

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 ballotement | 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