

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

Féthi Hadjoui <sup>"1</sup>

Mustapha Benachour <sup>"2</sup>

Fouad Hadjoui <sup>"3</sup>

<sup>"1,2 et 3</sup> Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Mécaniques : IS2M, Département de Génie Mécanique  
Algérie, [hadjoui\\_fethi@yahoo.fr](mailto:hadjoui_fethi@yahoo.fr)

### Résumé :

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 faite tout en variant les 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).*

## 1. Introduction

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

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 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

## 2. Modèles de propagations

Nous avons 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. [1], [2] et [3]

Parmi les plus reconnus, on note :

- Modèle de Paris :  $\frac{da}{dN} = (\Delta K)$  (1)

- Modèle de Walker :  $\frac{da}{dN} = C_w (\Delta K)^{m_w}$  (2)

Les paramètres  $C_w$  et  $m_w$  sont respectivement équivalents aux paramètres C et m de la loi de Paris.

- Modèle de Forman :  $\frac{da}{dN} = \frac{C (\Delta K)^m}{(1-R)(K_{IC} - K_{max})}$  (3)

- Modèle de McEvily :  $\frac{da}{dN} = \frac{8}{\pi E^2} (\Delta K^2 - \Delta K_{th}^2) \left( 1 + \frac{\Delta K}{K_C - K_{max}} \right)$  (4)

- Modèle de Forman / Mettu (Nasgro) :  $\frac{da}{dN} = C \left[ \left( \frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right]^n \frac{\left( 1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left( 1 - \frac{K_{max}}{K_{crit}} \right)^q}$  (5)

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.

### 3. Outils de simulation (AF GROW)

### 3.1. 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 1) et l'interface « matériaux » (Figure 2), de plus, il permet par des interfaces intermédiaires ou auxiliaires, d'introduire les spectres de chargement (figure 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  $da/dN=f(\Delta K)$ .

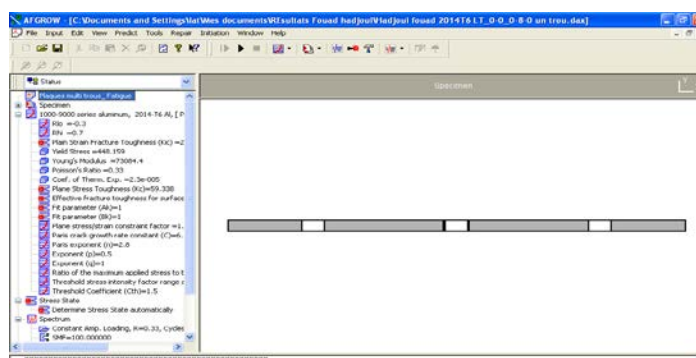


Figure 1. Interface AFGROW

### 3.2. Matériau étudié

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

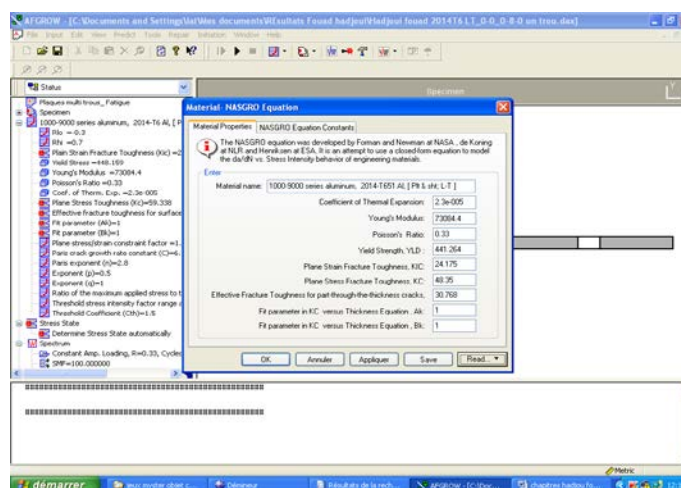


Figure 2. Interface matériau

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 1 suivant le sens L et T.

Tableau 1: Caractéristiques mécaniques 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

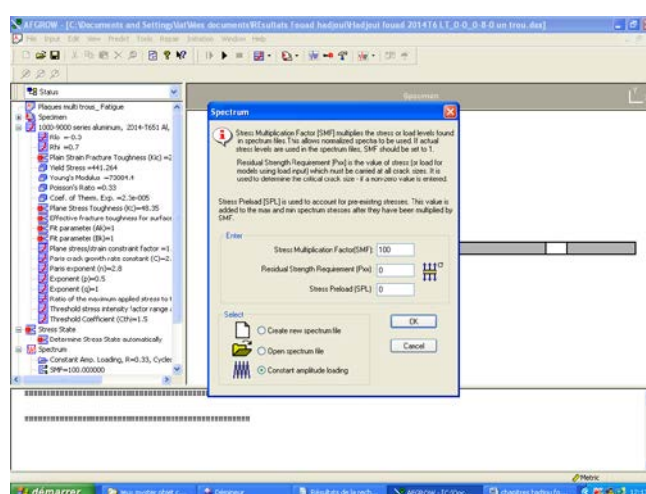


Figure 3. Interface chargement

### 3.3. 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.

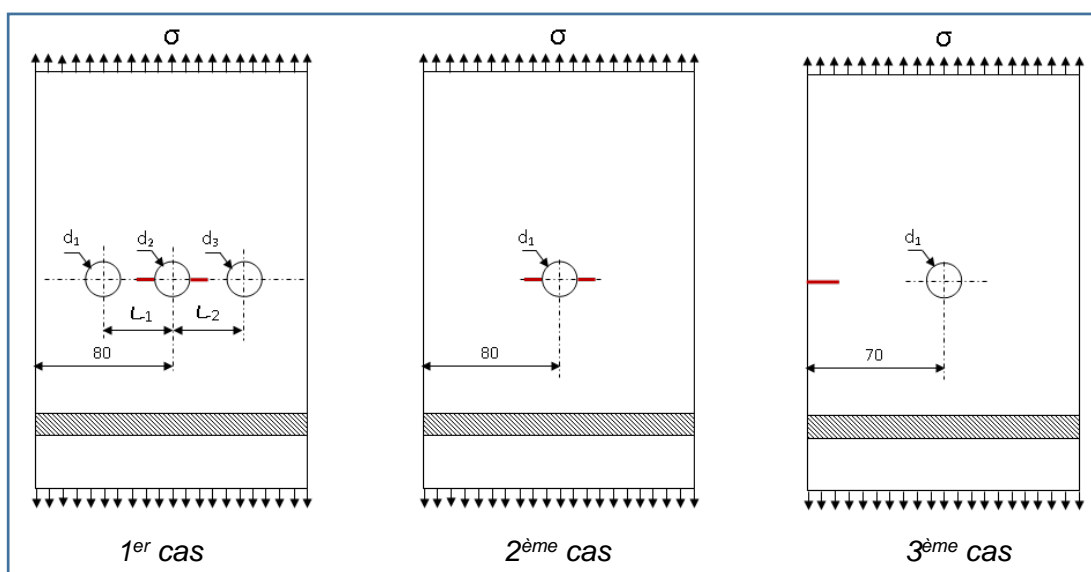


Figure 4. Eprouvettes utilisées

## 4. Modèle de propagation appliqué [4]

Le modèle de propagation utilisé dans cette étude est le modèle de Forman/Mettu [4] (équation) (5) dont les paramètres de propagation pour les matériaux étudiés sont portés sur le tableau 2. La vitesse de fissuration est évaluée par la méthode de la sécante à partir des résultats obtenus du couple (a, N).

$$\frac{da}{dN} = C \left[ \left( \frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right]^n \frac{\left( 1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left( 1 - \frac{K_{max}}{K_{crit}} \right)^q} \quad (5)$$

Tableau 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

## 5. Résultats & Discussion

### 5.1. Effet du rapport de charge

La figure 5. 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".

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 6. 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 [5]. L'augmentation du rapport de charge a fait augmenter les vitesses de fissuration.

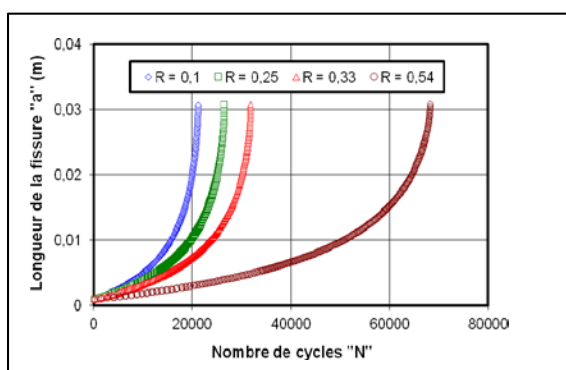


Figure 5. Eprouvettes Effet du rapport de charge sur la durée de vie en fatigue de l'alliage 2014 T6

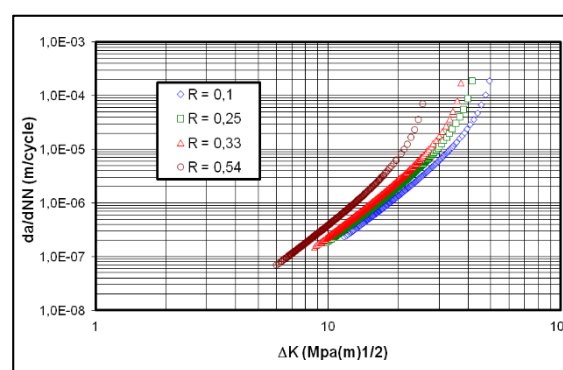


Figure 6. Effet du rapport de charge sur la vitesse de fissuration de l'alliage 2014 T6

## 5.2. 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 7. 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.

De même, l'amplitude de chargement affecte aussi la durée de vie. La figure 8. montre l'évolution de la vitesse de fissuration en fonction de la longueur de la fissure pour  $R=0.33$ .

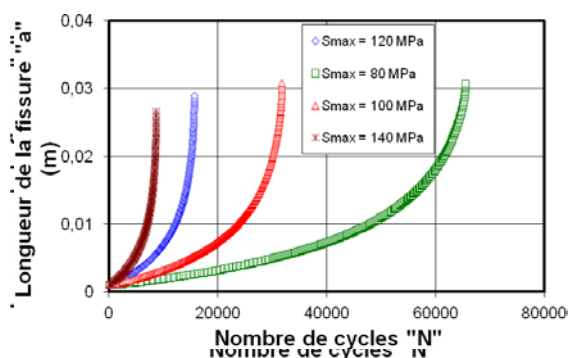


Figure 7. Effet de l'amplitude de chargement sur la durée de vie en fatigue de l'alliage 2014 T6

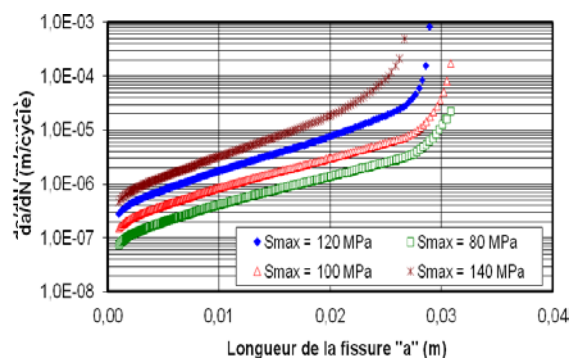


Figure 8. Effet de l'amplitude de chargement sur la vitesse de fissuration de l'alliage 2014 T6

## 5.3. Effet de la position des trous

La figure 9. 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

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.

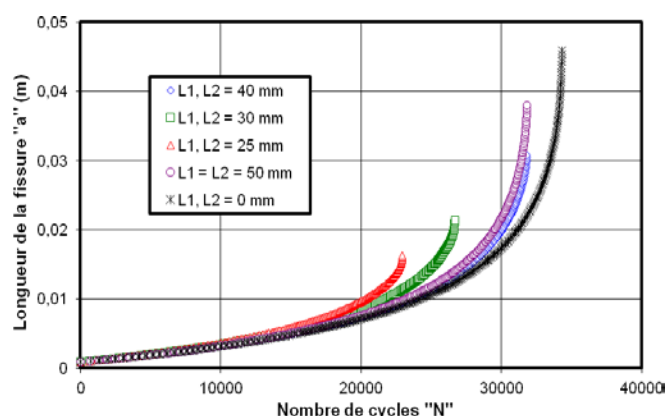


Figure 9. Epruvettes Effet de la position des trous sur la durée de vie en fatigue de l'alliage 2014 T6

#### 5.4. 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 10. 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.

En termes de vitesse de fissuration (figure 11.), une légère différence est constatée entre les différents alliages. Les vitesses de fissuration sont limitées dans la bande en traits discontinus.

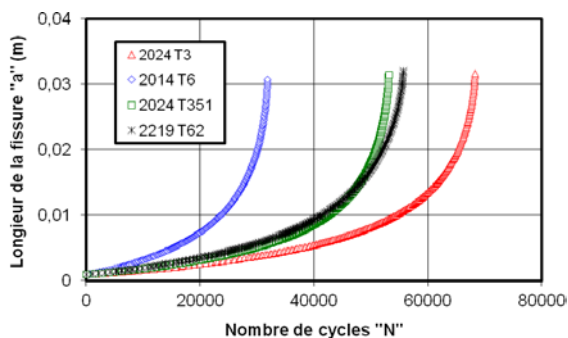


Figure 10. Etude comparative pour les différents matériaux sur la durée de vie en fatigue

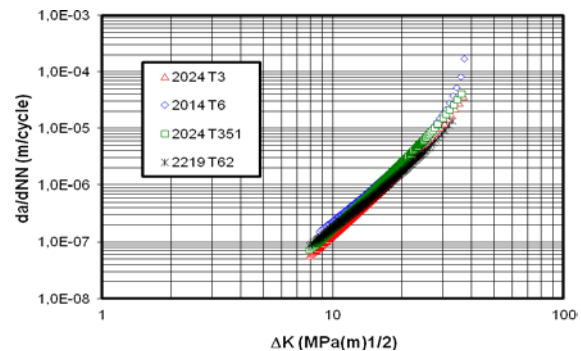


Figure 11. Etude comparative les différents matériaux sur la vitesse de fissuration de l'alliage

#### 5.5. 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 12.

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

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 13. 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.

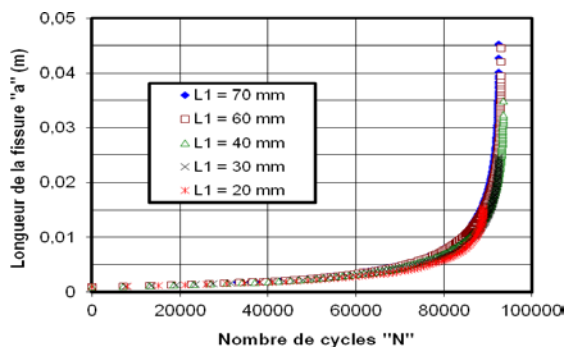


Figure 12. Evolution de la longueur de la fissure en fonction du nombre de cycles

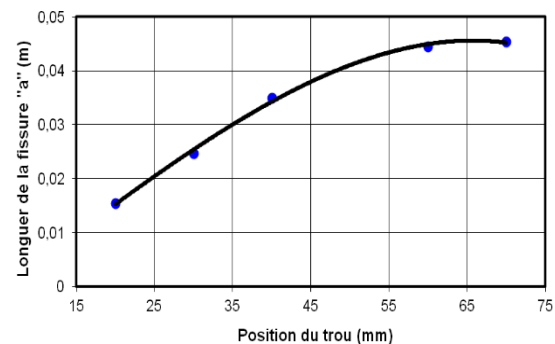


Figure 13. Effet de la position du trou sur la longueur finale de la rupture



## 6. Conclusion

Dans ce travail nous avons 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 nous avons étudié 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

## 7. Bibliographie

- [1] 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.
- [2] Forman, R. G. " Study of fatigue crack initiation from flaws using fracture mechanics theory ". Engineering Fracture Mechanics 4(2), (1972), pp. 333–345.
- [3] 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.
- [4] Thèse, Amorçage et propagation des fissures courtes dans un alliage d'aluminium lithium, École centrale Paris, 1991
- [5] D. Kujawski. "Correlation of long and physically short-crack growth in aluminium alloys", International Journal of Fatigue, 68(12): 1357-1369, 2001