

# TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

## MATÉRIAUX, STRUCTURES

# Fatigue des structures

Endurance, critères de dimensionnement,  
propagation des fissures, rupture

Gilbert HÉNAFF

Franck MOREL

ellipses

# TABLE DES MATIÈRES

<i>Avant-Propos</i>	7
<b>Chapitre I. Concepts généraux sur la fatigue</b>	<b>11</b>
1. Mise en évidence du phénomène de fatigue	11
2. Différents stades de l'endommagement	12
2.1. Morphologie d'une surface de rupture	12
2.2. Modifications microstructurales induites par la déformation cyclique	14
2.3. Amorçage de fissure	16
2.4. Propagation de fissure	17
3. Différentes approches en dimensionnement	18
3.1. Approche en durée de vie	20
3.2. Approche en tolérance aux dommages	21
3.3. Comparaison des différentes approches	22
<b>Chapitre II. Comportement cyclique, fatigue oligocyclique</b>	<b>23</b>
1. Comportement cyclique	23
1.1. Comportement monotone en traction	23
1.2. Comportement sous sollicitation cyclique.	25
2. Durée de vie en fatigue oligocyclique	31
3. Mécanismes d'accommodation et de rupture en fatigue plastique.	32
3.1. Accommodation	32
3.2. Fissuration	37
4. Modélisation du comportement cyclique	37
<b>Chapitre III. Durée de vie en fatigue - Endurance</b>	<b>41</b>
1. Caractérisation du Comportement en Fatigue	41
1.1. Chargement	41
1.2. Diagramme d'endurance	42
1.3. Aspects statistiques	44
2. Facteurs influençant la tenue en fatigue	46
2.1. Influence de la contrainte moyenne	46
2.2. Influence du mode de répartition des contraintes	51
2.3. Influence de l'état de surface	52
2.4. Contraintes résiduelles	52
2.5. Influence de la fréquence et du milieu ambiant.	57
2.6. Influence de la température.	58
3. Expressions mathématiques de la durée de vie	58

3.1. Approches en contrainte	58
3.2. Approche en déformation	59
<b>Chapitre IV. Dimensionnement en endurance multiaxiale</b>	<b>65</b>
<b>1. Introduction</b>	<b>65</b>
<b>2. Spécificités des mécanismes d'amorçage en fatigue sous sollicitation multiaxiale</b>	<b>66</b>
<b>3. Effets des contraintes statiques sur les contraintes alternées</b>	<b>67</b>
<b>4. Formulation des critères d'endurance multiaxiale</b>	<b>67</b>
4.1. Classification des chargements	68
4.2. Définitions et notations	70
<b>5. Critères empiriques</b>	<b>81</b>
5.1. Rappels sur les critères de fatigue uniaxiale	81
5.2. Critère de Gough et Pollard	82
<b>6. Critères de type Tresca</b>	<b>83</b>
6.1. Critère de Findley (1959)	84
6.2. Critère de Mataka (1977)	84
6.3. Critère de Mc Diarmid (1991)	85
<b>7. Critères de type Von Mises</b>	<b>86</b>
7.1. Critère de Sines (1959)	86
7.2. Critère de Crossland (1956)	87
<b>8. Approche mésoscopique</b>	<b>88</b>
8.1. Les échelles de description du matériau en fatigue	88
8.2. Les relations générales de passage de l'échelle macroscopique à l'échelle mésoscopique	90
8.3. Modèle de Lin-Taylor	91
8.4. Critère de Dang Van (1973)	93
8.5. Extension du critère de Dang Van : Critère de Papadopoulos	99
8.6. Mise en œuvre du critère de Dang Van	101
8.7. Critère de Papadopoulos (1993) – Cas des chargements déphasés	103
<b>Chapitre V. Problème de calcul de durée de vie en fatigue multiaxiale d'amplitude variable</b>	<b>107</b>
<b>1. Sollicitation uniaxiale d'amplitude variable</b>	<b>107</b>
1.1. Caractérisation des signaux	107
1.2. Les méthodes de comptage	110
1.3. Quelques exemples de lois d'endommagement	113
<b>2. Sollicitation multiaxiale d'amplitude variable</b>	<b>117</b>
2.1. Position du problème	117
2.2. Approches macroscopiques	118
2.3. Approches mésoscopiques	125
<b>Chapitre VI. Propagation des fissures de fatigue</b>	<b>133</b>
<b>1. Caractérisation de la propagation</b>	<b>133</b>
1.1. Essai de fissuration	133
1.2. Facteur d'intensité de contrainte	136
1.3. Description de la propagation dans le cadre de la mécanique de la rupture	138
1.4. Différents régimes de propagation	139
<b>2. Endommagement en pointe de fissure</b>	<b>141</b>
2.1. Zones plastifiées en tête de fissure	141
2.2. Mécanismes de propagation	143
2.3. Influence du rapport de charge R ; fermeture de fissure	145

<b>3. Seuil de propagation</b>	<b>147</b>
3.1. Mécanismes de propagation au voisinage du seuil.	148
3.2. Fermeture de fissure	148
3.3. Influence de l'environnement	150
3.4. Influence des facteurs métallurgiques	152
<b>4. Fissures courtes</b>	<b>155</b>
<b>Chapitre VII. Lois de propagation</b>	<b>159</b>
<b>1. Modèles théoriques</b>	<b>160</b>
1.1. Modèles basés sur le cumul de dommages	160
1.2. Modèles basés sur les propriétés cycliques	160
1.3. Modèles basés sur l'ouverture en fond de fissure (CTOD)	164
<b>2. Lois empiriques</b>	<b>164</b>
2.1. Loi de Walker	165
2.2. Loi de Forman	166
2.3. Loi NASGRO	166
2.4. Loi arctanh	169
<b>Chapitre VIII. Fatigue des composants entaillés</b>	<b>171</b>
<b>1. Concentration de contrainte</b>	<b>171</b>
<b>2. Coefficient de réduction de durée de vie <math>K_f</math></b>	<b>172</b>
<b>3. Approches fondées sur l'amplitude locale de déformation</b>	<b>175</b>
3.1. Approche de Neuber	176
3.2. Critère « Energie de déformation équivalente » (EDE)	179
3.3. Comparaison EDE-Neuber	180
<b>4. Approches fondées sur la mécanique de la rupture.</b>	<b>181</b>
4.1. Amorçage à fond d'entaille.	182
4.2. Propagation à partir d'une entaille.	182
4.3. Vitesse de propagation	184
4.4. Méthodologie de dimensionnement	185
<b>Chapitre IX. Propagation sous chargements à amplitude variable</b>	<b>187</b>
<b>1. Aspects phénoménologiques</b>	<b>187</b>
1.1. Effet d'une surcharge	187
1.2. Origines de l'effet « Retard »	190
1.3. Autres types de variation de chargement	191
<b>2. Modèles de propagation sous chargement à amplitude variable.</b>	<b>192</b>
2.1. Approche globale	192
2.2. Analyses cycle par cycle	193
<b>3. Approches empiriques basées sur les interactions de zones plastifiées</b>	<b>193</b>
3.1. Modèle de Wheeler	193
3.2. Modèle de Willenborg	194
<b>4. Approches basées sur les effets de fermeture de fissure</b>	<b>196</b>
4.1. Modèle PREFFAS (PREvision de la Fissuration en Fatigue AéroSpatiale)	196
4.2. Modèle de Dugdale modifié - FASTRAN	202
<b>Chapitre X. Tolérance aux dommages</b>	<b>207</b>
<b>1. Motivations et Objectifs</b>	<b>207</b>
1.1. Dimensionnement standard des structures aéronautiques	207
1.2. Concept de tolérance aux dommages	209
<b>2. Résistance résiduelle</b>	<b>213</b>

<b>3. Contrôle, inspection, durabilité</b>	<b>216</b>
3.1. Inspections périodiques	216
3.2. Fuite avant rupture	218
3.3. Durabilité complète	219
3.4. Essai de validation par surcharge	219
<b>4. Mise en œuvre de l'analyse en tolérance aux dommages</b>	<b>220</b>
4.1. Données de l'analyse	222
4.2. Solutions pour améliorer la tolérance aux dommages	227
<b><i>EXERCICES ET PROBLEMES RESOLUS</i></b>	<b>229</b>
<b><i>Bibliographie</i></b>	<b>277</b>