

collection génie civil dirigée par Jacky Mazars

# Chocs et impacts sur les matériaux et les structures

*de la théorie aux méthodes de l'ingénieur*

Patrice Bailly

hermes

Lavoisier

# Table des matières

<b>Introduction</b> . . . . .	13
<b>PREMIÈRE PARTIE. DYNAMIQUE DES SOLIDES</b> . . . . .	17
<b>Chapitre 1. Mouvements dans les solides</b> . . . . .	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
<b>Chapitre 2. Chocs de solides . . . . .</b>	<b>53</b>
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
<b>Chapitre 3. Ondes et chocs en milieu non linéaire . . . . .</b>	<b>83</b>
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
<b>Chapitre 4. Essais dynamiques sur matériaux . . . . .</b>	<b>117</b>
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. Éléments d'analyse . . . . .	129
<b>DEUXIÈME PARTIE. DYNAMIQUE DES STRUCTURES . . . . .</b>	<b>131</b>
<b>Chapitre 5. Impact sur une structure simple . . . . .</b>	<b>133</b>
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
<b>Chapitre 6. Collisions de structures . . . . .</b>	<b>165</b>
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
<b>Chapitre 7. Explosions et souffles . . . . .</b>	<b>185</b>
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
<b>Chapitre 8. Réponse mécanique des poutres . . . . .</b>	<b>215</b>
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
<b>Chapitre 9. Réponses de structures à plusieurs degrés de liberté. . . . .</b>	<b>255</b>
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
<b>Chapitre 10. Réponse d'une structure non linéaire . . . . .</b>	<b>277</b>
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
<b>Bibliographie</b> . . . . .	309
<b>Index</b> . . . . .	317

Dans des études de risques, les ingénieurs peuvent être amenés à devoir estimer les conséquences d'un accident entraînant un choc sur une construction. Cela peut concerner, par exemple, l'impact d'un véhicule ou d'un aéronef, ou, sur un site industriel, les effets d'une explosion.

Cet ouvrage réunit des éléments de mécanique appliquée dont concernent les méthodes pratiques, et parfois simplifiées, utilisées dans de telles études. Il s'adresse à des étudiants en master ou des élèves d'écoles d'ingénieurs ayant une formation assez générale en mécanique. Il peut également s'adresser à des ingénieurs en exercice souhaitant aborder le domaine de la résistance des structures aux actions mécaniques accidentelles. Il est un intermédiaire entre deux types d'ouvrages scientifiques : d'une part, il existe d'importantes ressources bibliographiques sur les domaines de la mécanique intervenant dans les études de choc sur des structures, c'est-à-dire les ondes dans les milieux continus, le comportement des matériaux, les calculs de résistance de structures, les vibrations, la dynamique des structures, etc.,

Dans les études de risques, les ingénieurs sont amenés à estimer les conséquences d'un accident entraînant un choc sur une construction. Cela peut concerner l'impact d'un véhicule terrestre ou d'un aéronef, ou les effets d'une explosion sur un site industriel.

Cet ouvrage présente une démarche didactique qui part des éléments théoriques de mécanique des matériaux et des structures pour développer leurs applications aux cas des chocs et les impacts. Ces derniers sont d'abord étudiés à une échelle locale. Ils induisent des contraintes et des déformations se propageant sous forme d'ondes dans le matériau, le mouvement provoqué s'étend ensuite à l'ensemble de la structure.

Une première partie est consacrée à l'étude de la dynamique des solides où entrent en jeu les comportements non linéaires. Une seconde partie est consacrée à la dynamique des structures et à l'évaluation de la réponse transitoire abordée à l'échelle globale d'une construction. Des méthodes pratiques, simplifiées et couramment utilisées par les ingénieurs sont également proposées tout au long de cet ouvrage.

#### *L'auteur*

Professeur à l'Ecole nationale supérieure d'ingénieurs de Bourges, Patrice Bailly est responsable de l'axe thématique Dynamique des matériaux et des structures du laboratoire PRISME.

**hermes**  
**Science**  
— PUBLICATIONS —

[www.editions.lavoisier.fr](http://www.editions.lavoisier.fr)

