

BERNARD JAOUL

Étude de la plasticité et application aux métaux

Introduction par Jacques Friedel



MINES PARIS
ParisTech
Les Presses

COLLECTION SCIENCES DE LA MATIÈRE

100 nm

A white horizontal scale bar is located below the text '100 nm'.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE 1. — Contraintes et déformations

1.1	<i>Tensions et déformations dans un corps homogène</i>	1
1.1.1.	Définition de l'état de contrainte	1
1.1.2.	Contrainte hydrostatique et contrainte réduite	5
1.1.3.	Cas particulier : contrainte plane	7
1.1.4.	Équations d'équilibre	8
1.1.5.	Définition des déformations	9
a)	Interprétation des ε et des γ	11
b)	Glissements, rotations et cisaillements	12
c)	Déformations principales, invariants	13
d)	Déformations finies	14
1.2	<i>Modèles et équations rhéologiques</i>	15
1.2.1.	Modèles rhéologiques simples	16
a)	Corps visqueux ou liquide de Newton	16
b)	Corps élastique ou solide de Hooke	16
c)	Corps rigide-plastique	18
1.2.2.	Modèles rhéologiques complexes	19
a)	Corps de Maxwell	19
b)	Corps de Kelvin	20
c)	Corps de Saint-Venant	20
d)	Corps de Bingham	20
1.2.3.	Phénomènes du second ordre	21
1.2.4.	Constantes et paramètres rhéologiques	22
a)	Coefficients élastiques	22
b)	Coefficient de viscosité	23
c)	Paramètre caractérisant la déformation plastique λ	24
1.3	<i>Les critères de plasticité</i>	24
1.3.1.	Représentation géométrique du critère	25
1.3.2.	Critères de Coulomb et de von Misès	26
1.3.3.	Influence de la tension moyenne	28
1.3.4.	Courbes et surfaces intrinsèques	29
1.3.5.	Recherche expérimentale d'un critère	31
a)	Essais de Lode	32
b)	Essais de Taylor et Quinney	33
c)	Essais de Ros et Eichinger	34
d)	Essais de Bailey	35
e)	Essais de Bridgmann	36
f)	Essais de Van Iterson	36
1.3.6.	Relation universelle effort-déformation	37
CHAPITRE 2. — Déformation plastique d'un milieu homogène		
2.1	<i>Théorie de la plasticité</i>	40
2.1.1.	Théorie de Saint-Venant	40
2.1.2.	Vérifications expérimentales	42

2.1.3.	Solide élastique-plastique : relation de Reuss	45
2.1.4.	Cas des faibles déformations	46
2.1.5.	Influence de la restauration	47
2.1.6.	Cas particulier de la déformation plane : théorie de Hencky	48
	a) Déformations planes	48
	b) Variation de la contrainte.	50
	c) Propriétés du champ des lignes de glissement	53
	d) Cas d'un matériau écrouissable	55
2.2	<i>Déformation d'un tube sous pression interne</i>	56
2.2.1.	Tube élastique	57
2.2.2.	Tube rigide-plastique en déformation plane	60
	a) Corps non écrouissable : relations de Saint-Venant	60
	b) Tube entièrement plastique : théorie de Hencky	62
	c) Tube écrouissable : relations de Saint-Venant	64
	d) Tube écrouissable : relations de Hencky	67
2.2.3.	Tube élastique-plastique en déformation plane	68
2.2.4.	Déformations finies	74

CHAPITRE 3. — Structure des métaux

3.1	<i>Rappels de cristallographie</i>	76
3.1.1.	Système cubique	79
3.1.2.	Systèmes quadratique et orthorhombique	83
3.1.3.	Système hexagonal	84
3.1.4.	Autres systèmes cristallins	86
3.1.5.	Utilisation des diagrammes de rayons X.	87
3.2	<i>Élasticité des cristaux</i>	90
3.2.1.	Équations de Hooke généralisées	91
3.2.2.	Symétries des cristaux.	92
3.2.3.	Les relations de Cauchy	94
3.2.4.	Modules d'élasticité des cristaux	96

CHAPITRE 4. — Les défauts dans les cristaux

4.1	<i>Introduction</i>	104
4.2	<i>Les défauts ponctuels dans les métaux</i>	104
4.2.1.	Lacunes et atomes interstitiels	104
	a) Effets géométriques	106
	b) Effets électriques.	106
4.2.2.	Impuretés	107
	a) Définition des solutions solides	107
	b) Solutions solides d'insertion	108
	c) Solutions solides de substitution	109
	d) Amas et précipités	110
	e) Solutions solides intermédiaires	111
	f) Solutions solides sursaturées	112

4.3	<i>Les défauts linéaires</i>	113
4.3.1.	La dislocation coin de Taylor	113
	a) Généralités	113
	b) Circuit de Burgers. Vecteur de Burgers	116
4.3.2.	Dislocation vis d'Orowan	117
4.3.3.	Techniques expérimentales de mise en évidence des dislocations	118
	a) Figures d'attaque	119
	b) Rayons X	120
	c) Microscopie électronique	120
	d) Décoration	121
4.4	<i>Définitions générale et propriétés des dislocations</i>	122
4.4.1.	Définition générale	122
4.4.2.	Propriétés générales des dislocations	123
	a) Forces de Peierls-Nabarro	124
	b) Énergie emmagasinée par une dislocation	124
	c) Crans sur les dislocations	125
4.5	<i>Contrainte sur une dislocation</i>	126
4.5.1.	Contrainte sur une ligne de dislocation libre à ses deux extrémités	126
4.5.2.	Contrainte exercée par une dislocation	128
4.5.3.	Interaction d'une dislocation et d'une surface	129
4.5.4.	Action d'une contrainte sur une dislocation bloquée à ses deux extrémités : tension de ligne	129
4.6	<i>Interaction des dislocations et des impuretés</i>	131
4.6.1.	Effet de taille	132
4.6.2.	Effet des constantes élastiques	133
4.6.3.	Interaction d'une dislocation avec des impuretés réparties uniformément	133
4.6.4.	Action d'une dislocation sur des impuretés mobiles	136
4.7	<i>Dislocations imparfaites</i>	138
4.7.1.	Défauts d'empilement	138
4.7.2.	Dislocations de Frank et de Shockley	139
4.7.3.	Décomposition de dislocations parfaites	140
4.8	<i>Interaction de dislocations dans le système cubique à faces centrées</i>	143
4.8.1.	Barrières de Cottrell	144
4.8.2.	Réactions de Hirsch avec des dislocations dissociées	146
4.9	<i>Applications</i>	146
4.9.1.	Limite élastique des monocristaux : théorie de Taylor	147
4.9.2.	Réseau de Frank des cristaux réels	148
4.9.3.	Empilements	149
4.9.4.	Polygonisation	151
4.9.5.	Vitesse des dislocations	152
4.10	<i>Conclusions</i>	153

CHAPITRE 5. — Méthodes expérimentales d'étude de la plasticité

5.1	<i>L'essai de traction</i>	158
5.1.1.	Généralités	158
5.1.2.	Courbes corrigées	159
	a) Correction de l'effort	160
	b) Correction d'allongement	160
5.1.3.	Instabilité en traction	161
5.1.4.	Réalisation pratique d'un essai de traction	168
	a) Éprouvettes de traction	169
	b) Fixation des éprouvettes	171
	c) Machines de traction	172
5.2	<i>L'essai de torsion</i>	174
5.2.1.	Détermination de la contrainte	175
5.2.2.	Détermination de la déformation	177
5.2.3.	Réalisation d'un essai de torsion	179
5.3	<i>L'essai de compression</i>	179
5.4	<i>Autres types d'essais</i>	180
5.4.1.	Essai de flexion plastique	180
5.4.2.	Essais sur éprouvettes entaillées	181
5.4.3.	Essais sous contrainte complexe	181
5.4.4.	Essais de dureté	181
	a) Dureté Brinnell	181
	b) Dureté Rockwell	181
	c) Dureté Vickers	181
5.5	<i>Étude des mécanismes de déformation</i>	182

CHAPITRE 6. — Étude géométrique de la déformation des monocristaux

6.1	<i>Introduction</i>	187
6.2	<i>Étude géométrique du glissement</i>	188
6.2.1.	Influence de l'orientation	190
6.2.2.	Allongement, rotation et glissement en traction	191
6.2.3.	Glissement double	194
6.2.4.	Cas de la déformation par compression	196
6.3	<i>Hétérogénéités de déformation</i>	197
6.4	<i>Étude géométrique du maillage</i>	201
6.4.1.	Éléments de maillage	203
6.4.2.	Déformation par maillage	207
6.5	<i>Observation micrographique du mécanisme de déformation</i>	211
6.5.1.	Lignes de glissement	211

6.5.2. Préparation de la surface	212
6.5.3. Couche d'oxyde	213
6.5.4. Conditions de déformation à la surface	213
6.5.5. Macles	213
6.6 Déformation des cristaux cubiques à faces centrées	215
6.6.1. Développement des lignes de glissement	216
a) Bandes de glissement	218
b) Lamelles de glissement	221
6.6.2. Influence de l'orientation	223
6.6.3. Bandes de déformation	228
a) Glissement secondaire	230
b) Pliages	234
c) Influence de la température et de la pureté	241
6.6.4. Influence de la déformation	242
6.6.5. Maclage des cristaux cubiques à faces centrées	244
6.7 Déformation des cristaux cubiques centrés	245
6.7.1. Directions et surfaces de glissement	245
6.7.2. Glissement secondaire	252
6.7.3. Hétérogénéités de déformation	257
6.7.4. Influence de la pureté, de la vitesse et de la température	260
6.7.5. Maclage des cristaux cubiques centrés	261
a) Plans et directions de maclage	261
b) Macles observées	262
c) Aspect des macles	264
6.8 Déformation des cristaux hexagonaux compacts	266
6.8.1. Systèmes de glissement	266
6.8.2. Bandes de déformation	271
6.8.3. Maclage des cristaux hexagonaux	274
6.9 Déformation des cristaux d'autres structures	275
6.9.1. Étain	276
6.9.2. Uranium α	276
6.9.3. Structures rhomboédriques	279

CHAPITRE 7. — Résistance et consolidation des monocristaux

7.1 Introduction	283
7.2 Limite élastique des cristaux	284
7.2.1. Influence de l'orientation : loi de Schmid	284
7.2.2. Origine de la cission critique	286
a) Généralités sur les contraintes internes	287
b) Forces de Peierls-Nabarro	287
c) Forces dues aux dislocations	288
d) Forces dues aux interactions avec les défauts ponctuels	288
e) Forces dues aux interactions avec les impuretés	288
7.2.3. Limite élastique des cristaux cubiques à faces centrées	288

a)	Influence de la température	288
b)	Influence de la polygonisation	291
c)	Influence des impuretés	291
7.2.4.	Limite élastique des cristaux cubiques centrés	294
a)	Forces de Peierls-Nabarro	295
b)	Influence de la polygonisation	295
c)	Rôle des impuretés en insertion : influence de la température	295
d)	Influence des éléments d'alliage	297
e)	Influence de la vitesse de déformation	298
f)	Cission critique de maillage	298
7.2.5.	Limite élastique des cristaux hexagonaux	299
a)	Cadmium, zinc et magnésium	299
b)	Titane, zirconium, béryllium	301
7.2.6.	Limite élastique des cristaux de structure complexe	302
7.3	<i>Courbes de traction et courbes de consolidation</i>	303
7.3.1.	Déformation par glissement dans une seule direction	304
7.3.2.	Déformation par glissements symétriques	307
	Remarque : instabilité de déformation dans les monocristaux	308
7.4	<i>Consolidation des cristaux cubiques à faces centrées</i>	309
7.4.1.	Étude expérimentale de la consolidation	311
a)	Influence de l'orientation	311
b)	Influence de la température	316
c)	Influence de la pureté	319
d)	Influence des conditions expérimentales	322
7.4.2.	Théories de la consolidation des cristaux cubiques à faces centrées	328
a)	Glissement facile	329
b)	Durcissement linéaire	332
c)	Durcissement parabolique	334
7.5	<i>Consolidation des cristaux cubiques centrés</i>	336
7.5.1.	Consolidation à la température ambiante	337
a)	Influence de l'orientation	340
b)	Influence de la vitesse de déformation	341
c)	Traction de cristaux de molybdène	342
7.5.2.	Consolidation à température supérieure à l'ambiante	342
7.5.3.	Déformation à basse température	343
a)	Clivage	344
b)	Maillage et glissement	345
7.5.4.	Influence du carbone	346
7.5.5.	Influence des éléments d'alliage autres que le carbone	350
7.6	<i>Consolidation des cristaux de structure non cubique</i>	350
7.6.1.	Cristaux hexagonaux : $c/a > 1,62$ (cadmium, zinc, magnésium)	350
a)	Influence de l'orientation	351
b)	Influence de la température et de la vitesse	353
c)	Influence de l'état de surface	355
d)	Maillage	355
e)	Origine de la consolidation	356
7.6.2.	Cas des autres métaux	356
7.7	<i>Conclusions</i>	357

CHAPITRE 8. — Mécanisme de la déformation des polycristaux	362
8.1 Nature des joints de grains	362
8.1.1. Joints cristallographiques	362
8.1.2. Joints réels	365
8.2 Déformation d'un bicristal	367
8.2.1. Déformations macroscopiques	367
8.2.2. Glissements dans un bicristal	369
8.3 Déformation d'un polycristal	371
8.3.1. Théorie de Taylor	371
8.3.2. Vérification des hypothèses de Taylor	374
8.4 Observation micrographique des glissements	375
8.4.1. Traversée des joints	376
8.4.2. Glissements à l'intérieur des grains	378
8.5 Observation de la déformation de métaux de diverses structures	380
8.5.1. Métaux cubiques à faces centrées	381
a) Développement des lignes de glissement	381
b) Influence de la température et de la vitesse de déformation	382
c) Influence de la pureté	384
d) Hétérogénéités de déformation	385
8.5.2. Métaux cubiques centrés	386
a) Systèmes de glissement	386
b) Influence de l'amplitude de la déformation	387
c) Influence de la température et de la vitesse	389
d) Influence de la pureté	389
e) Bandes de Piobert	390
f) Phénomène Portevin-Le Chatelier	396
8.5.3. Métaux hexagonaux	397
a) Zinc et cadmium	397
b) Magnésium	399
c) Autres métaux hexagonaux	399
8.5.4. Métaux d'autres structures	400
CHAPITRE 9. — Résistance et consolidation des polycristaux	
9.1 Généralités sur la résistance des polycristaux	403
9.2 Métaux cubiques à faces centrées	406
9.2.1. Limite élastique	406
a) Influence de la grosseur du grain	406
b) Influence de la température et de la vitesse	408
c) Influence des impuretés	410
9.2.2. Forme des courbes de traction des métaux purs	412
a) Domaine de durcissement intergranulaire	415
b) Domaine de durcissement linéaire	417

	c) Domaine de durcissement parabolique	419
	d) Influence des éléments en solution solide	421
9.2.3.	Origine de la consolidation des polycristaux cubiques à faces centrées	425
	a) Comparaison des courbes de résistance des monocristaux et des polycristaux	425
	b) Domaine de durcissement intergranulaire	427
	c) Consolidation linéaire	429
	d) Particularités du troisième domaine	431
	e) Influence des impuretés	434
9.2.4.	Influence des éléments non solubles	435
	a) Solutions sursaturées — Phénomène Portevin-Le Chatelier	435
	b) Consolidation par les impuretés non solubles	441
9.3	<i>Métaux cubiques centrés</i>	444
9.3.1.	Limite élastique	444
	a) Influence de la grosseur du grain	445
	b) Influence de la température et de la vitesse	447
9.3.2.	Déformation plastique	451
	a) Palier des courbes de traction	451
	b) Durcissement parabolique	458
	c) Comparaison des polycristaux aux monocristaux	460
	d) Influence de la température et de la vitesse	461
9.3.3.	Influence des impuretés et des éléments d'addition	464
	a) Éléments en insertion, vieillissement et phénomène Portevin-Le Chatelier	464
	b) Propriétés générales des aciers	471
	c) Résistance et déformation des aciers au carbone	473
	d) Influence des éléments en substitution dans la ferrite	474
	e) Influence des éléments d'addition en présence de carbone	476
	f) Influence du traitement thermique	477
	g) Détermination de la résistance des aciers	478
9.4	<i>Résistance et déformation des métaux non cubiques</i>	481
9.4.1.	Influence de l'anisotropie	481
9.4.2.	Cadmium et zinc	485
	a) Limite élastique	485
	b) Forme des courbes de traction	488
	c) Nature de l'écroutissage	490
	d) Influence des éléments d'alliage	491
9.4.3.	Magnésium	491
	a) Limite élastique	491
	b) Forme des courbes de traction	492
	c) Influence de la température et de la vitesse	494
	d) Influence des impuretés	495
9.4.4.	Zirconium et titane	496
	a) Forme des courbes de traction	497
	b) Influence de la température	499
	c) Influence des impuretés interstitielles	501
	d) Influence des éléments d'alliage métalliques	502
9.4.5.	Béryllium	506
9.4.6.	Étain	509
9.4.7.	Uranium	511

CHAPITRE 10. — Les déformations à chaud

10.1	<i>Introduction Générale</i>	517
10.2	<i>Fluage</i>	517
10.2.1.	Introduction. — Généralités	517
10.2.2.	Les chaleurs d'activation	520
10.2.3.	Le fluage stationnaire	522
10.2.4.	Mécanismes déterminant le fluage stationnaire	528
	a) Observations expérimentales	528
	b) Théories du fluage stationnaire	528
10.2.5.	Fluage logarithmique	531
10.2.6.	Fluage primaire et fluage tertiaire	532
10.3	<i>Déformation à chaud à vitesse imposée</i>	533
10.3.1.	Généralités	533
10.3.2.	Résistance mécanique à chaud	534
	a) Courbes effort-déformation	534
	b) Influence de la vitesse de déformation	537
	c) Influence de la température	538
10.3.3.	Évolution de la structure sous l'effet de la déformation et d'une haute température	540
10.4	<i>Relaxation</i>	546

CHAPITRE 11. — La rupture des métaux

11.1	<i>Généralités</i>	549
11.2	<i>Description des différents modes de rupture</i>	555
11.2.1.	Rupture fragile-clivage	556
	a) Aspect micrographique des surfaces	557
	b) Vitesse de propagation des fissures au cours du clivage	561
11.2.2.	Rupture ductile	562
11.2.3.	Rupture intergranulaire	566
11.3	<i>Analyse de l'influence des divers facteurs physiques sur les mécanismes de rupture intracristallins des métaux</i>	570
11.3.1.	Introduction	570
11.3.2.	Généralisation de la théorie de Griffith	571
	a) Géométrie de la germination	571
	b) Contraintes nécessaires à la germination	573
	c) Conditions de propagation	574
11.3.3.	Rupture des métaux hexagonaux compacts	576
11.3.4.	Rupture des métaux cubiques à faces centrées	577
11.3.5.	Rupture dans les métaux cubiques centrés et leurs alliages	578
11.4	<i>Rupture par fluage</i>	587
11.4.1.	Cuivre et laiton α_1	588
11.4.2.	Alliages cuivre-nickel	588

11.4.3. Magnésium et alliages au magnésium	588
11.4.4. Chrome et alliages	588
11.4.5. Aluminium et alliages	589
11.4.6. Aciers et alliages réfractaires	589
11.5 <i>Rupture par fatigue</i>	389
11.5.1. Étude micrographique des surfaces des éprouvettes	591
11.5.2. Étude micrographique des surfaces de rupture	591
11.5.3. Mécanismes d'amorçage et de propagation	594
INDEX ALPHABÉTIQUE	597