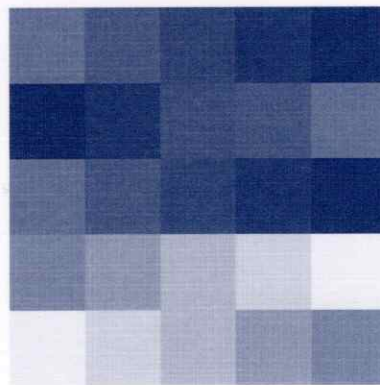


# Mécanique de propagation et bifurcation des fissures



Naman Recho

*hermes*

*Lavoisier*

---

## Table des matières

<b>Notations</b> . . . . .	13
<b>Avant-propos</b> . . . . .	19
<b>Préambule. Comment appréhender cet ouvrage ?</b> . . . . .	23
<b>Chapitre 1. Propagation des fissures</b> . . . . .	27
1.1. Rupture par fissuration brutale . . . . .	29
1.1.1. Critères du facteur d'intensité de contraintes . . . . .	31
1.1.2. Critère du taux de restitution d'énergie $G$ . . . . .	33
1.1.3. Critère du déplacement d'ouverture des lèvres de la fissure (COD) . . . . .	34
1.1.4. Critère de l'intégrale $J$ . . . . .	35
1.1.5. Critères des courbes $R$ . . . . .	36
1.1.6. Concept de Feddersen . . . . .	37
1.1.7. Approche des deux critères . . . . .	40
1.1.8. Méthode EPRI . . . . .	41
1.1.9. Critère de Leguillon . . . . .	42
1.1.10. Critère de transition ouverture/cisaillement des lèvres de la fissure . . . . .	47
1.2. Bifurcation des fissures . . . . .	57
1.2.1. Critère de bifurcation de fissure en milieu élastoplastique . . . . .	63
1.2.1.1. Critère de bifurcation pour les ruptures par ouverture . . . . .	64
1.2.1.2. Critère de bifurcation pour les fissures de cisaillement . . . . .	64

1.2.2. Critère de bifurcation de fissure à partir des entailles en V . . . . .	67
1.3. Rupture par fissuration successive sous fatigue . . . . .	69
1.3.1. Lois de propagation de fissures . . . . .	71
1.3.1.1. Fermeture des lèvres de la fissure . . . . .	76
1.3.1.2. Lois de fissuration en mode mixte . . . . .	76
1.3.2. Approches utilisées pour le calcul de la durée de vie à la fatigue . . . . .	78
1.3.2.1. Approche classique au moyen des courbes (S-N) . . . . .	78
1.3.2.2. Approche au moyen de la mécanique linéaire de la rupture . . . . .	80
1.3.2.3. Calcul rapide du facteur d'intensité de contraintes en mode I . . . . .	83
1.3.3. Cas du chargement à amplitude variable . . . . .	87
1.3.3.1. Définitions physiques de la loi du dommage donnant la résistance à la fatigue . . . . .	88
1.3.3.2. Définitions physiques de la loi de cumul d'endommagement . . . . .	90
1.3.3.3. Définitions considérées de la loi du dommage et de la loi de cumul d'endommagement . . . . .	90
1.3.3.4. Différents types d'associations des lois du dommage aux lois de cumul d'endommagement . . . . .	91
1.3.3.5. Méthodologie de dimensionnement à la fatigue d'un élément constructif soumis au chargement variable . . . . .	93
1.3.3.6. Méthodes de comptage . . . . .	95
1.3.3.7. Principe des théories de dommages cumulés . . . . .	98
1.3.3.8. Règle de Miner . . . . .	99
1.3.3.9. Inconvénients de la loi de Miner . . . . .	100
1.3.3.10. Durée de vie moyenne . . . . .	100
1.3.3.11. Autres théories plus complexes . . . . .	101
1.3.3.12. Dommage avec interaction de contraintes . . . . .	102
1.3.3.13. Dommage dépendant des niveaux de contraintes . . . . .	103
1.3.4. Cas de surcharges . . . . .	104
1.3.4.1. Phénomène de fermeture de fissure . . . . .	107
1.3.4.2. Phénomène d'écrouissage cyclique du matériau au fond de la fissure . . . . .	108
1.3.4.3. Phénomène de contraintes résiduelles en compression en pointe de fissure . . . . .	108

1.3.4.4. Modélisation de l'effet de retard . . . . .	109
1.3.4.5. Dépendance du cycle . . . . .	110
1.3.4.6. Dépendance de l'accroissement de la fissure . . . . .	110
1.3.4.7. Application . . . . .	111
1.3.5. « Fiabilité-rupture » en présence de variables aléatoires . . . . .	112
1.3.5.1. Éléments fiabilistes . . . . .	113
1.3.5.2. Intégrale indicatrice du dommage . . . . .	116
1.3.5.3. Cas du chargement variable aléatoire . . . . .	118
1.3.5.4. Cycles endommageants . . . . .	119
1.3.5.5. Effet de la séquence de l'application de sollicitations . . . . .	122
<b>Chapitre 2. Prédiction de la rupture par fissuration des éléments de structures métalliques soumises à la fatigue . . . . .</b>	
2.1. Signification et analyse par le calcul des contraintes au voisinage de l'effet local . . . . .	128
2.1.1. Assemblages tubulaires, géométrie et position du problème . . . . .	129
2.1.2. Premier effet local numérique (intersection d'éléments finis) . . . . .	131
2.1.3. Deuxième et troisième effets locaux (inertie du cordon de soudure et congé de raccordement) . . . . .	133
2.1.4. Quatrième effet local (défauts au pied du cordon) . . . . .	136
2.2. Amorçage des fissures sous fatigue . . . . .	138
2.2.1. Durée de vie à l'amorçage d'une fissure de fatigue . . . . .	139
2.2.1.1. Approche par l'utilisation d'un coefficient de réduction $k_f$ dû à l'entaille . . . . .	139
2.2.1.2. Approche par la déformation locale en fond d'entaille . . . . .	141
2.2.1.3. Approche par le critère du cisaillement maximal . . . . .	143
2.2.1.4. Approche par l'utilisation de plan critique de fatigue . . . . .	144
2.2.1.5. Approche par la mécanique de l'endommagement . . . . .	147
2.2.1.6. Approche par la propagation des fissures en plasticité non confinée . . . . .	148
2.2.1.7. Approche locale . . . . .	148
2.2.1.8. Approche globale . . . . .	149
2.2.1.9. L'intégrale $J$ cyclique $\Delta J$ corrigée . . . . .	150
2.2.2. Taille de la fissure initiale dans les soudures d'angles . . . . .	152
2.2.2.1. Evaluation de la taille de la fissure initiale . . . . .	153
2.2.2.2. Application : durée de vie – cas de l'assemblage en croix dont l'effort est appliqué selon le bras continu . . . . .	157



2.2.2.3. Distribution de la taille de la fissure initiale $a_i$ . . . . .	159
2.2.2.4. Applications numériques . . . . .	160
2.2.2.5. Discussion des résultats . . . . .	162
2.2.2.6. Conclusions relatives à la distribution statistique de $a_i$ . . . . .	162
2.3. Localisation et nocivité des fissures . . . . .	163
2.3.1. Définitions, position du problème dans les assemblages en croix . . . . .	165
2.3.2. Première approche . . . . .	166
2.3.3. Dépouillement et comparaison avec les résultats expérimentaux . . . . .	168
2.3.4. Cas de l'assemblage en croix soumis à la flexion selon le bras discontinu . . . . .	170
2.3.5. Conclusions relatives à la localisation et à la nocivité des fissures . . . . .	172
2.4. Bifurcation de la fissure amorcée par fatigue . . . . .	173
2.4.1. Campagne d'essais préliminaires . . . . .	174
2.4.1.1. Préfissuration . . . . .	174
2.4.1.2. Essais de bifurcation . . . . .	174
2.4.1.3. Résultats expérimentaux et numériques — comparaison . . . . .	177
2.4.1.4. Déconsolidation cyclique locale . . . . .	177
2.4.1.5. Ecrouissage . . . . .	178
2.4.1.6. Explication phénoménologique de la bifurcation par fatigue . . . . .	178
2.4.1.7. Critère de rupture sous chargement monotone . . . . .	178
2.4.1.8. Critère de bifurcation cyclique . . . . .	180
2.4.1.9. Applications numériques . . . . .	180
2.4.2. Suivi de fissuration en milieu élastoplastique . . . . .	182
2.4.3. Simulation de la propagation de fissure sur des configurations d'essais en mode mixte . . . . .	184
2.4.3.1. Interprétation par la technique de maillage pas-à-pas . . . . .	185
2.4.3.2. Technique de suivi de fissuration au moyen de la boîte à fissure . . . . .	188
2.4.3.3. Conclusions relatives à la bifurcation de la fissure amorcée . . . . .	193

<b>Chapitre 3. Possibilités offertes par les lois de propagation de fissure à l'étude de la durée de vie en fatigue</b> . . . . .	195
3.1. Calcul de la durée de vie à la propagation de la fissure d'un joint soudé . . . . .	196
3.1.1. Cas de l'assemblage en croix soudé . . . . .	196
3.1.1.1. Durée de vie à la propagation à partir d'une fissure à la racine du cordon de soudure . . . . .	198
3.1.1.2. Durée de vie à la propagation, à partir d'une fissure au pied du cordon de soudure . . . . .	199
3.1.1.3. Commentaire . . . . .	199
3.1.1.4. Comparaison avec les résultats expérimentaux et conclusions . . . . .	202
3.2. Etude de l'influence des différents paramètres sur la durée de vie d'un joint soudé . . . . .	203
3.3. Caractérisation statistique de la taille de fissure initiale en fonction du procédé de soudage . . . . .	206
3.3.1. Propagation de la fissure et proposition d'une relation entre $n$ et $C$ . . . . .	208
3.3.2. Approche statistique et calcul de la profondeur de la fissure initiale $a_0$ . . . . .	209
3.4. Les modèles couplés amorçage/propagation : <i>two phase models</i> . . . . .	210
3.4.1. Période de propagation . . . . .	212
3.4.2. Période d'amorçage . . . . .	215
3.4.3. Analyse des courbes courbes S-N à partir du modèle couplé . . . . .	216
3.4.4. Application du modèle couplé au cas du chargement à amplitude variable . . . . .	218
3.5. Elaboration d'un modèle d'endommagement prenant en compte le phénomène de fissuration . . . . .	220
3.5.1. Détermination numérique du nombre de cycles en fonction de la longueur de fissure ou vice-versa . . . . .	224
3.6. Prise en compte de la présence des contraintes résiduelles de soudage sur la propagation de fissure . . . . .	224
3.6.1. Distribution des contraintes résiduelles . . . . .	225
3.6.2. Méthode de calcul du taux de restitution d'énergie $G$ . . . . .	227
3.6.3. Simulation numérique . . . . .	229
3.6.4. Influence des contraintes résiduelles de soudage sur la propagation de fissure . . . . .	231

3.7. Prise en compte de la longueur de fissure initiale sous chargement à amplitude variable . . . . .	232
3.7.1. Description de la méthodologie . . . . .	233
3.7.1.1. Etape 1 : description des résultats expérimentaux . . .	234
3.7.1.2. Etape 2 : détermination de la taille de la fissure initiale	234
3.7.1.3. Etape 3 : détermination de la durée de vie sous chargement à amplitude variable . . . . .	235
3.7.1.4. Etape 4 : établissement des courbes S-N pour le chargement à amplitude variable. . . . .	235
3.8. Propagation de courte fissure en présence de gradient de contraintes . . . . .	236
3.8.1. Etude paramétrique sur éprouvette en mode I d'ouverture de l'entaille . . . . .	239
3.8.2. Application au cas d'assemblage soudé . . . . .	241
3.8.3. Conclusion et extensions futures . . . . .	242
3.9. Approche probabiliste de la durée de vie à la propagation en fatigue : fiabilité-rupture. . . . .	243
3.9.1. Modélisation du retard dû à l'application d'une surcharge .	248
3.9.2. Evolution de la probabilité de défaillance. . . . .	249
3.9.3. Etude de sensibilité en termes fiabilistes . . . . .	250
3.9.4. Inspection et fiabilité/rupture. . . . .	251
<b>Conclusion . . . . .</b>	<b>255</b>
<b>Bibliographie . . . . .</b>	<b>259</b>
<b>Références . . . . .</b>	<b>283</b>
<b>Index . . . . .</b>	<b>287</b>

## MATÉRIAUX

Le traité Mécanique et Ingénierie des Matériaux répond au besoin de disposer d'un ensemble complet des connaissances et méthodes nécessaires à la maîtrise de ce domaine.

Conçu volontairement dans un esprit d'échange disciplinaire, le traité MIM est l'état de l'art dans les domaines suivants retenus par le comité scientifique :

Géomécanique

Matériaux

Environnement et risques

Chaque ouvrage présente aussi bien les aspects fondamentaux qu'expérimentaux. Une classification des différents articles contenus dans chacun, une bibliographie et un index détaillé orientent le lecteur vers ses points d'intérêt immédiats : celui-ci dispose ainsi d'un guide pour ses réflexions ou pour ses choix.

Les savoirs, théories et méthodes rassemblés dans chaque ouvrage ont été choisis pour leur pertinence dans l'avancée des connaissances ou pour la qualité des résultats obtenus.

