 Déroulement d'un essai	18
2.3 Caractéristiques déduites de l'essai de traction	22
2.4 Particularités de la courbe de traction de certains matériaux	26
2.5 Effets de la température	29
2.6 Effet de la vitesse de traction	30
2.7 Influence du dispositif de traction	32
Chapitre 3 - Quelques autres essais mécaniques courants	41
3.1 L'essai de compression	41
3.2 Les essais de dureté	43
3.3 Les essais à chaud	50
3.4 L'essai de résilience Charpy	55
Chapitre 4 - Chargement mécanique d'un solide	60
4.1 Forces, moments, torseurs	60
4.2 Principe fondamental de la statique	65
4.3 Torseur des efforts de cohésion	69
4.4 Problématique et hypothèses simplificatrices	71
4.5 Exemple d'étude de cas : application du principe fondamental de la statique	77

PARTIE II

Éléments de mécanique des milieux continus

Chapitre 5 • État de contrainte	87
5.1 Définition	87
5.2 Tenseur des contraintes	90
5.3 Loi de la dynamique appliquée à un élément de volume	94
5.4 Contraintes principales et directions principales	96
5.5 Représentation de Mohr	98
5.6 Quelques cas types d'états contraints	103
5.7 Décomposition du tenseur des contraintes	106
Chapitre 6 • État de déformation en un point	113
6.1 Déplacements ; gradients des déplacements	113
6.2 Décomposition des gradients de déplacements	116
6.3 Propriétés du tenseur des déformations	119
6.4 Considérations énergétiques	121
6.5 Mesure des déformations	125
Chapitre 7 • Lois de comportement - Élasticité	137
7.1 Généralités - Modèles rhéologiques	137
7.2 Comportement élastique linéaire	138
7.3 Comportement élastique linéaire isotrope	143
Chapitre 8 • Lois de comportement - Plasticité	152
8.1 Généralités	152
8.2 Modèles rhéologiques uniaxiaux	153
8.3 Modèles triaxiaux	155
8.4 Principe du travail maximal	160
Chapitre 9 • Choix d'un critère de résistance	166
9.1 Critère de sécurité et cahier des charges fonctionnel	166
9.2 Critères d'entrée en plasticité	167
9.3 Critères de rupture	173
9.4 Influence des conditions de sollicitation	178
9.5 Sécurité - Fiabilité	180

Chapitre 11 - Torsion des poutres droites	196
11.1 Définitions	196
11.2 Contraintes et déformations	197
11.3 Exemples d'applications	200
Chapitre 12 - Flexion des poutres droites	205
12.1 Généralités	205
12.2 Effet du moment fléchissant seul	207
12.3 Effet de l'effort tranchant	210
12.4 Exemples d'applications	212
Chapitre 13 - Flambement d'une poutre droite	220
13.1 Définition	220
13.2 Théorie d'Euler	220
13.3 Autres conditions aux appuis	222
13.4 Contraintes dans une poutre en flambement	223
Chapitre 14 - Applications de l'énergie de déformation élastique	227
14.1 Généralités	227
14.2 Coefficients d'influence	228
14.3 Théorème de Castigliano	231
Chapitre 15 - Mécanique des défauts dans les solides	238
15.1 Inclusion sphérique	238
15.2 Dislocations dans un cristal	241
15.3 Fissure	246
Chapitre 16 - Introduction à la méthode des éléments finis	254
16.1 Généralités	254
16.2 Modélisation par éléments finis des problèmes de mécanique des structures	255
16.3 Illustrations simples	261
16.4 Quelques logiciels classiques de MEF	269

Annexes

Annexe A - Mécanique : grandeurs, unités légales et symboles (d'après NF X 02 203)	273
Annexe B - Tableaux de conversion d'unités	278
Annexe C - Propriétés mécaniques de quelques matériaux à température ambiante	280
Annexe D - Rappels de mathématiques	283
Index-lexique français-anglais	289