

# Table des matières

<b>Chapitre 1. Endommagement</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1. Définition . . . . .	1
1.2. Variable d'endommagement. . . . .	2
1.3. Contrainte effective . . . . .	3
1.4. Principe d'équivalence en déformation . . . . .	5
1.5. Caractérisation expérimentale de l'endommagement . . . . .	6
1.5.1. Variation des caractéristiques mécaniques . . . . .	6
1.5.2. Modifications de la matière . . . . .	7
1.5.3. Taux d'usure. . . . .	7
1.6. Modèles d'évolution des dommages D. . . . .	9
1.6.1. Dissipation . . . . .	9
1.6.2. Types d'endommagements . . . . .	10
1.6.2.1. L'endommagement plastique ductile . . . . .	10
1.6.2.2. L'endommagement de fluage. . . . .	12
<b>Chapitre 2. Rupture ductile</b> . . . . .	<b>17</b>
2.1. Les étapes du déchirement ductile . . . . .	17
2.1.1. Première étape : endommagement par décohésion, fissuration des inclusions, impuretés, précipités, formation de cupules . . . . .	17
2.1.2. Deuxième étape : cavités croissantes, formation de pédoncules puis striction donnant le déchirement ductile . . . . .	18
2.2. Endommagement plastique ductile linéaire en déformation . . . . .	20
2.3. Formation de fissures autour des inclusions ou précipités, cupules en rupture ductile . . . . .	23
2.3.1. Formation de fissures à partir de particules pour la figure 2.5b : cas de divers métaux . . . . .	28

2.3.2. Alliage aluminium-silicium . . . . .	29
2.4. Analyse de faciès de ruptures ductiles trichites et de métaux selon la pureté et l'état des contraintes . . . . .	30
2.4.1. Rupture de trichites (Cu et Fe) . . . . .	30
2.4.2. Polycristaux CC et CFC en rupture ductile – Influence des états de contraintes et de la pureté . . . . .	33
2.4.3. Rupture ductile d'éprouvettes d'acier sans entaille . . . . .	34
2.4.4. Rupture d'éprouvettes de fer pur . . . . .	35
2.4.4.1. Sans entaille . . . . .	35
2.4.4.2. Avec entaille . . . . .	35
2.4.5. Rupture ductile d'éprouvettes de cuivre industriel et de pureté 4N et 5N. . . . .	36
2.4.5.1. Sans entaille . . . . .	36
2.4.5.2. Avec entaille . . . . .	38
2.4.6. Cas de Fe zone fondue, Cu (4N, 5N et industriel), aluminium (3N, 5N et industriel) – Contraintes uni- et triaxiales. . . . .	40
2.5. Relation entre la densité des inclusions et la ductilité . . . . .	44
2.5.1. Cuivre fritté comprenant des particules . . . . .	44
2.5.1.1. Résultat expérimental . . . . .	45
2.5.2. Alumine . . . . .	46
<b>Chapitre 3. Rupture brutale, énergie de rupture . . . . .</b>	<b>53</b>
3.1. Analyse de la rupture . . . . .	53
3.2. Rupture brutale et critère énergétique . . . . .	54
3.2.1. Bilan énergétique pour faire avancer la fissure. . . . .	54
3.2.2. Obtention de $G_c$ . . . . .	56
3.2.3. Données pour $G_c$ et $K_{Ic}$ . . . . .	58
3.2.4. Exemples de ruptures brutales . . . . .	64
3.2.4.1. Rupture brutale d'un crochet de levage. . . . .	64
3.2.4.2. Rupture brutale de poutre . . . . .	65
3.2.4.3. Trépan de forage . . . . .	67
<b>Chapitre 4. Description et modélisation des mécanismes physiques . . . . .</b>	<b>73</b>
4.1. Propagation de fissures . . . . .	73
4.2. Calcul de $r_p$ : cas de la plasticité confinée . . . . .	74
4.3. Zone élastoplastique à l'extrémité d'une fissure . . . . .	76
4.4. Champ de contraintes et de déformations à l'extrémité de la fissure . . . . .	77

<b>Chapitre 5. Ruptures par clivage et intergranulaire . . . . .</b>	<b>81</b>
5.1. Rupture par clivage . . . . .	81
5.1.1. Exemples de ruptures par clivage . . . . .	82
5.1.2. Changement de micromécanismes . . . . .	84
5.2. Rupture intergranulaire . . . . .	85
5.2.1. Ruptures le long d'interfaces, de joints de grains . . . . .	85
5.2.2. Rupture intergranulaire fragile . . . . .	86
5.2.3. Paramètre de transition de rupture de métaux . . . . .	87
5.2.4. Influence des joints de grains . . . . .	91
5.2.5. Contrainte de clivage des aciers . . . . .	92
5.2.6. Influence des éléments d'addition sur la transition fragile-ductile . . . . .	93
5.2.6.1. Éléments gammagènes . . . . .	93
5.2.6.2. Éléments alphagènes. . . . .	94
5.2.6.3. Interstitiels. . . . .	94
5.2.6.4. Température de laminage . . . . .	95
 <b>Chapitre 6. Concentration de contraintes <math>K_t</math> . . . . .</b>	 <b>97</b>
6.1. Introduction. . . . .	97
6.2. Mesure de $K_t$ . . . . .	99
6.2.1. Par jauges d'extensométrie . . . . .	99
6.2.2. Par photoélasticimétrie. . . . .	100
6.3. Solides d'égales résistances . . . . .	101
6.4. Effet d'entaille . . . . .	102
6.5. Réduction du facteur de concentration de contrainte : cas de pièces entaillées . . . . .	104
6.6. Effet d'entaille en fatigue . . . . .	105
6.7. Valeurs de concentrations de contraintes $K_t$ : cas utiles en pratique. . .	107
 <b>Chapitre 7. Facteur d'intensité de contraintes <math>K</math>. . . . .</b>	 <b>111</b>
7.1. Introduction. . . . .	111
7.2. Champs de contraintes et de déplacements . . . . .	113
7.2.1. Mode I . . . . .	113
7.2.2. Mode II. . . . .	115
7.2.3. Mode III . . . . .	117
7.2.4. Valeurs des $K$ pour les milieux fissurés plans . . . . .	118

7.2.5. Zone en fond de fissure . . . . .	121
7.2.5.1. Forme et dimensions de la zone plastique . . . . .	121
7.2.5.2. Plasticité . . . . .	121
7.2.5.3. Cisaillement à 45° . . . . .	123
7.2.6. Influence de la zone plastique en fissuration . . . . .	124
7.3. Remarques concernant $K = \sigma \sqrt{\pi a}$ . . . . .	125
7.4. Valeurs d'intensités de contraintes $K_I, K_{II}, K_{III}$ pour les trois modes : cas traitant du sujet et cas utiles en pratique . . . . .	126
7.4.1. Valeurs usuelles de facteurs d'intensité des contraintes $K_I, K_{II}, K_{III}$ . . . . .	126
7.4.2. Valeurs de $K_I = f(\lambda) \cdot \sigma \sqrt{\pi a}$ . . . . .	131

## Chapitre 8. Zones de rupture en photoélasticimétrie. . . . . 137

8.1. Photoélasticité . . . . .	137
8.1.1. Contraintes principales et lignes isostatiques. . . . .	137
8.1.2. Biréfringence par déformation . . . . .	138
8.2. Propagation des vibrations lumineuses. . . . .	139
8.2.1. Propagation de la lumière dans le vide . . . . .	139
8.2.1.1. Intensité de la lumière . . . . .	140
8.2.2. Propagation de la lumière dans un milieu transparent. . . . .	140
8.2.3. Onde dans un diélectrique . . . . .	141
8.2.4. Valeurs des constantes C et K de matériaux photoélastiques . . . . .	142
8.2.4.1. Valeur de C . . . . .	142
8.2.4.2. Valeur de K . . . . .	143
8.2.5. Choix d'un revêtement photoélastique . . . . .	144
8.2.6. Ellipsoïde des indices . . . . .	145
8.2.6.1. Biréfringence par déformation : loi de Maxwell . . . . .	148
8.3. Photoélasticimétrie . . . . .	149
8.3.1. Photoélasticimètre . . . . .	149
8.3.2. Lignes isochromatiques, différence des contraintes principales . . . . .	150
8.3.2.1. Les zéros de $\sin^2 2\alpha$ : les isoclines . . . . .	153
8.3.2.2. Les zéros de $\sin^2 \frac{\pi e C}{\lambda} (\sigma_I - \sigma_{II})$ : les isochromes. . . . .	155
8.3.2.3. Isoclines ou isochromes . . . . .	155
8.3.2.4. Élimination des isoclines . . . . .	156
8.3.2.5. Éclairement en lumière blanche, isochromes . . . . .	157
8.3.3. Exemple de pièces sous contraintes : cas tridimensionnel, méthode du figeage. . . . .	158

<b>Chapitre 9. Influence des vitesses de déformation . . . . .</b>	<b>161</b>
9.1. Types de chargements dynamiques . . . . .	161
9.2. Exemple de ruptures brutales . . . . .	162
9.3. Endommagement, domaine entre striction et rupture, cas entre CLFS et CLFR . . . . .	168
9.3.1. Définition . . . . .	168
9.3.2. Grandes déformations et endommagement . . . . .	169
9.3.2.1. Endommagement . . . . .	169
9.3.2.2. Exemple : cas d'un essai statique . . . . .	170
9.3.2.3. Essai avec chargements et déchargements successifs : endommagement . . . . .	171
9.4. Courbes limites de formabilité : emboutissages statique (sous presse) et en dynamique (magnétoformage et électrohydroformage). . . . .	171
9.4.1. Mesure des déformations . . . . .	171
9.4.1.1. Types de déformations . . . . .	172
9.4.2. Descriptif d'un essai électrohydraulique (EH) . . . . .	172
9.4.3. Types d'éprouvettes . . . . .	176
9.4.4. Exemple de CLFR . . . . .	177
9.4.4.1. Tracé de CLF . . . . .	177
9.5. Choc par champ magnétique intense et pulsé sur alliages d'aluminium . . . . .	180
9.6. Résultats d'essais . . . . .	183
9.6.1. Trajectoires des déformations, évolution de $\varepsilon_1$ selon $\varepsilon_2$ , comparatif basse et grande vitesses . . . . .	184
9.6.1.1. Résultats obtenus sur les trajectoires . . . . .	185
9.6.2. Influence des vitesses de déformation sur les CLF, formabilités en statique et en dynamique . . . . .	187
9.6.3. Comparatif des valeurs en striction Z et rupture R . . . . .	189
9.6.3.1. Variation en striction . . . . .	189
9.6.3.2. Variation en rupture . . . . .	193
9.6.3.3. Évolution entre striction et rupture . . . . .	194
<b>Chapitre 10. Fatigue des métaux . . . . .</b>	<b>197</b>
10.1. Introduction . . . . .	197
10.2. Courbe d'endurance : tracé de la courbe d'endurance ou de Wöhler . . . . .	197
10.3. Limite d'endurance conventionnelle . . . . .	199
10.4. Classification des essais de fatigue . . . . .	201

10.4.1. Définition . . . . .	201
10.4.2. Essais en pratique . . . . .	203
10.4.3. Essais sous contraintes combinées . . . . .	205
10.4.3.1. Efforts statiques et dynamiques de même direction . . . . .	205
10.4.3.2. Diagramme de Goodman-Smith . . . . .	206
10.4.4. Application d'un critère en contrainte plane . . . . .	212
10.4.5. Exemples d'influences sur l'endurance . . . . .	216
10.4.6. Influence de la température . . . . .	217
10.5. Aspects physiques de fatigue. . . . .	219
10.5.1. Mécanismes physiques . . . . .	219
10.5.2. Surfaces de rupture par fatigue, micrographies. . . . .	222
10.5.3. Variation de l'écartement des stries . . . . .	223
10.5.4. Quelques micrographies de ruptures . . . . .	224
10.5.4.1. Influence des inclusions . . . . .	224
10.5.4.2. Bandes de déformation, MET lame mince . . . . .	225
10.6. Types de fatigues. . . . .	225
10.6.1. Comportement en fatigue de pièces non fissurées . . . . .	226
10.6.1.1. Cas $\sigma < \sigma_E$ : rupture à grand nombre de cycles . . . . .	226
10.6.1.2. Cas $\sigma > \sigma_E$ : rupture à petit nombre de cycles . . . . .	227
10.6.2. Comportement en fatigue de pièces fissurées. . . . .	230
10.6.2.1. Régime de Paris, zone 2 . . . . .	232
10.6.2.2. $N_f$ , nombre de cycles à rupture . . . . .	235
10.7. Plasticité, rupture par fatigue et brutale : étude de cas . . . . .	235
10.8. Propagation des fissures en corrosion sous contraintes fatigue-corrosion, influence des fréquences cycles . . . . .	241

**Chapitre 11. Rupture des composites. . . . . 247**

11.1. Mécanismes de rupture . . . . .	247
11.1.1. Composite unidirectionnel (UD) . . . . .	247
11.1.1.1. Fissuration de la matrice. . . . .	249
11.1.1.2. Rupture et déformation fibre et matrice. . . . .	250
11.1.2. Rupture des stratifiés . . . . .	252
11.2. Critères de rupture . . . . .	254
11.2.1. Données décrivant la résistance d'un UD ou d'un tissu. . . . .	254
11.2.2. Ruptures successives de couches . . . . .	256
11.2.3. Rapport résistance/contrainte : coefficient de résistance R . . . . .	256
11.2.4. Critères de contrainte maximale et/ou de déformation maximale. . . . .	257
11.2.5. Critère quadratique : dans l'espace des contraintes . . . . .	259

---

11.2.6. Enveloppes de rupture . . . . .	264
11.2.6.1. Coefficients $F_{ij}$ et $G_{ij}$ hors axes des matrices de passage . . . . .	264
11.2.6.2. Cas d'enveloppes multidirectionnelles . . . . .	265
11.3. Conception en contraintes principales . . . . .	266
11.3.1. Contraintes et déformations principales . . . . .	266
11.3.2. Invariants des contraintes et des déformations . . . . .	267
11.3.2.1. Définition de l'angle $\theta$ . . . . .	267
11.3.3. Dimensionnement des isotropes. . . . .	268
11.3.3.1. Dimensionnement de matériaux directionnels . . . . .	270
11.3.3.2. Valeurs des coefficients de contraintes $R$ . . . . .	271
11.3.3.3. Valeurs des déformations . . . . .	271
11.3.3.4. Valeurs des déformations équivalentes . . . . .	272
11.3.3.5. Méthode de dimensionnement de stratifiés. . . . .	272
<b>Annexes</b> . . . . .	<b>275</b>
<b>Bibliographie</b> . . . . .	<b>331</b>
<b>Index</b> . . . . .	<b>335</b>
<b>Sommaire de <i>Rhéologie, comportement physique et mécanique de matériaux 1</i></b> . . . . .	<b>339</b>
<b>Sommaire de <i>Rhéologie, comportement physique et mécanique de matériaux 2</i></b> . . . . .	<b>341</b>
<b>Sommaire de <i>Rhéologie, comportement physique et mécanique de matériaux 3</i></b> . . . . .	<b>343</b>
<b>Sommaire de <i>Rhéologie, comportement physique et mécanique de matériaux 4</i></b> . . . . .	<b>345</b>