

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique  
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -  
Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen  
Faculté de Technologie



Mémoire présenté  
pour l'obtention du **diplôme de MASTER**  
En Génie Mécanique  
Spécialité : **Maintenance Industrielle**

Présenté par : **HADJOUI Fouad**

Intitulé du sujet

---

---

## Simulation de la Fissuration sous Chargements Cycliques dans une Plaque Multi-trous

---

---

Soutenu publiquement le 06 juin 2017, devant le jury composé de :

Président : Mr SEBAA Fethi	MCA	Université de Tlemcen
Encadreur : BENACHOUR Mustapha	Pr	Université de Tlemcen
Examineur : KARA-ALI Djamel	MCB	Université de Tlemcen
Examineur : BENSALD Ismail	MCB	Université de Tlemcen

Année universitaire 2016-2017



سبحانك لا علم لنا إلا ما علمتنا

رَبِّ اشْرَحْ لِي صَدْرِي \* وَيَسِّرْ

لِي أَمْرِي \* وَاحْلُلْ عُقْدَةً مِّن

لِسَانِي \* يَفْقَهُوا قَوْلِي

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail*

*À la mémoire de mes défunts Oncles*

*Mohammed et Mustapha*

*À Mon Père qui m'a toujours guidé et soutenu*

*À Ma Mère qui a été toujours à mes côtés*

*À mon grand Père et mes deux grandes mères,*

*À mes frères et sœur Oussama,*

*Mohammed Abdelghani Akram et Sihem,*

*À mes Oncles*

*Abdelhamid, Ghouti et Abdelkrim,*

*À mes Tantes*

*Fatima Lohra et Nouria,*

*À Mes oncles et tantes maternelles*

*À Mes cousins et cousines*

*À tous mes amis et surtout Imad Mahmoud et Smain*

## Remerciements

*Je remercie ALLAH Le Tout Puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.*

*Qu'il me soit permis de remercier vivement Monsieur **BENACHOUR Mustapha** Professeur à l'université de Tlemcen, Faculté de Technologie, département de génie mécanique, d'avoir assuré la direction et l'encadrement de mon projet de fin d'étude, et surtout pour ses précieux conseils et son aide ainsi que l'attention dont il m'a entouré pendant toute la durée de ce travail.*

*Je remercie Monsieur **SEBAA Fethi**, Maître de conférences à l'université de Tlemcen, Faculté de Technologie, département de génie mécanique, de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance de mon mémoire.*

*Mes remerciements sont aussi adresser à mes Messieurs **KARA-ALI Djamal** et **BENSAID Ismail**, tous deux Maître de conférences à l'université de Tlemcen pour avoir accepté de faire partie de mon jury.*

*Mes reconnaissances et ma gratitude vont principalement à mon père **HADJOUI Féthi** et mon oncle **HADJOUI Abdelhamid**, respectivement Maître de conférences et Professeurs à l'université de Tlemcen, Faculté de Technologie, département de génie mécanique.*

*J'exprime ma plus sincère reconnaissance et ma gratitude à tous les **enseignants** de la faculté de Technologie, département de génie mécanique en général et aux enseignants de la spécialité maintenance industrielle en particulier.*

*Mes remerciements vont également à toute ma promotion de licence et master Maintenance Industrielle.*

*Et je n'oublie pas un vif remerciement à tous les membres de ma **famille** qui n'ont jamais arrêté de me soutenir.*

***HADJOUI FOUAD***

## RESUME

Les défaillances par le phénomène de fatigue représentent 90% de rupture des structures mécaniques en service. La propagation des fissures représente la plus grande préoccupation de nombreux chercheurs afin de réduire les risques d'accidents et de pannes dans les différentes structures. Le but de ce travail est une étude de l'effet des trous ainsi que leur position sur la propagation des fissures de fatigue sur des éprouvettes en alliage d'aluminium de la série 2000. Une variation des diamètres des trous avec des positions différentes ainsi que le positionnement des fissures s'est faites tout en variant paramètres de chargement (rapport de charge R et amplitude de contraintes) et les effets des paramètres géométriques des trous.

Les résultats obtenus montrent que L'augmentation du rapport de charge a fait augmenter la vitesse des fissurations. L'augmentation de l'amplitude de chargement a fait diminuer la durée de vie. La diminution des entraxes fait diminuer la longueur de la fissure ce qui présente un avantage d'arrêt de la propagation des fissures. La propagation suivant le sens (L-T) présente une meilleure résistance à la fatigue comparativement à l'orientation (T-L).

**Mots clés :** *Fatigue, Alliage d'aluminium, propagation de fissure, Rapport de charge, entraxe des trous, sens (L-T) et orientation (T-L).*

## ملخص

تمثل ظاهرة التعب أو الإجهاد 90% تمزق الهياكل الميكانيكية في الخدمة. انتشار الصدع هو أكبر قلق للكثير من الباحثين للحد من مخاطر الحوادث والأعطال في هياكل مختلفة. والغرض من هذا العمل هو دراسة تأثير الثقوب وموقفهم من انتشار الشقوق التعب من القطع اختبار من سبيكة الألومنيوم من سلسلة 2000. وهناك تباين من أقطار الثقوب مع المواقع المختلفة وتم تحديد المواقع من الشقوق في حين متفاوتة المعلمات تحميل (نسبة الإجهاد R والقيود السعة) وأثار المعلمات هندسية من الثقوب. وأظهرت النتائج أن الزيادة في نسبة الحمل زادت سرعة تكسير. زيادة السعة تحميل خفضت العمر. تقليل المسافات يقلل من طول صدع الذي لديه ميزة توقف بلدي الشروخ. انتشار وفقا لاتجاه (L-T) المعارض تحسنت مقاومة التعب مقارنة مع الاتجاه (T-L).

**كلمات السرية: التعب، سبائك الألومنيوم، والشروخ، نسبة الحمل، والمباعدة بين حفرة والتوجيه (L-T)**

**والاتجاه (T-L).**

## ABSTRACT

Fatigue failures represent 90% breakage of mechanical structures in service. The propagation of cracks is the greatest concern of many researchers in order to reduce the risk of accidents and breakdowns in the various structures. The aim of this work is to study the effect of holes and their position on the propagation of fatigue cracks on aluminum 2000 series alloy specimens. A variation of the diameters of the holes with different positions as well as the positioning of the cracks was done while varying loading parameters (load ratio  $R$  and amplitude of stresses) and the effects of the geometric parameters of the holes.

The results obtained show that the increase in the charge ratio increased the crack speed. The increase in the amplitude of loading has reduced the service life. The decrease in the centers of the cracks reduces the length of the crack, which has the advantage of stopping the propagation of the cracks. The propagation in the direction (L-T) has a better resistance to fatigue compared to the orientation (T-L).

*Key Word : Fatigue, Aluminum alloy, crack propagation, Load ratio, hole spacing, direction (L-T) and orientation (T-L).*



# SOMMAIRE

<b>DEDICACES</b> .....	I
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	II
<b>RESUME</b> .....	III
<b>SOMMAIRE</b> .....	VI
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	VIII
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	IX
<b>SYMBOLES ET ABREVIATIONS</b> .....	X

<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	1
<b>Chapitre 1 : FISSURATION PAR FATIGUE</b> .....	3
I.    Approche sur la mécanique de la rupture .....	3
I.1. Modes de rupture .....	3
I.2. Distribution des contraintes au niveau de la pointe de la fissure.....	4
II.   Définition du phénomène de la fatigue.....	7
III.  Amorçage et propagation par fatigue .....	9
III.1. Amorçage de fissures de fatigue.....	9
III.2. Propagation de fissures .....	10
IV.   Paramètres influents la propagation des fissures .....	12
IV.1. Stades de fissuration .....	12
IV.2. Domaines de fissurations par fatigue .....	13
IV.3. Paramètres influant sur le comportement en fatigue .....	16
V.   Modèles de propagations .....	VI

<b>Chapitre 2 : OUTILS DE SIMULATION (AF GROW)</b> .....	23
I. Définition .....	23
II. Matériaux étudié.....	24
III. Géométrie .....	26
IV. Modèle de propagation appliqué.....	29
<b>Chapitre 3 : RESULTATS &amp; DISCUSSION</b> .....	30
I. Effet du rapport de charge.....	30
II. Effet de l'amplitude du chargement maximal .....	32
III. Effet de la position des trous .....	34
IV. Effet du diamètre central.....	35
V. Effet d'orientation de la propagation de la fissure .....	36
VI. Etude comparative pour différents matériaux.....	38
VII. Effet de la position d'un trou pour une plaque à fissure sur le bord.....	40
<b>Conclusion</b> .....	42
<b>Références Bibliographiques</b> .....	43

## Liste des figures

Figure 1. 1: Modes élémentaires de rupture .....	4
Figure 1. 2: Fissure en mode 1 - état de contrainte au niveau de la pointe de la fissure .....	5
Figure 1. 3: Définition de la fatigue.....	7
Figure 1. 4: Cycle de contrainte en fatigue.....	1
Figure 1. 5: Formation d'une intrusion et extrusions dans des bandes de glissement.....	10
Figure 1. 6: Stades I et II de la fissuration par fatigue .....	11
Figure 1. 7: Passage de propagation stable d'une fissure principale .....	12
Figure 1. 8: Evolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de cycle.....	14
Figure 1. 9: Schématisation des stades de fissuration .....	15
Figure 1. 10: Effet des surcharges sur la propagation des fissures de fatigues.....	17
Figure 1. 11: Contraintes et concentrations de contraintes au niveau de l'entaille .....	18
Figure 2. 1: Interface AFGROW.....	23
Figure 2.2: Interface matériau .....	24
Figure 2.3: Interface chargement .....	25
Figure 2.4: Eprouvettes avec trois trous.....	26
Figure 2.5: Eprouvette avec un trou.....	27
Figure 2.6: Eprouvettes avec un trou .....	28
Figure 3. 1: Effet du rapport de charge sur la durée de vie en fatigue de l'alliage 2014 T6 .....	31
Figure 3. 2: Effet du rapport de charge sur la vitesse de fissuration de l'alliage 2014 T6 .....	31
Figure 3. 3: Effet de l'amplitude de chargement sur la durée de vie en fatigue de l'alliage 2014 T6 ...	33
Figure 3. 4: Effet de l'amplitude de chargement sur la vitesse de fissuration de l'alliage 2014 T6 .....	33
Figure 3. 5: Effet de la position des trous sur la durée de vie en fatigue de l'alliage 2014 T6 .....	34

Figure 3. 6 : Effet du diamètre central sur la durée de vie en fatigue de l'alliage 2014 T6 .....	35
Figure 3. 7: Effet d'orientation de la propagation de la fissure sur la durée de vie en fatigue de l'alliage 2014 T6 .....	37
Figure 3. 8: Effet d'orientation de la propagation de la fissure sur la vitesse de fissuration de l'alliage 2014 T6.....	37
Figure 3. 9: Etude comparative pour les différents matériaux sur la durée de vie en fatigue.....	39
Figure 3. 10: Etude comparative les différents matériaux sur la vitesse de fissuration de l'alliage.....	39
Figure 3. 11: Evolution de la longueur de la fissure en fonction du nombre de cycles .....	41
Figure 3. 12: Effet de la position du trou sur la longueur finale de la rupture.....	41

## Liste des Tableaux

Tableau 2 1: Caractéristiques mécanique des alliages d'aluminium .....	25
Tableau 2 2: Paramètres du modèle de propagation d'alliage d'aluminium .....	29

## Symboles et abréviations

$P_a$ , MPa, GPa : (Unités de pression)

$m$  : Mètre (Unité de longueur)

$E$  : Module de Young [Pa]

$C$  et  $m$  : Paramètres de la loi de Paris

$r$  : Rayon de la zone plastifiée

$a$  : Longueur de fissure [mm]

$a_0$  : Longueur de fissure initiale [mm]

$N$  : Nombre de cycle [cycle]

$R$  : Rapport de charge

$K$  : Facteur d'intensité de contrainte [ $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ]

$K_I$  : Facteur d'intensité de contrainte en mode I [ $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ]

$K_{\max}$  : Facteur d'intensité de contrainte maximale [ $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ]

$K_{\min}$  : Facteur d'intensité de contrainte minimale [ $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ]

$K_{\text{crit}}$  : Facteur d'intensité de contrainte critique (model Nasgro) [ $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ]

$\Delta K$  : Amplitude du facteur d'intensité de contrainte [ $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ]

$\Delta K_{\text{th}}$  : Amplitude du facteur d'intensité de contrainte seuil [ $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ]

$\Delta K_0$  : Amplitude du facteur d'intensité de contrainte seuil à  $R = 0$

$C_w$  et  $m_w$  : Paramètres de la loi de Walker

$da/dN$  : Vitesse de fissuration [mm/cycle]

$\sigma_m$  : Contrainte moyenne [MPa]

$\sigma_{\max}$  : Contrainte maximale [MPa]

$\sigma_{\min}$  : Contrainte minimale [MPa]

$\sigma_a$  : L'amplitude de contrainte [MPa]

$\sigma_{yy}$  : Résistance local à la rupture [MPa]

$\alpha$  : Rapport de contrainte/déformation plane

$a$  : Longueur de la fissure

$a_0$  : Longueur de la fissure initiale

$C_{\text{th}}$  : Coefficient seuil

KIC : Ténacité du matériau

Ak, Bk : paramètres d'ajustement

t : Epaisseur

$t_0$  : Epaisseur de référence (condition de déformation plane)

Al : Aluminium

# Introduction Générale

## INTRODUCTION GENERALE

Les alliages d'aluminium sont, de plus en plus utilisés dans les structures aéronautiques principalement du fait de leur faible densité. La conception de telles structures doit prendre en compte des sollicitations des vols ainsi que les risques d'apparitions de dommages en service. Ces sollicitations en fatigue de nature aléatoire, sont en fonction du type de structure, des conditions de service et des perturbations au sol et en vol.

L'étude de la propagation des fissures en fatigue des structures dépend de la nature des chargements appliqués (chargement à amplitude constante). Ces chargements sont caractérisés par plusieurs paramètres dont leurs influences sur la durée de vie en fatigue et la vitesse de fissuration est très significative du point de vue intégrité mécanique des structures. Le chargement à amplitude constante est caractérisé par l'amplitude de la contrainte et le rapport de charge.

Le constructeur recherche en permanence des solutions qui permettent de retarder ou de stopper l'avance de la fissure ; le chargement variable joue un rôle prépondérant et est caractérisé par des variations de spectres de chargement, soit par des surcharges ou des sous charges permettant ainsi de retarder ou accélérer l'avancée de la fissure de fatigue. Le spectre avec surcharges est caractérisé par le niveau de surcharge, le nombre de cycles de surcharge, le nombre de cycles avant et après surcharge et le rapport de charge.

Les chercheurs ont pu découpler l'endommagement par fatigue en trois étapes distinctes, une phase d'amorçage qui correspond à l'initiation des premières microfissures au sein matériau, une phase de propagation où les microfissures amorcées dans le matériau vont croître de façon stable et une phase de rupture où les fissures ont atteint une taille instable et provoquent la rupture de la pièce ou de la structure. La durée de chaque phase dépend de la forme du chargement appliquée et de



son niveau. La forme du chargement se caractérise généralement par un spectre d'amplitudes constantes ou variables.

Le but de ce travail est une étude de l'effet des trous ainsi que leur position sur la propagation des fissures de fatigue sur des éprouvettes en alliage d'aluminium de la série 2000. Une variation des diamètres des trous avec des positions différentes ainsi que le positionnement des fissures s'est faites tout en variant paramètres de chargement (rapport de charge  $R$  et amplitude de contraintes) et les effets des paramètres géométriques des trous ; pour cela nous avons présenté le manuscrit en trois parties :

- En chapitre I, une étude sur la fissuration par fatigue a été initiée avec présentation des certaines définitions et une petite recherche bibliographique
- En chapitre II, une présentation de l'outil de simulation utilisé, avec la définition des matériaux utilisés et leur géométrie ainsi que les différentes simulations réalisées ainsi que les différentes interfaces utilisées
- En chapitre III, présentation des différents résultats obtenus graphiquement et interprétations et discussions.

# Chapitre 1

## **Fissuration par fatigue**

# Chapitre 1 : FISSURATION PAR FATIGUE

## I. Approche sur la mécanique de la rupture

La mécanique de la rupture a été développée dans le but d'étudier la propagation des fissures macroscopiques. L'application de cette approche est liée à la présence des discontinuités dans le matériau modifiant l'état de contrainte, de déformation et de déplacement.

La mécanique de la rupture reste l'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 structures et la longueur de la fissure. Parmi ces variables, on distingue le facteur d'intensité de contraintes « KIC », le chargement cyclique appliqué (rapport de charge, amplitude de chargement, surcharge...), la microstructure, la fréquence.

### I.1. Modes de rupture

Les facteurs d'intensité de contrainte sont définis comme des quantités qui caractérisent la singularité du champ de contrainte au voisinage de la fissure. Cette notion de facteur d'intensité de contrainte a été initialement développée par Irwin [1]. Sous l'effet d'un chargement quelconque, les lèvres de la fissure subissent un déplacement que l'on peut décomposer dans le système de coordonnées (O, x, y, z) en une somme de trois composantes U, V et W correspondant aux trois modes élémentaires d'ouverture de la fissure. La rupture d'un tel composant mécanique se produit par fissuration du matériau selon l'un ou une combinaison des trois modes élémentaires décrits ci-dessous (figure 1. 1).

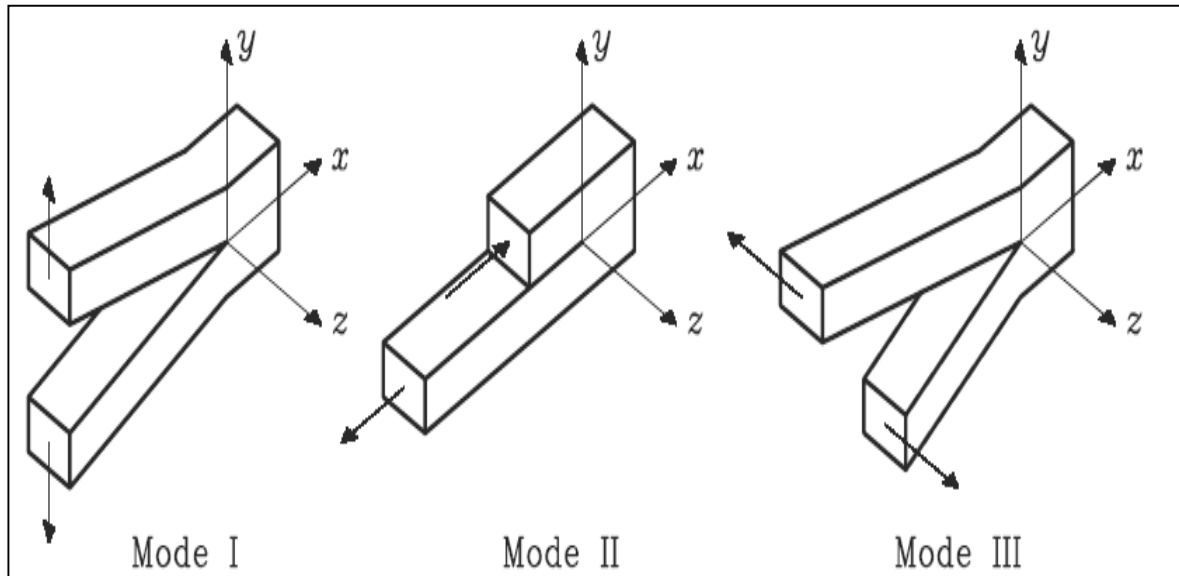


Figure 1. 1: Modes élémentaires de rupture

Mode I : Mode d'ouverture (Contrainte de traction appliquée perpendiculairement au plan de la fissure).

Mode II : Mode glissement plan (scission dans le plan de la fissure et appliquée perpendiculairement au front de la fissure).

Mode III : Cisaillement anti-plan (scission dans le plan de la fissure et appliquée parallèlement au front de la fissure).

Dans le cas général, la surface de rupture se développe suivant une combinaison de ces trois modes. Notons que les ruptures brutales résultent souvent de la propagation des fissures en mode I. C'est la raison pour laquelle la mécanique de la rupture s'intéresse plus particulièrement à ce mode.

## I.2. Distribution des contraintes au niveau de la pointe de la fissure

Le champ des contraintes au voisinage de la pointe de fissure (Figure 1. 2) est donné dans le cadre de l'élasticité linéaire par l'équation de Westergaard [2].

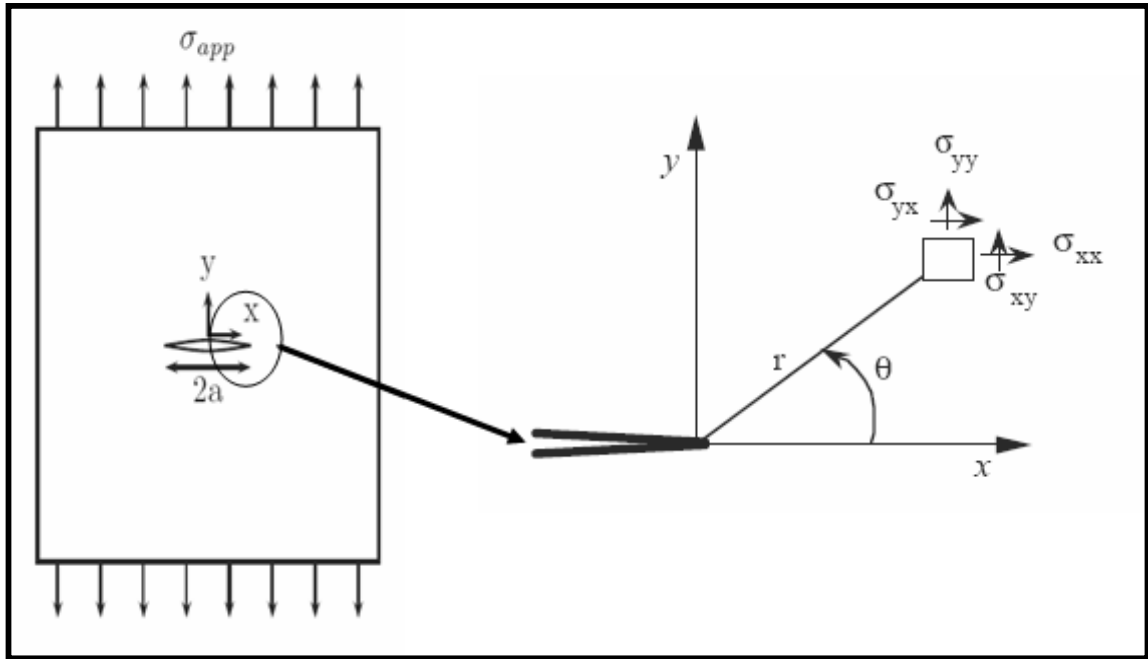


Figure 1. 2: Fissure en mode 1 - état de contrainte au niveau de la pointe de la fissure

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

$$\left[ \begin{array}{l}
 \sigma_{xx}(\theta) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\
 \sigma_{yy}(\theta) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\
 \sigma_{xy}(\theta) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\
 \sigma_{zz}(\theta) = \nu (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad \text{(CP)} \\
 \sigma_{zz}(\theta) = 0 \quad \text{(DP)}
 \end{array} \right. \quad (1)$$

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

Le facteur d'intensité de contrainte "FIC" est défini en fonction de la distribution des contraintes  $\sigma_{yy}$  par la relation :

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

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 « $\beta$ » 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 :

$$K_I = \beta \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

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

$$\Delta K = \beta \cdot (\sigma_{max} - \sigma_{min}) \cdot \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

Soit :

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} = K_{max}(1 - R) \quad (5)$$

Avec :  $R = \frac{K_{min}}{K_{max}}$  comme rapport de charge

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.

## II. Définition du phénomène de la fatigue

La fatigue est un processus qui, sous l'action de contraintes ou déformations cycliques, répétées ou alternées, modifie les propriétés locales d'un matériau et peut entraîner la formation de fissures et éventuellement la rupture de la structure. Encore les zones critiques de la structure sont créées par une discontinuité de matériaux. Il est décrit comme un « phénomène mystérieux » pouvant se produire sans signes avant-coureurs. Les recherches sur la fatigue des matériaux métalliques ont eu depuis lors un intérêt croissant et partagé pour les industriels et les chercheurs du monde entier.

Pineau et Bathias [3] ont défini que la fatigue ou endommagement par fatigue est la modification des propriétés des matériaux consécutive à l'application de cycle d'efforts, cycles dont la répétition peut conduire à la destruction des pièces constituées avec ces matériaux.

En règle générale, la fatigue se produit avec une déformation plastique localisée autour des défauts présents dans les matériaux, à partir de l'extrémité de la fissure lorsque elle se forme, et ne se produit pas avec une déformation de l'ensemble (figure 1.3).

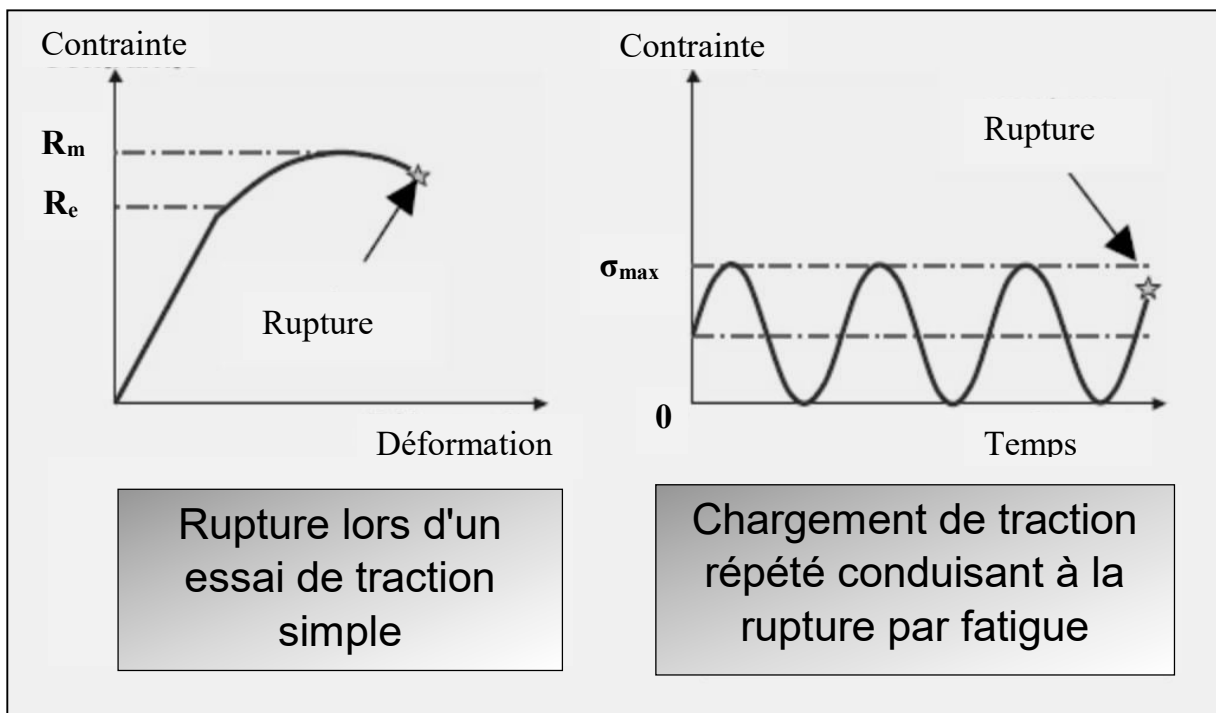


Figure 1. 3: Définition de la fatigue

Le cycle de contrainte de fatigue est défini par la contrainte maximale  $\sigma_{max}$ , la contrainte minimale  $\sigma_{min}$ , la contrainte moyenne  $\sigma_m$  et l'amplitude de la contrainte  $\sigma_a$  (figure 1. 4). On en déduit :

La contrainte moyenne  $\sigma_m$  est définie par :

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_{max} - \sigma_{min})}{2} \quad (6)$$

L'amplitude de contrainte  $\sigma_a$  est définie par :

$$\sigma_a = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (7)$$

L'étendue de variation de contrainte :

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (8)$$

Un autre paramètre important qui sera décrit par la suite est le rapport de charge "R" caractérisant le chargement est défini par la relation :

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (9)$$

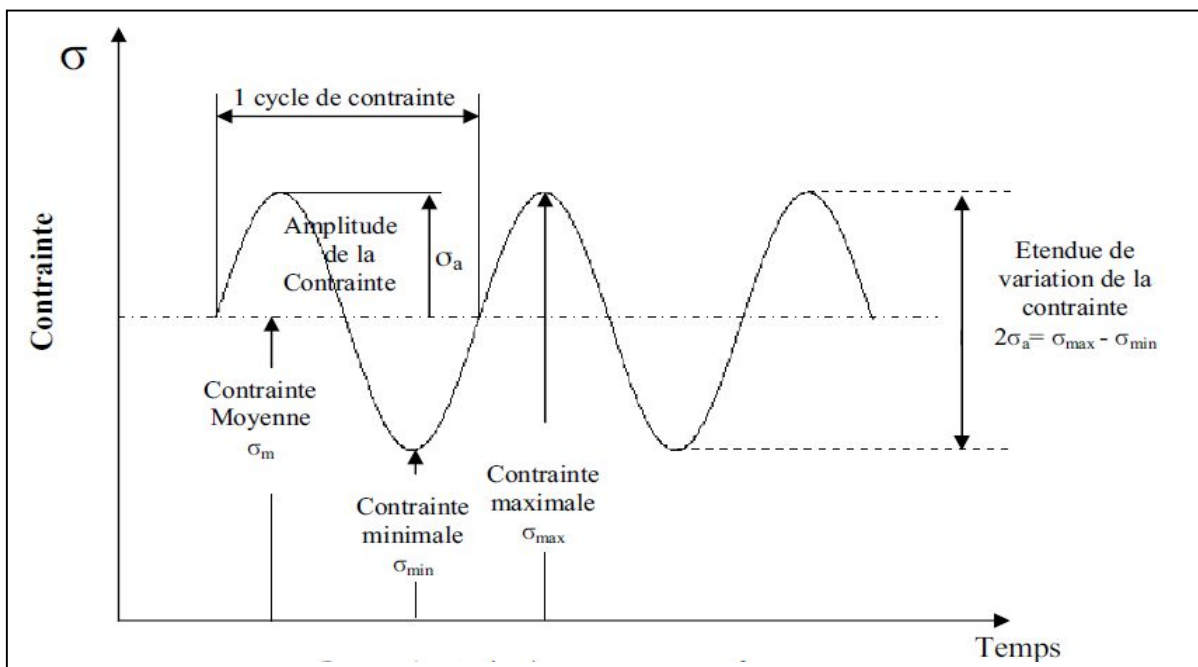


Figure 1. 4: Cycle de contrainte en fatigue



### III. Amorçage et propagation par fatigue

La définition de l'amorçage d'une fissure reste l'une des principales difficultés. Celle-ci peut en fait être différente selon que l'on s'intéresse à l'évolution microstructurale du matériau ou que l'on considère l'apparition d'une microfissure.

#### III.1. Amorçage de fissures de fatigue

Plusieurs définitions sont utilisées dans la littérature : variation de la rigidité de l'éprouvette, apparition d'une fissure de quelques microns, chute de la charge supportée par l'éprouvette [4]. La phase d'amorçage est généralement constituée par la nucléation et la croissance de fissures « courtes » mais la longueur seuil de fissure à laquelle l'amorçage se produit manque de définition uniforme. Plusieurs auteurs pensent que la phase d'amorçage d'une fissure de fatigue est de durée négligeable et qu'il existe des « petites » fissures de taille comparable à celle d'un défaut microstructural. Ces fissures se manifestent dès les premiers cycles de sollicitation. Alors, la durée de vie associée à l'amorçage correspondrait en fait à la phase de propagation de ces fissures courtes avant qu'elles n'atteignent une taille détectable par les moyens de suivi usuels [5]. D'autres auteurs estiment que la période d'amorçage de fissures dans un composant, à l'origine sans défaut, peut constituer une partie significative de sa durée de vie totale en fatigue [6,7].

Bien que les défauts existent dans toutes les pièces soumises à la fatigue, irrégularités de surface ou inclusions, provoquant des concentrations de contrainte locales très élevées conduisant à la rupture rapide par formation de microfissures particulièrement dangereuses, ils ne sont pas les seuls sites d'amorçage des fissures. Dans de nombreux cas où le matériau est globalement soumis à des contraintes inférieures à sa limite d'élasticité, il y a formation de bandes de glissement persistantes dans certains grains. Ces bandes de glissement peuvent donner lieu à des microfissures permanentes par formation d'intrusions et d'extrusions [8,10] ou par réunion entre elles [11]. L'atmosphère réagit avec les surfaces fraîches des plans de glissement et empêche la réversibilité de leur mouvement de va-et-vient, d'où un endommagement

du métal. Le mécanisme de formation des intrusions et extrusions à la surface est illustré sur la figure 1. 5.

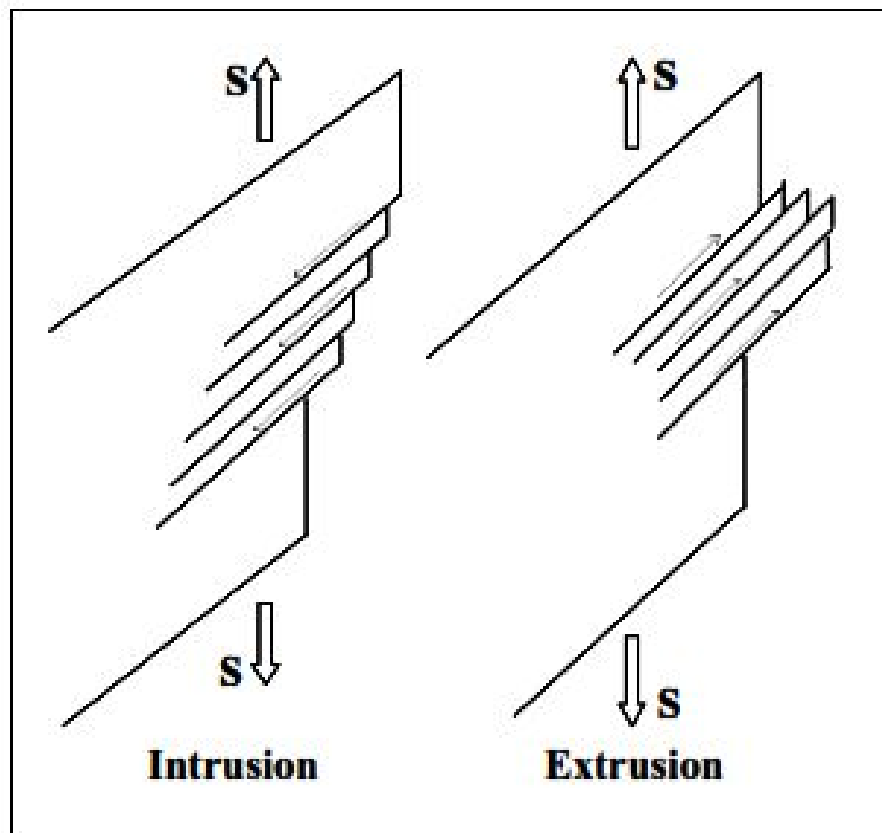


Figure 1. 5: Formation d'une intrusion et d'extrusions dans des bandes de glissement

### III.2. Propagation de fissures

Cette situation donne lieu, pour l'évaluation de la tenue de pièces en fatigue, à une approche basée sur des données de propagation de fissures. Dans le cas d'un défaut préexistant dans la pièce ou de l'apparition d'une fissure, deux types de problèmes peuvent être traités :

- Évaluation de la vitesse de propagation de la fissure (ou du défaut assimilé à une fissure) de manière à estimer la durée de vie résiduelle de la pièce. Ce problème se traite parfaitement en utilisant la Mécanique de la Rupture.
- Évaluation du chargement pour lequel la fissure ne se propage pas.

Comme nous venons de le voir, les fissures de fatigue s'amorcent généralement à la surface du matériau, en un ou plusieurs endroits, la propagation est souvent transgranulaire dans une direction cristallographique définie, même lorsque l'amorçage est intergranulaire, c'est le stade I (état de contraintes planes). Ensuite, intervient le stade II au cours duquel la fissure quitte le plan de scission maximale pour se propager dans le plan de contrainte normale, c'est-à-dire perpendiculaire à la contrainte principale maximale (état de déformation plane) (Figure 1. 6.) [12].

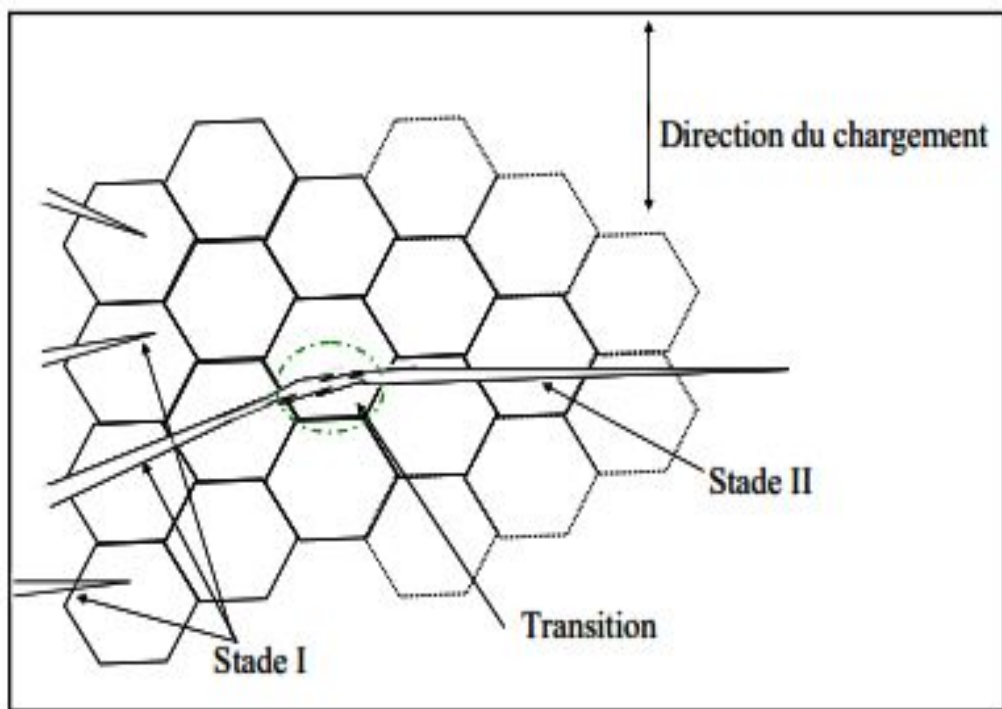


Figure 1. 6: Stades I et II de la fissuration par fatigue

La surface fissurée dans le stade I est très limitée par rapport à la surface totale de rupture bien que ce stade présente une durée de vie importante. Dans plusieurs cas, la fissure peut s'amorcer directement en stade II sans passer par le stade I. [13].

## IV. Paramètres influents la propagation des fissures

Le développement de modèles de propagation a connu un grand essor et a permis de tenir compte de plusieurs paramètres et conditions imposés en service ou en laboratoire qui agissent sur la propagation des fissures.

### IV.1. Stades de fissuration

Sous chargement cyclique, différents stades d'endommagement apparaissent dans une pièce mécanique où les défauts peuvent se développer dans une partie initialement saine (non endommagée) puis se propager de façon stable jusqu'à la rupture. Le développement de cet endommagement peut se décrire de la façon suivante :

- Des modifications microstructurales qui engendrent l'apparition d'un dommage irréversible ;
- L'apparition de microfissures ;
- La croissance des défauts microscopiques pour former des fissures principales ;
- La propagation stable d'une fissure principale (Figure 1. 7) ;
- La rupture finale.

L'examen de la surface rompue fait ressortir trois zones : un site d'amorçage, une zone de propagation stable, une surface de rupture finale.

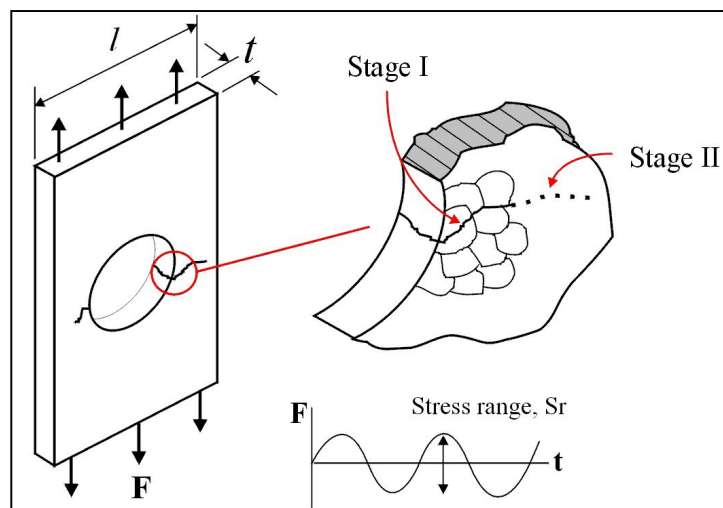


Figure 1. 7: Passage de propagation stable d'une fissure principale

La fatigue des pièces métalliques est définie par l'apparition de fissures macroscopiques et leur propagation, sous des charges répétées. Les intensités de la plupart de ces charges sont nettement inférieures à la limite élastique des matériaux. C'est donc un nombre suffisant de telles charges qui peut produire une fissure importante et conduire à la ruine partielle ou totale d'une structure.

Le dimensionnement en fatigue d'une structure sous chargement cyclique nécessite de définir un "état limite" qui sera le critère de résistance. Ce choix lié aux trois étapes distinctes mises en jeu des mécanismes différents.

Initiation de la fissure : Elle explicite le comportement de la structure entre l'état vierge et l'état où apparaît une fissure microscopique. Il s'agit de la phase d'amorçage. Celui-ci se produit généralement au voisinage des défauts intrinsèques qui peuvent induire des concentrations de contraintes.

Propagation lente (stable) d'une fissure macroscopique : Au cours de cette étape, la fissure peut croître plus ou moins rapidement selon le matériau et l'intensité du chargement critique.

Rupture (Propagation instable) : Il s'agit là de l'étape finale du phénomène, qui se produit lorsque la taille de la fissure est telle qu'elle a atteint son seuil d'instabilité.

Nous adopterons en pratique des critères de ruine liés à une perte de rigidité de la structure, définis par une profondeur relative fixée de la fissure par rapport à l'épaisseur de la pièce.

## IV.2. Domaines de fissurations par fatigue

La rupture par fatigue est le phénomène d'une fissure sous chargement cyclique passant par les stades amorçage et propagation stable. La compréhension de ce phénomène réside dans l'étude de la vitesse de propagation fissure par fatigue, dans ce cadre la mécanique de la rupture a fortement contribué à l'étude de nombreuses lois liant la vitesse de fissuration en fatigue à des paramètres caractéristiques déterminée analytiquement. D'une façon générale nous pouvons expliciter une loi semi –

théorique « loi de propagation de fissure ». Si nous considérons une structure contenant une fissure de longueur "a", et on suit le comportement de cette fissure (la longueur en fonction du nombre de cycle appliqué (N) pendant un essai de fissuration, sous un chargement à amplitude constant, on constate que cette croissance continue jusqu'à la rupture (figure 1. 8) [14].

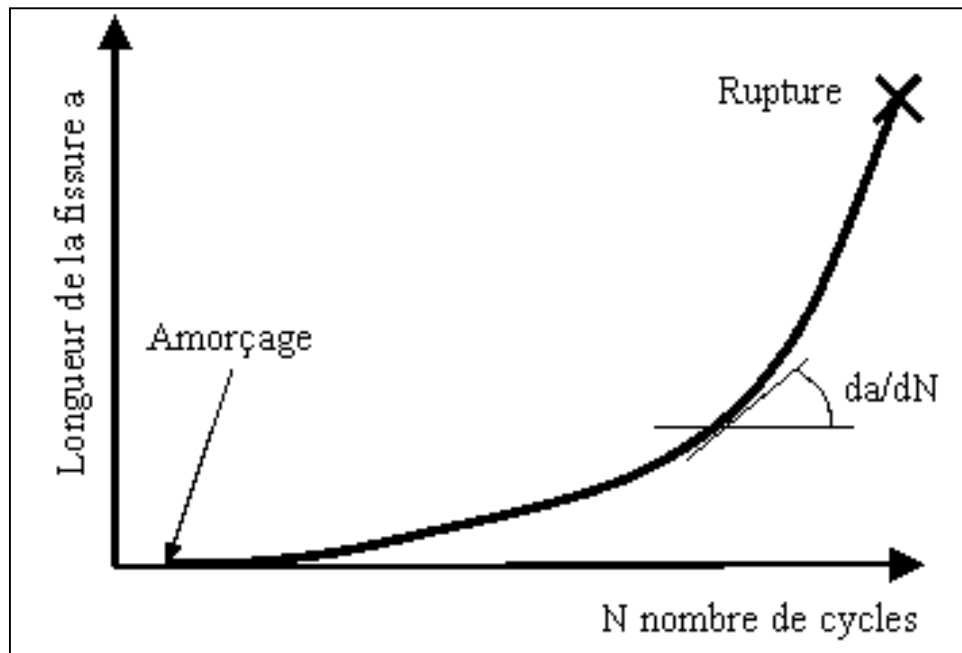


Figure 1. 8: Evolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de cycle

En général, l'expérience a montré que l'amorçage des fissures résulte de la concentration de déformation plastique qui se produit dans un domaine de dimension finie. Une fois que les fissures se sont amorcées ; elles peuvent se propager d'une façon stable. L'évolution de la vitesse de fissuration en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte  $\Delta K$ , permet de faire distinguer trois domaines de fissuration, la figure 1. 9, représente en échelle logarithmique la vitesse de fissuration  $da/dN$  en fonction de  $\Delta K$ .

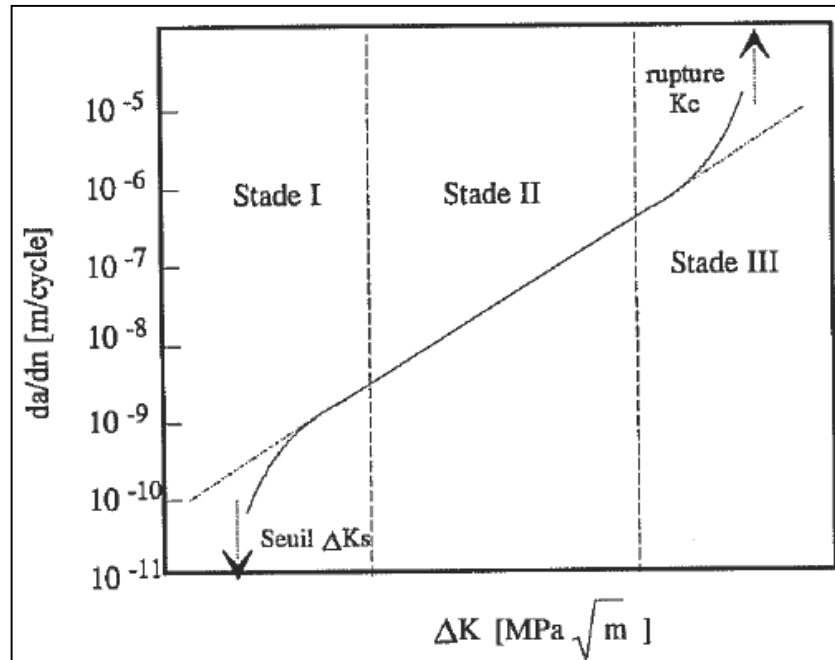


Figure 1. 9: Schématisation des stades de fissuration

- Domaine I : Domaine des faibles vitesses de fissuration où les effets de l'environnement et de la microstructure sont prédominants. Pour décrire ce domaine, on effectue généralement des essais à  $\Delta K$  décroissant pour déterminer la valeur de  $\Delta K_s$
- Domaine II : Domaine des vitesses moyennes ou de Paris où la vitesse de propagation varie linéairement avec  $\Delta K$  en échelle bi-logarithmique. La fissure se propage le plus souvent dans un plan perpendiculaire à la direction de l'effort appliqué. C'est le domaine où s'applique la loi de Paris [15];
- Domaine III : Domaine correspondant au cas des chargements élevés pour lesquels une déchirure se produit dans le matériau en pointe de fissure. Les vitesses de propagation sont très élevées et conduisent très vite à la rupture de la pièce (pour  $K_{\max} = K_{IC}$ ).

Pour décrire la partie linéaire de cette courbe (domaine II), Paris [15] a proposé la relation empirique suivante :

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (10)$$

Où C et m sont des constantes dépendant du matériau, des conditions de chargement et de l'environnement.

### IV.3. Paramètres influant sur le comportement en fatigue

#### a- Paramètres d'ordre métallurgique

- Taille des grains
- Taux d'érouissage
- Traitement thermique
- Défauts métallurgiques de l'alliage

#### b- Paramètres d'ordre mécanique et géométrique

- Nature du chargement
- Le chargement peut être monotone ou variable (spectre).

Dans le cas des chargements monotones les paramètres prépondérants sont :

- Rapport R (rapport entre la valeur minimale et la valeur maximale du chargement) : à contrainte maximale constante, si R augmente, la durée de vie augmente ;
- Contrainte moyenne : à amplitude de chargement constante, si  $\sigma_{\text{moy}}$  augmente, la durée de vie diminue.
- La période du signal a peu d'influence sur la durée de vie. Cette règle est infirmée quand le phénomène de fatigue est associé à d'autres modes d'endommagement fonction du temps : fatigue-corrosion, fatigue-fluage...etc.



Dans le cas des chargements variables (figure 1. 10), les paramètres prépondérants sont :

- Présence de surcharges : la répétition périodique d'une surcharge peut retarder considérablement la propagation de fissures ;
- Ordre d'apparition des cycles.
- Discontinuités géométriques (entailles, trous, etc.) : Un accident de forme augmente localement le niveau de contrainte (figure 1. 11). Cette augmentation peut être traduite par un coefficient de surcontrainte élastique  $K_t$  : rapport entre la contrainte locale maximale et la contrainte nominale. Dans le domaine d'endurance limité (domaine visé par l'industrie aéronautique), si la valeur de  $K_t$  augmente, la durée de vie diminue.

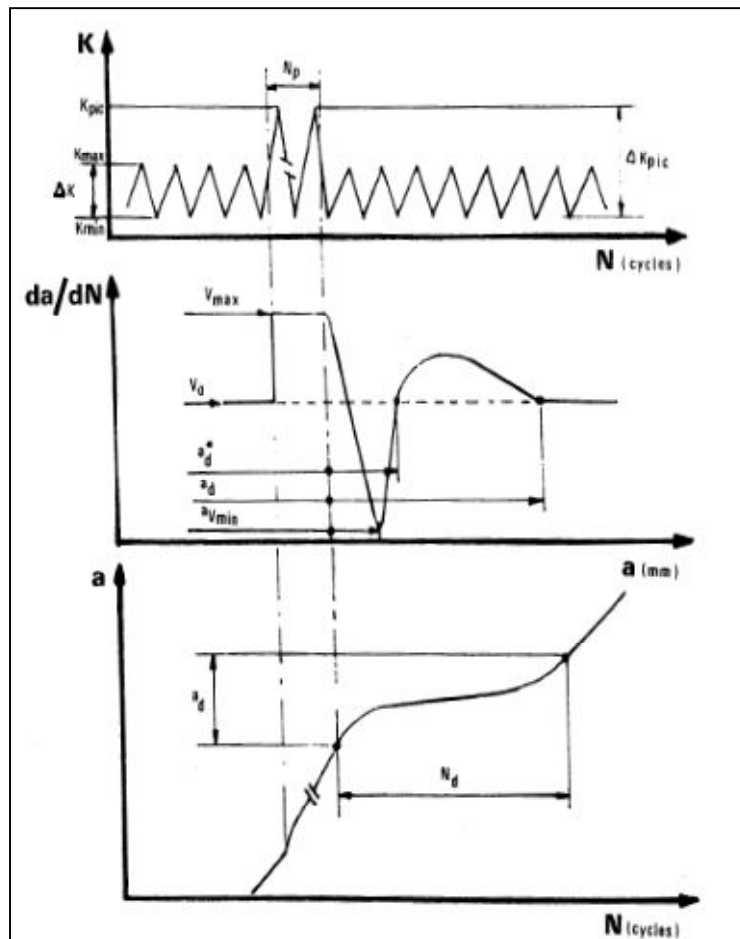


Figure 1. 10: Effet des surcharges sur la propagation des fissures de fatigues

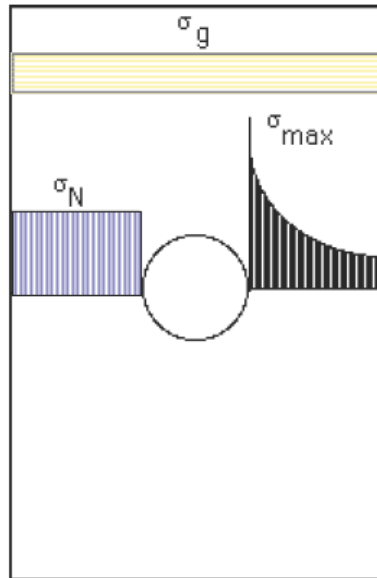


Figure 1. 11: Contraintes et concentrations de contraintes au niveau de l'entaille

## V. Modèles de propagations

On a plusieurs modèles qui ont été proposés. Une variété de modèles ont été proposés pour prédire la durée de vie et la vitesse de fissuration «  $da/dN$  » sous différentes conditions. Dans cette partie on présente les modèles de prédiction de la durée de vie sous chargement à constante et sans effet du rapport de charge  $R$ .

Parmi les plus reconnus, on note :

### a. Modèle de Paris

Pour les matériaux à comportement élastique, Paris [16] a proposé d'utiliser la variation du facteur d'intensité de contrainte  $\Delta K$  pour décrire la croissance stable des fissures par fatigue en élasticité linéaire (domaine II).

$$\frac{da}{dN} = (\Delta K)^2 \quad (11)$$

Cette démarche empirique est justifiée dans le cas où il n'y a pas de fermeture à la pointe de la fissure ni d'émoussement. La loi proposée par Paris ne décrit pas la totalité de la courbe de propagation ; cependant, d'autres lois empiriques ou analytiques ont été proposées pour décrire l'ensemble de la courbe de propagation.

### b. Modèle de Walker

La principale limite de la loi de Paris est son incapacité à prendre compte de l'effet du rapport de charge. Cet inconvénient a été notifié par Walker [17] afin d'améliorer le modèle de Paris en incluant l'effet du rapport de charge. Walker a proposé le paramètre  $\overline{\Delta K}$ , qui est équivalent au facteur d'intensité de contrainte à  $R=0$  et qui provoque la même vitesse de propagation au  $K_{max}$  réelle, et la combinaison du rapport  $R$ . Elle est exprimée par la relation suivante (équation.12) :

$$\overline{\Delta K} = (1 - R)^{\gamma_w} \quad (12)$$

$$\text{Où} \quad \Delta K_{max} = \frac{\Delta K}{(1 - R)}$$

L'équation (12) devient donc :

$$\overline{\Delta K} = \frac{\Delta K}{(1-R)^{1-\gamma_w}} \quad (13)$$

Par conséquent, la loi de Walker est représenté par :

$$\frac{da}{dN} = C_w \left( \frac{\Delta K}{(1-R)^{1-\gamma_w}} \right)^{m_w} \quad (14)$$

Pour  $R = 0$ , l'équation (14) est écrite sous la forme :

$$\frac{da}{dN} = C_w (\Delta K)^{m_w} \quad (15)$$

Les paramètres  $C_w$  et  $m_w$  sont respectivement équivalents aux paramètres  $C$  et  $m$  de la loi de Paris. Le modèle de Walker permet de tenir compte du rapport de charge  $R$  au prix d'une constante supplémentaire ( $\gamma_w$ ).

### c. Modèle de Forman

Forman [18] a amélioré le modèle de Walker en suggérant un nouveau modèle dont est capable décrire la région III de la courbe de la vitesse de propagation et inclut l'effet de rapport de charge. La loi de Forman est donnée par :

$$\frac{da}{dN} = \frac{C (\Delta K)^m}{(1-R)(K_{IC} - K_{max})} \quad (16)$$

Cette loi ne semble pas décrire convenablement le comportement des aciers ou l'effet du rapport R est généralement moins marqué. On remarque, que dans la relation précédant, le rapport  $da/dN$  tend vers l'infini quand  $K_{max}$  tends vers  $K_{IC}$ . De plus, cette relation ne tient pas compte de l'existence d'un seuil de fissuration.

Des modifications du modèle de Forman ont été proposées par Hartman et Schijve [19] afin de tenir compte du facteur d'intensité de contrainte seuil  $\Delta K_{th}$  (région I). Le modèle modifié est représenté par l'équation (17).

$$\frac{da}{dN} = \frac{C (\Delta K - \Delta K_{th})^m}{(1-R) \cdot K_{IC} - \Delta K} \quad (17)$$

Où

$\Delta K$  : désigne la variation du facteur d'intensité de contrainte.

C et m : sont des constantes propres au matériau et à l'environnement considéré.

R : rapport de charge.

#### d. Modèle de McEvily

En 1974, McEvily [20] a proposé un modèle relie la propagation de la fissure par cycle dans le mode de striation en fonction de l'ouverture de la fissure où l'effet seuil ( $\Delta K_{th}$ ) est inclut (équation 18).

$$\frac{da}{dN} = \frac{B}{\pi E^2} (\Delta K^2 - \Delta K_{th}^2) \quad (18)$$

Une modification de ce modèle a été proposée afin de tenir compte de l'effet rapport de charge R et de la zone de propagation instable.

$$\frac{da}{dN} = \frac{B}{\pi E^2} (\Delta K^2 - \Delta K_{th}^2) \left( 1 + \frac{\Delta K}{K_C - K_{max}} \right) \quad (19)$$

L'amplitude du facteur d'intensité de contrainte seuil  $\Delta K_{th}$  est exprimée par la relation (20) :

$$\Delta K_{th} = \frac{1.2 (\Delta K_{th0})}{1+0.2 \left( \frac{1+R}{1-R} \right)} \quad (20)$$

### e. Modèle de Forman / Mettu (Nasgro)

Le modèle NASGRO utilisé dans la prédiction de la vitesse de propagation de fissuration de fatigue et implémenté dans plusieurs codes de calcul de fatigue, a été développé par Forman et Mettu [21]. Le modèle de NASGRO prédit la vitesse de fissuration pour les trois domaines et est sous la forme :

$$\frac{da}{dN} = C \left[ \left( \frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right]^n \frac{\left( 1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left( 1 - \frac{K_{max}}{K_{crit}} \right)^q} \quad (21)$$

C, n, p, q sont des paramètres empiriques  $K_{max}$  et  $K_{crit}$  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 :

$$f = \frac{K_{cp}}{K_{max}} = \begin{cases} \max(R, A_0 + A_1 R + A_2 R^2 + A_3 R^3) & R \geq 0 \\ A_0 + A_1 R & -2 \leq R < 0 \\ A_0 + 2A_1 & R < -2 \end{cases} \quad (22)$$

Les coefficients  $A_i$  sont données par :

$$A_i \begin{cases} A_0 = (0,825 - 0,34 \alpha + 0,05 \alpha^2) \left[ \cos \left( \frac{\pi}{2} \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} \right) \right]^{1/\alpha} \\ A_1 = (0,415 - 0,71 \alpha) \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} \\ A_2 = 1 - A_0 - A_1 - A_3 \\ A_3 = 2A_0 + A_1 - 1 \end{cases} \quad (23)$$

$\alpha$  : Rapport de contrainte/déformation plane

$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_0}$  : Rapport de la contrainte maximale appliquée sur la contrainte d'écoulement

$\Delta K_{th}$ : Amplitude du facteur d'intensité de contrainte seuil donnée par :

$$\Delta K_{th} = \Delta K_0 \left( \frac{a}{a+a_0} \right)^{\frac{1}{2}} / \left( \frac{1-f}{(1-A_0)(1-R)} \right)^{(1+C_{th}R)} \quad (24)$$

$\Delta K_0$ : Amplitude du facteur d'intensité de contrainte seuil à  $R = 0$

$a$  : Longueur de la fissure

$a_0$  : Longueur de la fissure initiale

$C_{th}$  : Coefficient seuil

L'effet d'épaisseur est inclut dans le modèle et dépend du rapport  $K_{crit} / K_{IC}$  donné par :

$$\frac{K_{crit}}{K_{IC}} = 1 + B_k e^{-\left(A_k \frac{t}{t_0}\right)^2} \quad (25)$$

$K_{IC}$  : Ténacité du matériau

$A_k, B_k$  : paramètres d'ajustement

$t$  : Epaisseur

$t_0$  : Epaisseur de référence (condition de déformation plane)

La condition de déformation plane est définie par :

$$t_0 = 2.5 \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_F} \right)^2 \quad (26)$$

# Chapitre 2

## **Outils de simulation (AF GROW)**

## Chapitre 2 : OUTILS DE SIMULATION (AF GROW)

### I. Définition

AFGROW est un code de calcul permettant d'étudier la propagation des fissures de fatigue et la prévision de la durée de vie développé par HARTER au profit de la NASA. La version de code AFGROW qu'on utilisera travaille sous une interface sous Windows XP.

Le code possède deux interfaces principales l'interface « modèle géométrique » (Figure 2. 1) et l'interface « matériaux » (Figure 2. 2), de plus, il permet par des interfaces intermédiaires ou auxiliaires, d'introduire les spectres de chargement (figure 2. 3), les modèles d'amplitude et plusieurs d'autre fonction comme la fonction « Repair Menu ». Il offre la possibilité d'introduire des matériaux différents et avec des résultats expérimentaux. L'introduction des modèles géométriques nouveaux nécessite l'élaboration des interfaces sous Microsoft Visual Basic. Les résultats sont sous forme graphique et données numérique de l'évolution de longueur de la fissure en fonction du nombre de cycle  $a=f(N)$  et de la vitesse de propagation  $da/dN=f(\Delta K)$ .

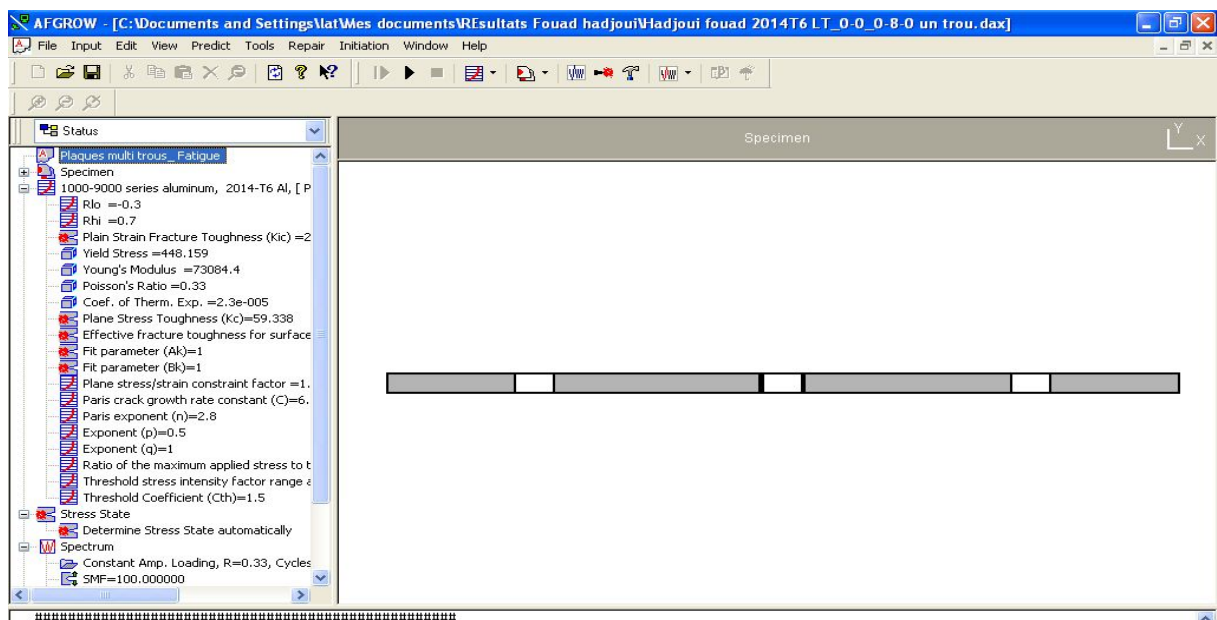


Figure 2. 1: Interface AFGROW



## II. Matériaux étudié

L'interface suivante nous permet de fixer le matériau choisi et d'introduire différentes propriétés mécaniques équivalentes.

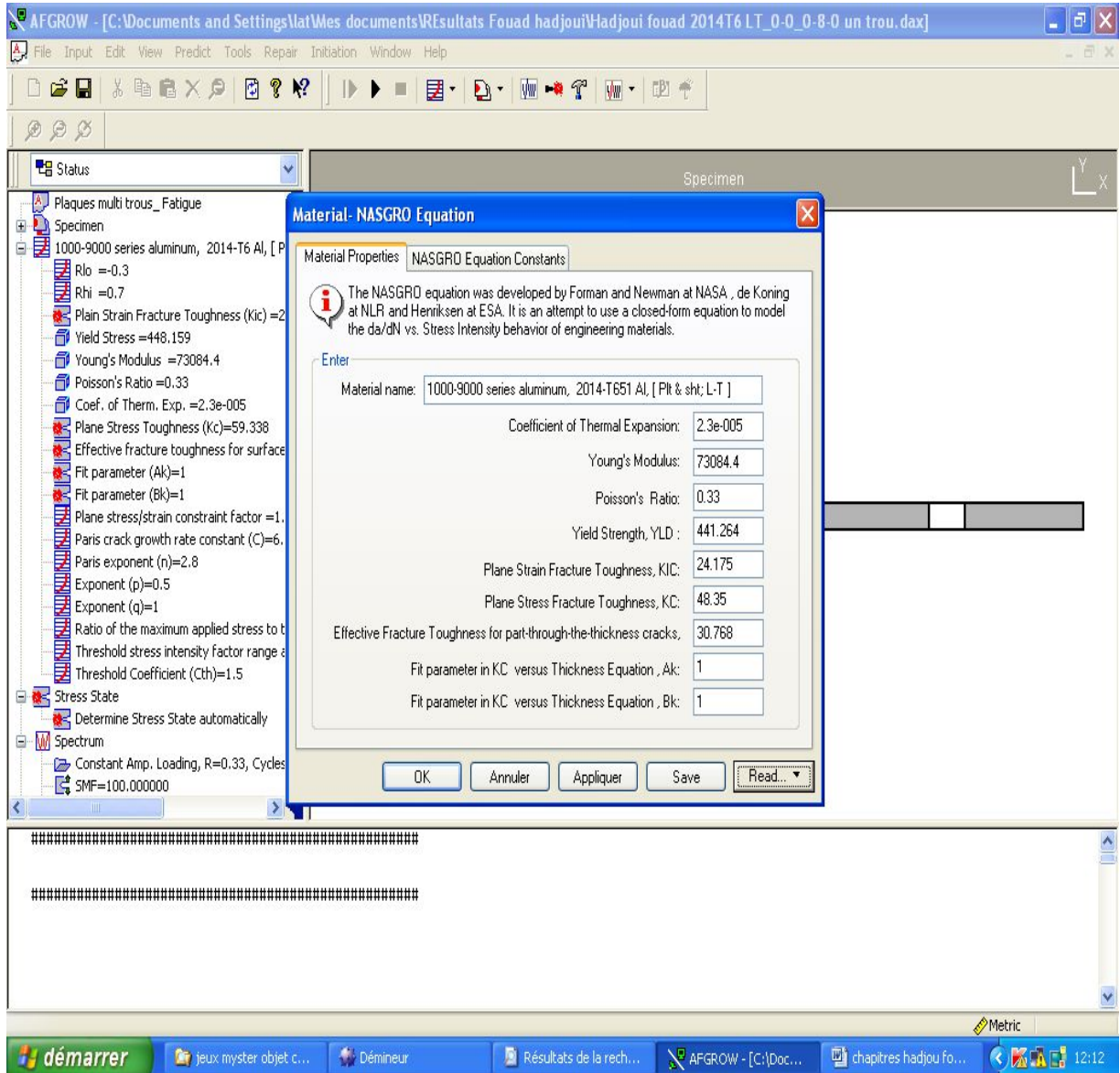


Figure 2.2: Interface matériau

Le matériau étudié est un alliage d'aluminium de **série 2000, 2014-T6, 2024-T3, 2024-T351 et 2219-T62.**

Les propriétés mécaniques sont présentées sur le Tableau 2. 1 suivant le sens L et T.

Tableau 2 1: Caractéristiques mécanique des alliages d'aluminium

Matériaux	$\sigma_e$ (MPa)	E (MPa)	$K_c$ (MPa m <sup>1/2</sup> )	$K_{Ic}$ (MPa m <sup>1/2</sup> )	$\nu$
2014 T6 T-L	434.37	73084.4	25.273	19.779	0.33
2014 T6 L-T	448.159	73084.4	41.756	29.669	0.33
2024 T3 L-T	365.422	73084.4	50.547	36.262	0.33
2024 T351 L-T	372.317	73084.4	52.744	37.361	0.33
2219 T62 L-T	296.475	73084.4	47.25	34.061	0.33

Ensuite on passe à une interface sur laquelle, on introduit les différents chargements

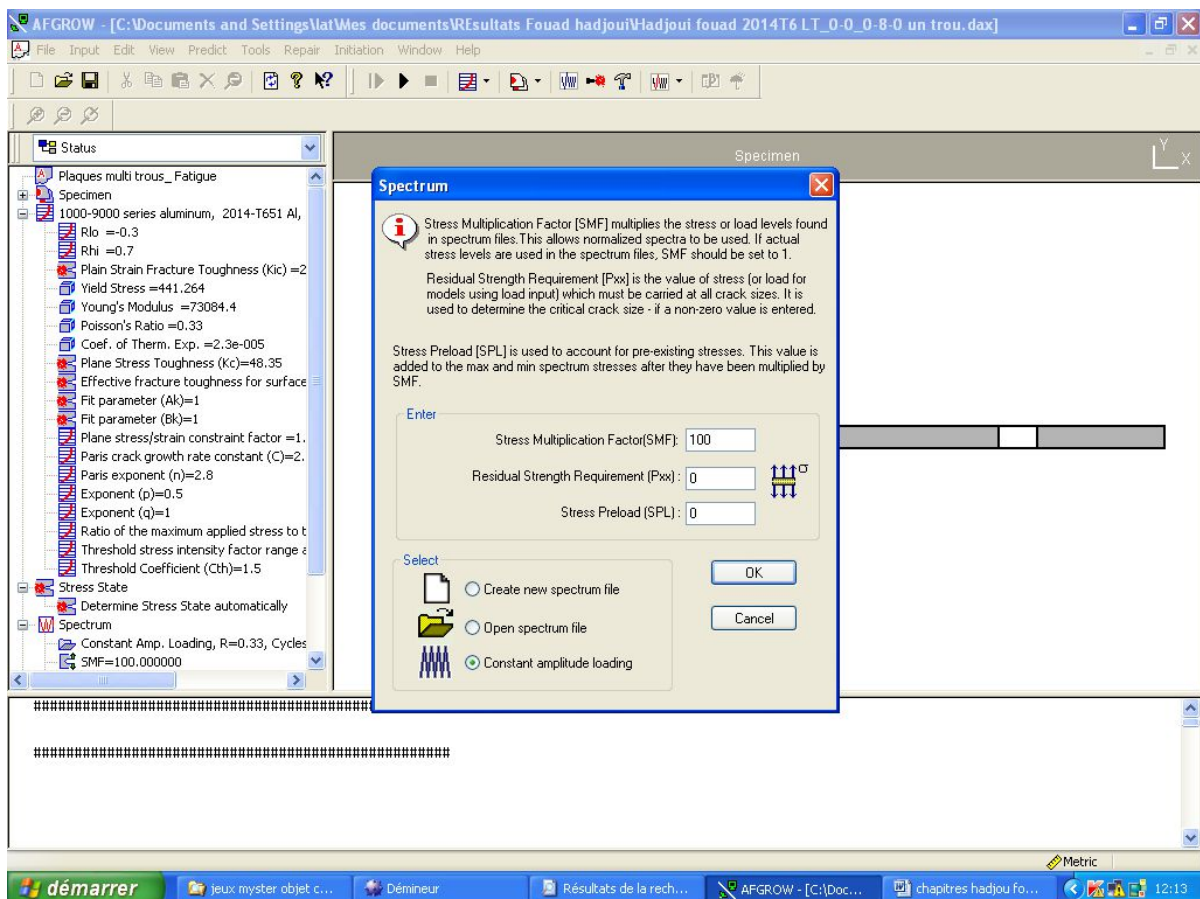


Figure 2.3: Interface chargement

### III. Géométrie

Les éprouvettes utilisées sont des éprouvettes "Sent" sous forme d'une tôle rectangulaire d'une longueur de 320mm, d'une largeur de 160mm et d'une épaisseur de 5 mm, percées selon trois variantes.

#### Premier cas :

- Trois trous alignés horizontalement et symétrique par rapport à la largeur
- Les centres sont respectivement à 40 mm, 80 mm et 120 mm par rapport à un coté latéral
- Avec trois variantes de diamètre
  - a. Trois trous  $d_1 = d_2 = d_3 = 8$  mm
  - b. Trois trous  $d_1 = d_3 = 6$  mm et  $d_2 = 8$  mm
  - c. Trois trous  $d_1 = d_3 = 4$  mm et  $d_2 = 8$  mm

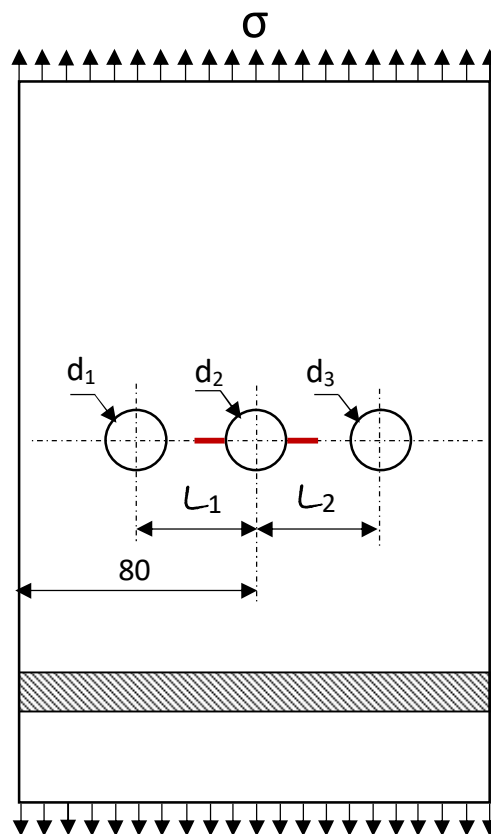


Figure 2.4: Eprouvettes avec trois trous

**Deuxième cas :**

Une éprouvette de dimension identique au précédentes, mais avec un seul trou centré de diamètre  $d_1 = 8$  mm avec et une fissuration sur le trou.

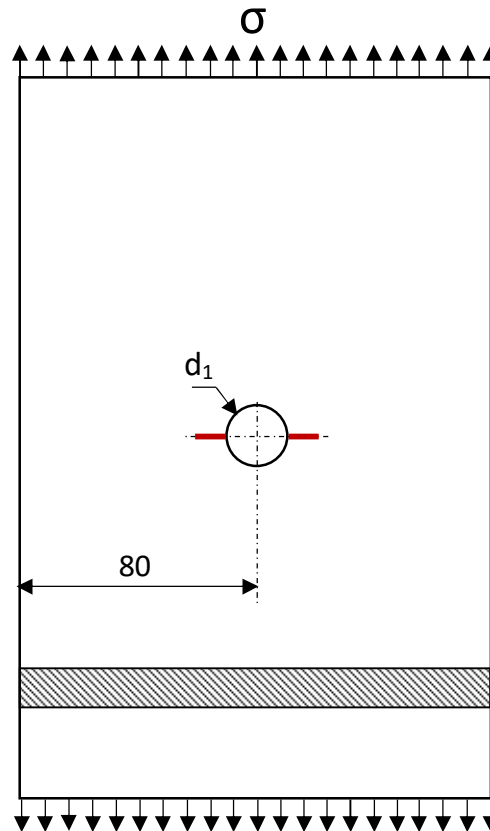


Figure 2.5: Epreuve avec un trou

**Troisième cas :**

Une éprouvette identique au deuxième cas, avec le même diamètre du trou ( $d_1 = 8 \text{ mm}$ ) mais la fissuration sur le côté.

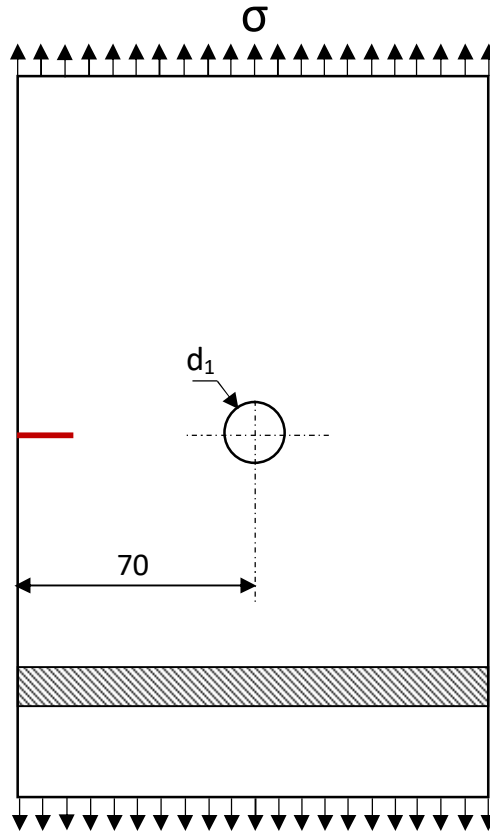


Figure 2.6: Eprouvettes avec un trou

#### IV. Modèle de propagation appliqué

Le modèle de propagation utilisé dans cette étude est le modèle de Forman/Mettu [21] (équation) dont les paramètres de propagation pour les matériaux étudiés sont portés sur le tableau 2. 2. La vitesse de fissuration est évaluée par la méthode de la sécante à partir des résultats obtenus du couple (a, N).

$$\frac{da}{dN} = C \left[ \left( \frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right]^n \frac{\left( 1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left( 1 - \frac{K_{max}}{K_{crit}} \right)^q} \quad (21)$$

Tableau 2 2: Paramètres du modèle de propagation d'alliage d'aluminium

Alliages d'aluminium	C	N	P	p	$\Delta k_{th}$ (R=0)
2014 T6 T-L	$6.827 \cdot 10^{-10}$	2.8	0.5	1	2.967
2014 T6 L-T	$6.827 \cdot 10^{-10}$	2.8	0.5	1	2.967
2024 T3 L-T	$1.5451 \cdot 10^{-10}$	3.284	0.5	1	3.187
2024 T351 L-T	$1.7073 \cdot 10^{-10}$	3.353	0.5	1	2.857
2219 T62 L-T	$7.4543 \cdot 10^{-10}$	2.657	0.5	1	3.956

# Chapitre 3

**Résultats**

**&**

**Discussions**

## Chapitre 3 : RESULTATS & DISCUSSION

### I. Effet du rapport de charge

La figure 3.1 montre l'évolution de la longueur de la fissure "a" en fonction du nombre de cycles "N" sous l'effet du rapport de charge "R".

L'augmentation du rapport de charge a fait augmenter la durée de vie ; ceci est due en effet à la diminution de l'amplitude de chargement " $\Delta\sigma$ " à  $R = 0.1$  ; l'amplitude de chargement est de 90 MPa par contre à  $R=0.54$ , l'amplitude de chargement est de 46 MPa. Il est à noter qu'à  $R = 0.1$ , la durée de vie à la rupture est de 21114 cycles.

A  $R = 0.54$ , la durée de vie est de 68134 cycles, cela représente une augmentation de 3.226 fois par rapport à la durée de vie pour  $R=0.1$

L'effet de l'augmentation du rapport de charge sur la vitesse de fissuration  $da/dN$  en fonction de  $\Delta K$  est montré par la figure 3.2. En effet, l'influence du rapport de charge est traduite par un décalage des courbes  $da/dN - \Delta K$  vers les faibles valeurs de  $\Delta K$ .

Ces résultats montrent la dépendance de  $\Delta K_s$  seuil du rapport de charge. Ces résultats sont en bonne concordance avec les résultats de la littérature [22]. L'augmentation du rapport de charge a fait augmenter les vitesses de fissuration.

A titre d'exemple pour  $\Delta K = 20\text{Mpa}$ , la vitesse de fissuration à  $R = 0.1$  est de  $1.37 \times 10^{-6}$  m/cycle et à  $R = 0.54$ , la vitesse de fissuration est de  $6.35 \times 10^{-6}$  m/cycle. Le taux d'augmentation est de 4.63.



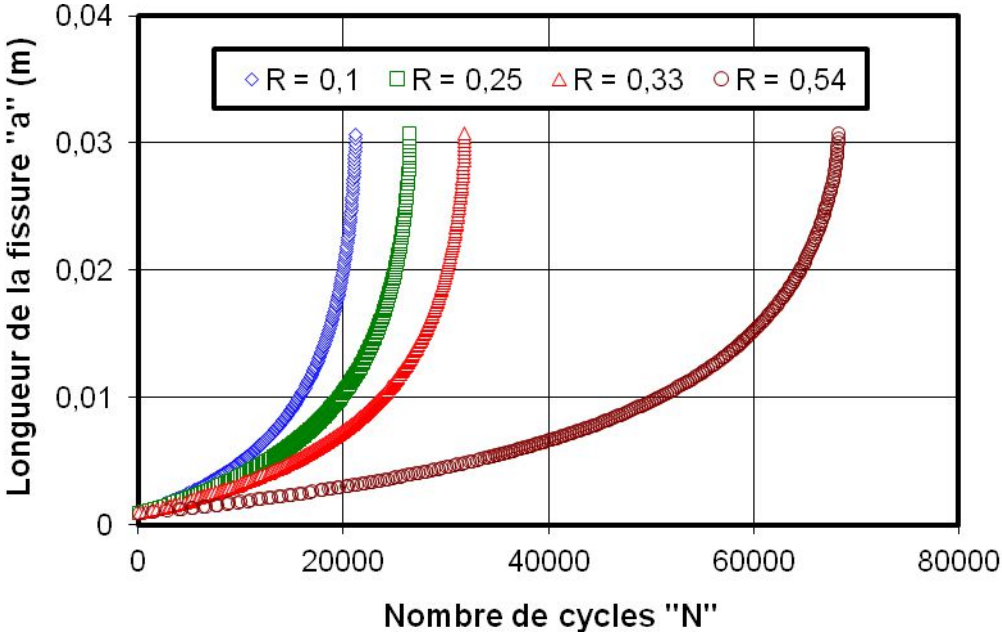


Figure 3. 1: Effet du rapport de charge sur la durée de vie en fatigue de l'alliage 2014 T6

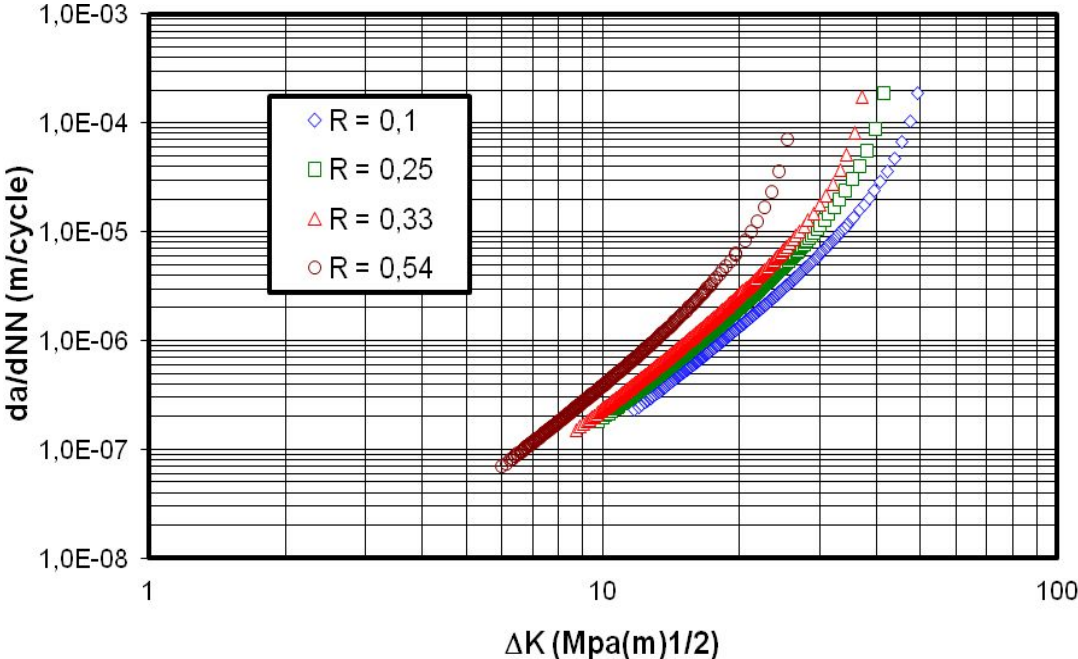


Figure 3. 2: Effet du rapport de charge sur la vitesse de fissuration de l'alliage 2014 T6

## II. Effet de l'amplitude du chargement maximal

L'amplitude de chargement présente un autre paramètre affectant le comportement de fissuration par fatigue. L'effet de l'amplitude de chargement sur la durée de vie en fatigue est montré par la figure 3.3.

A rapport de charge constant "R= 0.33", l'augmentation du chargement maximal appliqué a fait diminué la durée de vie en fatigue.

En effet, l'augmentation de la charge maximale fait augmenter l'amplitude de chargement et le chargement moyen.

A  $\sigma_{\max} = 140$  MPa, l'amplitude de chargement  $\Delta\sigma$  est de 93.8 MPa et à  $\sigma_{\max} = 80$  MPa, elle est de 53.6 MPa. Le chargement moyen est respectivement de 70 et 40 MPa pour  $\sigma_{\max}$  de 140 et 80 MPa.

La durée de vie pour  $\Delta\sigma = 93.8$  MPa est de l'ordre 8660 cycles et à  $\Delta\sigma = 53.6$  MPa, elle est de 65500 cycle. Cela représente un taux de diminution en durée de vie de 7.56 fois.

De même, l'amplitude de chargement affecte aussi la durée de vie. La figure 3.4 montre l'évolution de la vitesse de fissuration en fonction de la longueur de la fissure pour R=0.33.

A une longueur de fissure "a = 20 mm", la vitesse de fissuration pour  $\Delta\sigma = 93.8$  MPa est de  $2.03 \times 10^{-5}$  m/cycle. Pour  $\Delta\sigma = 53.6$  MPa, la vitesse de fissuration pour la même longueur de fissure a passé à  $1.42 \times 10^{-6}$  m/cycle, ce qui représente un taux de diminution de 14.3 fois.

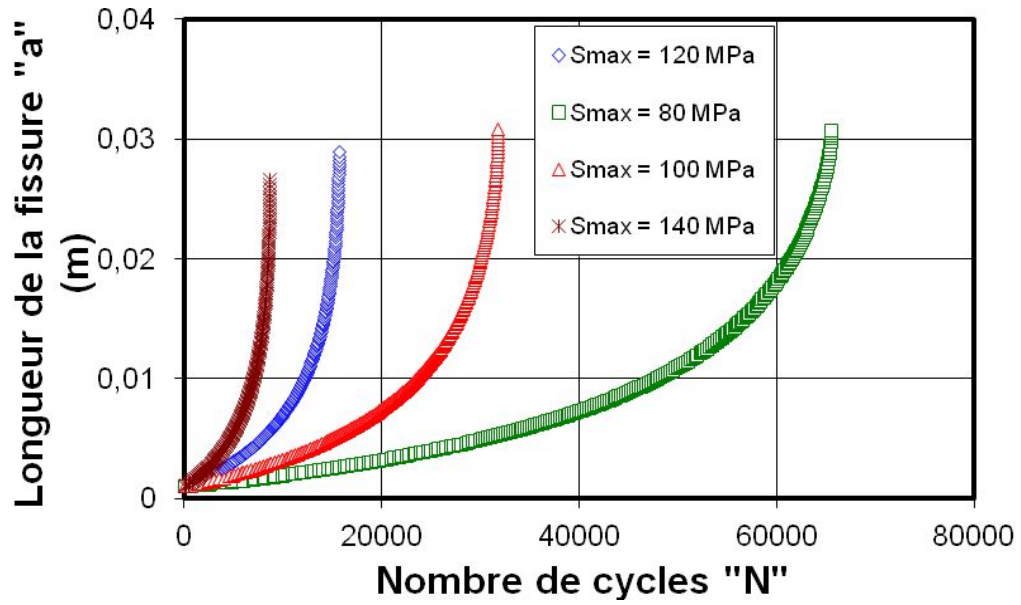


Figure 3. 3: Effet de l'amplitude de chargement sur la durée de vie en fatigue de l'alliage 2014 T6

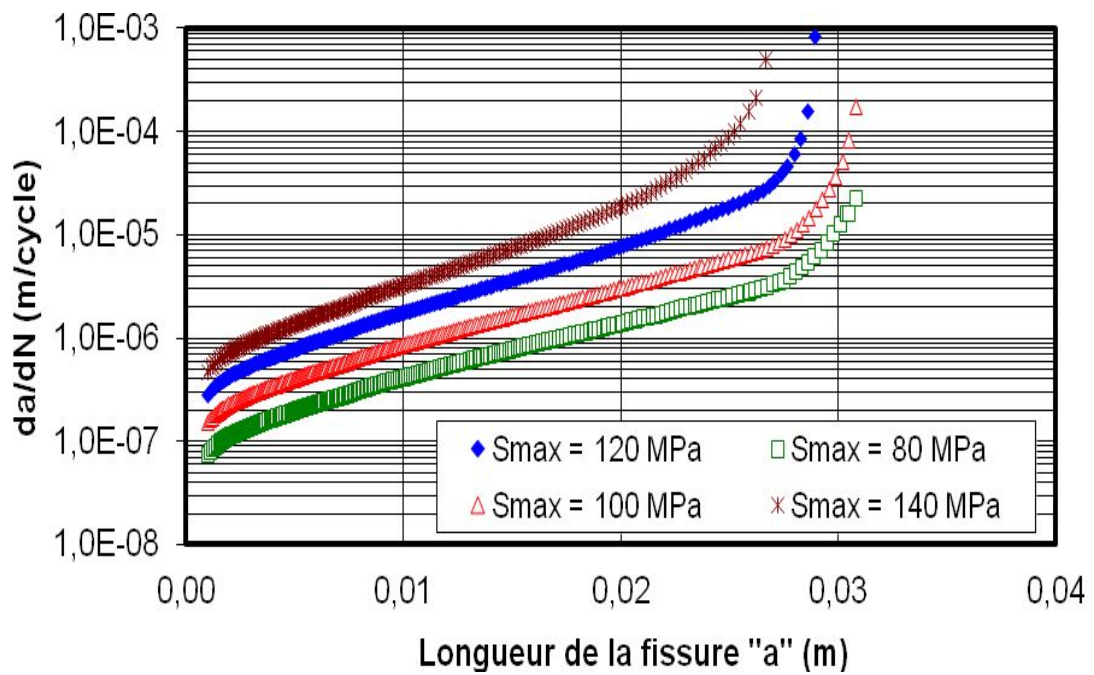


Figure 3. 4: Effet de l'amplitude de chargement sur la vitesse de fissuration de l'alliage 2014 T6

### III. Effet de la position des trous

La figure 3.5 montre l'évolution de la longueur de la fissure "a" en fonction du nombre de cycles "N" sous l'effet de la variation de la position des trous caractérisée par les longueurs L1 et L2 par rapport au trou central fissuré. L'augmentation des entraxes L1 et L2 permet de prolonger la propagation de la fissure. Par contre la diminution des entraxes L1 et L2 a présenté un avantage d'arrêt de fissure

A  $L1 = L2 = 50$  mm, la longueur de la fissure a atteint une longueur propagée de 38 mm par contre pour  $L1 = L2 = 40$  et pour une même durée de vie, la longueur de la fissure propagée est de 31 mm. Pour des faibles entraxes (exemple  $L1 = L2 = 25$  mm), la longueur propagée a atteint une longueur de 16.3 mm pour une durée de vie de 23000 cycles. A  $L1 = L2 = 30$  mm, la longueur de la fissure a passé à 21.4 mm pour un nombre de cycles de 26655 cycles. A titre d'exemple, la réduction de la longueur des entraxes de 50 mm à 25 mm a diminué la longueur de la fissure propagée de 2.34 fois pour un taux en durée de vie de 1.37 fois. A l'absence de la présence des trous, la fissure se propage jusqu'à atteindre une longueur critique de 46 mm équivalente à la ténacité du matériau. En conclusion, la présence des trous présente un effet bénéfique sur la fissuration par fatigue. En effet ils permettent le blocage de la propagation des fissures, et en conséquence un gain sur la durée de service de la structure en question.

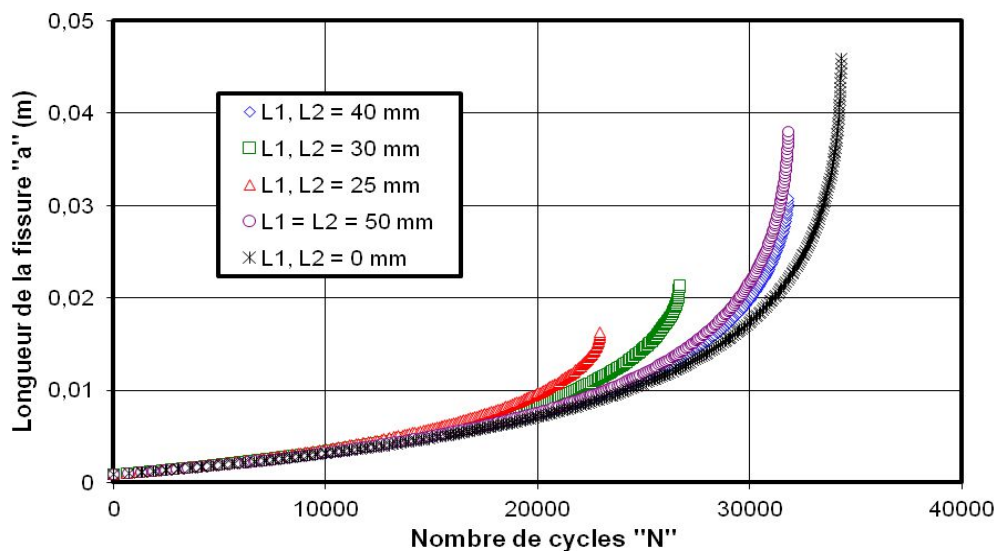


Figure 3. 5: Effet de la position des trous sur la durée de vie en fatigue de l'alliage 2014 T6

#### IV. Effet du diamètre central

La figure 3.6 représente l'évolution de la longueur de la fissure "a" en fonction du nombre de cycles "N" sous l'effet de la variation du diamètre de trou centrale et des diamètres fixes  $d_1$  et  $d_3$  ( $d_1 = d_3 = 8$  mm) et des entraxes fixes ( $L_1 = L_2 = 40$  mm).

La diminution du trou centrale a fait augmenter le nombre de cycles à rupture. Le passage d'un diamètre de 10 mm à un diamètre de 6 mm a augmenté la durée de vie d'environ de 1.57 fois.

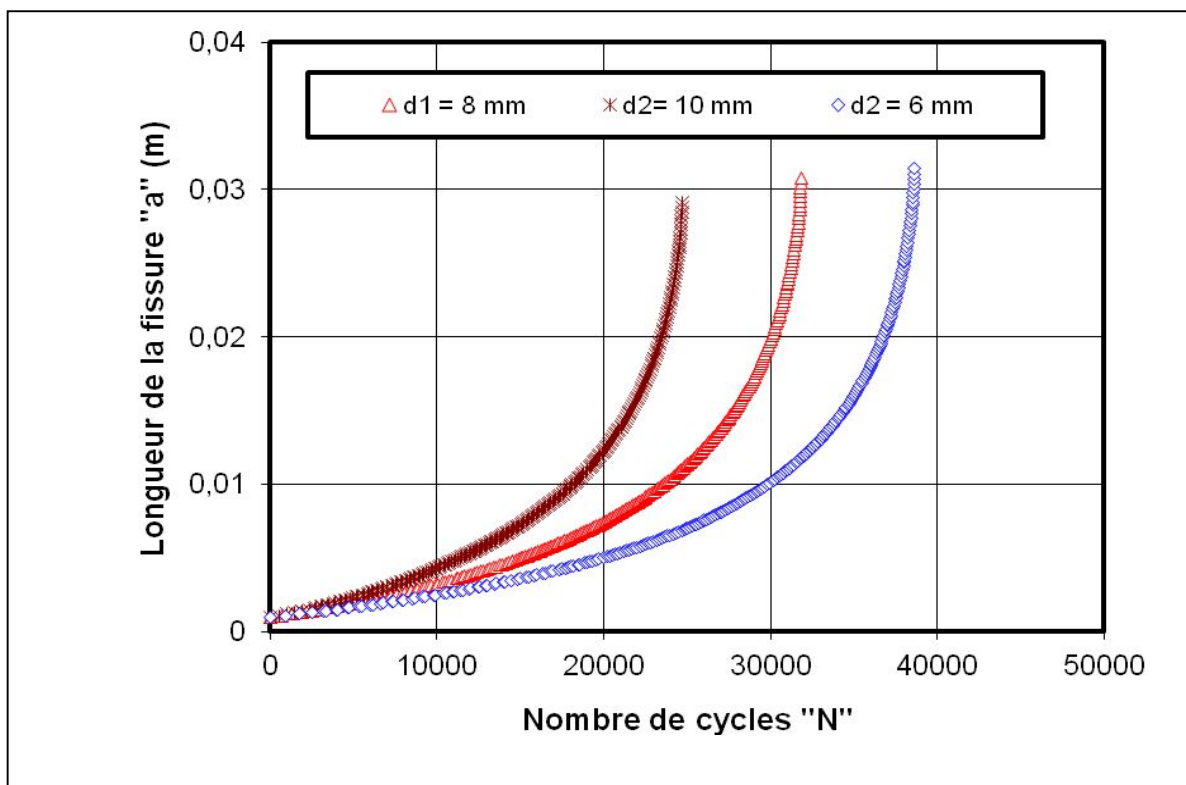


Figure 3. 6 : Effet du diamètre central sur la durée de vie en fatigue de l'alliage 2014 T6

## V. Effet d'orientation de la propagation de la fissure

La figure 3.7 montre l'évolution de la longueur de la fissure "a" en fonction du nombre de cycles "N" sous l'effet d'orientation de la propagation de la fissure. Deux sens d'orientation sont considérés à savoir le sens L-T et T-L

On remarque que la durée de vie pour une propagation suivant le sens T (L-T) est importante par rapport à une propagation suivant le sens L (T-L). Pour le sens L, la longueur de la fissure s'est limitée à 17.32 mm et une durée de vie de 19750 cycles. Par contre pour le sens T, la longueur de la fissure atteinte est de 30.8 mm et une durée de vie de 31790 cycles. Cela présente un taux d'augmentation en durée de vie de 1.62.

L'effet d'orientation de la propagation de la fissure est très marqué en examinant l'évolution de la vitesse de fissuration en fonction du facteur d'intensité de contrainte  $\Delta K$  (figure 3.8). L'écart entre les courbes des vitesses de fissuration est faible pour des valeurs de  $\Delta K$  inférieures à  $\Delta K = 10 \text{MPa} \sqrt{\text{m}}$ . Cette écart devient très important à partir de  $\Delta K = 13,5 \text{MPa} \sqrt{\text{m}}$ .

A  $\Delta K = 18 \text{MPa} \sqrt{\text{m}}$ , la vitesse de propagation suivant le sens L (T-L) est de l'ordre de  $4.2 \times 10^{-5}$  m/cycles et suivant le sens T (L-T) elle de  $1.82 \times 10^{-6}$  m/cycles ce qui représente un taux de réduction des vitesses de 23.1 fois. En conclusion, on peut dire que l'orientation (L-T) présente une meilleure résistance à la fissuration par fatigue.

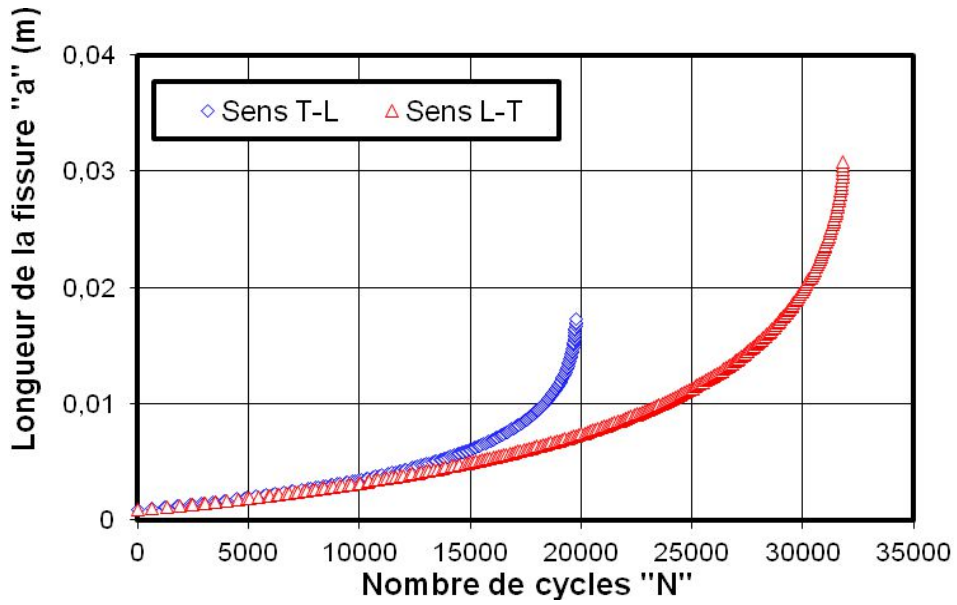


Figure 3. 7: Effet d'orientation de la propagation de la fissure sur la durée de vie en fatigue de l'alliage 2014 T6

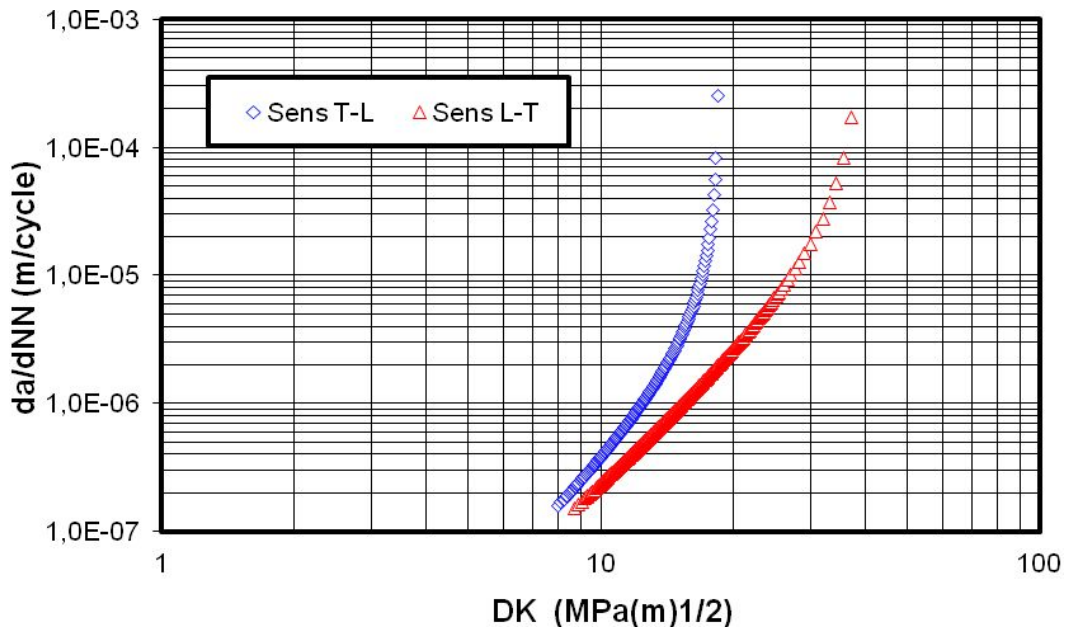


Figure 3. 8: Effet d'orientation de la propagation de la fissure sur la vitesse de fissuration de l'alliage 2014 T6

## VI. Etude comparative pour différents matériaux

Les alliages d'aluminiums sont fortement utilisés en aéronautique avec différentes nuances et traitement thermiques.

Dans cette partie on présente une comparaison en durées de vie et vitesses de fissuration prédites pour des alliages d'aluminium de la série 2000.

La figure 3.9 représente l'évolution de la durée de vie pour des alliages d'aluminium (2014 T6, 2024 T3, 2024 T351 et 2219 T62).

Cette comparaison est faite sous les conditions suivantes : un chargement appliqué d'amplitude constante avec  $\sigma_{max} = 100$  MPa, un rapport de charge  $R=0.33$ , des entraxes  $L1 = L2 = 40$  mm et des diamètres des trous  $d1 = d2 = d3 = 8$  mm.

On remarque que la durée de vie prédite pour l'alliage 2024 T3 est importante par rapport à la durée de vie de l'alliage 2219 T62. La différence en durée de vie est de l'ordre de 36500 cycles ce qui présente un taux d'augmentation pour le 2024 T3 de 2.15 fois.

En termes de vitesse de fissuration (figure 3.10), une légère différence est constatée entre les différents alliages. Les vitesses de fissuration sont limitées dans la bande en traits discontinus. Cette bande pour un facteur d'intensité de contrainte de  $20 MPa\sqrt{m}$  varie de  $1 \times 10^{-6}$  à  $5 \times 10^{-6}$  m/cycles.



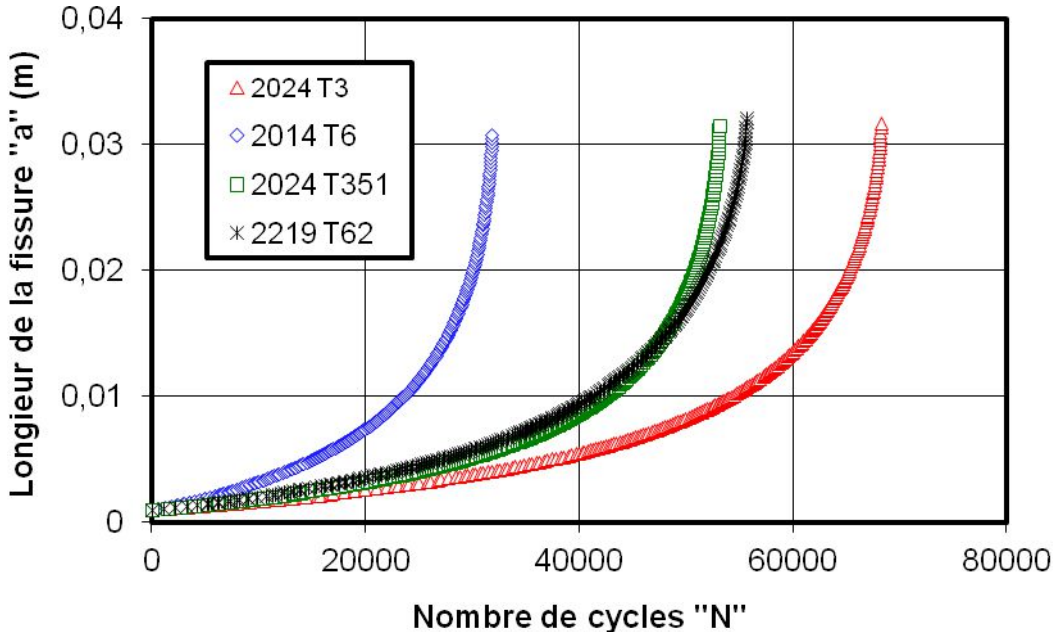


Figure 3. 9: Etude comparative pour les différents matériaux sur la durée de vie en fatigue

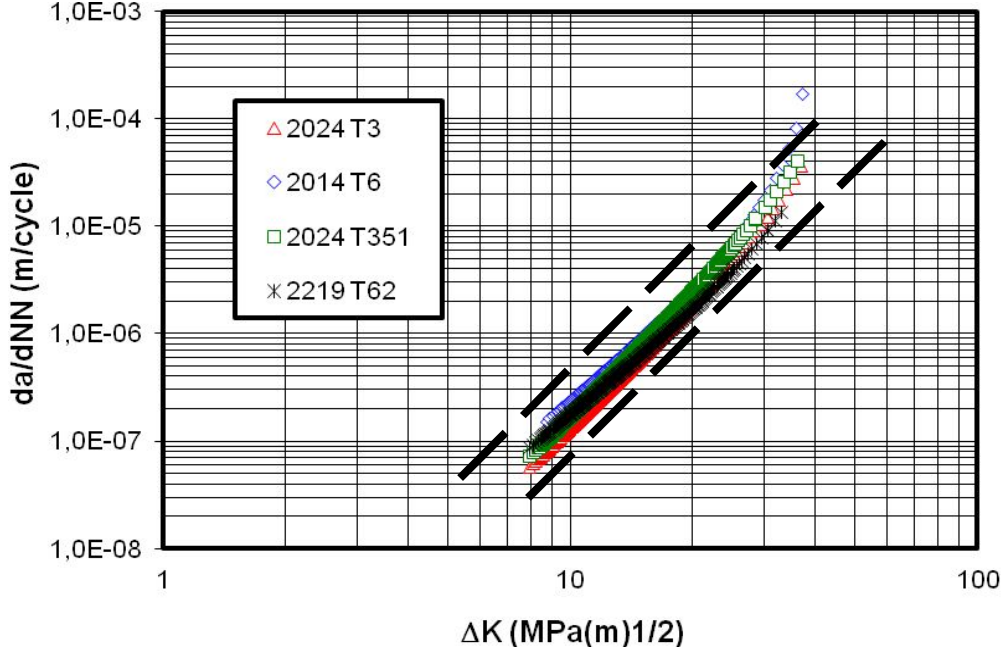


Figure 3. 10: Etude comparative les différents matériaux sur la vitesse de fissuration de l'alliage

## VII. Effet de la position d'un trou pour une plaque à fissure sur le bord

La prédiction des durées de vie pour une plaque en alliage 2014 T6 fissuré sur le bord et ayant un trou suivant le chemin de propagation positionné à une distance variable  $L1$  est montrée sur la figure 3.11.

On constate que les durées de vie ne sont pas affectées par la position du trou mais les longueurs fissurées critiques sont fortement affectées.

A une longueur  $L1=70$  mm, la longueur de la fissure est de 45 mm ; par contre pour une longueur  $L1$  de 20 mm, la longueur est de l'ordre de 15 mm.

L'augmentation de la position du trou ( $L1$ ) par rapport à la fissure initiale a permis d'augmenter la longueur de la fissure.

La figure 3.12 montre clairement l'effet de cette distance sur la longueur finale de la fissure. On constate qu'à partir de  $L1 = 60$  mm, cette longueur n'a aucun effet sur la longueur finale de la fissure.

Cela montre que la ténacité du matériau est atteinte malgré la présence du trou. L'évolution de la longueur de la fissure en fonction de la distance  $L1$  est exprimée par la fonction polynomiale suivante :

$$a = -1 \times 10^{-5} \cdot L1^2 + 1.7 \times 10^{-3} \cdot L1 - 0.0141 \quad (27)$$

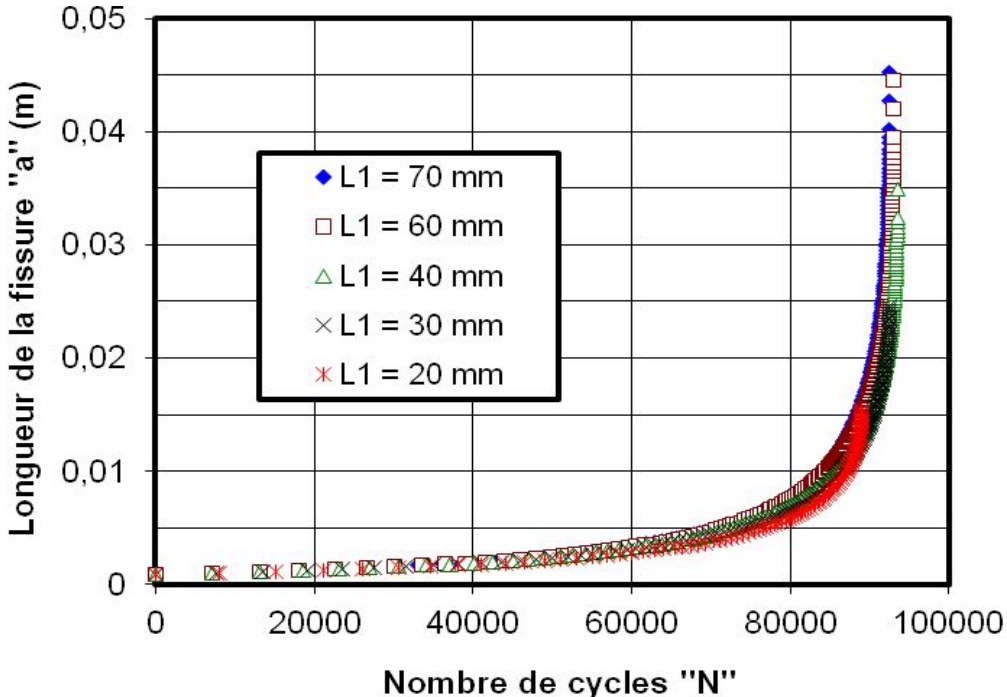


Figure 3. 11: Evolution de la longueur de la fissure en fonction du nombre de cycles

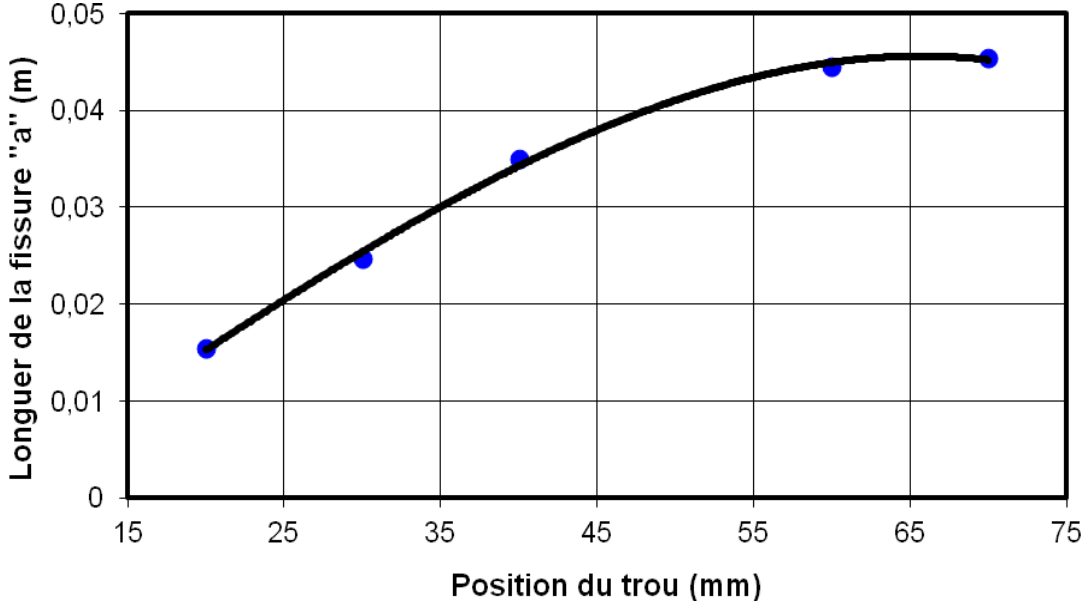


Figure 3. 12: Effet de la position du trou sur la longueur finale de la rupture

# Conclusion Générale

## Conclusion Générale

Dans ce mémoire on a étudié l'effet de la position des trous adjacent à un trou fissuré sur la propagation des fissures de fatigue sur des éprouvettes en alliage d'aluminium de la série 2000. De plus on étudie les effets des paramètres de chargement (rapport de charge R et amplitude de contraintes) et les effets des paramètres géométriques des trous.

Le résultat obtenu montre que L'augmentation du rapport de charge a fait augmenter la vitesse des fissurations.

L'augmentation de l'amplitude de chargement a fait diminuer la durée de vie.

La diminution des entraxes fait diminuer la longueur de la fissure ce qui présente un avantage d'arrêt de la propagation des fissures.

La propagation suivant le sens (L-T) présente une meilleure résistance à la fatigue comparativement à l'orientation (T-L)

En perspective nous souhaitons étudier ce type de géométrie en présence de multifissures d'un côté et faire une étude comparative avec d'autre type d'alliage d'aluminium

# Références Bibliographiques

## Références Bibliographiques

- [1] S. Roy Swanson (1974). “Handbook of fatigue testing”. American Society of Testing and Materials.
- [2] H.M. Westergaard (1939)., “Bearing pressures and cracks”. Transactions ASME, Journal App. Mech., A 49.
- [3] A. Pineau, C. Bathias. “ Fatigue des matériaux et structures 1 “ : introduction, endurance, amorçage et propagation des fissures, fatigue oligocyclique et gigacyclique, édition Lavoisier. (2008), pp. 24-29, pp. 85-87.
- [4] F. Nguedjio, Amorçage des Fissures de Fatigue et Probalisation, Calvin université de technologie de compiegne mécanique appliquée et matériaux, 1989.
- [5] N. Gérard, Etude du comportement des fissures courtes au fond d'une entaille Mécanique sous sollicitation en fatigue, 2003.
- [6] J. J. Kruzic, J. P. Campbell and R. O. Ritchie, On the fatigue behaviour of  $\alpha$ -based titanium aluminides: role of small cracks, Acta mater. Vol. 47, No. 3, p. 801-816, 1999.
- [7] D. S. Tchankov , A. Ohta , N. Suzuki , Yoshio Maeda, Random loading fatigue life assessments for notched plates, International Journal of Fatigue 21, p.941–946, 1999.
- [8] thèse, Amorçage et propagation des fissures courtes dans un alliage d'aluminium lithium, École centrale Paris, 1991.
- [9] : P.J.E. Forsyth, Fatigue damage and crack growth in aluminium alloys, Acta. Metall., 11, p. 703-715, 1963.
- [10] J.R. Desforges Programmation en fatigue des fissures courtes dans les alliages d'aluminium, ENSMA Poitiers, 1996.

- [11] M. Zhang, P. Yang, Y. Tan Micromechanisms of fatigue crack nucléation and short crack growth in a low carbon steel under low cycle impact fatigue Loading, International Journal of Fatigue 21, p.823-830, 1999.
- [12] ] Bellahcen Tassadit. « Etude de la nocivité des défauts dans les canalisations sous environnement hydrogène ». Thèse de doctorat de génie mécanique Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou2008.
- [13] Gertner A.W, Graf.M.K, hillenbrand.H.G. «Producer’s view of large diameter line pipe in the next decade» the international conference on pipeline reliability. PP III-1.1-III1.15  
Calgary(1992)
- [14] F. R. Stonesifer (1978). “Effect of grain size and temperature on fatigue crack propagation in A533 B steel”. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 10, pp 305-314.
- [15] J. P. Benson (1979), Metal Science, 13, pp 535-539
- [16] P.C. Paris, M.P. Gomez, and W. E. Anderson. “ A rational analytic theory of fatigue “. The Trend in Engineering, vol. 13, (1961), pp. 9-14.
- [17] E.K. Walker. “ The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7076-T6 aluminum. In: Effect of environment and complex load history on fatigue life “. ASTM STP 462. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, (1970), pp.1–14.
- [18] Forman, R. G. “ Study of fatigue crack initiation from flaws using fracture mechanics theory “. Engineering Fracture Mechanics 4(2), (1972), pp. 333–345.
- [19] A. Hartman, and J. Schijve. “ The effects of environment and load frequency on the crack propagation law for macro fatigue crack growth in aluminum alloys “. Engineering Fracture Mechanics, 1(4), (1970), pp. 615-631.



[20] McEvily, A.J. “ Phenomenological and microstructural aspects of fatigue “. Third International Conference on the Strength of Metals and Alloys, Cambridge, England; published by The Institute and The Iron and Steel Institutes, Publication, W36, (1974), pp. 204-213.

[21] 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.

[22] D. Kujawski. “Correlation of long and physically short-crack growth in aluminium alloys”, International Journal of Fatigue, 68(12): 1357-1369, 2001



## RESUME

Les défaillances par le phénomène de fatigue représentent 90% de rupture des structures mécaniques en service. La propagation des fissures représente la plus grande préoccupation de nombreux chercheurs afin de réduire les risques d'accidents et de pannes dans les différentes structures. Le but de ce travail est une étude de l'effet des trous ainsi que leur position sur la propagation des fissures de fatigue sur des éprouvettes en alliage d'aluminium de la série 2000. Une variation des diamètres des trous avec des positions différentes ainsi que le positionnement des fissures s'est faites tout en variant paramètres de chargement (rapport de charge R et amplitude de contraintes) et les effets des paramètres géométriques des trous.

Les résultats obtenus montrent que L'augmentation du rapport de charge a fait augmenter la vitesse des fissurations. L'augmentation de l'amplitude de chargement a fait diminuer la durée de vie. La diminution des entraxes fait diminuer la longueur de la fissure ce qui présente un avantage d'arrêt de ma propagation des fissures. La propagation suivant le sens (L-T) présente une meilleure résistance à la fatigue comparativement à l'orientation (T-L).

**Mots clés :** *Fatigue, Alliage d'aluminium, propagation de fissure, Rapport de charge, entraxe des trous, sens (L-T) et orientation (T-L).*

## ملخص

فشل بظاهرة التعب تمثل 90% تمزق الهياكل الميكانيكية في الخدمة. إنتشار الصدع هو أكبر قلق للكثير من الباحثين للحد من مخاطر الحوادث والأعطال في هياكل مختلفة. والغرض من هذا العمل هو دراسة تأثير الثقوب وموقفهم من انتشار الشقوق التعب من القطع اختبار من سبيكة الألومنيوم من سلسلة 2000. وهناك تباين من أقطار الثقوب مع المواقف المختلفة وتم تحديد المواقع من الشقوق في حين متفاوتة المعلمات تحميل (نسبة الإجهاد R والقيود السعة) وآثار المعلمات هندسية من الثقوب. وأظهرت النتائج أن الزيادة في نسبة الحمل زادت سرعة تكسير. زيادة السعة تحميل خفضت العمر. تقليل المسافات يقلل من طول صدع الذي لديه ميزة توقف بلدي الشروخ. انتشار وفقا لاتجاه (L-T) المعارض تحسنت مقاومة التعب مقارنة مع الاتجاه (T-L).

**كلمات السرية:** *التعب، سبائك الألومنيوم، والشروخ، نسبة الحمل، والمباعدة بين حفرة والتوجيه (L-T) والاتجاه (T-L).*

## ABSTRACT

Fatigue failures represent 90% breakage of mechanical structures in service. The propagation of cracks is the greatest concern of many researchers in order to reduce the risk of accidents and breakdowns in the various structures. The aim of this work is to study the effect of holes and their position on the propagation of fatigue cracks on aluminum 2000 series alloy specimens. A variation of the diameters of the holes with different positions as well as the positioning of the cracks was done while varying loading parameters (load ratio R and amplitude of stresses) and the effects of the geometric parameters of the holes.

The results obtained show that the increase in the charge ratio increased the crack speed. The increase in the amplitude of loading has reduced the service life. The decrease in the centers of the cracks reduces the length of the crack, which has the advantage of stopping my propagation of the cracks. The propagation in the direction (L-T) has a better resistance to fatigue compared to the orientation (T-L).

**Key Word :** *Fatigue, Aluminum alloy, crack propagation, Load ratio, hole spacing, direction (L-T) and orientation (T-L).*