

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

– جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان –

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention de **diplôme de Master**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Par : CHEMANI Omar

Sujet :

Etude de l'effet de contrainte résiduelles dues à l'expansion à froid sur la propagation de fissures de fatigue d'alliage d'aluminium

Soutenu publiquement le /09/2020, devant le jury composé de :

| | | | |
|-----------------|------|--------------|---------------|
| Mr. Hadjoui F | MC-B | Univ.Tlemcen | Président |
| Mr. Benachour M | Pr | Univ.Tlemcen | Encadreur |
| Mme.Benachour N | | Univ.Tlemcen | Co- Encadreur |
| Mr. Sebaa F | MC-A | Univ.Tlemcen | Examineur |

Année universitaire : 2019/2020

RESUME

L'endommagement par fatigue des matériaux conduit à leur dégradation progressive due aux sollicitations appliquées, variables au cours du temps. Il est responsable de près de 90% des cas de défaillance des systèmes mécaniques.

Les trous de fixation et plus précisément les trous de rivetage présentent des sites de concentration de contrainte et en conséquence des sites d'amorçage et de propagation des fissures de fatigue. Afin d'améliorer le comportement en fatigue des structures trouées, des contraintes résiduelles de compression sont induites au tour de trou par processus d'expansion à froid. Ces contraintes résiduelles tendent à créer un retard et on conséquent prolonger la durée de vie à la propagation. L'objectif de ce mémoire est de prédire la durée de vie résiduelle en fatigue des plaques trouées pré-fissurées en alliage d'aluminium 2024 T351 pour un degré d'expansion de 6.6%. Les résultats montrent un effet bénéfique des contraintes résiduelles de compression autour du trou sur la durée de vie résiduelle de propagation. De plus, L'effet du rapport de charge sur la durée de vie résiduelle et la vitesse de fissuration a été étudié

Mots clés : Fissuration par fatigue, expansion à froid, contraintes résiduelles, propagation de fissures.

Abstract

Fatigue damage to materials leads to their progressive degradation due to the applied stresses, which vary over time. It is responsible for almost 90% of all mechanical system failures.

The fastening holes and more specifically the riveting holes present sites of stress concentration and consequently sites of the initiation and propagation of fatigue cracks. In order to improve the fatigue behavior of hole structures, residual compressive stresses are induced around the hole by a cold expansion process. These residual stresses tend to create a delay and consequently extend the propagation life.

Keywords: fatigue, residual stress, crack initiation, crack propagation, cold expansion.

ملخص

يؤدي تلف المواد الناتج عن الإجهاد إلى تدهورها التدريجي بسبب الضغوط المطبقة، والتي تختلف بمرور الوقت. إنها مسؤولة عما يقرب من 90٪ من جميع حالات فشل النظام الميكانيكي.

تظهر فتحات التثبيت، وبشكل أكثر تحديداً، فتحات التثبيت، مواقع تركيز الإجهاد، وبالتالي مواقع بدء وانتشار شقوق التعب. من أجل تحسين سلوك إجهاد هياكل الثقب، يتم إحداث ضغوط الضغط المتبقية حول الثقب من خلال عملية التمدد البارد. تميل هذه الضغوط المتبقية إلى حدوث تأخير وبالتالي إطالة عمر الانتشار.

الكلمات المفتاحية: الإجهاد، الإجهاد المتبقي، بدء الشقوق، انتشار الشقوق، التمدد البارد.

REMERCIEMENTS

*Tout d'abord, je remercie **ALLAH** le tout puissant pour ces faveurs et ses bontés, de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de terminer ce modeste travail.*

*Je tiens à adresser mes vifs remerciements à mon encadreur monsieur **BENACHOUR Mustapha** Professeur au département de génie mécanique (faculté de technologie- université Abou Bakr BELKAID-Tlemcen) d'avoir accepté de diriger ce travail ainsi que pour son entière disponibilité, soutien et ses précieux conseils durant toute la période de l'élaboration de ce travail.*

*Mes remerciements vont aussi à mon co-encadreur madame **BENACHOUR Nadja**.*

*C'est un honneur pour moi que Monsieur **HADJOUI Fethi** Maitre de conférences à l'université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen, qui a accepté de présider le jury.*

*Je remercie également messieurs **SEBAA Fethi** maitre de conférences au Département de génie mécanique (Faculté des technologie - université Abou Bakr BELKAID de Tlemcen) qu'ils ont accepté d'examiner et évaluer le contenu scientifique de ce mémoire.*

DÉDICACE

*Avec beaucoup de respect et d'amour Je dédie ce
modeste travail à :*

*Ma mère pour tous les sacrifices, les efforts
prodigieux, a consentie pour moi qu'elle trouve ici le
témoignage de mon profond amour et respect.*

*Mon père pour le soutien les efforts et les conseils
qu'il m'a apporté durant toutes les années d'études. A*

mes frères.

Ma sœur.

Mes amis.

*Je dédie cet humble travail à toute la famille
universitaire.*

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I :

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1.1: origine de rupture autour des coins d'hublot rectangulaire | 5 |
| Figure 1.2: Propagation d'une fissure de fatigue amorcée au coin d'un hublot au cours d'un essai de fatigue sur un avion Comet I | 5 |
| Figure 1.3: Différents niveaux de classification des lois d'endommagement en fatigue | 8 |
| Figure 1.4: Différents stades de fissuration par fatigue | 9 |
| Figure 1.5: Illustration des différents stades de rupture par fatigue. | 9 |
| Figure 1.6: Formes de chargements cycliques..... | 10 |
| Figure 1.7: Nature des contraintes en fonction de rapport de charge. | 10 |
| Figure 1.8: Différents site d'amorçage | 11 |
| Figure 1.9: passage de stade I stade II | 12 |
| Figure 1.10: Les mode de rupture | 13 |
| Figure 1.11: Fissure en mode I - Etat de contrainte au niveau de la pointe de la fissure | 14 |
| Figure 1.12 : Distribution des contraintes en pointe de fissure (Zone plastique). | 27 |
| Figure 1.13 : Représentation schématique des différents régimes de propagation..... | 27 |

CHAPITRE II :

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 2.1: Définition schématique des contraintes résiduelles d'ordre I, II et III dans un domaine couvrant plusieurs grains | 23 |
| Figure 2.2: Origine des contraintes résiduelles. Interdépendance entre les différents états du matériau..... | 25 |
| Figure 2.3: méthode d'expansion de trou (a) par bill (b) mandrin (c) par manchon fondu. | 27 |
| Figure 2.4: phénomène de génération des contraintes résiduelles par expansion de trou (a) contrainte âpre perçage (b) au cours de l'expansion (c) après le retrait de l'outil de l'expansion | 28 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 2.5: Effet des contraintes résiduelles par préchargement mécanique sur la durée de vie à l'amorçage de l'alliage d'aluminium 2024 T351 [12]. | 29 |
| Figure 2.6: Influence du degré d'expansion sur la durée à la rupture de l'alliage d'aluminium LY 12-CZ. | 30 |
| Figure 2.7: Effet du processus d'expansion sur la fissuration par fatigue de l'alliage 2024 T3 (a) Trou non expansé (b) Trou expansé. | 31 |
| Figure 2.8: Effet du degré d'expansion sur la durée de vie à la rupture par fatigue de l'alliage de magnésium | 32 |
| Figure 2.9: Effet du degré d'expansion sur l'incrément de la durée de vie en fatigue de l'alliage d'aluminium 7050 T7451. | 32 |
| Figure 2.10: Effet du degré d'expansion sur la durée de vie à l'amorçage. | 33 |
| Figure 2.11: Effet des contraintes résiduelles de compression sur la durée de vie à l'amorçage et à la propagation de l'alliage 2024 T 351 | 34 |
| Figure 2.12: Effet du degré d'expansion sur la durée de vie en fatigue | 35 |
| Figure 2.13: Effet de l'expansion à froid sur la fissuration par fatigue de l'alliage d'aluminium 2024 T351 [21] (U : non expansé, C : expansé) | 35 |

CHAPITRE III :

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 3.1: Modèle géométrique pour la prédiction du comportement en fatigue [4] | 41 |
| Figure 3.2 : Distribution des contraintes résiduelles σ_{xx} pour DCE=6.6% [4]. | 42 |
| Figure 3.3: Contraintes résiduelles à travers l'épaisseur de la plaque | 43 |
| Figure 3.4: Effet du rapport de charge sur la durée de vie résiduelle de propagation dans la direction "c" | 45 |
| Figure 3.5: Effet du rapport de charge sur la durée de vie résiduelle de propagation dans la direction "a" | 45 |
| Figure 3.6: Effet du rapport de charge sur la vitesse de fissuration dans la direction "c" | 46 |
| Figure 3.7: Effet du rapport de charge sur la durée de résiduelle en présence des contraintes résiduelles (orientation "c") | 47 |
| Figure 3.8: Effet du rapport de charge sur la durée de résiduelle en présence des contraintes résiduelles (orientation "a") | 47 |

Figure 3.9: Effet du rapport de charge sur la vitesse de fissuration dans la direction "c" en présence des contraintes résiduelles dues à l'expansion du trou 49

Figure 3.10 : Effet du rapport de charge sur la vitesse de fissuration dans la direction "c" en présence des contraintes résiduelles dues à l'expansion du trou (orientation "a") .. 49

Figure 3.11 : Effet des contraintes résiduelles dues l'expansion sur la durée de vie en présence des contraintes résiduelles (orientation "c") pour R=0.3 51

Figure 3.12: Effet des contraintes résiduelles dues l'expansion sur l'évolution des vitesses de fissures en absence et en présence des contraintes résiduelles dues à l'expansion (orientation "c") pour R=0.3.....51

LISTE DES TABLEAU

Tableau 3.1: Paramètres de propagation de l'alliage d'aluminium 2024 T351.....41

SYMBOLES

E : Module de Young

R_e : Limite d'élasticité

R_m : Résistance (contrainte à la rupture)

ν : Coefficient de Poisson

a : Longueur de la fissure

a₀ : Longueur de la fissure initiale

σ : Contrainte

K : Facteur d'intensité de contraintes

G : Taux de restitution d'énergie

K_I : Facteur d'intensité de contrainte en mode I

K_C : Facteur d'intensité de contrainte critique

σ_{max} : Contrainte maximal

σ_{min} : Contrainte minimale

R : Rapport de charge

r_p : Rayon de la zone plastifiée

N : nombre de cycles

C et m : coefficients de la loi de Paris, qui correspondent au matériau étudié

$\frac{da}{dN}$: Vitesse de fissuration

K_{IC} : Ténacité du matériau

$\Delta\sigma$: Amplitude des contraintes

$\Delta\sigma_N$: Amplitude de contrainte nominale

ΔK_{th} : Amplitude du facteur d'intensité de contrainte seuil

ΔK_{eff} : Variation du facteur d'intensité de contrainte effective

ΔP : Amplitude de chargement

N_f : Nombre de cycles à la rupture

N_i : Nombre de cycles à l'initiation

SOMMAIRE

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| INTRODUCTION GENERALE | 1 |
| 1 Objectifs : | 1 |
| 2 Structure de mémoire : | 2 |
| CHAPITRE I : APPROCHE TEORIQUE DE L'ENDOMMAGEMENT PAR FATIGUE | 3 |
| 1ENDOMMAGEMENT PAR FATIGUE : | 4 |
| 1.1Introduction : | 4 |
| 1.2Classification des lois d'endommagement en fatigue : | 6 |
| 1.3Les différents types d'approche des lois d'endommagement en fatigue : | 6 |
| 1.4Les différentes échelles du dommage par fatigue : | 7 |
| 1.5Les bases physiques des lois d'endommagement en fatigue : | 7 |
| 2STADE D'ENDOMMAGEMENT PAR FATIGUE : | 8 |
| 2.1Amorçage des fissures : | 11 |
| 2.2Propagation de fissure : | 11 |
| 2.2.1Approche de la mécanique de la rupture : | 13 |
| 2.2.2Facteur d'intensité de contrainte et mode de rupture : | 13 |
| 2.2.3Distribution des contraintes au niveau de la pointe de la fissure : | 13 |
| 2.2.4Zone plastique au niveau de la pointe de la fissure : | 16 |
| 2.3Modélisation de la propagation des fissures de fatigue : | 17 |
| 2.3.1Lois de propagation : | 18 |
| 3REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 20 |
| CHAPITRE II : GENERATION DE CONTRAINTE RESIDUELLES PAR EXPANSION | 21 |
| 1CONTRAINTES RESIDUELLES | 22 |
| 1.1Définition : | 22 |
| 1.2Type de contraintes résiduelles : | 22 |
| 1.3Origine des contraintes résiduelles : | 24 |
| 1.4Analyse et détermination des contraintes résiduelles : | 26 |
| 1.4.1Méthodes destructives : | 26 |
| 1.4.2Méthodes non destructives : | 26 |
| 2METHODE DE GENERATION DES CONTRAINTE RESIDUELLES PAR EXPANSION : | 27 |
| 3EFFET DE CONTRAINTE RESIDUELLES PAR EXPANSION SUR LA PROPAGATION DES FISSURES DE FATIGUE : | 28 |
| 4REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE | 36 |
| CHAPITRE III : EFFET DE CONTRAINTE RESIDUELLE SUR L'AMORCAGE ET LA PROPAGATION DES FISSURE DE FATIGUE | 39 |
| 1Introduction | 40 |
| 2Modele geometrique ET PARAMETRES DE FISSURATION PAR FATIGUE | 40 |
| 3CHAMPS DE CONTRAINTE RESIDUELLES PAR EXPANSION | 41 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4EFFETS DES CONTRAINTES RESIDUELLES DUES A L'EXPANSION SUR LA FISSURATION PAR FATIGUE | 43 |
| 4.1Effet du rapport de charge en absence des contraintes résiduelles : | 44 |
| 4.2 Effet du rapport de charge en présence des contraintes résiduelles absence des contraintes résiduelles : | 46 |
| 4.3Influence des contraintes résiduelles dues à l'expansion sur la fissuration par fatigue | 50 |
| 5REFERENCES | 52 |
| CONCLUSION GENERALE | 54 |

INTRODUCTION GENERALE

1 Objectifs :

La fatigue est un processus d'endommagement local d'une pièce mécanique sous l'effet d'efforts variable (vibration, forces appliquées etc.) au cours de temps. Il est responsable de près de 90% des cas de défaillance des systèmes mécaniques. Son évolution quantitative est liée à la définition de la variable choisie pour représenter ce phénomène. Les structures aéronautiques représentent l'une des structures qui sont soumises aux phénomènes de fatigue sous chargement complexes.

Parmi les paramètres influençant le comportement en fatigue des matériaux et des structures, les contraintes résiduelles générées par différentes sources dont leur rôle est prépondérant. L'objectif de ce mémoire est l'étude de l'effet des contraintes résiduelles dues à l'expansion à froid sur la propagation des fissures de fatigue d'alliage d'aluminium 2024 T351. L'effet du rapport de charge est étudié sur l'évolution de la durée de vie et la vitesse de la propagation.

Le processus d'expansion à froid consiste à faire passer un mandrin conique ou une bille à travers un trou. Le processus d'expansion tend à réduire les concentrations de contraintes et en conséquence réduire le facteur de concentration de contrainte à la fatigue et prolonger la durée de vie en fatigue. En cas d'apparition de fissure les vitesses de propagation seront réduites ce qui laisse le temps de conduire une opération de maintenance ou changement d'organes mécaniques.

2 Structure de mémoire :

Ce mémoire est devisé en trois chapitres :

Le premier chapitre fait l'objet d'une étude sur l'approche théorique de l'endommagement par fatigue et les modelés de prédictions des durées de vie et vitesse de fissuration.

Le deuxième chapitre consiste sur l'état de l'art de l'effet de contrainte résiduelles dues à l'expansion à froid sur la propagation des fissures de fatigue.

Le troisième chapitre consiste à étudier l'effet de la présence des contraintes résiduelles autour de trous préfissurés sur la durée de vie résiduelle et la vitesse de propagation sous la variation du rapport de charge.

**CHAPITRE I :
APPROCHE TEORIQUE
DE L'ENDOMMAGEMENT
PAR FATIGUE**

1 ENDOMMAGEMENT PAR FATIGUE :

1.1 Introduction :

L'endommagement par fatigue d'un matériau est un phénomène physique que l'on peut appréhender qualitativement et quantitativement par la mesure de certaines propriétés physiques (comme la résistance électrique par exemple) et mécaniques (caractéristiques monotones, cycliques, etc...) du matériau. Les variables d'endommagement couramment utilisées pour exprimer le dommage par fatigue sont [1] :

- Les variables liées à la sollicitation : ce sont les contraintes et les déformations qui traduisent le chargement appliqué au composant mécanique,
- Les caractéristiques mécaniques monotones (ν , E , σ_e , R_m , R_u) et cycliques (σ_D , N_r ...). Ces caractéristiques, qui par essence sont intrinsèques au matériau, peuvent être modifiées en fonction de la nature de la sollicitation,
- Les paramètres d'influence : ils regroupent les coefficients d'écrouissage cyclique, les facteurs d'échelle, d'état de surface, de gradient de contrainte et de triaxialité des contraintes,
- Les paramètres de service : ces derniers traduisent les conditions du fonctionnement du composant mécanique (température, surcharge, fréquence de la sollicitation, agressivité du milieu, etc...). La plupart de ces paramètres servent à définir les conditions initiales et finales du problème.

L'étude de ce phénomène d'endommagement prend une allure importante depuis les années 50 suite aux accidents dans le domaine d'aéronautique, nucléaire, ferroviaire, transport de gaz et pétrole, ...etc. Parmi les accidents importants on cite l'écrasement du Havilland Comet I (Figure 1.1) dont l'origine de cet accident est l'amorçage et la propagation de fissures de fatigue au niveau des coins des hublots. La figure 1.2 montre une fissure de fatigue amorcée au coin d'un hublot au cours d'un essai de fatigue sur un avion Comet I [2].

CHAPITRE I : APPROCHE THEORIQUE DE L'ENDOMMAGMENT PAR FATIGUE

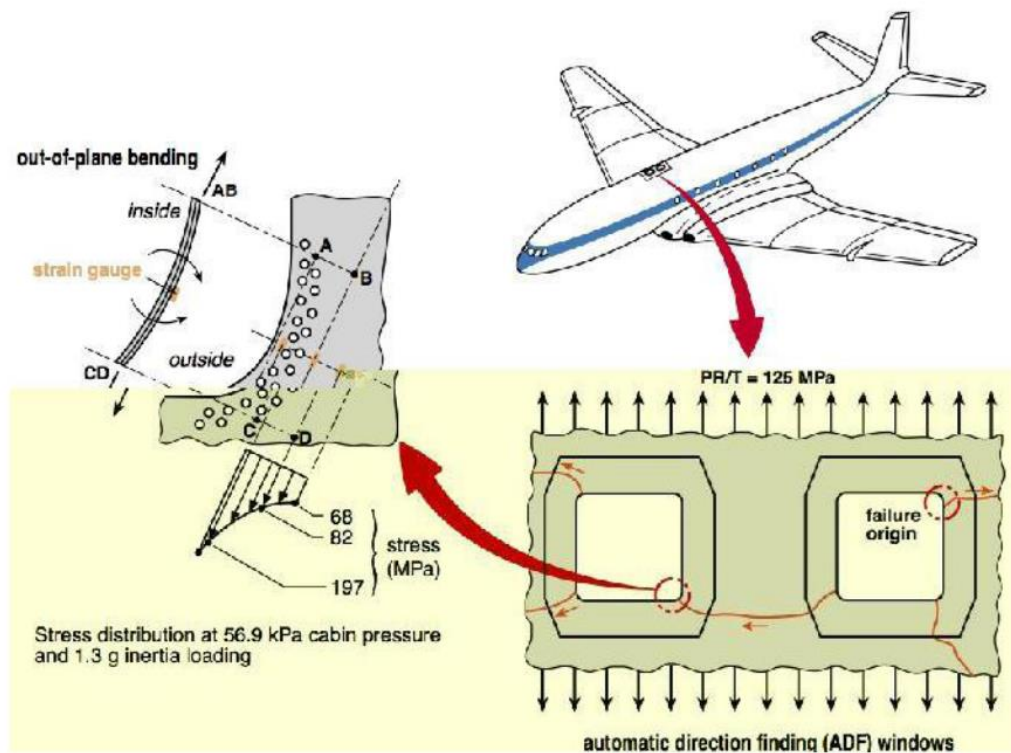


Figure 1.1 : origine de rupture autour des coins d'hublot rectangulaire [2]

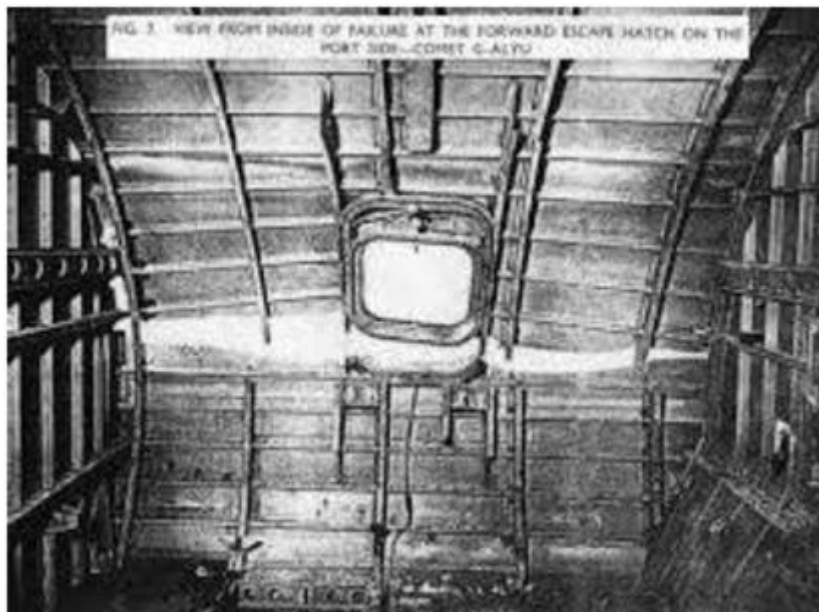


Figure 1.2 : Propagation d'une fissure de fatigue amorcée au coin d'un hublot au cours d'un essai de fatigue sur un avion Comet I [2]

1.2 Classification des lois d'endommagement en fatigue :

Pour mener l'étude des lois d'endommagement en fatigue recensées dans la littérature nous les avons classées en plusieurs modèles suivant leurs bases physiques et leurs concepts. Nous avons défini pour cela trois niveaux de classement : le type d'approche de la loi, l'échelle du dommage par fatigue et la base physique de la loi [1].

1.3 Les différents types d'approche des lois d'endommagement en fatigue :

Les lois d'endommagement en fatigue appartiennent à l'une ou l'autre des quatre approches suivantes, qui caractérisent en fait la démarche scientifique utilisée pour décrire le dommage par fatigue [1] :

- ✓ L'approche empirique : les lois relevant de cette approche reposent sur des résultats expérimentaux obtenus pour des sollicitations et des matériaux spécifiques. C'est le cas principalement des lois d'endommagement développées avant 1970,
- ✓ L'approche phénoménologique : ces lois se sont développées avec les progrès techniques qui permettent d'observer et de mesurer avec une grande précision certains paramètres indicateurs du dommage tels que les extrusions, les bandes de glissement, la longueur de fissure, etc... Elles tentent d'expliquer au mieux le mécanisme d'endommagement du matériau à l'aide de l'évolution de ces paramètres,
- ✓ L'approche dite conceptuelle : les lois de cette catégorie ont la particularité d'émettre des postulats (couche superficielle durcie du métal), notion de contrainte interne inférieure à la contrainte réellement appliquée, déformation plastique cumulée représentative du dommage du matériau. Elles sont d'une certaine façon à mi-chemin entre l'approche phénoménologique et l'approche analytique,
- ✓ L'approche analytique : on retrouve ici les lois élaborées à partir des théories de la mécanique des solides. Les lois entrant dans cette catégorie s'appuient sur des critères de résistance, sur l'énergie de déformation, sur la plasticité ou d'autres caractéristiques de la loi de comportement.

1.4 Les différentes échelles du dommage par fatigue :

L'endommagement par fatigue d'un solide est, par définition, l'altération progressive de ses propriétés physiques et mécaniques pouvant conduire à sa rupture suite à l'application d'une sollicitation fluctuante. Ce phénomène est quantifié le plus souvent par la mesure de la longueur de la fissure amorcée et qui se propage. Deux niveaux d'échelles de mesure sont utilisés par les auteurs : les fissures microscopiques (ou petites fissures) pour traduire un dommage à l'échelle microscopique et les fissures macroscopiques pour le dommage à l'échelle macroscopique [1].

1.5 Les bases physiques des lois d'endommagement en fatigue :

Quelles que soient son approche et son échelle, chaque loi d'endommagement en fatigue a une base (ou une justification) physique spécifique. Parmi l'ensemble des lois recensées, nous distinguons cinq types ou modèles de bases physiques [1] :

- ✓ Les modèles d'énergie de déformation : les lois d'endommagement développent des théories basées ici sur les énergies de déformation. Elles présentent l'avantage de tenter de concilier les endommagements d'origines diverses : le fluage, la thermique et la fatigue.
- ✓ Les modèles de propagation de fissure : ils permettent notamment de décrire les phénomènes de retard de propagation et revêtent un intérêt marqué dès lors que la croissance du dommage est directement liée à l'évolution des paramètres physiques de la propagation, comme l'accroissement de la longueur de fissure par exemple. Ils relèvent en général de la mécanique linéaire de la rupture et sont pour l'essentiel basés sur l'intégration d'une expression de la vitesse de propagation de la fissure, parfois en prenant en compte l'interaction des niveaux de charges successifs et les dimensions, changeantes, de la partie de l'éprouvette non fissurée.
- ✓ Les modèles de variation de la limite d'endurance du matériau : ces modèles postulent une évolution de la limite d'endurance du matériau au cours de sa vie, fonction des niveaux successifs du chargement et de leur interaction.

CHAPITRE I : APPROCHE THEORIQUE DE L'ENDOMMAGEMENT PAR FATIGUE

- ✓ Les modèles d'évolution de courbe S-N du matériau : ces modèles sont également basés sur une interaction des niveaux successifs du chargement. Ils introduisent une modification des courbes S-N du matériau, cette modification étant liée aux niveaux de contrainte rencontrés et à leur ordre d'apparition (effet de séquence). La différence avec la catégorie précédente de modèles est que la limite d'endurance du matériau n'est pas la seule donnée de fatigue affectée, c'est toute la courbe S-N qui est modifiée ici.
- ✓ Les modèles d'endommagement continu, lesquels sont souvent associés à une déformation plastique cumulée. Initiés au départ pour décrire le phénomène du fluage, ils ont été étendus au dommage par fatigue.

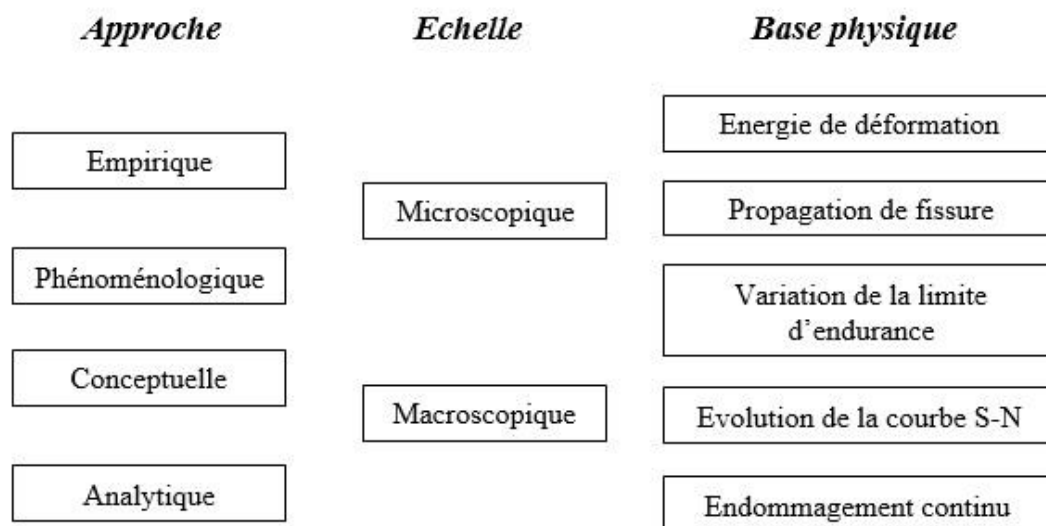


Figure 1.3 : Différents niveaux de classification des lois d'endommagement en fatigue

2 STADE D'ENDOMMAGEMENT PAR FATIGUE :

Les études des mécanismes de rupture par fatigue à travers les examens macroscopiques et microscopiques (analyse fractographique) ont permis aux chercheurs de découpler les phases d'endommagement par fatigue en trois phases distinctes :

- Phase d'initiation ou amorçage : Correspond à l'apparition des microfissures au niveau du matériau et à leur croissance difficile à prédire dans le volume du matériau en question.

CHAPITRE I : APPROCHE THEORIQUE DE L'ENDOMMAGEMENT PAR FATIGUE

- Phase de fissuration ou propagation : Correspond à l'accroissement stable des microfissures amorcées dans le matériau et dépend des charges appliquées.
- Phase de rupture brutale : correspond à la propagation instable où les fissures ont atteint une taille critique liée à la capacité de résistance du matériau

Les différentes phases d'endommagement peuvent être schématisées par le processus donné par la figure 1.4. Forsyth (Forsyth, 1963) fut le premier à identifier les stades de fissuration où le premier stade correspond au développement de contraintes de cisaillement inclinée par rapport à la direction de chargement (Figure 1.5). Après le stade I on est en présence d'un stade transitoire reliant le stade I au stade II. Le stade II est caractérisé par l'orientation perpendiculaire de la fissure par rapport au chargement [2].

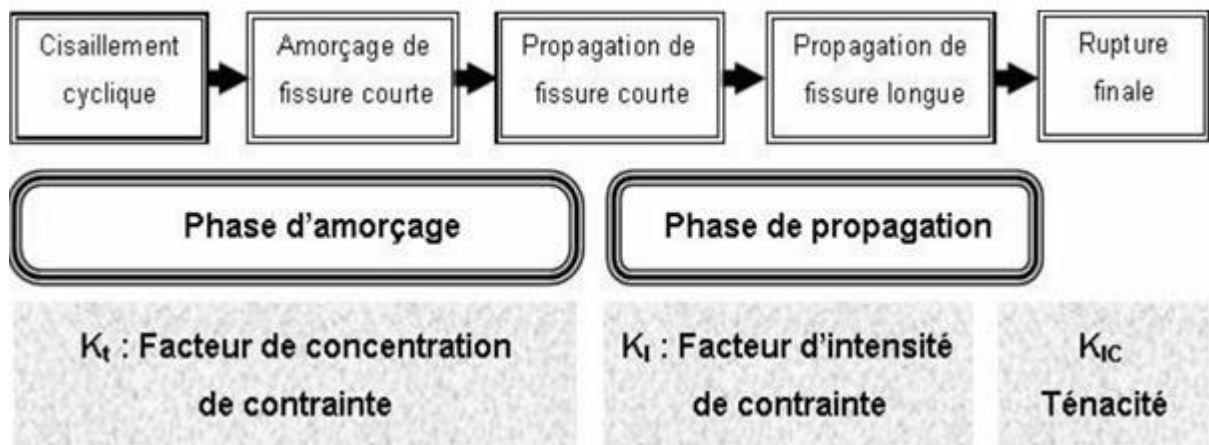
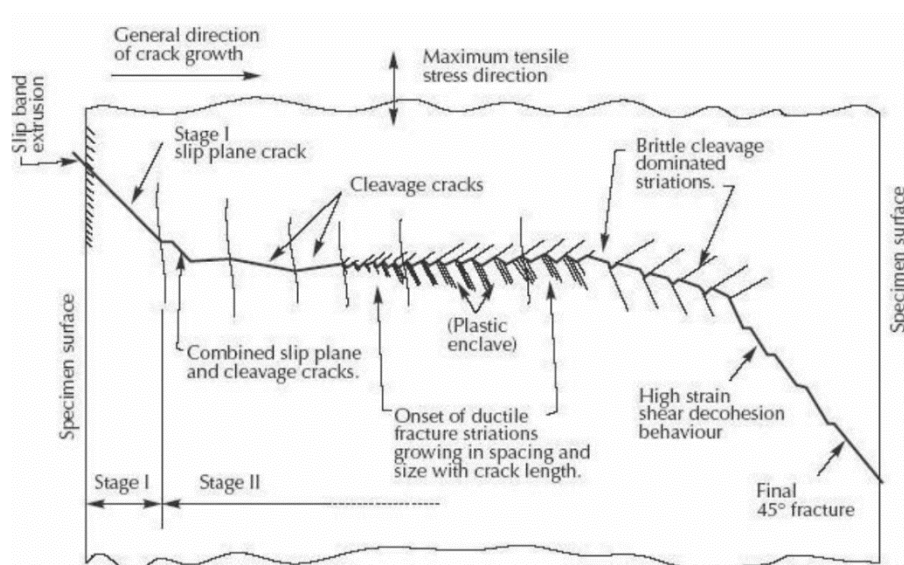


Figure 1.4 : Différents stades de fissuration par fatigue [3]



CHAPITRE I : APPROCHE THEORIQUE DE L'ENDOMMAGNEMENT PAR FATIGUE

Figure 1.5 : Illustration des différents stades de rupture par fatigue [4].

Le chargement cyclique appliqué peut prendre plusieurs formes : chargement à amplitude constant, amplitude variable ou aléatoire (figure 1.6). Le cycle de chargement est défini par le chargement maximal, le chargement minimal, la contrainte moyenne et l'amplitude de contrainte. Pour des chargements cycliques à amplitude constant, le rapport charge minimale charge maximale définit le rapport de charge R (figure I.7) [2].

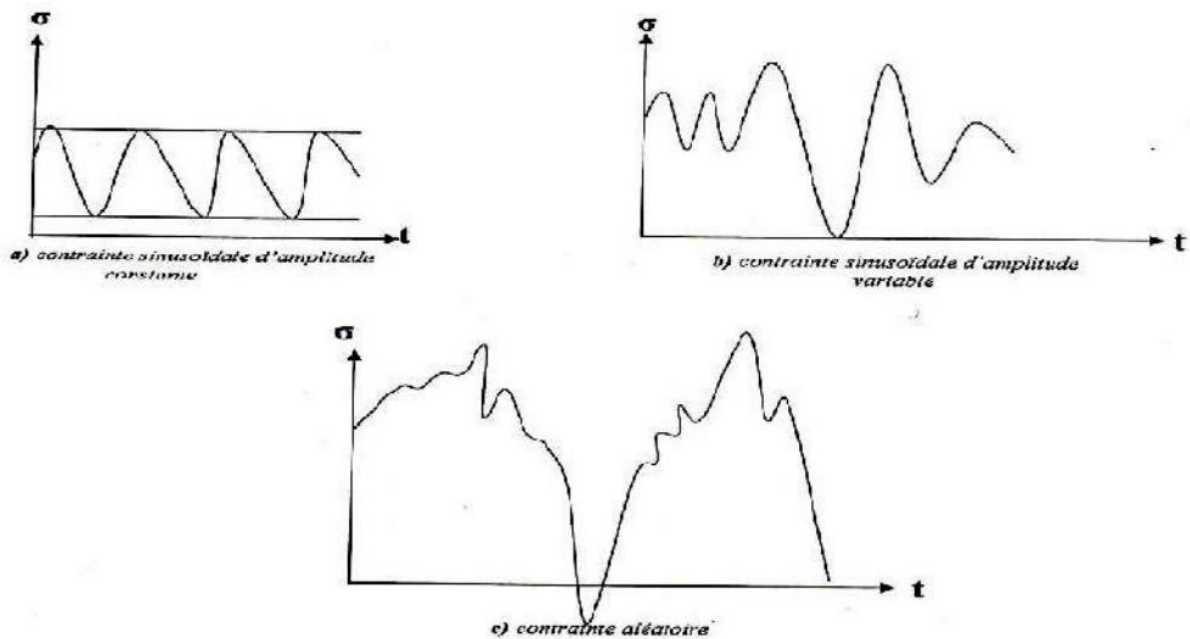


Figure 1.6 : Formes de chargements cycliques

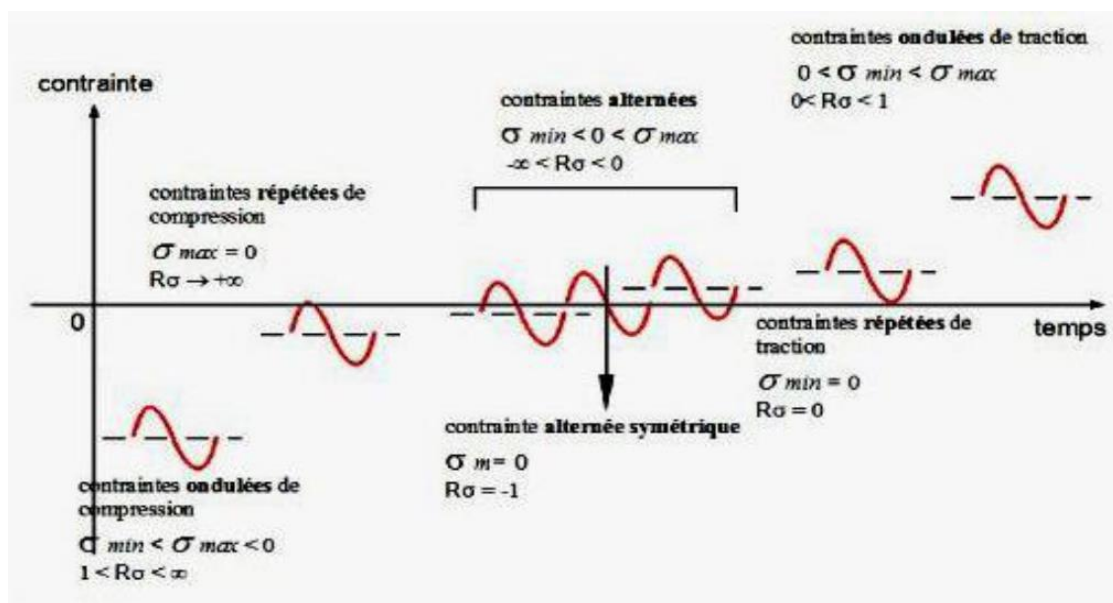


Figure 1.7 : Nature des contraintes en fonction de rapport de charge [2].

2.1 Amorçage des fissures :

On considère que les bandes persistence de glissement constitue les sites préférentiels d'amorçage pour les matériaux macroscopiquement isotropes. Les fissures tendent alors se former à l'interface entre bande de glissement et la matrice. Ces Observations ont essentiellement été menées sur des monocristaux de cuivre ou d'aluminium. Dans les polycristaux les extrusions sont marquées et la fissure apparait généralement au sein de la bande persistante. La figure 1.8 présente toutefois les différents sites d'amorçage possibles, à savoir amorçage transgranulaire (i) ou intergranulaire (ii) voire sur une porosité. Retassure ou inclusion (iii). Les deux premiers correspondent un amorçage lié aux bandes persistantes de glissement en surface. Le troisième mode d'amorçage se rencontre sur certains alliages industriels. Il existe également des sites d'amorçage aux inclusions (iv). Sur des microvides aux joints de grain (v) Ou des intersections de joints de grain (vi) [5].

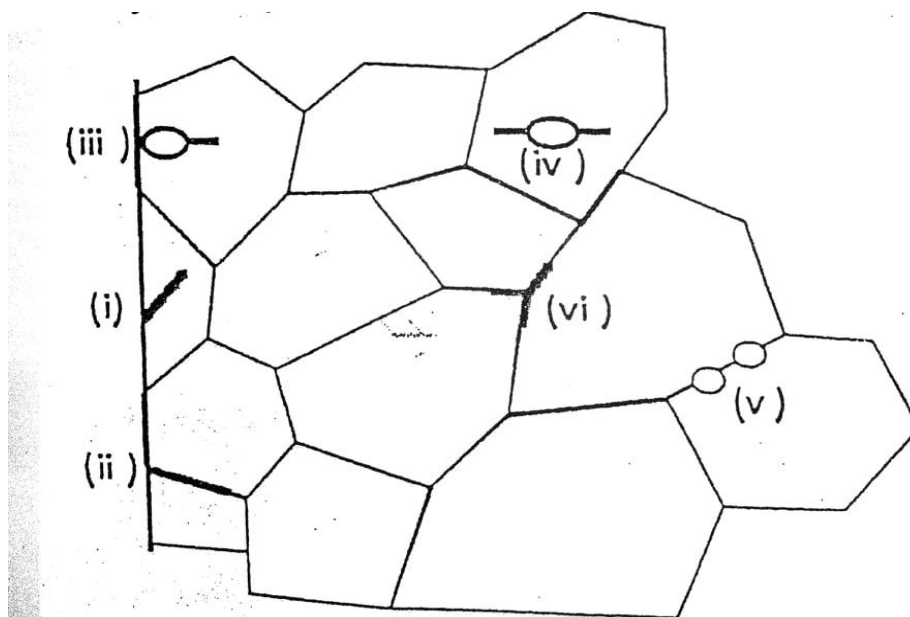


Figure 1.8 : Différents site d'amorçage [5]

2.2 Propagation de fissure :

Une fois que les fissures se sont amorcées elles peuvent éventuellement se propager sous l'action de sollicitation. Dans les polycristaux les joints de grain peuvent parfois servir de barrière pour gêner la propagation des microfissures D'un autre côté. À haute température ou en présence d'un environnement corrosif par exemple, les fissures peuvent également se propager suivant les joints de grain.

En chargement uniaxial la contrainte maximale de cisaillement se situe sur les plans dont la normale fait un angle de 45° par rapport à la direction d'application de la charge. Par conséquent les microfissures auront tendance à s'amorcer suivant ces mêmes plans (figure 1.9). Si l'on poursuit le certaines de ces fissures vont se propager suivant ces bandes de glissement jusqu'à ce qu'une fissure principale se dégage. Cette fissure principale change alors de direction de propagation pour se propager suivant un plan macroscopiquement perpendiculaire à l'axe de sollicitation. Cette transition d'un régime cristallographique (stade I) à un mode non cristallographique (stade II) se fait à travers quelques grains. La durée du stade I dépend de la microstructure mais est généralement de l'ordre de quelques grains [5].

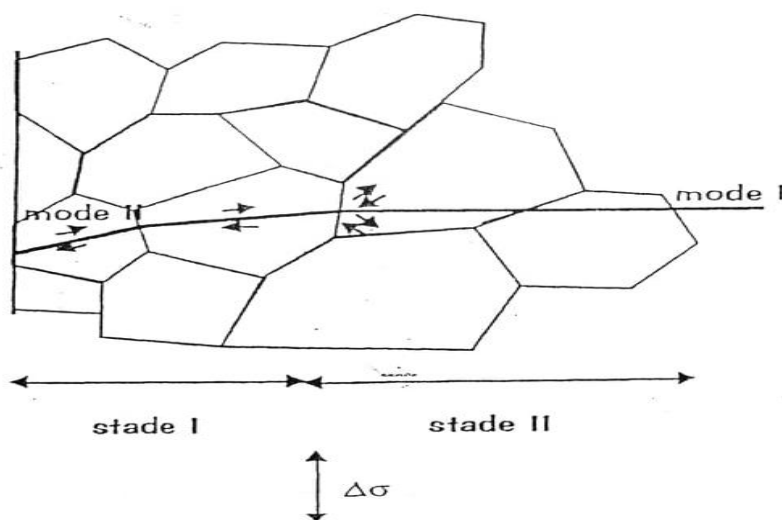


Figure 1.9 : passage de stade I stade II [5]

2.2.1 Approche de la mécanique de la rupture :

La mécanique de la rupture présente un outil le plus adéquat pour décrire la propagation de fissures de fatigue. La fissuration par fatigue est régie par des lois exprimant la variation de la longueur de la fissure par cycle, da/dN , en fonction de variables prenant en compte le chargement appliqué, la géométrie de la structure et la longueur de la fissure. Parmi ces variables, on distingue le facteur d'intensité de contraintes "K", et le taux de restitution d'énergie "G", le chargement cyclique appliqué (rapport de charge, amplitude de chargement, surcharge...), la microstructure, la fréquence [6]

2.2.2 Facteur d'intensité de contrainte et mode de rupture :

La rupture d'un composant mécanique se produit par fissuration du matériau selon l'un ou une combinaison des trois modes élémentaires décrits ci-dessous (figure 1.9)

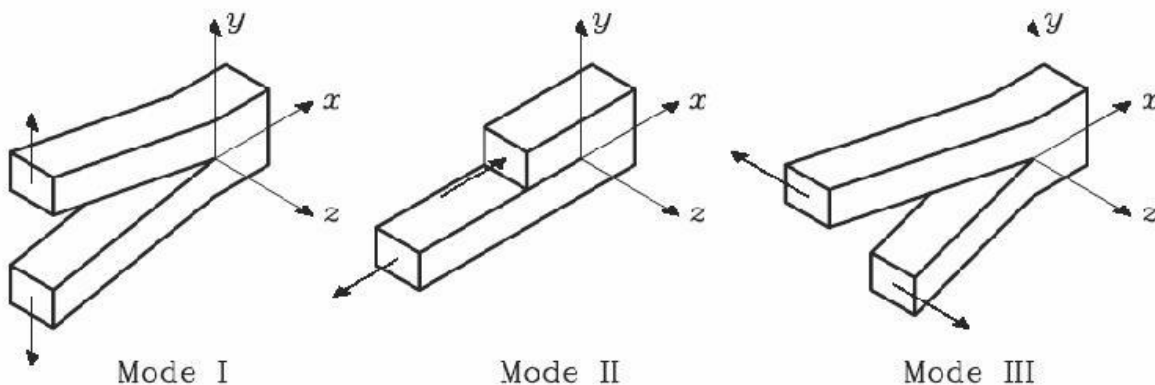


Figure 1.9 : Les mode de rupture [5]

Mode 1 : mode par ouverture

Mode 2 : mode glissement de translation

Mode 3 : mode glissement de rotation

2.2.3 Distribution des contraintes au niveau de la pointe de la fissure :

Le champ des contraintes au voisinage de la pointe de fissure (Figure 1.10) est donné dans le cadre de l'élasticité linéaire par l'équation de Westergaard [7].

CHAPITRE I : APPROCHE THEORIQUE DE L'ENDOMMAGEMENT PAR FATIGUE

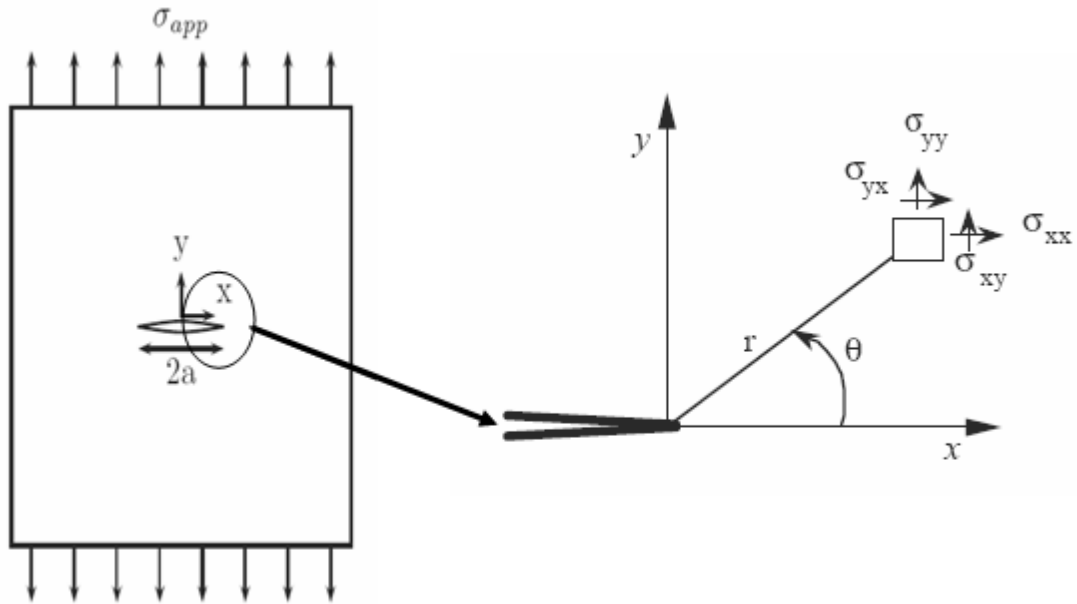


Figure 1.10 : Fissure en mode I - Etat de contrainte au niveau de la pointe de la fissure [7]

Le champ de contrainte pour une plaque sollicitée en mode I est décrit par le système d'équations 1 :

- $\sigma_{xx}(\theta) = \frac{KI}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right)$
- $\sigma_{yy}(\theta) = \frac{KI}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right)$
- $\sigma_{xy}(\theta) = \frac{KI}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(\sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right)$
(1.1)
- $\sigma_{zz}(\theta) = \nu (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$ CP
- $\sigma_{zz}(\theta) = 0$ DP

Où KI représente le facteur d'intensité de contrainte en mode I.

Le facteur d'intensité de contrainte "KI" est défini en fonction de la distribution des contraintes σ_{yy} par la relation :

$$K_I = \sqrt{2\pi} \lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{yy}(r, \theta) f^{1/2} \quad (1.2)$$

CHAPITRE I : APPROCHE THEORIQUE DE L'ENDOMMAGEMENT PAR FATIGUE

Le facteur K rassemble à lui seul l'influence de la dimension de la fissure, des forces appliquées et de la géométrie de la pièce fissurée.

Le succès de la mécanique de la rupture provient de ce que les conditions à l'extrémité de la fissure dépendent de ce seul et unique paramètre. Cela permet donc des comparaisons faciles entre éprouvette et structure : il suffit que K soit le même pour que l'état des contraintes à l'extrémité soit identique. Au moment de la rupture, en particulier, K atteint une valeur critique K_C qui est donc toujours la même et, par conséquent, caractéristique du matériau. Le facteur d'intensité des contraintes K ne doit pas être confondu avec le facteur de concentration de contraintes K_t qui donne la contrainte maximale sur un défaut de rayon de courbure non nul. K_t est d'ailleurs sans dimension, alors que « K » s'exprime en $\text{MPa} \sqrt{m}$ (unité pratique) [7].

D'après le critère de rupture d'Irwin, les champs de contraintes locaux autour de la pointe de fissure dans un matériau linéaire élastique peuvent être définis uniquement par le facteur d'intensité de contrainte K , et la rupture est censée intervenir lorsque ce facteur K dépasse une valeur critique K_C (caractéristique du matériau). Un coefficient de correction « β » doit être ajouté à l'expression de K , prenant en compte les dimensions finies et la géométrie de l'éprouvette, et qui est donné pour chaque type d'éprouvette sous forme d'une fonction polynomiale du rapport (a/w) où w désigne la largeur de l'éprouvette soit :

$$K_I = \beta \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi a} \quad (1.3)$$

Dans le cas d'un chargement cyclique entre σ_{\max} et σ_{\min} , l'amplitude du facteur K est définie par :

$$\Delta K = \beta (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \sqrt{\pi a} \quad (1.4)$$

Soit :

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = K_{\max} (1 - R) \quad (1.5)$$

Avec R le rapport de charge défini par

$$R = \frac{K_{\min}}{K_{\max}} \quad (1.6)$$

Lorsque l'éprouvette est soumise à un chargement croissant, on observe, pour une longueur de fissure donnée, une rupture sous la contrainte critique σ_c à laquelle

CHAPITRE I : APPROCHE THEORIQUE DE L'ENDOMMAGEMENT PAR FATIGUE

correspond la valeur critique du facteur d'intensité de contraintes K_{IC}. Celui-ci caractérise donc la résistance d'un matériau à la propagation brutale d'une fissure en mode I.

$$K_c = \beta \sigma_c \sqrt{\pi a} \quad (1.7)$$

Où σ_c est la valeur atteinte par la contrainte appliquée à la rupture.

La rupture aura lieu lorsque le facteur d'intensité de contrainte K atteint une valeur critique que l'on peut appeler K_C. La valeur K_C permet de quantifier la résistance à la rupture d'un certain matériau de construction mécanique. Généralement la majorité des études sur la rupture des matériaux ont été faite en mode I (mode le plus dangereux), on écrit :

$$K_I = K_{IC} \quad (\text{Conditions de déformation plane}) \quad (1.8)$$

2.2.4 Zone plastique au niveau de la pointe de la fissure :

La mécanique linéaire de la rupture prédise des contraintes infinies à l'extrémité d'une fissure aigue. Mais dans les métaux réels, les contraintes à l'extrémité d'une fissure restent finies car le rayon en fond de fissure n'est pas nul. Ces contraintes dépassent la limite élastique du matériau et une déformation plastique résultant, conduit à une relaxation des contraintes à l'extrémité de la fissure. La contrainte normale en contraintes plans en un point situé à une distance « r » de la pointe d'une fissure sollicité en mode I ($\theta = 0$) est égale à [7] :

$$\sigma_1 = \frac{KI}{\sqrt{\pi r}} \quad (1.9)$$

Irwin, sur l'hypothèse d'une zone plastifiée circulaire (figure 1.11), définit le rayon de la zone plastifiée par :

$$r_p = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_y^2} \quad (1.10)$$

La taille et la forme de la zone plastifiée dépendent essentiellement de l'état de contraintes.

Irwin propose pour un état de déformations planes la forme suivante :

$$r_p = \frac{K_I^2}{6\pi\sigma_y^2} \quad (1.11)$$

CHAPITRE I : APPROCHE THEORIQUE DE L'ENDOMMAGMENT PAR FATIGUE

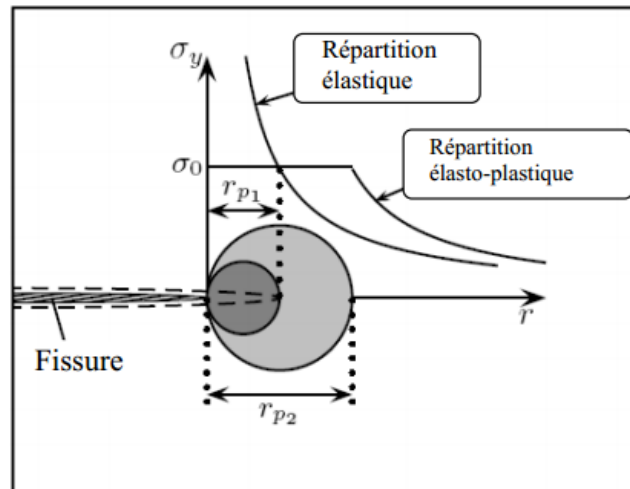


Figure 1.11 : Distribution des contraintes en pointe de fissure (Zone plastique) [7].

2.3 Modélisation de la propagation des fissures de fatigue :

Afin de prédire la vitesse et la direction de la propagation des fissures, il est possible de lier le taux de propagation (da/dN) à la variation ΔK , comme le montre la Figure (1.12).

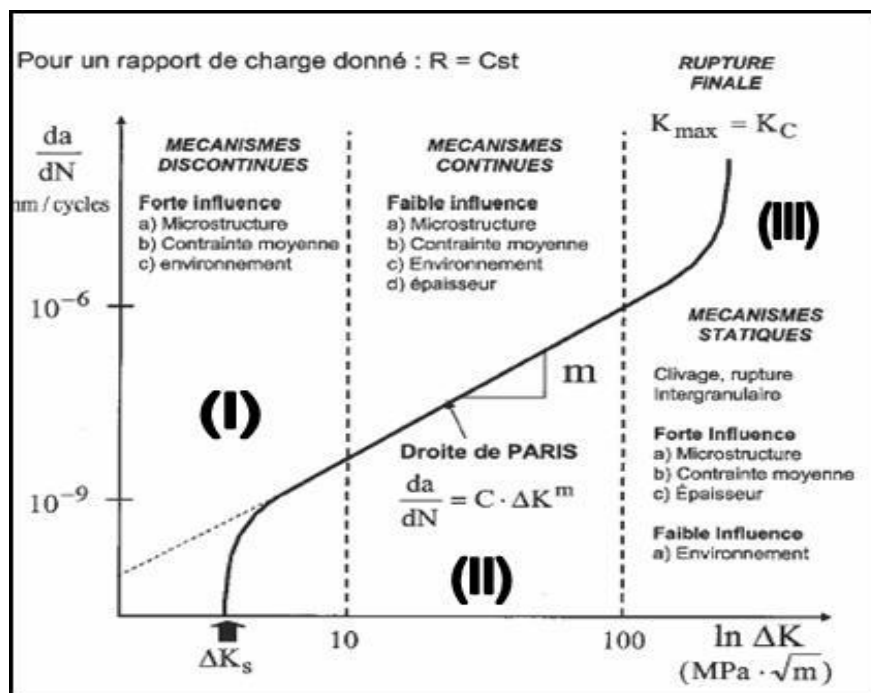


Figure 1.12 : Représentation schématique des différents régimes de propagation [6].

2.3.1 Lois de propagation :

La propagation de fissure peut être décrite suivant trois stades de propagation principaux :

- Stade I : micro propagation de fissure autour du seuil de fissuration K_s ;
- Stade II : domaine de Paris ;
- Stade III : la propagation s'accélère car K_{max} avoisine la valeur critique du FIC, K_{IC} . Au-delà de K_{IC} , il y a rupture instable.

La figure 1.12 décrit ces stades de la cinétique de propagation obtenue lors d'essais de fissuration en fatigue.

Les lois de propagation de fissure sont basées sur la relation entre le facteur d'intensité de contraintes et l'avancée de la fissure. La plus simple est la loi de Paris donnée ci-dessous. Cette loi exprime l'avancée de la fissure par cycle $\frac{da}{dN}$ en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes ΔK . Un cycle est un motif de contraintes étalé sur une plage de temps et qui est appelé à se reproduire de nombreuses fois :

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (1.12)$$

Avec :

a : profondeur de la fissure,

N : nombre de cycles,

C et m : coefficients de la loi de Paris, qui correspondent au matériau étudié.

Différents modèles régissant la propagation des fissures de fatigue ont été développés. Forman et Mettu [8] ont développés un modèle décrivant les trois domaines de fissuration par fatigue. Le modèle nommée équation de NASGRO est implémenté dans le code de calcul AFGROW pour prédire les durées de vie et les vitesses de fissuration. La vitesse de fissuration est exprimée par l'équation (1.12) incluant les trois domaines de fissurations [7] :

$$\frac{da}{dN} = C \left[\left(\frac{1-f}{1-R} \right) \Delta k \right]^n \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^P}{\left(1 - \frac{K_{max}}{K_{crit}} \right)^q} \quad (1.13)$$

3 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] NGARGUEUEDJIM Kimtangar (2003). "Contribution à l'étude des lois d'endommagement en fatigue ». Thèse de doctorat, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.
- [2] Frédéric Bron (2004). "Déchirure ductile des tôles minces en alliage d'aluminium 2024 pour application aéronautique". Thèse de Docteur de l'Ecole des Mines de Paris, France.
- [3] BENACHOUR Nadjia (2014). "Influence des effets de la géométrie des entailles sur l'amorçage et la fermeture des fissures". Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen.
- [4] P.J.E. Forsyth (1963), "Fatigue damage and crack growth in aluminium alloys". *Acta Metallurgica*, 11(7), pp 703–715.
- [5] BENACHOUR Mustapha (2018). "Rupture et endommagement par fatigue". Cours, Université de Tlemcen.
- [6] R.O. Ritchie (1977). Influence of microstructure on near-threshold fatigue-crack propagation in ultra-high strength steel. *Metal Science*, 11(8-9), pp 8-9.
- [7] H.M. Westergaard (1939). Bearing pressures and cracks. *Transactions ASME, Journal App. Mech.*, A 49.
- [8] R.G Forman, S.R Mettu. "Behavior of surface and corner cracks subjected to tensile and bending loads in Ti-6Al-4V alloy". *Fracture Mechanics 22nd Symposium*, Vol. 1, ASTM STP 1131, H.A. Saxena and D.L. McDowell, eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1992.

**CHAPITRE II :
GENERATION DE
CONTRAINTE
RESIDUELLES PAR
EXPANSION**

1 CONTRAINTES RESIDUELLES

1.1 Définition :

On définit généralement les contraintes résiduelles comme étant les contraintes qui subsistent dans les pièces mécaniques qui ne sont soumises à aucun effort extérieur. Tout procédé de fabrication introduit dans une pièce mécanique des contraintes résiduelles qui vont influencer son comportement en fatigue, en rupture et même en corrosion. Il existe peu de modes de mise en œuvre de matériaux qui n'engendrent pas un nouvel état de contraintes. Le rôle des contraintes résiduelles est donc très important pour concevoir une pièce mécanique [1].

1.2 Type de contraintes résiduelles :

Les contraintes résiduelles existent dans pratiquement toutes les pièces rigides, métalliques ou non (bois, polymère, verre, céramique, etc.). Elles traduisent l'histoire métallurgique le cas échéant et mécanique de chaque point et de l'ensemble de la pièce au cours de son élaboration. Elles existent à différents niveaux. On en distingue en général trois qui dépendent de l'échelle à laquelle on les observe [2] :

- **Contraintes résiduelles d'ordre macroscopiques (1er ordre) :** se situent à l'échelle d'un grand nombre de grains ou de la pièce mécanique. Elles sont accessibles à la mesure, par exemple à l'aide de jauges qui détectent les déformations qu'elles produisent et par diffraction des rayons X.
- **Contraintes dues à l'hétérogénéité et à l'anisotropie du cristal (grain) (2eme ordre) :** Lors d'une sollicitation mécanique (traction uniforme d'une éprouvette lisse par exemple), certains grains orientés favorablement atteindront avant d'autres la limite d'écoulement, ce qui provoquera une hétérogénéité du comportement lorsque la charge sera supprimée, les retours élastiques se feront donc différemment et plus ou moins librement suivant les grains, ce qui conduira ceux-ci dans des états de contraintes résiduelles non nulles. La moyenne cependant de ces contraintes, c'est-à-dire la résultante générale suivant l'axe de traction, sera nulle à la fin de l'essai (contrainte résiduelle d'ordre macroscopiques). Ce type de contraintes pourrait être mesuré par diffraction des rayons X ;

CHAPITRE II : GENERATION DES CONTRAINTES RESIDUELLES PAR EXPANSION

- **Contraintes à l'échelle du cristal (3^{ème} ordre)** : On atteint à ce niveau la limite de la notion de contraintes. Ce sont les actions créées par tous les types de défauts cristallins : lacunes, atomes interstitiels, atomes en substitution, dislocations, défauts d'empilement, macles, jusqu'aux joints de grains.

Ces trois types de contraintes résiduelles interviennent les unes sur les autres. Ce sont bien sûr les contraintes du premier ordre ou macro-contraintes qui intéressent les mécaniciens ou les bureaux d'études. Mais les contraintes résiduelles de 2^{èmes} ordres ont également très importantes, car elles sont l'indicateur de l'état d'écroutissage et d'endommagement du matériau [2].

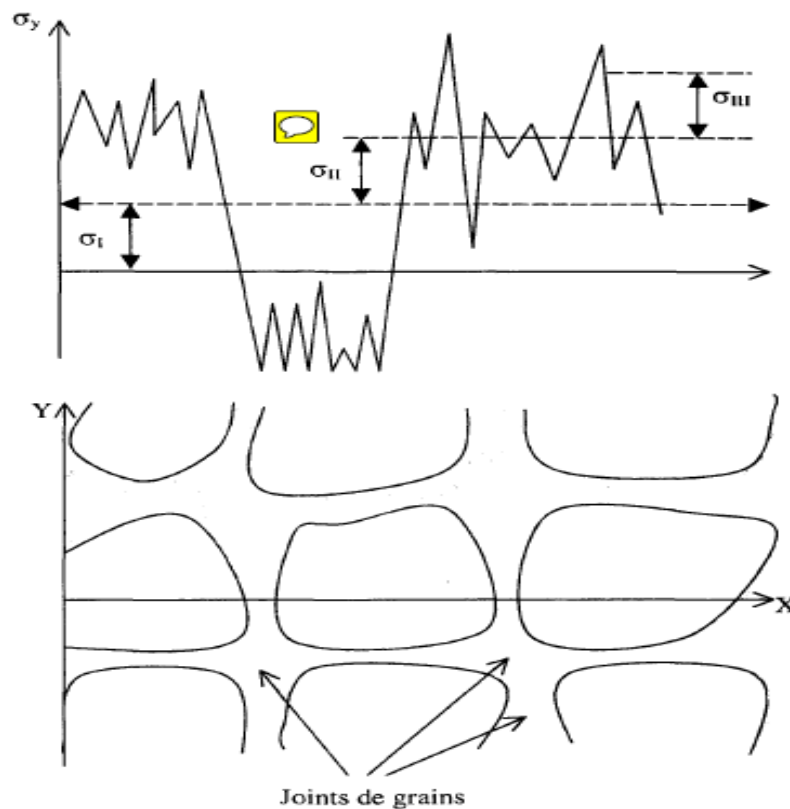


Figure 2.1 : Définition schématique des contraintes résiduelles d'ordre I, II et III dans un domaine couvrant plusieurs grains [3].

En général, il est très difficile de séparer les contraintes du 2nd et du 3^{ème} ordre, et le terme "micro contraintes" est défini par la somme des deux derniers ordres. Dans le cas

CHAPITRE II : GENERATION DES CONTRAINTES RESIDUELLES PAR EXPANSION

des matériaux réels, l'état de contraintes résiduelles résulte de la superposition des contraintes du 1er, 2nd et 3ème ordre.

1.3 Origine des contraintes résiduelles :

Les origines des contraintes résiduelles sont nombreuses et variées. Elles peuvent être séparées en trois catégories : mécanique, thermique et métallurgique, un exemple générique de leur génération peut être abordé par le problème d'incompatibilité du fait des hétérogénéités de déformation plastique entre les grains ou entre les phases d'un même polycristal. Ces différences de déformation créeraient des vides ou des recouvrements. Pour assurer la continuité du milieu, ceux-ci sont compensés par des déformations élasto-plastiques additionnelles qui sont à l'origine des contraintes résiduelles [4].

De cela, on peut définir la notion de contraintes résiduelles, liée au matériau par des déformations créées par les incompatibilités entre les grains, les constituants, les cristallites ou entre les phases du même matériau. Les contraintes résiduelles peuvent être générées lors de l'élaboration durant la solidification, les traitements thermomécaniques et thermiques, la mise en forme, l'usinage, l'assemblage, ou par sollicitation mécanique, thermique, chimique etc.

Des inclusions dans le matériau, des défauts structuraux (par exemple, dislocation, maclage, domaine ordonné, joints de grains, sous-joints de grains, interface de lamelles) peuvent engendrer des distorsions locales du réseau, causant une fluctuation du paramètre de la maille.

De manière générale, les contraintes résiduelles sont le résultat de l'activité des sources fondamentales suivantes agissant seules ou en combinaison (figure 2.2) [4].

CHAPITRE II : GENERATION DES CONTRAINTES RESIDUELLES PAR EXPANSION

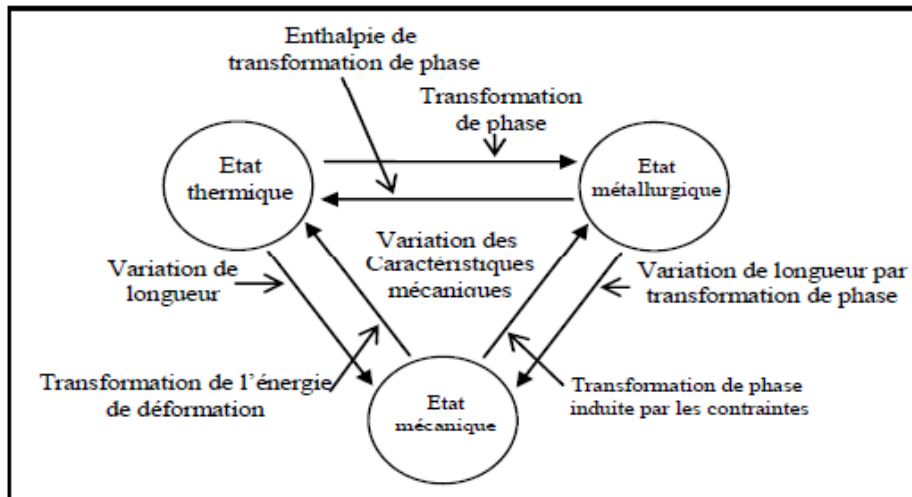


Figure 2.2 : Origine des contraintes résiduelles. Interdépendance entre les différents états du matériau [4].

Les contraintes résiduelles sont le résultat de l'activité des sources fondamentales suivant agissant seules ou en combinaison :

- Un écoulement plastique non homogène sous l'action de forces extérieures (grainage, auto-frittage, galetage, martelage, choc laser) ;
- Une déformation plastique non homogène au cours d'un chauffage ou d'un refroidissement non uniforme (trempe banale, moulage des matières plastiques) ;
- Des déformations structurales de transformation de la matière (traitements thermiques) ;
- Des hétérogénéités d'ordre chimique ou cristallographique (nituration, cémentation) ;
- Des traitements superficiels divers (émaillage, nickelage, chromage, physical vapor deposition : PVD, chemical vapor deposition : CVD) ;
- Des différences de coefficients de dilatation thermique et des incompatibilités mécaniques des différents composants des composites (composites à matrice métallique et organique, revêtements céramiques).

1.4 Analyse et détermination des contraintes résiduelles :

Les méthodes de mesure des contraintes résiduelles peuvent généralement être divisées en méthode non-destructif et destructive.

1.4.1 Méthodes destructives :

Les techniques destructives permettent de déterminer seulement les macro-contrainte ou contraintes macroscopiques. Ces méthodes ne donnent aucune indication sur les microdéformations, ce groupe des techniques est basé sur la destruction de l'état d'équilibre des contraintes d'une pièce après enlèvement de matière. Dans ces cas, les contraintes résiduelles sont mesurées pendant la relaxation ; mais, il n'est possible de mesurer que les conséquences de la relaxation. Parmi les avantages de ces méthodes mécaniques on note leur application relativement simple, leur prix réduit et la rapidité des résultats [5].

Les différentes méthodes sont en général désignées par le mode d'enlèvement de matière utilisé :

- La méthode de découpage ou trépanage,
- La méthode de la flèche,
- La méthode du trou (semi-destructive),
- La méthode de Sachs,
- La méthode d'usinage chimique ou électrochimique.

1.4.2 Méthodes non destructives :

Le deuxième groupe de méthodes représente les techniques non-destructives sont basées sur la mesure de la distribution de la déformation du réseau cristallin (à l'aide des techniques de diffraction) ou bien la mesure de variations observées sur quelques propriétés physiques du matériau [5]. Parmi ces méthodes, nous pouvons citer :

- La méthode par effet Barkhausen,
- La méthode par ultrasons,
- La méthode par diffraction des neutrons,
- La méthode par diffraction des rayons X.

CHAPITRE II : GENERATION DES CONTRAINTES RESIDUELLES PAR EXPANSION

2 METHODE DE GENARATION DES CONTRAINTES RESIDUELLES PAR EXPANSION :

L'expansion des trous présente un mécanisme d'écroutissage des matériaux autour des trous. Le mécanisme se réalise à froid par l'introduction d'une bille, d'un mandrin conique ou par manchon fondu avec un diamètre supérieur à celui du trou. Les deux premiers procédés consistent à un enfoncement de la bille ou du manchou (figures 2.3a) et 2.3.b) par conte le troisième procédé consiste en un tirage d'un mandrin conique à travers un trou en métal, équipé d'une manche fondue lubrifiée (figure 2.3c).

On définit le niveau des contraintes introduites par le degré d'expansion en pourcentage DCE :

$$DCE\% = \frac{D-d}{d} * 100 \quad (2.1)$$

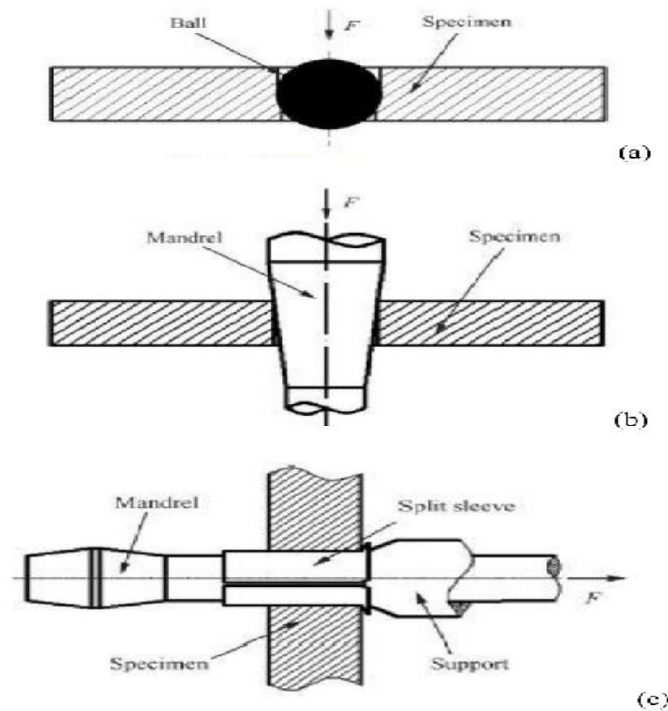


Figure 2.3 : méthode d'expansion de trou (a) par bill (b) mandrin (c) par manchon fondu [6].

CHAPITRE II : GENERATION DES CONTRAINTES RESIDUELLES PAR EXPANSION

La distribution des contraintes dues au processus d'expansion de trous est schématisée par la figure (2.3). Après l'opération de perçage, les contraintes résiduelles au bord du trou peuvent être en état de traction ou de compression. Après l'enfoncement du manchon conique ou de la bille dans le trou, les contraintes au bord sont de traction dont les valeurs peuvent atteindre la limite d'élasticité du matériau en question. Après la sortie du manchon, la zone déformée crée des contraintes résiduelles de compression au bord du trou et au le long de l'épaisseur de la plaque. La dimension de la zone plastifiée et le niveau des contraintes résiduelles de compression introduites dépendent du degré d'expansion [7].

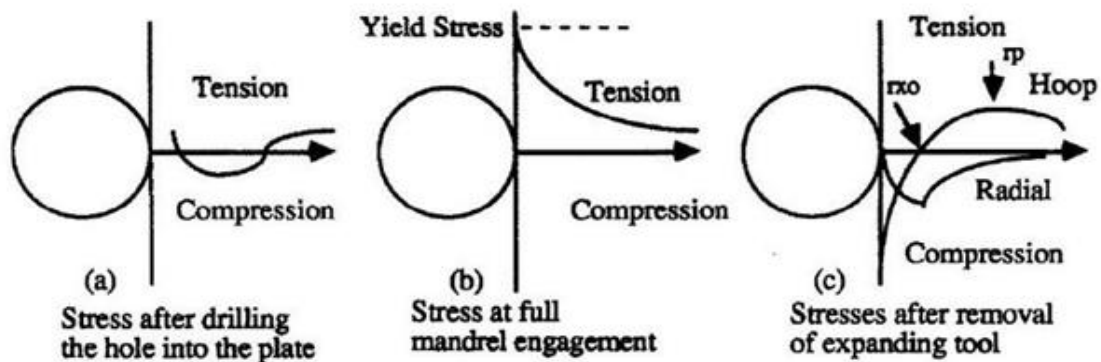


Figure 2. 4 : phénomène de génération des contraintes résiduelles par expansion de trou (a) contrainte âpre perçage (b) au cours de l'expansion (c) après le retrait de l'outil de l'expansion [8]

3 EFFET DE CONTRAINTE RESIDUELLES PAR EXPANSION SUR LA PROPAGATION DES FISSURES DE FATIGUE :

La durée de vie en fatigue des pièces ou structures dépend de plusieurs paramètres. En phase d'amorçage, la durée de vie en fatigue est liée fortement aux paramètres métallurgiques (état de traitement thermique), géométriques (concentration de contraintes) et de chargements cycliques (rapport de charge, contrainte moyenne, amplitude de contrainte.), la nature des contraintes résiduelles présente dans la pièce (de compression ou de traction) [9].

Pearson [10] a montré expérimentalement que la durée de vie est affectée par le rapport de charge où la longueur d'amorçage considérée est de l'ordre de 0.05 mm. Plusieurs chercheurs ont étudié l'effet de ce paramètre sur l'amorçage et la propagation des fissures de fatigue en absence et en présence des contraintes résiduelles des alliages d'aluminium.

CHAPITRE II : GENERATION DES CONTRAINTES RESIDUELLES PAR EXPANSION

Benachour et al. [11] ont étudié l'influence des contraintes résiduelles introduites par préchargement mécanique en flexion sur l'amorçage des fissures de fatigue dans des éprouvettes de type Charpy. Le champ de contraintes résiduelles est évalué avec considération de l'érouissage isotrope. La durée de vie à l'amorçage pour une longueur de fissure de 0.2 mm augmente avec l'augmentation du niveau de contraintes résiduelles de compression au niveau des entailles (figure 2.4). La durée de vie à l'amorçage présente 40 à 50% de la durée de vie totale de l'éprouvette. La phase propagation à travers les champs de contraintes résiduelles de compression générées ont permis de réduire la vitesse de propagation.

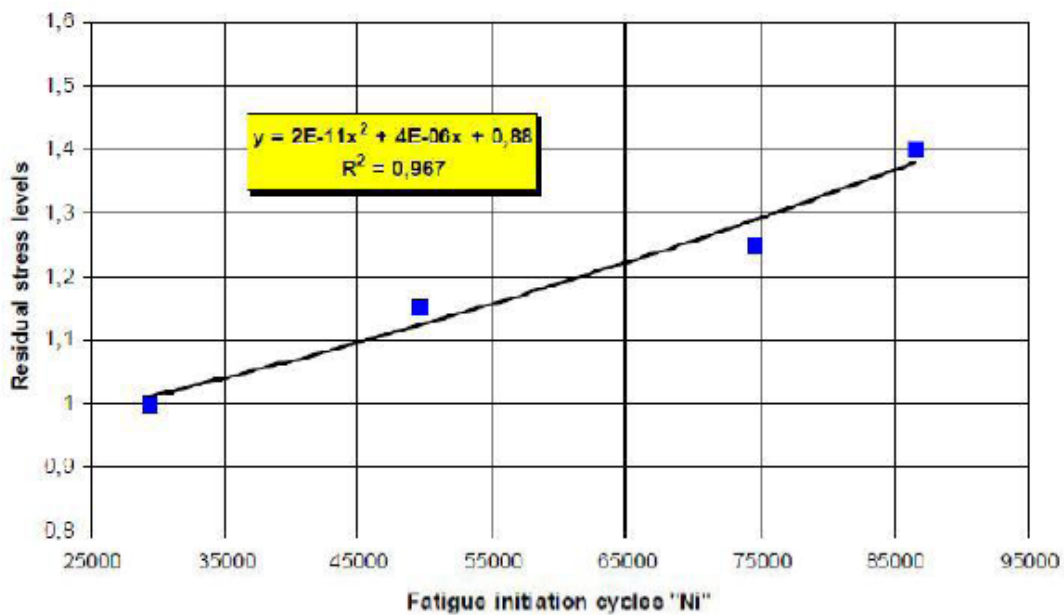


Figure 2.5 : Effet des contraintes résiduelles par préchargement mécanique sur la durée de vie à l'amorçage de l'alliage d'aluminium 2024 T351 [12].

Yongshou et al. [13] Ont montré que les fissures de fatigue s'amorçage à partir de la face d'entrée du trou vu le faible niveau de contraintes résiduelles de compression comparativement par rapport à la face de sortie. La durée de vie après expansion de 4% et 6% a été augmentée moyennant de six fois par rapport à un trou non expansé (figure 2.5). La zone de contraintes résiduelles en compression et la zone de déformation plastique dues à l'expansion à froid sont les paramètres influençant la durée de vie à l'initiation et à la propagation de la fissure de fatigue.

CHAPITRE II : GENERATION DES CONTRAINTES RESIDUELLES PAR EXPANSION

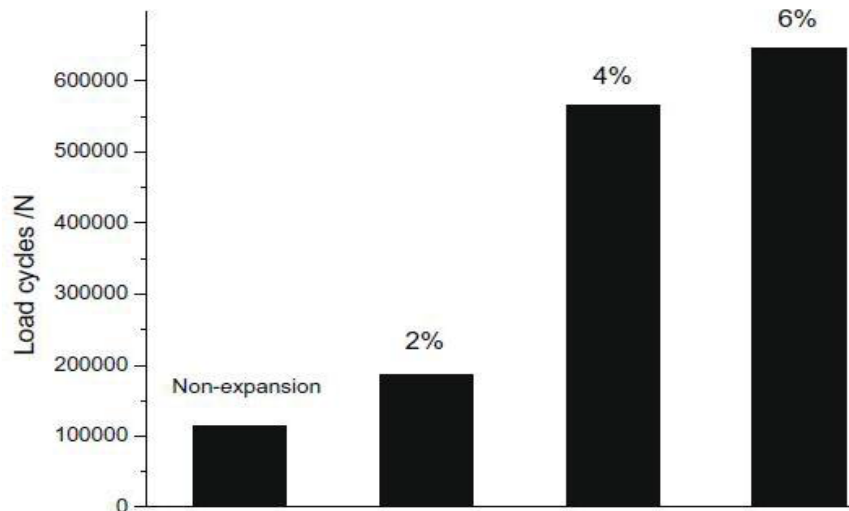
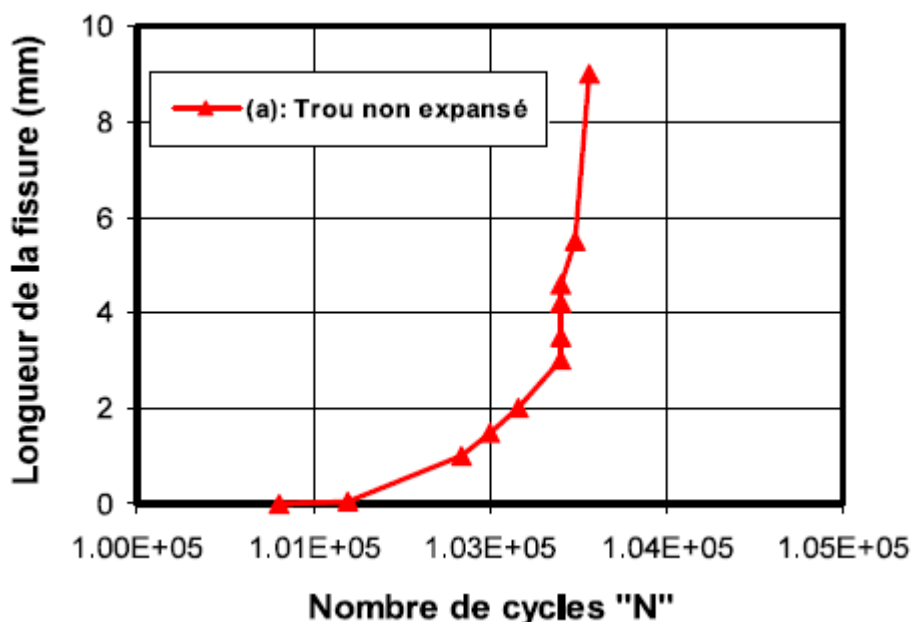


Figure 2.6: Influence du degré d'expansion sur la durée à la rupture de l'alliage d'aluminium LY 12-CZ

Adjrami et al. ont montré que les fissures de fatigue pour l'alliage 2024 T3 s'amorcent à partir de la face d'entrée du trou expansé et cela est attribué aux faibles contraintes résiduelles de compression par rapport à la face de sortie et à mi-épaisseur de la plaque. De plus les durées de vie à l'amorçage et à la propagation sont affectées par la présence des contraintes résiduelles de compressions.

La figure 2.6 (a, b) montre la comparaison entre de la durée de vie en fatigue pour une plaque avec un trou expansé et un trou non expansé. Un retard à l'amorçage de 6 à 7 fois est constatée [14].



CHAPITRE II : GENERATION DES CONTRAINTES RESIDUELLES PAR EXPANSION

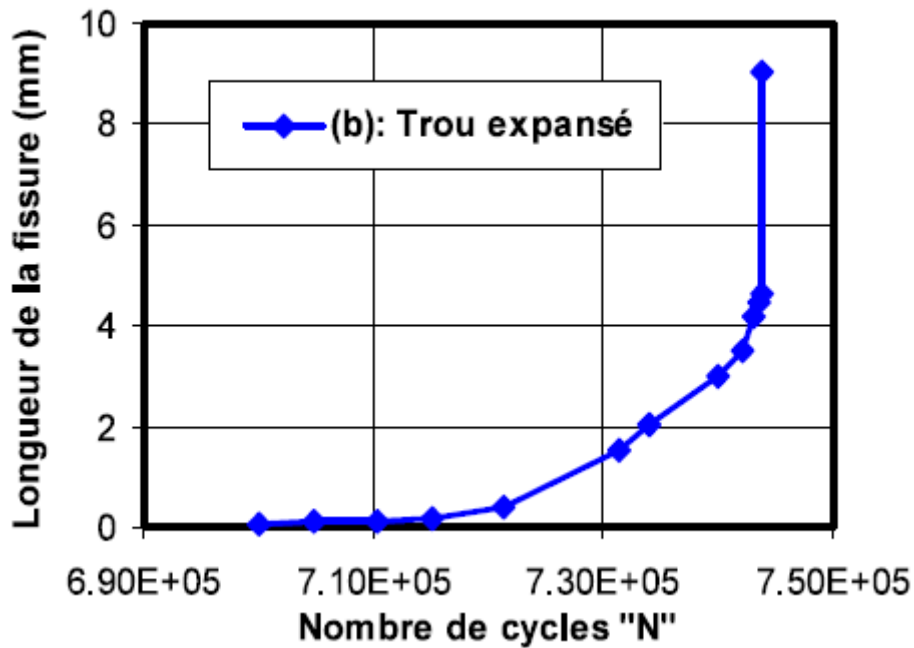


Figure 2.7 : Effet du processus d'expansion sur la fissuration par fatigue de l'alliage 2024 T3 (a) Trou non expansé (b) Trou expansé [14].

Récemment Faghih a démontré expérimentalement que le degré d'expansion optimum dépend de l'épaisseur de la plaque. De plus la durée de vie finale de rupture par fatigue augmente par l'augmentation du degré d'expansion et devient importante pour le degré d'expansion optimum (figure 2.7) [15].

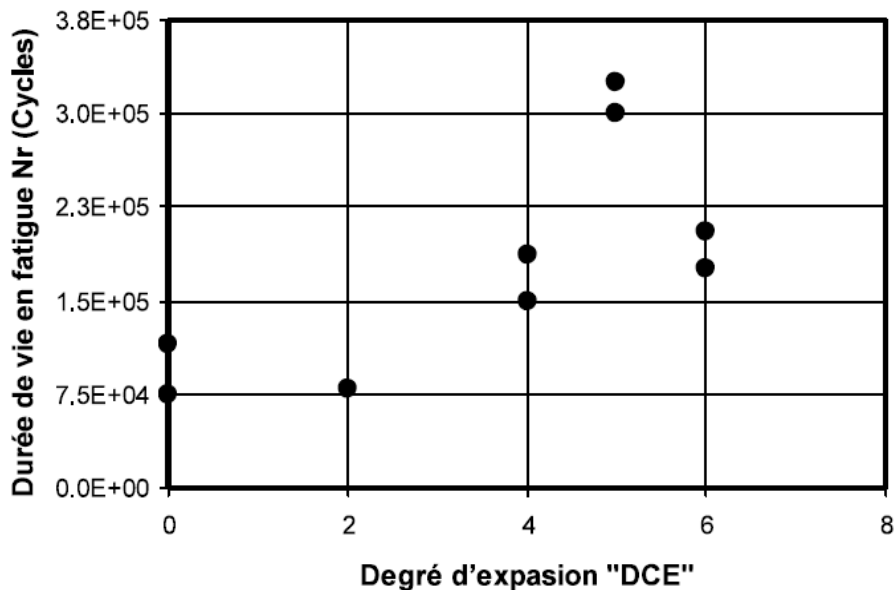


Figure 2.8: Effet du degré d'expansion sur la durée de vie à la rupture par fatigue de l'alliage de magnésium [15].

CHAPITRE II : GENERATION DES CONTRAINTES RESIDUELLES PAR EXPANSION

La durée de vie en fatigue de l'alliage 7050 T7451 augmente avec l'augmentation de la taille de la zone de contraintes résiduelles en compression générée par expansion (figure 2.8). Au-delà du degré d'expansion optimum (DCE=4.1%), la durée de vie diminue malgré la taille de la zone de compression importante [16].

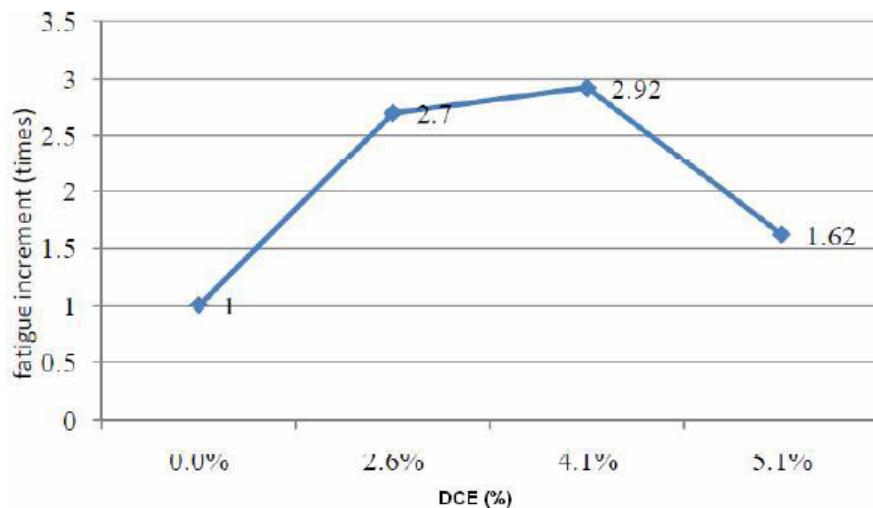


Figure 2.9 : Effet du degré d'expansion sur l'incrément de la durée de vie en fatigue de l'alliage d'aluminium 7050 T7451 [16].

Dans une étude expérimentale conduit par Wang et al. la durée de vie en fatigue pour l'alliage d'aluminium 6016 T6 est évalué à 2.47 fois pour un trou expansé par rapport à un trou non expansé. Le gain en durée de vie est attribué aux changements des orientations cristallographiques confirmées par des observations sur MEB. Les contraintes résiduelles ont été déterminées par l'application d'un modèle d'écrouissage cinématique bilinéaire.

Kumar et al. (Kumar et al. 2014) ont montré que la durée de vie en fatigue d'une plaque trouée en alliage d'aluminium est améliorée de 5.39 fois pour un trou expansé (DCE=5%) par rapport à un trou non expansé. L'effet bénéfique de l'expansion s'est traduit aussi sur la vitesse de fissuration. Les vitesses de fissuration à ces durées de vie sont respectivement 1.97×10^5 mm/cycle et 0.0587×10^5 mm/cycle [17].

Les essais de fatigue conduits par Ghfiri, appliquant la méthode de réparation par trou, ont montré que la durée de vie à l'amorçage de l'alliage 6082 T6 augmente avec l'augmentation des contraintes résiduelles de compression autour du trou (augmentation du

CHAPITRE II : GENERATION DES CONTRAINTES RESIDUELLES PAR EXPANSION

degré d'expansion de 1.7% à 4.3%) (Figure 2.9). De plus il a montré que la durée à l'amorçage décroît pour des degrés d'expansion important (supérieur à 7%) et cela est dû à un endommagement plastique local [18].

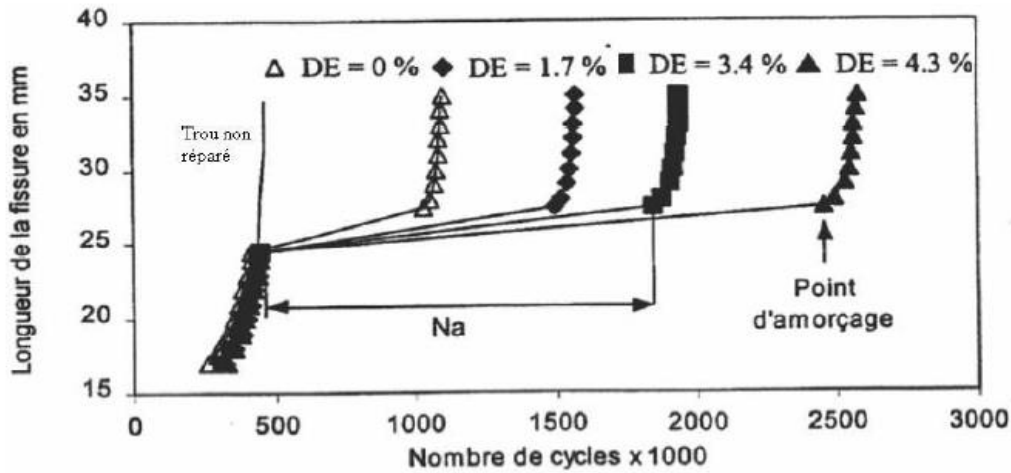


Figure 2.10 : Effet du degré d'expansion sur la durée de vie à l'amorçage [18].

Zhang et al. [19] Ont montré que la durée de vie à l'amorçage en absence des contraintes résiduelles pour une plaque trouée présente environ de la durée de vie totale. Par contre pour un trou expansé le pourcentage en durée de vie pour la phase amorçage est de 57% par rapport à la durée de vie totale (figure 2.10). Un gain en durée de vie à l'amorçage est évalué à 36%. Il est constaté que la phase propagation est aussi affecté par la présence des contraintes résiduelles de compression.

L'étude menée par Fagih et al [20] sur l'effet de l'expansion à froid sur le comportement en fatigue de l'alliage de magnésium AZ31 a montré que la durée de vie en fatigue est fortement améliorée par l'augmentation du degré d'expansion DCE% comparativement par rapport à un trou non expansé (Figure 2.11). Le degré d'expansion optimale est de l'ordre de 5%.

CHAPITRE II : GENERATION DES CONTRAINTES RESIDUELLES PAR EXPANSION

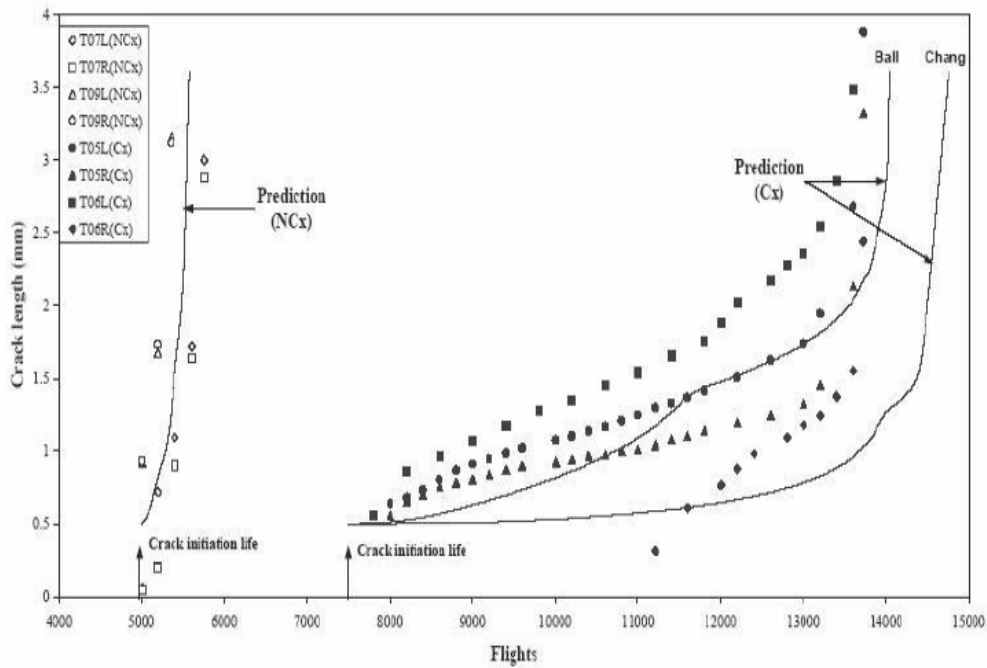


Figure 2.11 : Effet des contraintes résiduelles de compression sur la durée de vie à l'amorçage et à la propagation de l'alliage 2024 T 351 [19]

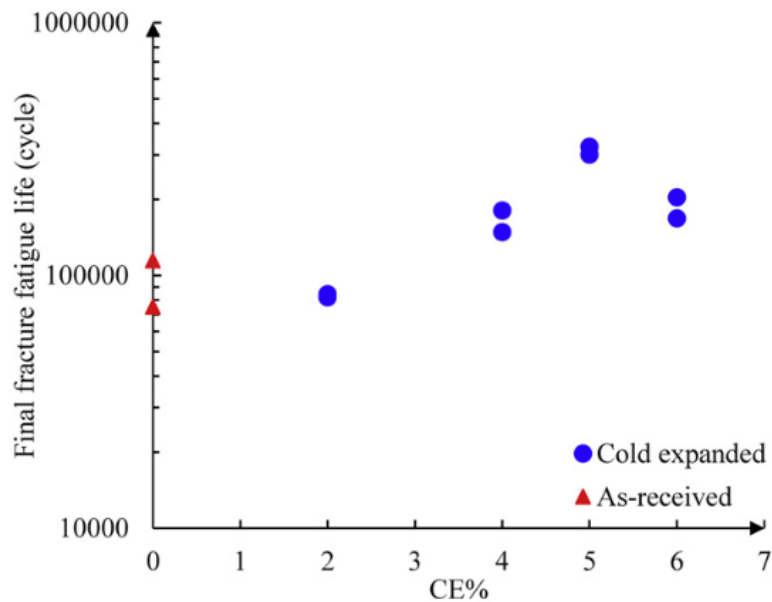


Figure 2.12 : Effet du degré d'expansion sur la durée de vie en fatigue [20]

L'analyse de la propagation de fissure de fatigue à partir d'un trou d'une plaque en alliage d'aluminium 2024 T351 révèle une augmentation de la durée de vie de propagation pour un trou expansé à froid comparativement par rapport à un trou non expansé. L'augmentation moyenne en durée de vie est de l'ordre de 3.2 fois pour un trou expansé par rapport à un trou non expansé (Figure 2.12).

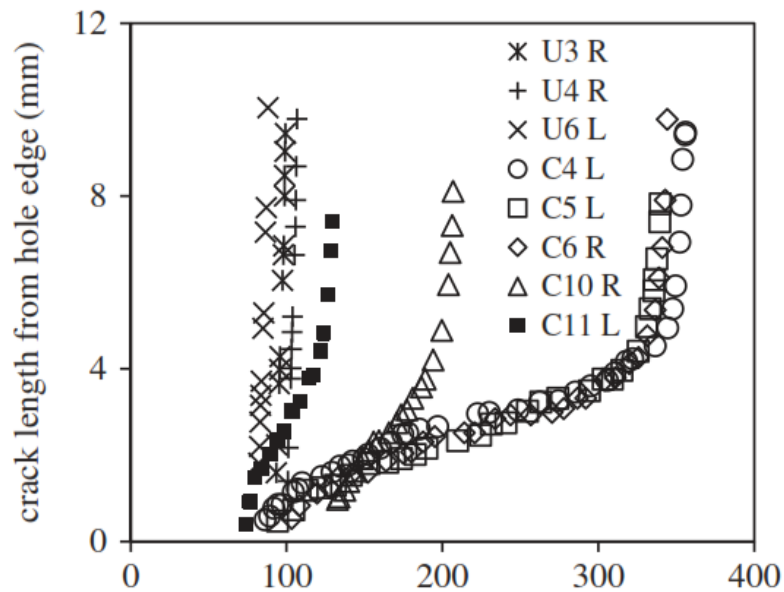


Figure 2.13: Effet de l'expansion à froid sur la fissuration par fatigue de l'alliage d'aluminium 2024 T351 [21] (U : non expansé, C : expansé) [21]

4 REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] Dahaoui Mourad. (2013) Effet des prédéformations sur le comportement en fatigue des alliages d'aluminium a durcissement structural. Mémoire de magister, université de Tlemcen.
- [2] Nelson.D.V., Residual Stress Effects in Fatigue, ASTM STP 776, American Society for Testing and Materials.
- [3] Ronite LEVY-TUBIANA. (NOVEMBRE 1999) Etude des composites à matrice métallique par la technique de la diffraction de neutrons : analyse du comportement élastoplastique et évaluation des contraintes résiduelles. Thèse de doctorat, université paris XI Orsay
- [4] Sellam Souad. (Décembre 2015), Analyse par la méthode des éléments finis des contraintes résiduelles dans les matériaux composites. Thèse de doctorat, université de Sidi Bel Abbès.
- [5] Tayeb Kebir (2013). Etude de l'effet des contraintes résiduelles sur la propagation de fissure de fatigue. Mémoire de magister, université de Sidi Bel Abbès.

CHAPITRE II : GENERATION DES CONTRAINTES RESIDUELLES PAR EXPANSION

- [6] Fu Yucan, Ge Ende, Su Honghua, Xu Jiuhua, Li Renzheng (2015). "Cold expansion technology of connection holes in aircraft structures: A review and prospect". Chinese Journal Of Aeronautics, 28(4), pp. 961-973.
- [7] Amrouche, A, Mesmacque, G., Garcia, S., Talha, A. (2003). "Cold expansion effect on the initiation and the propagation of the fatigue crack". International Journal of Fatigue, 25, pp. 949-954.
- [8] Herman, R. (1994). "Three-dimensional stress distribution around cold expanded holes in aluminum alloys. Engineering Fracture Mechanics, 48(6), pp 819-835.
- [9] EL HABIRI Mohamed. (2019) Influence des contraintes résiduelles sur l'amorçage et la propagation des fissures de fatigue. Thèse de doctorat, université de Tlemcen.
- [10] Pearson, S. (1975). "Initiation of fatigue crack in commercial aluminum alloys and the subsequent propagation of very short cracks". Engineering Fracture Mechanic, 7 pp. 235-247.
- [11] Benachour, M. (2008). "Simulation de l'avancée d'une fissure de fatigue à travers un champ de contraintes résiduelles". Thèse de Doctorat, Université de Sidi Bel Abbes, Algérie.
- [12] Benachour, M., Benachour, N., Benguediab M (2014), Investigation of residual stress effect on fatigue crack initiation for 2024 T351 AL- alloy. International Journal of Fracture Fatigue and Wear, 2, pp. 239 -245.
- [13] Sohel Rana, M., Makabe, C., Fujiwara, G. (2009). "The effect of hole shape on the extent of fatigue life improvement by cold expansions". Engineering Failure Analysis, 16, pp. 2081-2090.
- [14] Elajrami, M. Benguediab, M., G. Ronald, G. (2011) "The effect of cold expansion on the fatigue behaviour of 2024-t3 aluminium alloy" Sciences & Technologie B, 34, pp. 33-37.
- [15] Faghih Sasan (2018). "Experimental and numerical investigation of split sleeve cold expansion of AZ31B magnesium alloy". Master Thesis, Waterloo University, Ontario, Canada.

CHAPITRE II : GENERATION DES CONTRAINTES RESIDUELLES PAR EXPANSION

- [16] Huang, H., Zhao, Q., Liu, F. (2015). "Effect of split-sleeve cold expansion on the fatigue life of 7050-T7451 aluminum alloy" *Advanced Materials Research*, 1082, pp 403-407.
- [17] Kumar S.A., Bhattacharya, A., Mahendra Babu, N C., (2014). "Fatigue crack growth life prediction around cold expanded hole using finite element method" *Procedia Materials Science*, 5, pp 316-325.
- [18] Ghfiri, R. (2000). "Etude du retard à l'amorçage et à la propagation d'une fissure de fatigue après perçage d'un trou avec et sans expansion. Thèse de doctorat. Université des Sciences et Technologie de Lille, France.
- [19] Zhang, X., Wang, Z., Gaerke, J. (2000). "Predicting fatigue life improvement in cold expanded fastener joints". 22d International Congress of Aeronautical Sciences, 27 August-1 September 2000, Harrogate International Conference Centre, UK. ICAS 2000 Congress pp 455.1-455.10.
- [20] Sasan Faghih, Sugrib Kumar Shaha, Seyed Behzad Behraves, Hamid Jahed (2020). "Split sleeve cold expansion of AZ31B sheet: Microstructure, texture and residual stress". *Materials and Design*, 186, pp 1-13.
- [21] AMJAD Khurram, ASQUITH David, EANN Patterson, SEBASTIAN Chris, WANG Wei-Chun (2017). The interaction of fatigue cracks with a residual stress field using thermoelastic stress analysis and synchrotron X-ray diffraction experiments. *Royal Society Open Science*, 4 (171100).

**CHAPITRE III :
EFFET DE CONTRAINTE
RESIDUELLE SUR LA
PROPAGATION DES
FISSURE DE FATIGUE**

CHAPITRE III : EFFET DES CONTRAINTES RESIDUELLES SUR LA PROPAGATION DES FISSURE DE FATIGUE

1 Introduction

L'apparition d'une fissure de fatigue (amorçage de fissure) met en difficulté les ingénieurs et experts à cause du temps restant pour que la fissure se propage jusqu'à rupture. Afin d'augmenter la durée de vie de propagation des contraintes résiduelles de compression peuvent être introduites afin d'augmenter la durée de vie résiduelle de propagation. Le présent chapitre a pour but la prédiction de la durée de vie à la propagation des fissures de fatigue au niveau des trous expansés et non expansés. Afin d'atteindre ce but on a utilisé le code AFGROW [1]

$$\frac{da}{dN} = C \left[\left(\frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right]^n \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left(1 - \frac{K_{max}}{K_{crit}} \right)^q} \quad (1)$$

C, n, p, q sont des paramètres empiriques et Kmax et Kcrit sont respectivement le facteur d'intensité de contrainte maximale et le facteur d'intensité de contrainte critique. f représente la contribution de la fermeture de la fissure (voir guide AFGROW) [3].

2 Modèle géométrique ET PARAMETRES DE FISSURATION PAR FATIGUE

Le modèle géométrique utilisé pour prédire la propagation des fissures de fatigue est donné par la figure 1 [4]. Le modèle géométrique présente deux fissures d'amorçage semi-circulaire de 0.5 mm au bord du trou à partir de la face d'entrée d'expansion des trous. Le matériau étudié est l'alliage d'aluminium 2024 T351 dont les paramètres principaux du modèle de propagation (équation 1) sont donnés par le tableau 1.

CHAPITRE III : EFFET DES CONTRAINTES RESIDUELLES SUR LA PROPAGATION DES FISSURE DE FATIGUE

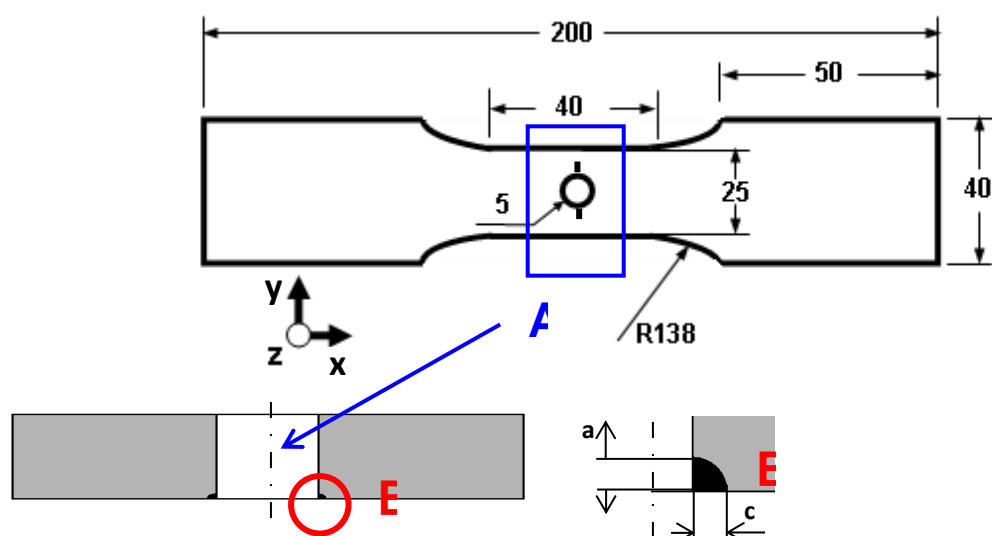


Figure 3.1 : Modèle géométrique pour la prédiction du comportement en fatigue [4]

Tableau 3.1: Paramètres de propagation de l'alliage d'aluminium 2024 T351

| C | m | p | q | K_{IC} | K_C | ΔK_{th} à $R=0$ |
|--------------------------|-------|-----|-----|----------|-------|-------------------------|
| 1.7073×10^{-10} | 3.353 | 0.5 | 1.0 | 37.36 | 74.72 | 2.857 |

3 CHAMPS DE CONTRAINTES RESIDUELLES PAR EXPANSION

Les champs des contraintes résiduelles dues à l'expansion des trous considérés par cette étude ont été déterminés par EL HABIRI [4] pour différents degrés d'expansion (DCE %) en utilisant la méthode des éléments finis 3D pour un comportement élasto-plastique isotrope. Le degré d'expansion considéré est 4.6

La distribution des contraintes résiduelles circonférentielles pour le degré d'expansion $DCE\% = 6.6$ le long du chemin de fissuration (σ_{xx}) est donnée par la figure 2. On note que les contraintes sur la face d'entre au niveau du bord trou sont inférieures par rapport à celles sur la face de sortie et à mi-épaisseur de la plaque ce qui justifie le choix du modèle géométrique de propagation. La figure 3 montre l'évolution des contraintes résiduelles de compression à travers l'épaisseur du trou qui jouent un rôle important sur

CHAPITRE III : EFFET DES CONTRAINTES RESIDUELLES SUR LA PROPAGATION DES FISSURE DE FATIGUE

la vitesse propagation des fissures de fatigue. L'évolution des contraintes résiduelles à travers l'épaisseur de la plaque sur le bord du trou est décrite par une équation de type polynôme.

$$\sigma_{xx} = 0.7817 \times e^4 - 13.13 \times e^3 + 90.9 \times e^2 - 297.59 \times e - 118.69 \quad (2)$$

avec « e » la variation de l'épaisseur de la face d'entrée à la face de sortie.

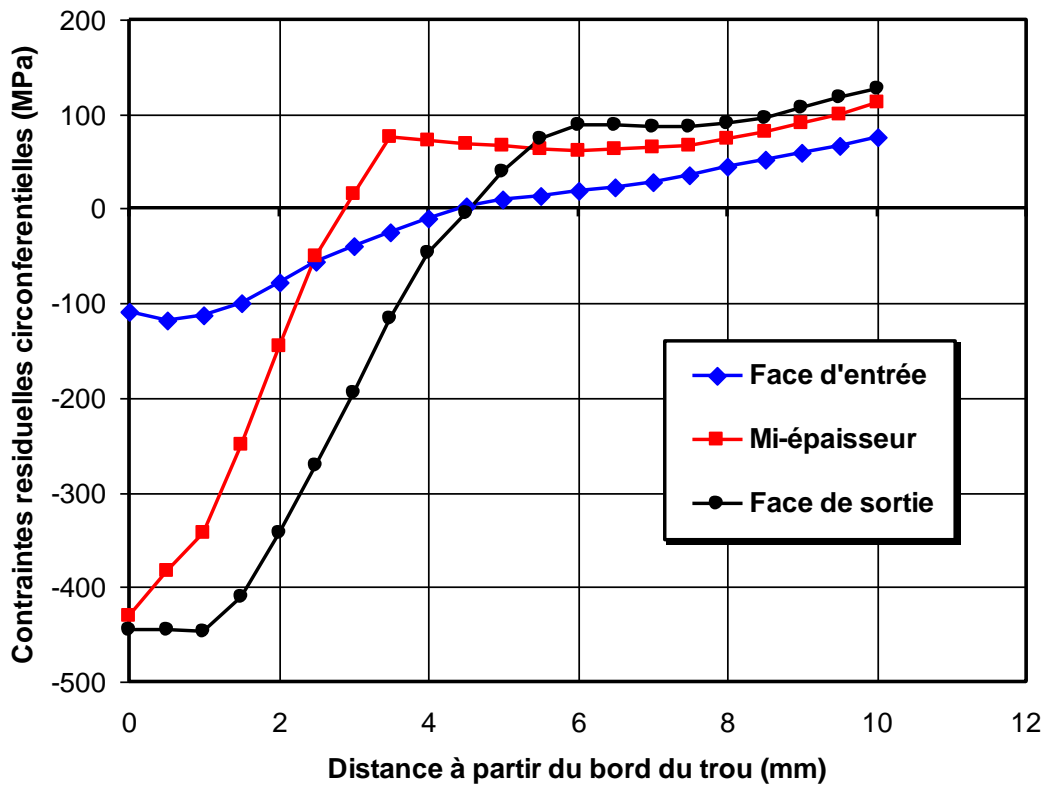


Figure 3.2 : Distribution des contraintes résiduelles σ_{xx} pour DCE=6.6% [4]

**CHAPITRE III : EFFET DES CONTRAINTES RESIDUELLES SUR LA PROPAGATION
DES FISSURE DE FATIGUE**

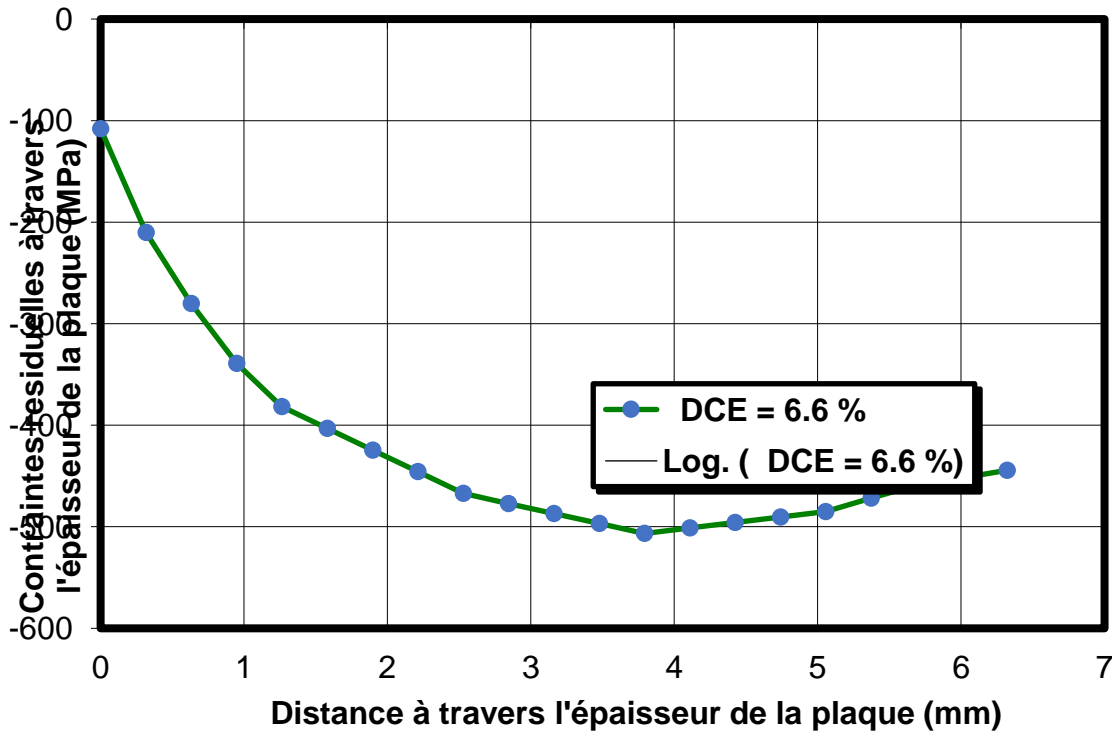


Figure 3.3 : Contraintes résiduelles à travers l'épaisseur de la plaque

4 EFFETS DES CONTRAINTES RESIDUELLES DUES A L'EXPANSION SUR LA FISSURATION PAR FATIGUE

Pour tenir compte de l'effet des contraintes résiduelles induites par expansion (Figures 2 et 3, le facteur d'intensité de contrainte effective, K_{eff} , est déterminé par :

$$K_{eff} = K_{app} + K_r \tag{3}$$

K_{app} est le facteur d'intensité de contraintes due au chargement appliqué et K_r est le facteur d'intensité de contrainte due aux contraintes résiduelles générées par expansion à froid. Le facteur d'intensité de contrainte, pour la plaque soumise à des efforts cycliques de traction ($\sigma_{app} = 150$ MPa) et la forme de la fissure considérée (voir figure) implémenté dans le code AFGROW, est déterminé par Newman et Raju [5] est exprimé par l'équation 4.

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi \frac{a_2}{Q}} F_{sh} \left(\frac{a_2}{a_1}, \frac{a_2}{t}, \frac{r}{t}, \frac{r}{w}, \frac{a_1}{w}, \phi \right) \tag{4}$$

CHAPITRE III : EFFET DES CONTRAINTES RESIDUELLES SUR LA PROPAGATION DES FISSURE DE FATIGUE

Avec $0 \leq \phi \leq \pi/2$, F_{sh} fonction de correction de géométrie et Q est un facteur de forme lié à la forme de la fissure et est exprimé par l'équation suivante pour le cas $a_1/a_2 \leq 1$

$$Q = 1 + 1.464 \left(\frac{c}{a} \right)^{1.65} \quad (5)$$

AFGROW intègre la méthode d'intégration de Gauss pour déterminer le facteur d'intensité de contrainte effective « Kr ».

4.1 Effet du rapport de charge en absence des contraintes résiduelles :

Les figures 4 et 5 représente l'effet du rapport de charge « R » sur la durée de vie résiduelle de propagation respectivement dans les sens « c » et « a ». On remarque une augmentation de la durée de vie avec l'augmentation du rapport de charge. Cette augmentation se traduit par la diminution de l'amplitude de la contrainte appliqué $\Delta\sigma_a$.

La longueur finale de rupture dans la direction « c » est de 8.73 mm par contre dans la direction « a » est de 6.1 mm.

L'effet du rapport de charge sur la vitesse de fissuration en absence des contraintes résiduelles dans la direction sens « c » est montré par la figure 6. L'augmentation du rapport de charge fait augmenter la vitesse de fissuration. La tendance de ce résultat est confirmée par d'autres études [6-8]

$$\Delta\sigma_a = \sigma_{amax} - \sigma_{amin} \quad (6)$$

$$R = \frac{\sigma_{amin}}{\sigma_{amax}} \quad (7)$$

CHAPITRE III : EFFET DES CONTRAINTES RESIDUELLES SUR LA PROPAGATION DES FISSURE DE FATIGUE

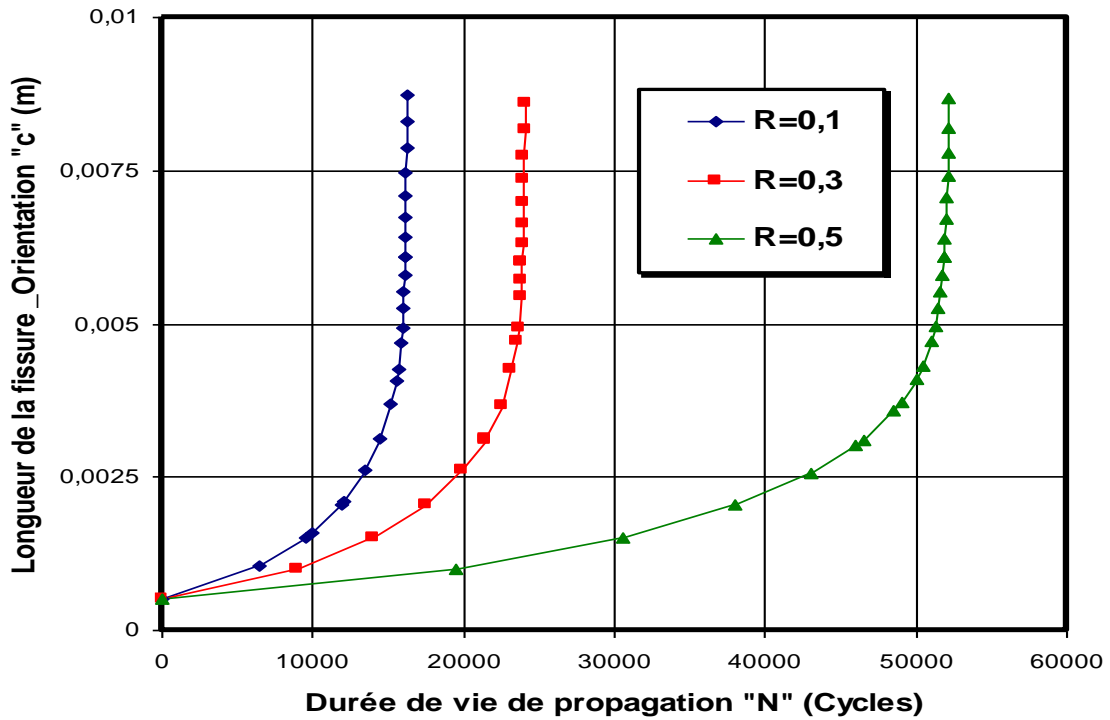


Figure 3.4 : Effet du rapport de charge sur la durée de vie résiduelle de propagation dans la direction "c"

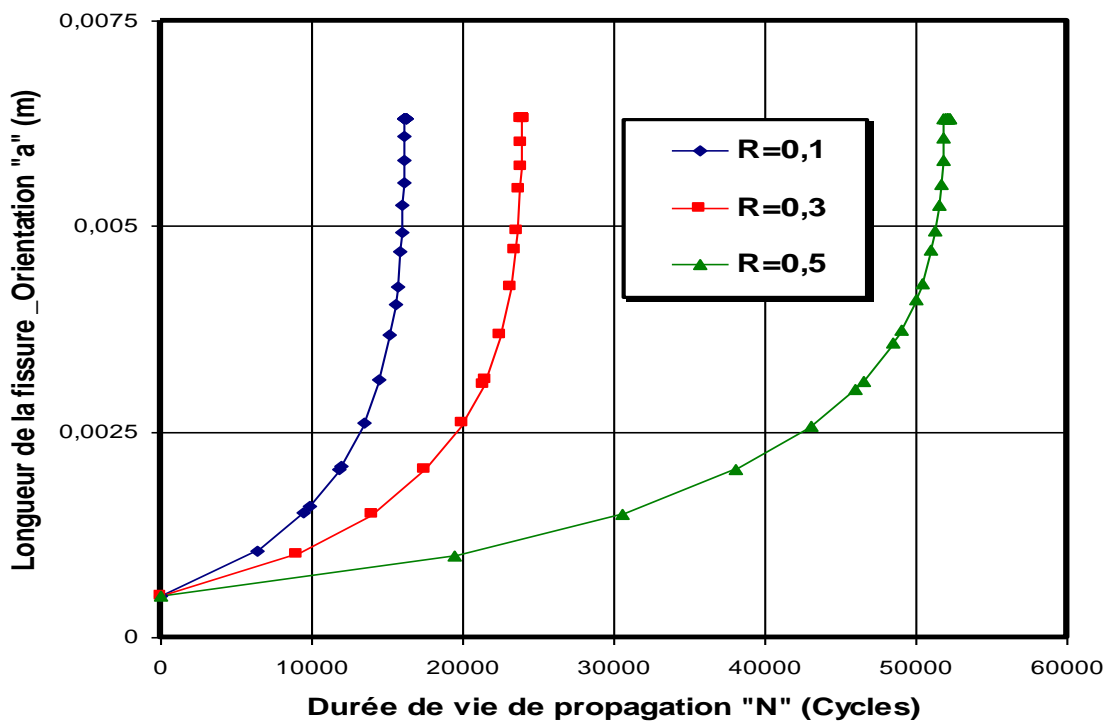


Figure 3.5 : Effet du rapport de charge sur la durée de vie résiduelle de propagation dans la direction "a"

CHAPITRE III : EFFET DES CONTRAINTES RESIDUELLES SUR LA PROPAGATION DES FISSURE DE FATIGUE

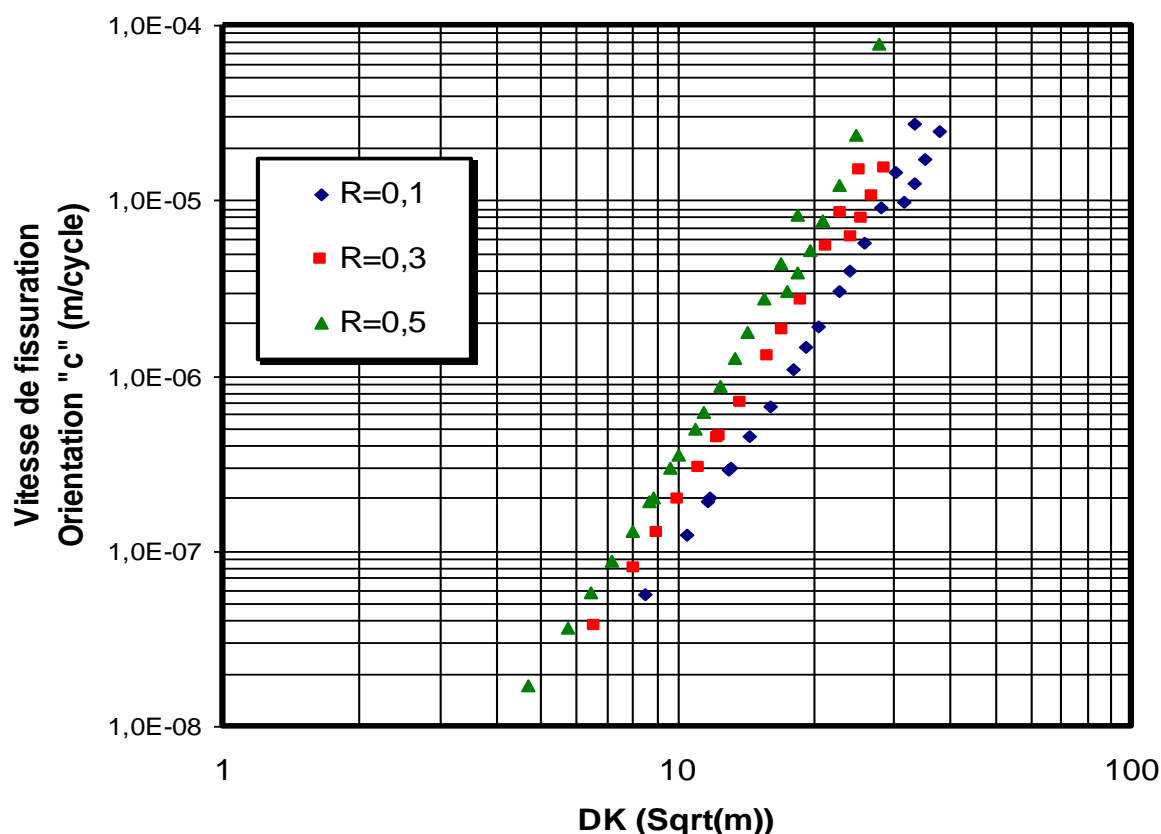


Figure 3.6 : Effet du rapport de charge sur la vitesse de fissuration dans la direction "c"

4.2 Effet du rapport de charge en présence des contraintes résiduelles absence des contraintes résiduelles :

Les figures 7 et 8 représentent respectivement l'évolution de la longueur de la fissure en fonction de la durée de vie résiduelle en présence des contraintes résiduelles dues à l'expansion à froid pour différents rapports de charge. On note en premier lieu que l'effet du rapport de charge sur la durée de vie est négligé pour $R=0.1$ et $R=0.3$ dans les deux sens de propagation de la fissure. La durée de vie avoisine les 250000 cycles. Pour $R=0.5$, la durée de vie résiduelle atteinte est de 280000 cycles. Comparativement aux résultats de la propagation sans contraintes, on remarque un effet significatif des contraintes résiduelles de compression sur le bord du trou expansé dans le sens transversal du trou « c » et à travers l'épaisseur de la plaque « a ».

**CHAPITRE III : EFFET DES CONTRAINTES RESIDUELLES SUR LA PROPAGATION
DES FISSURE DE FATIGUE**

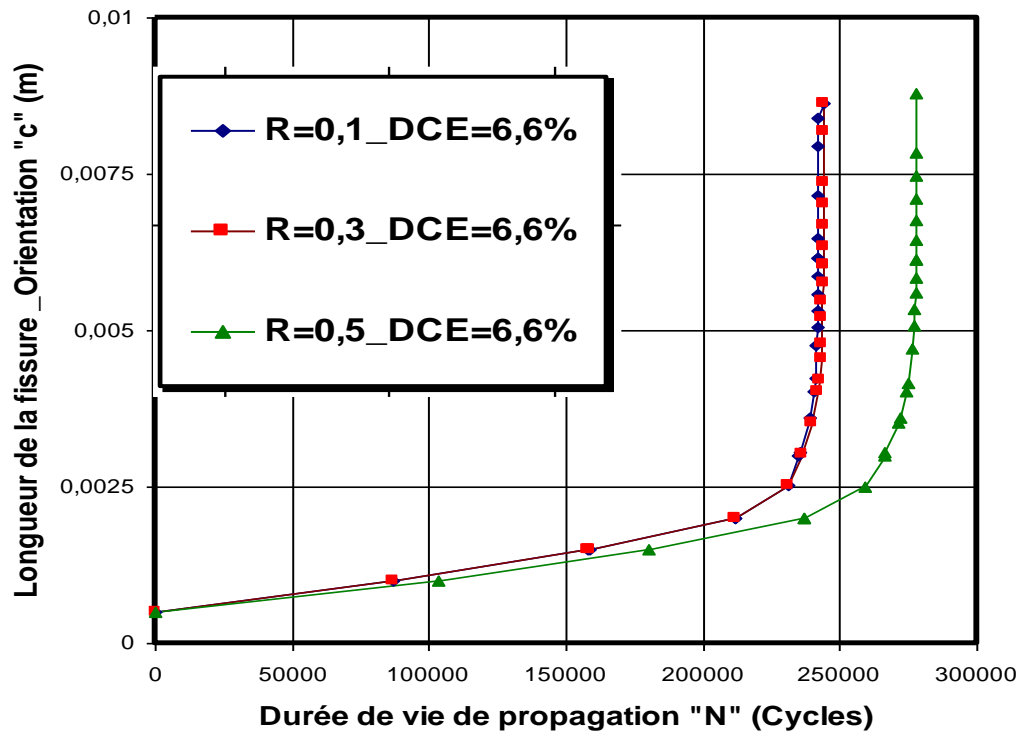


Figure 3.7 : Effet du rapport de charge sur la durée de résiduelle en présence des contraintes résiduelles (orientation "c")

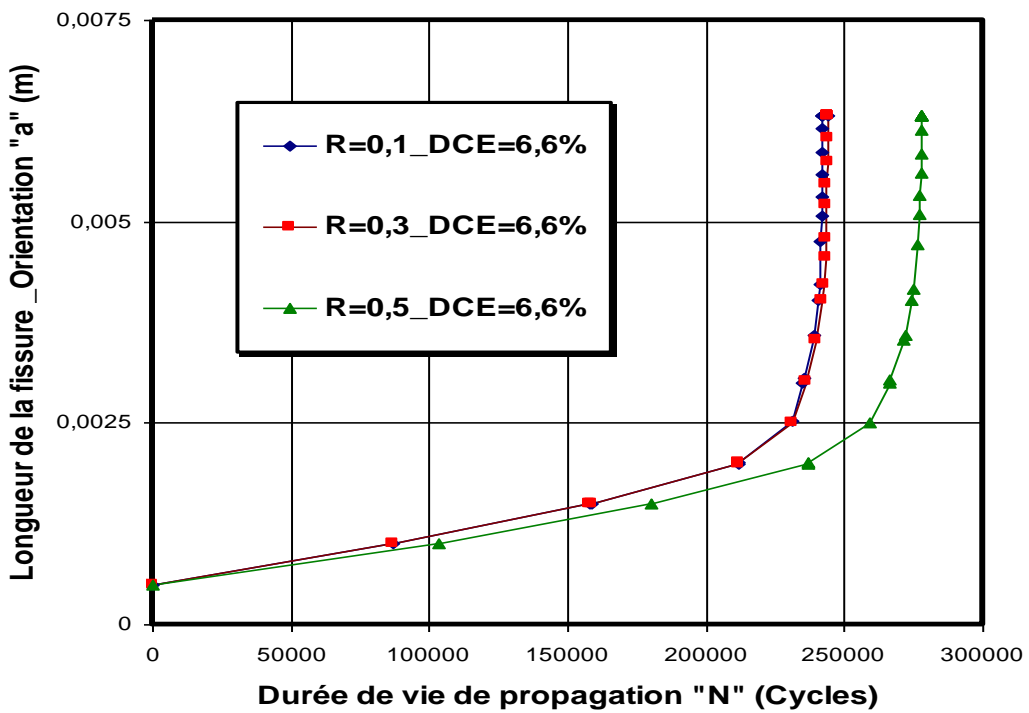


Figure 3.8 : Effet du rapport de charge sur la durée de résiduelle en présence des contraintes résiduelles (orientation "a")

CHAPITRE III : EFFET DES CONTRAINTES RESIDUELLES SUR LA PROPAGATION DES FISSURE DE FATIGUE

Les effets des contraintes résiduelles dues à l'expansion se traduit sur l'évolution des vitesses de fissuration en fonction du facteur d'intensité de contraintes. L'effet des contraintes résiduelles est considéré comme un effet de rapport de charge en modifiant le rapport de charge initiale par :

$$R_{eff} = \frac{K_{app-min} + K_r}{K_{app-max} + K_r} \quad (8)$$

Cette méthode de calcul est implémentée dans le code AFGROW et utilisé dans plusieurs études [9-12] de la fissuration par fatigue en présence des contraintes résiduelles. Les figures 9 et 10 montrent l'effet des contraintes résiduelles pour différents rapports de charges sur les vitesses de fissuration par fatigue. On note que l'effet du rapport de charge est atténué en début de fissuration par la présence de forte contrainte résiduelles de compression pour des amplitudes du facteur d'intensité de contrainte inférieurs à 10 MPa(m)^{1/2} (Figure 9). Au-delà de 10 MPa(m)^{1/2} et por R=0.5, l'effet des contraintes résiduelles de compression est atténué. Pour R=0.3, la vitesse de fissuration augmente par rapport à la vitesse de fissuration pour R=0.1 pour ΔK supérieur à 18 MPa(m)^{1/2}.

La vitesse de fissuration dans le sens "a" montre l'effet important de la vitesse de fissuration à travers l'épaisseur de la plaque (présence des contraintes résiduelles de compression importantes. La vitesse du débit de fissuration est de l'ordre de 1×10⁻¹⁰ m/cycles. L'effet du rapport de charge est minimisé par le niveau important des contraintes résiduelles de compression.

CHAPITRE III : EFFET DES CONTRAINTES RESIDUELLES SUR LA PROPAGATION DES FISSURE DE FATIGUE

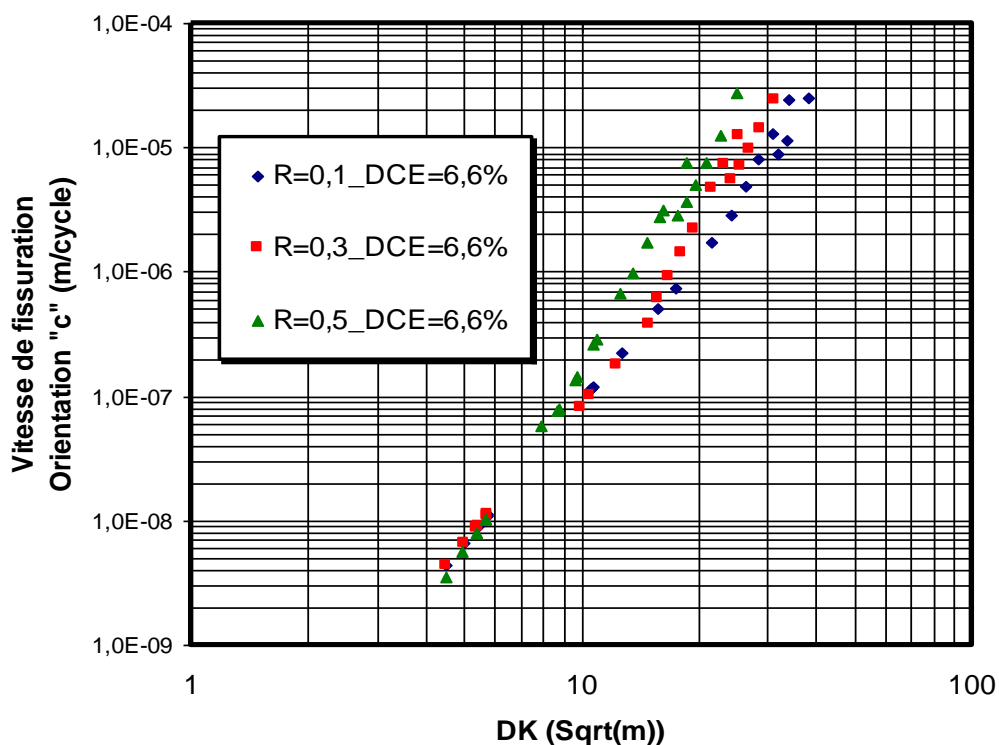


Figure 3.9 : Effet du rapport de charge sur la vitesse de fissuration dans la direction "c" en présence des contraintes résiduelles dues à l'expansion du trou

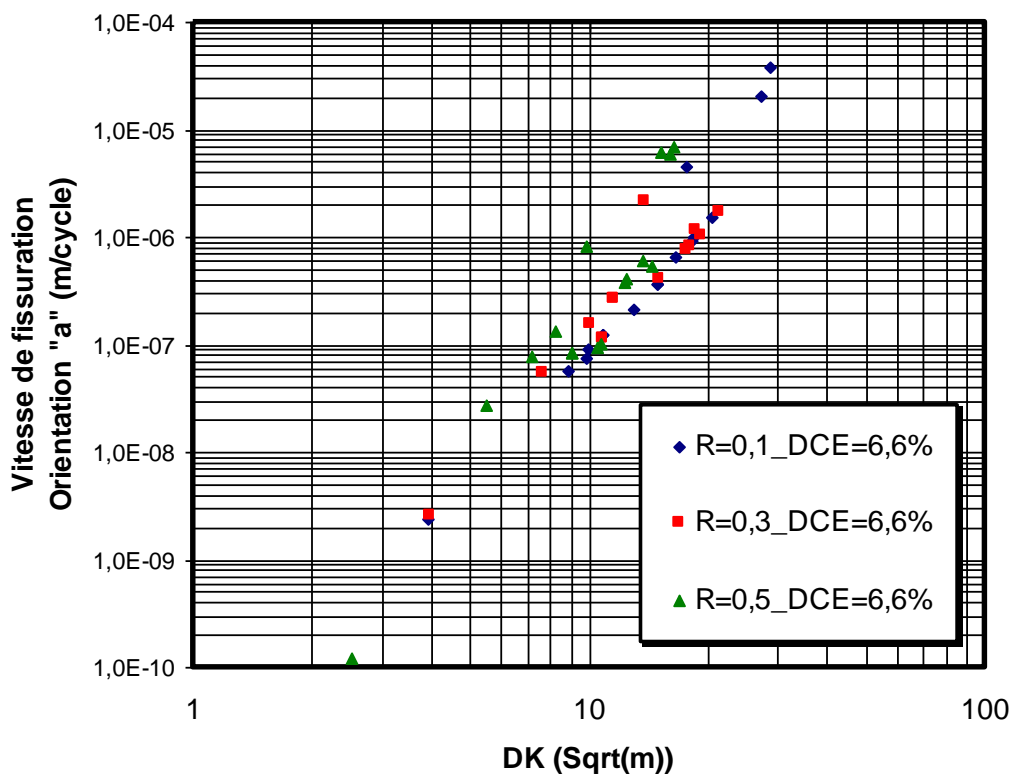


Figure 3.10 : Effet du rapport de charge sur la vitesse de fissuration dans la direction "c" en présence des contraintes résiduelles dues à l'expansion du trou (orientation "a")

CHAPITRE III : EFFET DES CONTRAINTES RESIDUELLES SUR LA PROPAGATION DES FISSURE DE FATIGUE

4.3 Influence des contraintes résiduelles dues à l'expansion sur la fissuration par fatigue

La présence des contraintes résiduelles au bords des trous pour rivetage ou boulonnage s'avère dans le but d'augmenter la durée de service des assemblages réalisés (augmenter la durée de vie à l'amorçage et à la propagation). Les figures 11 et 12 montre respectivement les effets bénéfiques de la présence des contraintes résiduelles de compression dues à l'expansion des trous sur la durée de vie résiduelles de propagation et les vitesses de fissurations. La figure 11 montre que la durée de vie de fissuration à partir d'un trou expansé est augmenté de 10 fois par rapport à un trou non expansé. La durée de vie finale de rupture a passé de 24051 cycles à 243902 cycles. En termes de vitesse de fissuration, la figure 12 montre l'influence significative des contraintes résiduelles de compression sur le bord et à travers la profondeur suivant le sens "c". On note une réduction des vitesses de fissuration en présence des contraintes de compression. La vitesse de fissuration est démarrée de 4.5×10^{-9} m/cycle pour le trou expansé par contre pour un trou non expansé, le début de propagation est à partir de 4.0×10^{-8} m/cycle. Les courbes des vitesses de fissuration traduit clairement l'effet des contraintes résiduelles comme effet de rapport de chargé effective modifié par la présence des contraintes résiduelles de compression. A $10 \text{ MPa(m)}^{1/2}$, la vitesse de fissuration en présence des contraintes résiduelles de compression est réduite de 2.0×10^{-7} m/cycles à 1.0×10^{-7} m/cycles dans le sens "c" de propagation. Au-delà de $20 \text{ MPa(m)}^{1/2}$, l'effet des contraintes résiduelles est atténué (faible contraintes résiduelles de traction).

**CHAPITRE III : EFFET DES CONTRAINTES RESIDUELLES SUR LA PROPAGATION
DES FISSURE DE FATIGUE**

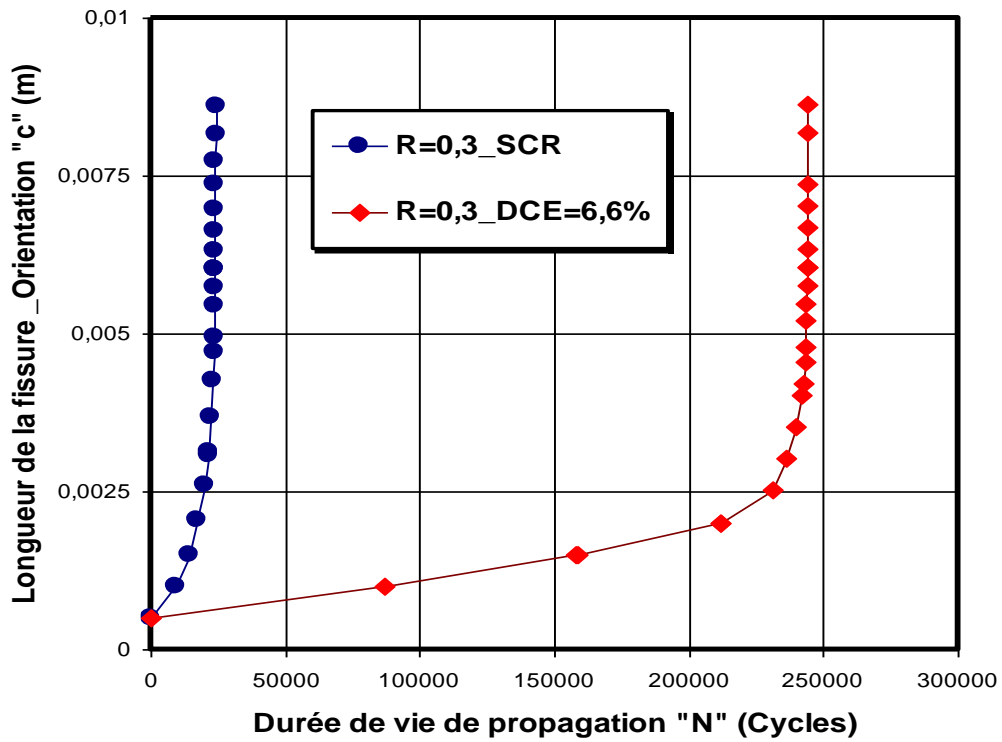


Figure 3.11 : Effet des contraintes résiduelles dues l'expansion sur la durée de vie en présence des contraintes résiduelles (orientation "c") pour R=0.3

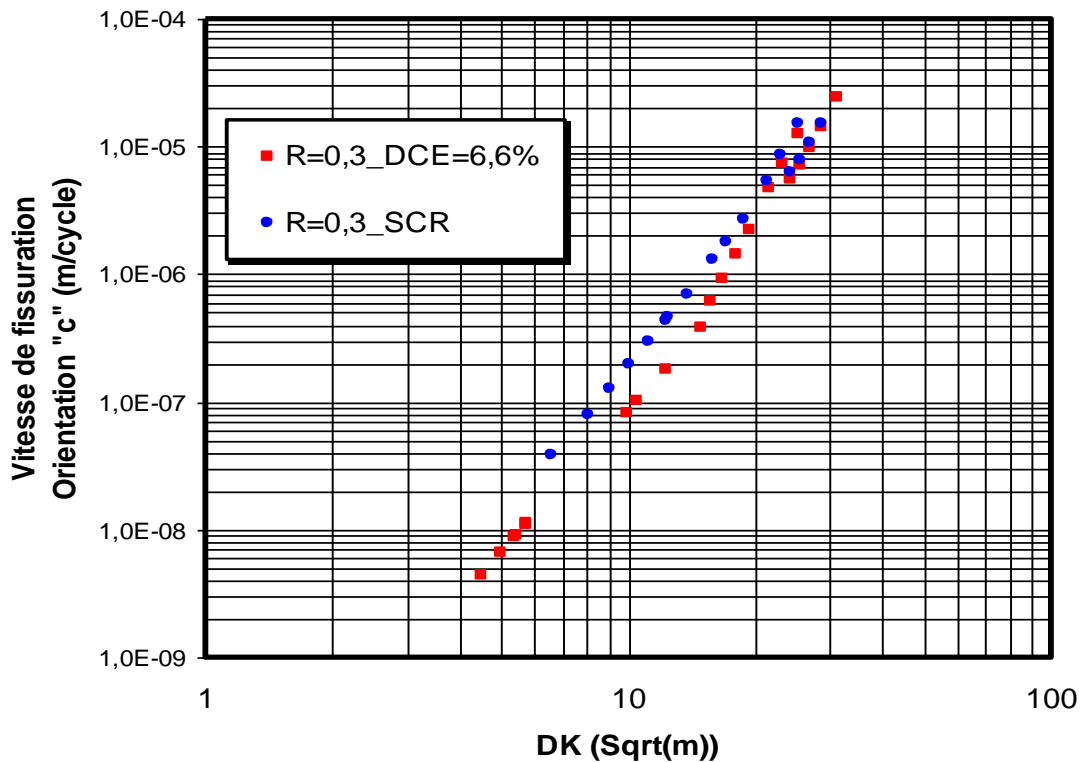


Figure 3.12 : Effet des contraintes résiduelles dues l'expansion sur l'évolution des vitesses de fissures en absence et en présence des contraintes résiduelles dues à l'expansion (orientation "c") pour R=0.3

CHAPITRE III : EFFET DES CONTRAINTES RESIDUELLES SUR LA PROPAGATION DES FISSURE DE FATIGUE

5 REFERENCES

[1] AFGROW VASM (2008). "Structural mechanics branch – Afgrow: Fracture mechanics and fatigue crack growth analysis software". Version 4.11.14.0. Air force research laboratories structural mechanics branch, Wright Patterson, Air Force Base, OH, USA.

[2] Forman, R.G., Mettu, S.R. (1992). "Behavior of surface and corner cracks subjected to tensile and bending loads in Ti-6Al-4V alloy". Fracture Mechanics 22nd Symposium, Vol. 1, ASTM STP 1131, H.A. Saxena and D.L. McDowell, eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

[3] Harter JA, "AFGROW Users Guide and Technical Manual, AFRL-VA-WP-1999-3016". Air Force Research Laboratory, Wright-Patterson, OH, Feb 1999.

[4] El Habiri Mohamed (2019). "Effet des contraintes résiduelles sur l'initiation et la propagation des fissures de fatigue". Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Tlemcen

[5] Newman, J.C., Raju, I.S. (1981), "Stress intensity factor equations for cracks in three-dimensional finite bodies". NASA Technical Memorandum 83200, pp 1-49

[6] M. Benachour, A. Hadjoui, M. Benguediab, N. Benachour (2010). Stress ratio effect on fatigue behavior of aircraft aluminium alloy 2024 T351. Material Research Proceeding 7, 1272.

[7] A.H. Noroozi, G. Glinka, S. Lambert. (2007). A study of the stress ratio effects on fatigue crack growth using the unified two-parameter fatigue crack growth driving force. International Journal of Fatigue 29 (2007) 1616–1633.

[8] Ferreira, N., Antunes, P.V., Ferreira, J.A.M., Costa, J.D., Capela C. (2018). "Effects of shot-peening and stress ratio on the fatigue crack propagation of aluminium 7475-T7351 specimens". Applied Sciences, 8, 375. doi:10.20944/preprints201801.0219.v1

[9] Xu, Y., Bao, R., Liu, H., Zhang, X. (2017). "A modified loading method for separating the effect of residual stress on fatigue crack growth rate of welded

CHAPITRE III : EFFET DES CONTRAINTES RESIDUELLES SUR LA PROPAGATION DES FISSURE DE FATIGUE

joints”. Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures, 40(8), 1227-1239.

[10] Lin Zhu, Min-PingJia (2017). “A new approach for the influence of residual stress on fatigue crack propagation”. Results in Physics, Volume 7, pp 2204-2212

[11] Barsoum, Z., Barsoum, I. (2009). “Residual stress effects on fatigue life of welded structures using LEFM”. Engineering Failure Analysis, 16, pp. 449-467.

[12] Ž. Božić, S. Schmauder, M. Mlikota, M. Hummel (2014). “Multiscale fatigue crack growth modelling for welded stiffened panels”. Fatigue Fract Engng Mater Struct 00, pp 1–12.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de cette étude la prédiction de la durée de vie résiduelle de la propagation des fissures de fatigue à partir de trous pré-fissurés expansés et non expansés. Le processus d'expansion a permis de créer des contraintes résiduelles de compression dont le niveau est très important où un cas de création des contraintes résiduelles de la littérature est utilisé. L'utilisation du code AFGROW a permis de prédire la durée de vie résiduelle et la vitesse de fissuration en absence et en présence d'un champ de contraintes résiduelles sous différents rapports de charge.

Les résultats obtenus montrent :

- ↗ La distribution des contraintes résiduelles montre que les fissures s'initient à partir de la face d'entrée du trou expansé.
- ↗ Les contraintes résiduelles à travers le trou expansé augmentent d'une façon significative de la face d'entrée à la face de sortie.
- ↗ Les contraintes résiduelles sont de nature compressive autour du trou et sur une certaine profondeur.
- ↗ L'effet du rapport de charge se traduit par une augmentation respective de la vitesse de fissuration et de la durée de vie résiduelle.
- ↗ La présence des contraintes résiduelles de compression dues à l'expansion autour du trou a permis d'augmenter la durée de vie résiduelle de fissuration et réduire la vitesse de fissuration.

En perspective, l'étude de l'effet et de l'optimisation du degré d'expansion sur la propagation des fissures de fatigue peut faire l'objet d'une étude future.