

SOMMAIRE

Chocs et impacts sur les matériaux et les structures :

Introduction	13
PREMIÈRE PARTIE. DYNAMIQUE DES SOLIDES	17
Chapitre 1. Mouvements dans les solides	19
1.1. Représentation du milieu	19
1.1.1. Cadre de la mécanique des milieux continus	19
1.1.2. Représentation du mouvement	20
1.1.3. Représentation des efforts intérieurs	21
1.2. Equations de l'élastodynamique	23
1.2.1. Equations de Navier	23
1.2.2. Ondes de déformation	25
1.2.2.1. Décomposition de Helmholtz	25
1.2.2.2. Ondes P	25
1.2.2.3. Ondes S	26
1.2.2.4. Ondes planes	26
1.2.2.5. Ondes P en symétrie sphérique	27
1.3. Ondes monodimensionnelles	28
1.3.1. Etat uniaxial de contrainte	28
1.3.2. Etat uniaxial de déformation	29
1.3.3. Solution de d'Alembert	30
1.4. Ondes harmoniques	31
1.4.1. Définitions	31

1.4.2. Dispersion des ondes	33
1.4.3. Dispersion des ondes dans une barre	34
1.4.3.1. Solution de « Love Rayleigh »	34
1.4.3.2. Solution de Pochhammer et Chree	36
1.5. Viscoélasticité	38
1.5.1. Représentation d'un comportement rhéologique	38
1.5.1.1. Représentation et modèles	38
1.5.1.2. Construction des modèles rhéologiques	39
1.5.2. Fonctions fluage et relaxation	40
1.5.2.1. Formulation	40
1.5.2.2. Aspect tridimensionnel	41
1.5.3. Modèles rhéologiques	42
1.5.3.1. Modèle de Kelvin-Voigt	42
1.5.3.2. Modèle de Maxwell	43
1.5.3.3. Modèle linéaire standard	44
1.5.4. Modules complexes	45
1.5.5. Ondes dans les milieux viscoélastiques	47
1.5.5.1. Equation de propagation	47
1.5.5.2. Equation de dispersion.	49
Chapitre 2. Chocs de solides	53
2.1. Discontinuité de contrainte et de vitesse	53
2.1.1. Equations de conservation	53
2.1.1.1. Propagation d'une discontinuité	53
2.1.1.2. Conservation de la masse	54

2.1.1.3. Conservation de la quantité de mouvement	55
2.1.1.4. Conservation de l'énergie	55
2.1.2. Diagramme d'état	56
2.2. Marche des ondes	58
2.2.1. Diagramme de Lagrange	58
2.2.2. Réflexion sur une extrémité libre	59
2.2.3. Réflexion sur une extrémité fixe	61
2.2.4. Diffraction à une interface	62
2.2.5. Ondes et modes	64
2.3. Chocs de solides	66
2.3.1. Choc de deux solides	66
2.3.2. Chocs successifs	72
2.3.3. Piégeur d'onde et écaillage	73
2.4. Chocs sur des solides viscoélastiques	75
2.4.1. Conditions à l'interface	75
2.4.1.1. Kelvin-Voigt	76
2.4.1.2. Maxwell	77
2.4.2. Choc d'un solide élastique sur un solide viscoélastique	79
2.4.3. Choc de deux solides viscoélastiques	80
2.4.4. Propagation d'un choc dans un solide de Maxwell	81
Chapitre 3. Ondes et chocs en milieu non linéaire	83
3.1. Phénomènes irréversibles	83
3.1.1. Vitesse d'impact	83
3.1.2. Trajets de chargements	84

3.1.3. Vitesse de déformation	85
3.1.4. Cisaillement et plasticité	87
3.1.4.1. Plasticité et dynamique	87
3.1.4.2. Viscoplasticité	88
3.1.5. Comportements sous forte pression	90
3.2. Cisaillement adiabatique	91
3.2.1. Dynamique et thermique	91
3.2.2. Condition de cisaillement adiabatique	94
3.3. Propagation en état uniaxial de contrainte	96
3.3.1. Matériau élastoplastique	96
3.3.2. Matériau viscoplastique	101
3.4. Etat uniaxial de déformation	103
3.4.1. Matériau métallique	103
3.4.2. Géomatériau	108
3.5. Ondes de choc	109
3.5.1. Origine du phénomène	109
3.5.2. Compactage au passage d'une onde de choc	111
3.5.3. Notion de loi d'état	114
Chapitre 4. Essais dynamiques sur matériaux	117
4.1. Essais dynamiques	117
4.1.1. Moyens d'essai	117
4.1.2. Difficulté spécifique	118
4.2. Barres de Hopkinson	120
4.2.1. Dispositif	120

4.2.2. Principe de l'essai	120
4.2.3. Analyse de l'essai	123
4.2.4. Types de sollicitations	125
4.3. Essai par impact direct	125
4.3.1. Dispositif	125
4.3.2. Analyse de l'essai	126
4.4. Essai d'impact de Taylor	126
4.4.1. Principe de l'essai	126
4.4.2. Analyse simplifiée	127
4.5. Impact de plaque	128
4.5.1. Dispositifs	128
4.5.2. Eléments d'analyse	129
DEUXIÈME PARTIE. DYNAMIQUE DES STRUCTURES	131
Chapitre 5. Impact sur une structure simple	133
5.1. Structure élémentaire	133
5.1.1. Système linéaire à un degré de liberté	133
5.1.2. Chargement de courte durée	136
5.2. Spectre de réponse à un choc	137
5.2.1. Impulsion « créneau »	137
5.2.2. Divers types d'impulsions	142
5.2.3. Chargement alterné	143
5.2.4. Facteur d'amplification dynamique	146
5.3. Courbes iso dommage	148
5.3.1. Chargement impulsif	148

5.3.2. Chargement alterné	150
5.4. Modélisation d'une structure réelle	151
5.4.1. Définition d'un système équivalent	151
5.4.2. Poutres en flexion	153
5.4.3. Choc sur une poutre	154
5.4.4. Souffle sur une poutre	157
5.4.5. Choc sur une masse portée par un mat	159
5.4.6. Choc sur une construction	161
Chapitre 6. Collisions de structures	165
6.1. Chocs de structures élastiques	165
6.1.1. Equations du mouvement	165
6.1.2. Impact d'un projectile relativement souple	166
6.1.3. Couplage lors d'un choc de deux structures	167
6.1.4. Chute d'un corps rigide sur une structure souple	170
6.2. Choc avec écrasement	171
6.2.1. Phénomènes d'écrasement	171
6.2.2. Force d'impact	177
6.3. Classification des chocs	181
6.3.1. Choc dur et choc mou	181
6.3.2. Choc avec rebond ou écrasement	182
Chapitre 7. Explosions et souffles	185
7.1. Explosions accidentelles	185
7.1.1. Importance du risque d'explosion	185
7.1.2. Processus d'explosion de gaz	186

7.1.2.1. Conservation de la masse	186
7.1.2.2. Conservation de la quantité de mouvement	187
7.1.2.3. Conservation de l'énergie	188
7.1.2.4. L'énergie	190
7.1.3. Explosion avec confinement	190
7.2. Onde de pression	191
7.2.1. Onde externe issue d'une détonation	191
7.2.1.1. Les caractéristiques	191
7.2.1.2. Règles de similitude	192
7.2.1.3. Similitude de Sachs	193
7.2.1.4. Similitude de Hopkinson	193
7.2.1.5. La référence TNT	196
7.2.1.6. La modélisation	197
7.2.2. Onde externe issue d'une déflagration	197
7.3. Action d'une explosion sur une structure	199
7.3.1. Réflexion d'une onde de choc	199
7.3.2. Spectre de réponse à une détonation	200
7.3.3. Modèle simplifié d'une action sur une structure	201
7.4. Couplage souffle structure	205
7.4.1. Conditions de couplage	205
7.4.2. Approche linéaire du couplage	208
Chapitre 8. Réponse mécanique des poutres	215
8.1. Modèles dynamiques de poutre	215
8.1.1. Notations	215

8.1.2. Modèle de Bernoulli	216
8.1.3. Modèle de Rayleigh	218
8.1.4. Modèle de Timoshenko	219
8.2. Impacts sur les poutres	222
8.2.1. Adaptation du modèle à l'échelle de temps	222
8.2.1.1. Mise en place de la flexion	222
8.2.1.2. Influence des conditions aux limites	223
8.2.2. Impact au centre d'une poutre	224
8.2.3. Poutre sollicitée par un souffle	227
8.2.4. Sollicitation dans un tronçon de poutre sous impact	232
8.3. Calcul par superposition modale	236
8.3.1. Modes propres de déformation	236
8.3.2. Projection sur base modale	239
8.3.3. Exemple d'un souffle sur un mur	240
8.3.4. Fonction de transfert par un élément en flexion	246
8.4. Flambement dynamique	249
8.4.1. Equation du mouvement en flambement élastique	249
8.4.2. Réponse à une impulsion	251
Chapitre 9. Réponses de structures à plusieurs degrés de liberté	255
9.1. Modélisation par un système discret	255
9.1.1. Equations du mouvement	255
9.1.2. Recherche de modes propres	257
9.2. Résolution par superposition modale	259
9.2.1. Projection sur base modale	259

9.2.2. Exemple	261
9.3. Couplage fluide structure	265
9.3.1. Petits mouvements de fluides	265
9.3.2. Notion de masse ajoutée	266
9.3.3. Mode de ballonnement	268
9.3.4. Couplage avec une structure	271
Chapitre 10. Réponse d'une structure non linéaire	277
10.1. Comportement non linéaire de structures	277
10.1.1. Structures métalliques	278
10.1.1.1. Rotule plastique	278
10.1.1.2. Plastification par cisaillement	279
10.1.1.3. Plastification en flexion et traction ou compression	280
10.1.2. Structures en béton armé	281
10.1.3. Flexion et extension en grands déplacements	287
10.2. Système non linéaire à un degré de liberté	291
10.2.1. Formulation.	291
10.2.2. Chargement impulsionnel	292
10.2.3. Approche rigide plastique	293
10.3. Cas d'un comportement élastoplastique	294
10.3.1. Chargement impulsionnel	294
10.3.2. Spectre de réponse non linéaire	296
10.3.3. Système équivalent	301
10.4. Approche de la réponse à un impact violent	302
10.4.1. Choc sur une poutre	302

10.4.2. Impact d'une charge répartie 305

Bibliographie 309

Index 317