

# Table des matières

## Chapitre I

### Les outils de la mécanique des milieux continus 21

<b>I.1 Vitesse de déformation et déformation</b>	21
I.1.1 Définitions	21
I.1.2 Trois chemins de déformation simples	24
I.1.3 Chemins de déformation complexes	29
<b>I.2 Contraintes</b>	31
I.2.1 Définitions	31
I.2.2 Equations d'équilibre	33
<b>I.3 Comportements plastique et viscoplastique</b>	34
I.3.1 Critères de plasticité	34
I.3.2 Lois d'écoulement	40
I.3.3 Comportement viscoplastique	44
I.3.4 Trois chemins de déformation simple (suite)	45
<b>I.4 Théorèmes d'extremum en viscoplasticité</b>	48
<b>I.5 Annexes</b>	50
I.5.1 Expressions du tenseur gradient de vitesse et des équations d'équilibre des contraintes en coordonnées cylindriques et sphériques	50
I.5.2 Lignes de courant et trajectoires	53
I.5.3 Déformation équivalente. Influence du chemin de déformation	56
I.5.4 Energie élastique et critère de von Mises	60
I.5.5 Section d'une frontière d'écoulement par le plan $\pi$	63
I.5.6 Prévion des cornes d'emboutissage	65
I.5.7 Note sur le « Dynamic Material Modeling »	68

## Chapitre II

### Les outils de la plasticité cristalline 71

<b>II.1 Cristallographie élémentaire des métaux</b>	72
II.1.1 Le réseau cristallin	72
II.1.2 Les indices de Miller	78
II.1.3 Le motif	81
II.1.4 Empilements compacts	84

<b>II.2 Mécanique du monocristal</b>	86
II.2.1 Glissement cristallographique	86
II.2.2 Frontière d'écoulement du monocristal	90
II.2.3 Loi d'écoulement	97
II.2.4 Modèle cristallin viscoplastique	100
II.2.5 Rotation des axes cristallographiques	103
II.2.6 Facteur d'orientation et facteur de Taylor	104
<b>II.3 Annexe</b>	105
II.3.1 Notations de Miller à 4 indices pour le réseau hexagonal	105

## Chapitre III

### Les outils de la métallurgie physique 111

<b>III.1 Energie des dislocations</b>	112
<b>III.2 Interactions entre dislocations</b>	115
III.2.1 Formule de Peach et Koehler	115
III.2.2 Interaction entre deux dislocations coins parallèles	117
III.2.3 Interaction entre deux dislocations partielles de Shockley parallèles	120
<b>III.3 Mouvement des dislocations</b>	123
III.3.1 Relation d'Orowan	123
III.3.2 Montée des dislocations	124
III.3.3 Glissement thermiquement activé	127
<b>III.4 Grains, joints et sous-joints</b>	130
III.4.1 Représentation des grains	130
III.4.2 Désorientation des grains	132
III.4.3 Mouvement des joints de grains	136
<b>III.5 Annexes</b>	138
III.5.1 Variations du facteur $\kappa$ de la relation (III.39)	138
III.5.2 Evolution du rapport de forme des grains	140
III.5.3 Matrice de passage, rotation et angles d'Euler	144
III.5.4 Distribution « de Mackenzie » pour des cristaux de structure hexagonale	147

## Chapitre IV

### Essais rhéologiques à chaud 149

<b>IV.1 Essais de compression</b>	151
IV.1.1 Essai de compression uniaxiale	152
IV.1.2 Essai de compression plane encastrée	155

<b>IV.2 Essai de torsion</b>	157
IV.2.1 Etude cinématique	158
IV.2.2 Calcul de la contrainte d'écoulement	160
IV.2.3 Distribution de la puissance plastique	162
<b>IV.3 Annexes</b>	163
IV.3.1 Modèle de frottement de Tresca	163
IV.3.2 Application de la relation de Fields et Backofen	164

## Chapitre V

### Notions sur les textures 169

<b>V.1 Textures morphologiques et topologiques</b>	169
<b>V.2 Fonction de distribution des orientations cristallines</b>	171
<b>V.3 Représentations bidimensionnelles de la texture cristallographique</b>	174
V.3.1 Projection stéréographique	174
V.3.2 Figures de pôles	180
<b>V.4 Symétries des textures : exemples</b>	184
V.4.1 Textures de laminage	184
V.4.2 Textures de torsion	186
<b>V.5 Annexe</b>	189
V.5.1 Classification des textures de torsion des matériaux cubiques	189

## Chapitre VI

### Mécanismes de la déformation à chaud 195

<b>VI.1 Mécanismes d'adoucissement statique</b>	195
VI.1.1 Etat déformé à froid : microstructure écrouie	196
VI.1.2 Restauration statique	197
VI.1.3 Recristallisation statique	200
VI.1.4 Croissance des grains	205
<b>VI.2 Recristallisation dynamique</b>	206
VI.2.1 Recristallisation dynamique continue	206
VI.2.2 Recristallisation dynamique discontinue	213
VI.2.3 Remarques générales	220
<b>VI.3 Transformations métadynamiques</b>	222
<b>VI.4 Annexe</b>	225
VI.4.1 Cinétique de recristallisation statique : Loi d'Avrami	225

## Chapitre VII

### Lois de comportement à chaud 231

<b>VII.1 Paramètres rhéologiques macroscopiques</b>	231
VII.1.1 Sensibilité à la vitesse	232
VII.1.2 Sensibilité à la température	232
VII.1.3 Sensibilité à la déformation	234
VII.1.4 Coefficient de Taylor-Quinney	234
<b>VII.2 Lois de comportement empiriques (macroscopiques)</b>	235
<b>VII.3 Modèles physiques (microscopiques)</b>	239
VII.3.1 Modèle de Kocks-Mecking	240
VII.3.2 Modèle de Laasraoui-Jonas	241
VII.3.3 Loi puissance	243
VII.3.4 Paramètres rhéologiques microscopiques	244
<b>VII.4 Relations entre contrainte d'écoulement et microstructure</b>	245
<b>VII.5 Annexes</b>	248
VII.5.1 Calcul du coefficient de Taylor-Quinney	248
VII.5.2 Interprétations de la limite d'élasticité	249
VII.5.3 Modèle de Stüwe-Hertel	251
VII.5.4 Modèle élémentaire de recristallisation dynamique discontinue	252

## Chapitre VIII

### Déformation à chaud des alliages biphasés 257

<b>VIII.1 Du métal pur à l'alliage multiphasé</b>	258
<b>VIII.2 Caractérisation des alliages biphasés</b>	259
VIII.2.1 Forme des domaines homogènes	260
VIII.2.2 Distribution des domaines homogènes	261
VIII.2.3 Lois de comportement des phases et du mélange	263
<b>VIII.3 Lois de mélange « simples »</b>	264
VIII.3.1 Modèle de Taylor	265
VIII.3.2 Modèle statique	266
VIII.3.3 Modèle Iso- $w$	267
<b>VIII.4 Mécanique de l'inclusion d'Eshelby</b>	269
VIII.4.1 Inclusion élastique sphérique	269
VIII.4.2 Inclusion élastique ellipsoïdale	273
VIII.4.3 Inclusion (sphéroïdale) et matrice viscoplastiques linéaires	275
VIII.4.4 Inclusion (sphéroïdale) et matrice viscoplastiques non linéaires	278
<b>VIII.5 Lois de mélange utilisant la mécanique de l'inclusion d'Eshelby</b>	279
VIII.5.1 Cas où l'une des phases est minoritaire	279

VIII.5.2 Cas d'un mélange de phases approximativement équivolumique	282
<b>VIII.6 Paramètres rhéologiques des alliages biphasés</b>	284
<b>VIII.7 Annexes</b>	286
VIII.7.1 Fractions volumiques et massiques	286
VIII.7.2 Champ de déplacement élastique autour d'une inclusion sphérique	289
VIII.7.3 Energie élastique des configurations d'Eshelby	290

## Chapitre IX

### Instabilités, endommagement et ductilité 297

<b>IX.1 Définitions et mesures de la ductilité</b>	297
<b>IX.2 Instabilités en mise en forme</b>	300
IX.2.1 Critère portant sur l'effort de traction	300
IX.2.2 Critère portant sur la réduction de section	307
IX.2.3 Notions sur le comportement superplastique	308
<b>IX.3 Endommagement en mise en forme</b>	311
IX.3.1 Amorçage d'une cavité	311
IX.3.2 Croissance d'une cavité isolée	313
IX.3.3 Comportement des matériaux poreux	315
<b>IX.4 Critères macroscopiques de rupture ductile</b>	320
<b>IX.5 Annexes</b>	321
IX.5.1 Extension du critère de Considère à un essai anisotherme	321
IX.5.2 Critère de Shima et Oyane sous chargement axisymétrique	322

## Chapitre X

### Exercices corrigés 325

X.1 Compacité des structures <i>cc</i> , <i>cfc</i> et <i>hc</i>	325
X.2 Mailles élémentaires rhomboédriques des structures <i>cc</i> et <i>cfc</i>	326
X.3 Structure cristalline du rutile $\text{TiO}_2$	329
X.4 Réduction du critère de Hill au cas isotrope	331
X.5 Critère de Hill : compression uniaxiale	334
X.6 Critère de Hill : compression 3D	338
X.7 Critère de Hill : essais mécaniques sur une tôle mince	341
X.8 Critère de plasticité polynomial d'exposant supérieur à 2	345
X.9 Critère de plasticité monoclinique prismatique	348
X.10 Essai de traction uniaxiale	351
X.11 Champ de vitesse non uniforme en compression	355
X.12 Gonflement d'une bulle dans une matrice viscoplastique linéaire	358
X.13 Extrusion d'une barre	362

X.14 Procédé d'étirage à chaud	365
X.15 Effets d'inertie en traction	370
X.16 Méthode d'Eshelby : analogie des ressorts	374
X.17 Température homologue et paramètre de Zener-Hollomon	378
X.18 Loi de comportement pseudoplastique générale	379
<b>Références</b>	<b>383</b>
<b>Glossaire français-anglais</b>	<b>391</b>
<b>Index</b>	<b>395</b>