

# Table des matières

<b>Avant-propos</b> . . . . .	1
<b>Chapitre 1. Plasticité dynamique : dislocations</b> . . . . .	5
1.1. Introduction : comment décrire la plasticité ? . . . . .	5
1.1.1. Équivalence entre procédés de mise en forme et essais mécaniques . . . . .	6
1.1.2. Premiers stades de la déformation . . . . .	7
1.1.3. Multiplication des dislocations . . . . .	7
1.1.4. Observations fines (cycles charge-décharge) du début de plastification . . . . .	11
1.2. Vitesse de déformation : $\dot{\epsilon}$ ( $\dot{\gamma}$ pour le cisaillement) . . . . .	11
1.2.1. Quelques définitions et ordres de grandeur . . . . .	11
1.2.2. Influence de la vitesse de déformation. . . . .	13
1.2.3. Influence de « l'histoire » de la déformation . . . . .	15
1.2.4. Saut de vitesse dynamique-dynamique . . . . .	18
1.3. Les mécanismes microstructuraux de la plasticité . . . . .	20
1.3.1. Description d'une dislocation et de sa ligne . . . . .	20
1.3.2. Types de dislocation . . . . .	21
1.3.2.1. Densité de dislocations . . . . .	24
1.3.2.2. Micrographies électroniques . . . . .	25
1.3.2.3. Contraintes, champ des déplacements et des déformations d'une dislocation . . . . .	29
1.3.3. Glissements cristallographiques . . . . .	43
1.3.3.1. Systèmes de glissements de cristaux . . . . .	46

1.3.3.2. Exemple de déplacements de dislocations : visualisation des dislocations par « figures d'attaque » en choisissant le cas du fluorure de lithium . . . . .	47
1.3.3.3. Montée d'une dislocation ( <i>climb</i> ) . . . . .	54
1.3.4. Le maclage . . . . .	55
1.3.5. Force sur la dislocation. . . . .	60

## **Chapitre 2. Obstacles et mécanismes de franchissements . . . . . 63**

2.1. Les obstacles . . . . .	64
2.2. Nature et résistance des obstacles. . . . .	65
2.3. Exemple de mesure de vitesses des dislocations . . . . .	66
2.4. Mécanismes microstructuraux de la vitesse de déformation . . . . .	71
2.5. Mécanismes dus aux obstacles : mécanismes de durcissement . . . . .	72
2.5.1. Obstacles au mouvement dus aux dislocations elles-mêmes. . . . .	73
2.5.2. Interactions avec la forêt. . . . .	74
2.5.3. Analyse (simplifiée) de la consolidation due à la forêt de dislocations. . . . .	75
2.5.4. Blocage des dislocations par empilement . . . . .	78
2.5.5. Empilements de dislocations . . . . .	79
2.5.6. Influence de la grosseur du grain . . . . .	81
2.5.7. Cas des nanomatériaux (très faible taille de grain) : résistance mécanique et dureté ( $T$ inférieur à $0,3 T_f$ ). . . . .	85
2.5.8. Influence des lacunes. . . . .	88
2.5.9. Lacunes et dislocations. . . . .	89
2.5.10. Fautes d'empilement et de macles . . . . .	90
2.5.11. Barrières de Lomer-Cottrell . . . . .	95
2.5.11.1. Cas de monocristaux CFC. . . . .	95
2.5.11.2. Cas de monocristaux CC. . . . .	97
2.5.12. Influence des obstacles associés aux éléments d'alliages et aux impuretés. . . . .	98
2.5.13. Ancrage de dislocations . . . . .	99
2.5.14. Formation de boucles autour de particules . . . . .	101
2.5.15. Substitution et insertion d'atomes . . . . .	102
2.5.16. Évolution des contraintes due aux éléments d'addition . . . . .	102
2.5.16.1. Analyse simplifiée d'interaction dislocation-inclusion . . . . .	105
2.5.17. Durcissement par les précipités . . . . .	108
2.5.17.1. Précipités cohérents . . . . .	108
2.5.17.2. Précipités incohérents . . . . .	109

2.5.17.3. Alliages à durcissement structural . . . . .	113
2.5.17.4. Étapes . . . . .	114
2.5.17.5. Durcissement par des précipités ordonnés (d'après Castagné) : évolution des propriétés mécaniques . . . . .	117
2.5.17.6. Précipités . . . . .	119
2.6. Mécanisme athermique du mouvement d'une dislocation . . . . .	120
2.6.1. Densité $\rho$ de dislocations et contrainte athermique . . . . .	121
2.7. Mécanisme thermiquement activé du mouvement d'une dislocation . .	126
2.7.1. Modèle de loi de comportement . . . . .	130
2.7.1.1. Comparatif de coefficient d'un modèle de comportement et en <i>jump test</i> . . . . .	130
2.7.1.2. Comparatif du modèle en <i>jump test</i> . . . . .	131
2.8. Mécanisme de frottement visqueux. . . . .	133
2.8.1. Influence de la viscosité $\eta$ du milieu sur le coefficient d'amortissement visqueux $B$ . . . . .	138

### Chapitre 3. Écoulements dynamiques mono et polycristaux . . . . . 141

3.1. Type d'éprouvettes mono et polycristallines en cisaillement dynamique (anisotropie et isotropie aux grandes vitesses). . . . .	142
3.2. Le tenseur des contraintes de choc . . . . .	143
3.3. Étude de la déformation d'un polycristal . . . . .	144
3.4. Écoulements dynamiques par chocs électromagnétiques, aluminium polycristallin A5 . . . . .	144
3.5. Cas pour six polycristaux. . . . .	146
3.6. Cas de monocristaux . . . . .	147
3.6.1. Écoulement d'un cristal . . . . .	148
3.7. Modèles pour CFC . . . . .	151
3.7.1. Écoulements dynamiques viscoplastiques de cristaux : cas de l'aluminium ( $\dot{\epsilon} \approx 10^4 \text{ s}^{-1}$ ) . . . . .	153
3.8. Dynamique des écoulements, observation par caméra ultra-rapide . . .	156
3.8.1. Dynamique des chocs de cisaillement . . . . .	158
3.8.1.1. Trajectoires d'écoulements cristallographiques ; cisaillement dynamique ; poly et monocristaux d'aluminium. . . . .	159
3.8.1.2. Micrographie électronique d'écoulement cristallographique par cisaillement dynamique . . . . .	160
3.8.1.3. Mono et polycristaux de cuivre . . . . .	161
3.9. Viscoplasticité . . . . .	164

3.9.1. Influence des frottements visqueux phonique et électronique ; cas du plomb . . . . .	166
3.9.2. Viscoplasticité de cristaux métalliques ; influence du frottement visqueux . . . . .	169
3.10. Références pour la viscoplasticité . . . . .	173

## **Chapitre 4. Limites de formabilité statique et dynamique . . . . . 175**

4.1. Instabilité plastique . . . . .	175
4.1.1. La striction . . . . .	175
4.1.2. Coefficient d'écroutissage $n$ . . . . .	177
4.1.3. Études d'instabilités (dont effet de vitesse $\dot{\epsilon}$ ). . . . .	177
4.1.4. Rôle de la vitesse de déformation . . . . .	179
4.1.5. Résumé . . . . .	181
4.1.6. Vitesse de déformation généralisée . . . . .	182
4.2. Mise en forme par emboutissage . . . . .	183
4.2.1. Étude de l'instabilité plastique ; influence de l'écroutissage et de l'anisotropie (caractéristiques d'emboutissage de tôles minces). . . . .	183
4.2.1.1. Principe, instabilité selon $n$ et $r$ . . . . .	183
4.2.1.2. Application du critère de von Mises. . . . .	184
4.2.1.3. Calcul de $\bar{\epsilon}$ . . . . .	184
4.2.1.4. Calcul de $\bar{\epsilon}_A$ et $\bar{\epsilon}_Z$ (en $M$ ) . . . . .	185
4.2.1.5. Instabilité . . . . .	186
4.2.2. Paramètres influençant l'instabilité : influences de l'écroutissage $n$ et de l'anisotropie $r$ . . . . .	187
4.2.2.1. Le coefficient d'écroutissage $n$ . . . . .	187
4.2.2.2. Le coefficient d'anisotropie $r$ . . . . .	187
4.2.3. Emboutissage et formabilité en bombement de tôles, mise en forme de bulbes elliptiques . . . . .	190
4.3. Endommagement : domaine entre striction et rupture, cas entre CLFS et CLFR. . . . .	191
4.3.1. Définition. . . . .	191
4.3.2. Mesure de l'endommagement $D$ . . . . .	192
4.3.3. Grandes déformations et endommagement . . . . .	195
4.3.4. Courbe contrainte, déformation d'un acier 30 CD4 ayant subi un recuit de globularisation de la perlite . . . . .	196
4.3.4.1. Essai avec chargements et déchargements successifs : endommagement . . . . .	196
4.4. Limite de formabilité à striction (CLFS) et à rupture (CLFR) : influence de la vitesse de déformation. . . . .	197

4.4.1. Types de déformations . . . . .	198
4.4.1.1. Éprouvette pour CLFS. . . . .	200
4.4.2. Comparatif de CLF selon $\dot{\epsilon}$ : choc par action électronique, cas d'alliages d'aluminium . . . . .	202
4.4.3. Influence des vitesses de déformation sur les CLF : formabilités en statique et en dynamique. . . . .	205
4.4.4. Métaux étudiés . . . . .	208
4.4.5. Trajectoires des déformations : évolution de $\epsilon_1$ selon $\epsilon_2$ ; comparatif basse et grande vitesses . . . . .	208
4.4.5.1. Cas d'Al Ag 2,2 (5052) et de Cu. . . . .	208
4.4.5.2. Résultats obtenus sur ces trajectoires . . . . .	209
4.4.6. Comparatif des valeurs en striction Z et rupture R . . . . .	210
4.4.7. Variation en striction . . . . .	211
4.4.8. Variation en rupture . . . . .	214
4.4.9. Évolution entre striction et rupture . . . . .	216
4.4.10. Exemples en magnétoformage et électro-hydroformage . . . . .	217
4.4.10.1. Électrohydraulique . . . . .	218

## **Chapitre 5. Dynamique aux chocs d'ordre mécanique . . . . . 221**

5.1. Les contraintes de choc . . . . .	221
5.1.1. Aspects énergétiques : quantité de mouvement, énergie cinétique, impulsion . . . . .	221
5.1.2. Comparaison entre contraintes en chargements statique et dynamique . . . . .	223
5.1.2.1. Déplacements, contraintes . . . . .	223
5.1.2.2. Traction statique (cas a) . . . . .	224
5.1.2.3. Traction dynamique (cas b) . . . . .	225
5.1.2.4. Contrainte dynamique maximale . . . . .	226
5.1.2.5. Flexion statique (cas a) . . . . .	227
5.1.2.6. Flexion dynamique (cas b) . . . . .	227
5.2. Essai de résilience . . . . .	229
5.2.1. Choc par un pendule simple . . . . .	229
5.2.1.1. Transition fragile-ductile . . . . .	231
5.2.1.2. Choc interne « électronique » par impulsion électromagnétique . . . . .	233
5.2.2. Contraintes aux impacts polaires de choc . . . . .	234
5.2.2.1. Contrainte d'impact . . . . .	234
5.2.2.2. Polaire de choc . . . . .	236
5.2.2.3. Valeurs d'impacts . . . . .	237
5.2.2.4. Écaillage . . . . .	237

5.2.3. Choc avec rebond, coefficient de restitution, pertes énergétiques . . . . .	239
5.2.4. Effet de résistance au mouvement, vitesse et contrainte au choc . . . . .	240
5.2.4.1. Force de résistance proportionnelle à la vitesse instantanée $v$ . . . . .	241
5.2.4.2. Vitesse limite . . . . .	241
5.2.4.3. Accélération . . . . .	242
5.2.5. Force résistante proportionnelle au carré de la vitesse instantanée $v^2$ . . . . .	243
5.2.6. Résistance élastoplastique au choc et déformation de solide. . . . .	248
5.3. Chargements types, ondes de contraintes . . . . .	252
5.3.1. Ondes longitudinales de compression, impédance mécanique, contrainte. . . . .	253
5.3.1.1. Réflexion et transmission des ondes longitudinales . . . . .	254
5.3.1.2. Réflexion sur une surface libre. . . . .	255
5.3.2. Diagramme de marche des ondes. . . . .	256
5.3.2.1. Impact d'un projectile simple . . . . .	256
5.3.2.2. Cas d'un déchargement dynamique-dynamique : technique employée pour la mémoire structurale . . . . .	259
5.3.2.3. Cas d'un chargement dynamique-dynamique . . . . .	262
5.4. Essais dynamiques, technique Hopkinson, lois de comportement. . . . .	264
5.4.1. Principe des essais dynamiques aux barres de Hopkinson . . . . .	264
5.4.1.1. Choix des matériaux des barres . . . . .	266
5.4.1.2. Géométrie de l'échantillon . . . . .	266
5.4.2. Mesure des déformations par jauges d'extensométrie. . . . .	267
5.4.2.1. Choix des jauges et des colles . . . . .	268
5.4.2.2. Autres moyens de mesures . . . . .	269
5.4.3. Acquisition des données . . . . .	270
5.4.4. Traitement des données : analyse d'essais de comportement dynamique de matériaux . . . . .	272
5.4.4.1. Dépouillement . . . . .	274
5.4.5. Traction et torsion dynamique . . . . .	278
5.4.5.1. Génération de la sollicitation . . . . .	278
5.4.5.2. Torsion dynamique : banc d'essai d'étude en cisaillement dynamique de matériau. . . . .	278
5.4.6. Cisaillement dynamique de mono et polycristaux . . . . .	280
5.4.6.1. Cisaillement de polycristaux : exemple de l'alliage d'aluminium $Al_4$ , comportement suivant différents types de précipitations . . . . .	283

---

<b>Annexe A. Temps principaux des mécanismes</b> . . . . .	289
<b>Bibliographie</b> . . . . .	313
<b>Index</b> . . . . .	319
<b>Sommaire de <i>Rhéologie, comportement physique et mécanique de matériaux 2</i></b> . . . . .	321