

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 du **diplôme de MASTER**

En : **Génie Mécanique**

*Spécialité : Assemblages Soudés et Matériaux*

Par : **BENKOU Yacine**

### Thème

*Influence de l'expansion à froid des trous de rivetage  
sur la propagation des fissures de fatigue sous blocs  
de chargements cycliques*

Soutenu, le ...../06/2025, devant le jury composé de

Président	:	Djamel KARA ALI	MCA	Univ. Tlemcen
Encadreur	:	Mustapha BENACHOUR	Pr.	Univ. Tlemcen
Co-encadreur	:	Fatima Zohra SERIARI	Dr	Univ. Tlemcen
Examineur	:	Fethi SEBAA	Pr.	Univ. Tlemcen

*Année Universitaire 2024/2025*

# DÉDICACES

*Je dédie ce travail à ma chers maman et mon cher père  
pour les sacrifices qu'ils ont faits pour pendant mes  
études.*

*À mes sœurs et à ma famille et tous mes amis*

# *Remerciements*

*Je remercie ALLAH de m'avoir la force, la force, le courage, la volonté pour terminer ce travail.*

*Je remercie ma mère et mon père qui m'ont apporté tout l'aide que j'avais besoin au cours de mes études.*

*Je remercie mes professeurs de thèse, Monsieur BENACHOUR Mustapha et SERIARI Fatima Zohra pour leurs efforts fournis, les instructions et les conseils donnés.*

*Je tiens à remercier également les membres de jury pour avoir acceptés d'examiner mon travail ainsi à tous mes enseignants et équipe du département de génie mécanique*

# ملخص

تدرس هذه المذكرة، المقدمة بهذا الشكل، آثار الإجهادات المتبقية الناتجة عن التمدد البارد لثقب الحفر على سلوك التعب للصفحة المحفورة من سبيكة الألومنيوم T351 2024. يبلغ معدل التمدد 4.6%. تُطبق ثلاثة أنواع من الأحمال الدورية، وهي: التحميل ثابت المستوى، والتحميل المتغير للكتلة "min-Max-min"، والتحميل المتغير للكتلة "Max-min-Max". تتميز الإجهادات المتبقية المُستحثة حول الثقب، والتي تعتمد على سمك الصفحة، بطابعها الانضغاطي، مما يُحسن زمن الانتشار (زيادة في العمر الافتراضي) وسرعة الانتشار (انخفاض في السرعة). وقد مكن التحميل المتغير للكتلة "mMm" من تحقيق عمر افتراضي يبلغ 1.84 ضعف عمر التحميل المتغير للكتلة "MmM".

**الكلمات المفتاحية:** الإجهاد المتبقي، التمدد البارد، انتشار الشقوق، الأحمال الدورية، نسبة التحميل

## ***ABSTRACT***

The thesis thus presented, studies the effects of residual stresses due to cold expansion of drilled hole on the fatigue behavior of a plate from aluminum alloy 2024 T351. The expansion rate is 4.6%. Three cyclic loading are applied namely constant cyclic loading, cyclic loading with block "min-Max-min" and variable block loading "Max-min-Max". Residual stress induced around the hole and depending on the thickness of the plate are compressive in nature and offer beneficial effects on the propagation time (increase in life) and the crack growth rates (decreasing of crack growth rates). The cyclic loading with block "mMm" made it possible to achieve a life of 1.84 times the life for a loading with block "MmM".

**Key words:** Residual stress, cold expansion, fatigue crack, constant cyclic loading, Variable amplitude loading with bloc, stress ratio

## **RÉSUMÉ**

Le mémoire ainsi présenté, étudie les effets des contraintes résiduelles dues à l'expansion à froid de trou de perçage sur la propagation des fissures de fatigue d'une plaque percée en alliage d'aluminium 2024 T351. Le taux d'expansion est de 4.6%. Trois chargements cycliques sont appliqués à savoir le chargement cyclique constant, le chargement cyclique à block « min-Max-min » et le chargement à block variable « Max-min-Max ». Les contraintes résiduelles induites autour du trou et suivant l'épaisseur de la plaque sont de nature compressive et offrent des effets bénéfiques sur la durée de propagation (augmentation de la durée de vie) et la vitesse de propagation (diminution de la vitesse). Le chargement cyclique à block « mMm » a permis d'atteindre une durée de vie de 1.84 fois la durée de vie pour un chargement à block « MmM ».

**Mots clés:** Contraintes résiduelles, expansion de trous à froid, fissuration par fatigue, chargement constant, chargement à block variable, rapport de charge

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre 1

<b>Figure 1.1</b>	Accident du Vol 123 de Japan Airlines (1985).....	4
<b>Figure 1.2</b>	Pont du détroit de Tacoma (Tacoma, 1940).....	5
<b>Figure 1.3</b>	Schématisation des différentes phases d'endommagement par fatigue.....	6
<b>Figure 1.4</b>	Variation de la longueur de fissure / Nombre de cycle appliqué.....	6
<b>Figure 1.5</b>	Régimes de propagation.....	7
<b>Figure 1.6</b>	Effet du rapport de charge sur la vitesse de fissuration du 2024 T351.....	9
<b>Figure 1.7</b>	Influence du rapport sur la durée de vie.....	10

## Chapitre 2

<b>Figure 2.1</b>	Expansion périphérique des trous.....	14
<b>Figure 2.2</b>	Expansion par mandrin.....	15
<b>Figure 2.3</b>	Expansion de la bille.....	15
<b>Figure 2.4</b>	Expansion par manchon fendu.....	16
<b>Figure 2.5</b>	Processus de l'expansion du trou.....	16
<b>Figure 2.6</b>	Evolution des contraintes résiduelles- modèle 3D .....	17
<b>Figure 2.7</b>	Distribution des contraintes résiduelles sur les trois faces.....	17
<b>Figure 2.8</b>	Déférence des contraintes résiduelles de la face entre et la face sortie.....	18
<b>Figure 2.9</b>	Effet des contraintes résiduelles par pré chargement mécanique .....	19
<b>Figure 2.10</b>	influence de l'expansion de trou à froid sur le nombre de cycle de rupture ....	19
<b>Figure 2.11</b>	influence de DCE sur la durée de vie à l'initiation.....	20
<b>Figure 2.12</b>	influence du trou percé et du trou expansé sur la vitesse de fissuration .....	21
<b>Figure 2.13</b>	Influence du DCE sur la durée de vie à la rupture d'alliage de magnésium.....	22
<b>Figure 2.14</b>	Influence du DCE sur la durée de vie à la rupture de l'alliage LY12-CZ.....	22

## Chapitre 3

<b>Figure 3.1</b>	Plaque trouée pour la prédiction du comportement en fatigue.....	27
<b>Figure 3.2</b>	Chargement cyclique à amplitude constante.....	28
<b>Figure 3.3</b>	3.3a .Chargement cyclique à blocks variables mMm.....	28
	3.3b. Interface d'introduction du chargement cyclique à blocks mMm.....	29
<b>Figure 3.4</b>	3.4a. Chargement cyclique à blocks variables MmM.....	29
	3.4b. Interface d'introduction du chargement cyclique à blocks MmM.....	30
<b>Figure 3.5</b>	Distribution des contraintes résiduelles circonférentielles pour un degré d'expansion de 4.6%.....	30
<b>Figure 3.6</b>	Effet du rapport de charge sur la durée de vie en fatigue sans contraintes résiduelles dans la direction "c".....	32
<b>Figure 3.7</b>	Effet du rapport de charge sur la durée de vie en fatigue sans contraintes résiduelles dans la direction "a".....	32
<b>Figure 3.8</b>	Effet du rapport de charge sur la vitesse de propagation sans contraintes résiduelles suivant la direction "c".....	33
<b>Figure 3.9</b>	Effet du rapport de charge sur la vitesse de propagation sans contraintes résiduelles suivant la direction "a".....	33
<b>Figure 3.10</b>	Effet du rapport de charge sur la durée de vie en fatigue sans contraintes résiduelles dans la direction "c".....	34
<b>Figure 3.11</b>	Effet du rapport de charge sur la durée de vie en fatigue sans contraintes résiduelles dans la direction "a".....	35
<b>Figure 3.12</b>	Effet du rapport de charge sur la vitesse de propagation en présence des contraintes résiduelles suivant la direction "c".....	36
<b>Figure 3.13</b>	Effet du rapport de charge sur la vitesse de propagation en présence des contraintes résiduelles suivant la direction "a".....	37
<b>Figure 3.14</b>	Effet des contraintes résiduelles sur l'évolution du facteur $K_r$ (direction "c")...37	
<b>Figure 3.15</b>	Effet des contraintes résiduelles sur l'évolution du facteur $K_r$ (direction "a")...38	
<b>Figure 3.16</b>	Effets du rapport de charge et les contraintes résiduelles sur le rapport $R_{eff}$ (direction « c »).....	38
<b>Figure 3.17</b>	Effets du rapport de charge et les contraintes résiduelles sur le rapport $R_{eff}$ (direction « a »).....	39
<b>Figure 3.18</b>	Evolution de la longueur de la sous un chargement "mMm" et en présence des contraintes résiduelles dans la direction "c".....	40
<b>Figure 3.19</b>	Evolution de la longueur de la fissure sous un chargement "mMm" et en présence des contraintes résiduelles dans la direction "a".....	41

<b>Figure 3.20</b>	Evolution de la vitesse de fissuration sous un chargement "mMm" et en présence des contraintes résiduelles dans la direction "c/a" .....	41
<b>Figure 3.21</b>	Evolution de la longueur de la fissure sous un chargement "MmM" et en présence des contraintes résiduelles dans la direction "c" .....	43
<b>Figure 3.22</b>	Evolution de la longueur de la fissure sous un chargement "MmM" et en présence des contraintes résiduelles dans la direction "a" .....	43
<b>Figure 3.23</b>	Evolution de la vitesse de fissuration sous un chargement "MmM" et en présence des contraintes résiduelles dans la direction "c/a" .....	44

# Liste des symboles

$a$ :	Longueur de fissure
$a_0$ :	Fissure initiale
$a(ol)$ :	Fissure à la surcharge
$N$ :	Nombre des cycles
$R$ :	Rapport de charge
$da/dN$ :	Vitesse de propagation de la fissure.
$\Delta K$ :	Facteur d'intensité de contrainte (FIC).
$C$ et $m$ :	Constantes du modèle de Paris.
$C_{th}$ :	Coefficient seuil
$f$ :	Contribution à la fermeture de la fissure.
$C, n, p, q$ :	Paramètres du modèle de Nasgro.
$\Delta K_{th}$ :	Facteur seuil de non fissuration.
$\Delta K_{eff}$ :	Facteur d'intensité de contrainte effectif
$\Delta K_{ouv}$ :	Facteur d'intensité de contrainte d'ouverture de la fissure
$K_{max}$ :	FIC maximal
$K_{min}$ :	FIC minimal
$K_{crit}$ :	FIC critique.
$K_{IC}$ :	Ténacité du matériau
$\tau = ORL$ :	Taux de surcharge
$K_r$ :	FIC dû aux contraintes résiduelles locales.
$R_{eff}$ :	Rapport de charge effectif.
$\alpha$ :	Rapport de contrainte déformation plane
$d$ :	Diamètre du mandrin (mm)
$D$ :	Diamètre du trou (mm)
$DCE$ :	Taux d'expansion à froid
$E$ :	Module de young
$r$ :	rayon du trou (mm)
$\sigma_m$ :	contrainte moyenne
$t$ :	Epaisseur (mm)
$w$ :	Largeur de la plaque
$CRC$ :	Contraintes résiduelles de compression

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>2</b>
<b>CHAPITRE 1.....</b>	<b>3</b>
<b>I. HYSTORIQUE SUR L'ENDOMMAGEMENT PAR FATIGUE : .....</b>	<b>4</b>
<b>II. MECANISMES DE LA FISSURATION PAR FATIGUE : .....</b>	<b>5</b>
II-1 STADES D'ENDOMMAGEMENT PAR FATIGUE.....	5
II.2. REGIMES DE PROPAGATION.....	6
II.3. MODELE DE PROPAGATION A AMPLITUDE CONSTANTE : .....	8
II.4. PARAMETRES D'EFFETS SUR LA PROPAGATION .....	9
<b>REFERENCES CHAPITRE I.....</b>	<b>11</b>
<b>CHAPITRE 2.....</b>	<b>12</b>
<b>I. GENERALITES : .....</b>	<b>13</b>
<b>II. METHODES DE GENERATIONS DES CONTRAINTES RESIDUELLES PAR EXPANSION.....</b>	<b>13</b>
II.1. EXPANSION PERIPHERIQUE DES TROUS .....	13
II.2. EXPANSION PAR MANDRIN .....	14
II.3. EXPANSION DE LA BILLE .....	15
II.4. EXPANSION A FROID PAR MANCHON .....	15
<b>III. DISTRIBUTION DES CONTRAINTES RESIDUELLES .....</b>	<b>17</b>
<b>IV. EFFET DES CONTRAINTES RESIDUELLES SUR LA FISSURATION PAR FATIGUE .....</b>	<b>18</b>
<b>REFERENCES CHAPITRE 2.....</b>	<b>23</b>
<b>CHAPITRE 3.....</b>	<b>26</b>
<b>I. INTRODUCTION .....</b>	<b>27</b>
<b>II. MATERIAU D'ETUDE &amp; MODELE GEOMETRIQUE .....</b>	<b>27</b>
<b>III. CHARGEMENTS CYCLIQUES APPLIQUEES ET CONTRAINTES RESIDUELLES PAR EXPANSION .....</b>	<b>27</b>
<b>IV. RESULTATS &amp; INTERPRETATIONS .....</b>	<b>31</b>
<b>REFERENCES CHAPITRE 3.....</b>	<b>45</b>
<b>CONCLUSION &amp; PERSPECTIVES .....</b>	<b>46</b>

*Introduction générale*

## **INTRODUCTION GENERALE**

Le phénomène de fatigue est un processus d'endommagement conduisant à des ruptures sous des chargements cycliques (répétés) dont l'amplitude maximale de chargement créant des contraintes inférieures à la limite élastique. Afin de parer aux catastrophes dues à la présence de fissures de fatigue l'intervention de réparation des fissures est nécessaire avant que les tailles de fissures atteignent des tailles critiques. L'existence d'entailles génère des concentrations de contraintes et en conséquence localisation de la fissure. Afin de réduire les concentrations de contraintes et diminuer le risque de ruptures catastrophiques pour des structures percées, l'amélioration des trous percés par la génération des contraintes résiduelles de compression (CRC) autour des trous est nécessaire. La technique d'expansion est l'une des techniques efficace pour introduire des CRC autour des trous. L'expansion à froid consiste à générer des déformations plastiques à froid par le passage des billes ou mandrins coniques à travers les trous percés.

Le résultat à atteindre de ce travail se résume à l'étude des effets des CRC créés par expansion au niveau des trous de perçage sur la propagation des fissures de fatigue sous des chargements cycliques constants et chargements à amplitudes variables par block.

Le mémoire est structurée trois chapitres. Le premier chapitre fait état d'études bibliographiques sur la propagation par fatigue. Le deuxième chapitre présente les techniques d'expansion à froid et un état de l'art sur les effets des contraintes résiduelles sur la fissuration par fatigue. Le 3ème troisième chapitre est réservé à l'étude de l'influence des CR dues à l'expansion à froid sur la fissuration sous des chargements cycliques constants et chargements à block variables. En dernier, une conclusion générale et des perspectives sont présentées.

*Chapitre 1 :*  
*Analyse bibliographique*  
*sur le comportement en fatigue*

## **I. HISTORIQUE SUR L'ENDOMMAGEMENT PAR FATIGUE :**

Les fissures de fatigue sont l'un des principaux problèmes à aborder lors de l'analyse de la sûreté des matériaux et des constructions fonctionnant sous l'influence d'une charge cyclique. À la différence des ruptures brusques causées par des surcharges statiques, l'effet de la fatigue se caractérise par la destruction lente et progressive du matériel. En d'autres termes, le matériel se détériore progressivement, sous forme de formations et de croissances de fissures lorsqu'il est exposé à des contraintes répétées, même à des niveaux inférieurs à la limite élastique du matériau. Ce phénomène, souvent imperceptible jusqu'à un stade avancé, est à l'origine de nombreuses catastrophes (Aéronautique, industrie mécanique, structures génie civil, ...etc).

Parmi les accidents majeurs liés à la fatigue, on peut citer :

- \* Vol de Japan Airlines 123 Chaque fois que la menace de fatigue de l'équipage est mentionnée, la mort tragique du vol 123 de Japan Airlines le 12 août 1985 est citée. Dans le puits central de l'avion, une fissure de fatigue s'est formée et s'est agrandie pour causer une perte de contrôle de l'avion après une décompression amoindrie expulsant la boîte noire de l'œil (figure 1) [1].
- \* L'effondrement du pont de la rivière Tacoma Narrows (1940) Surnommé "Galloping Gertie", ce pont s'est effondré en raison de la fatigue des matériaux utilisés. Les oscillations induites par le vent ont accéléré la propagation des fissures, entraînant une défaillance structurelle totale (figure 2) [2].



Figure 1.1. Accident du Vol 123 de Japan Airlines (1985) [1]

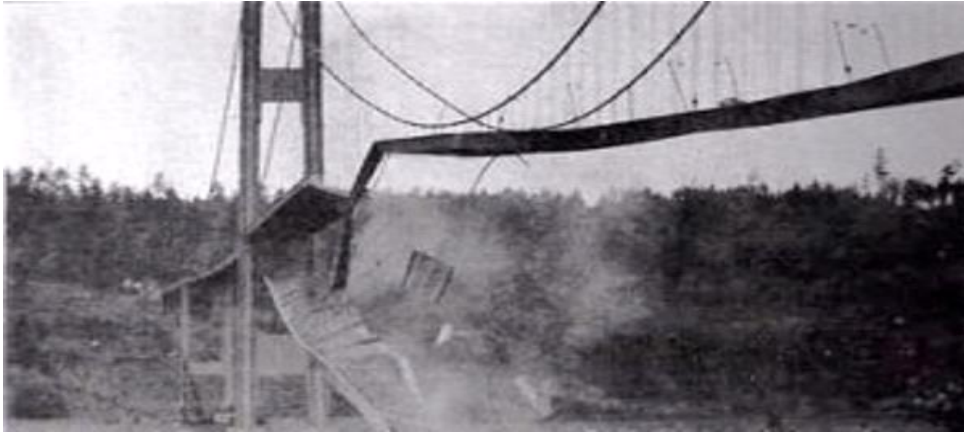


Figure 1.2. Pont du détroit de Tacoma (Tacoma, 1940) [2]

## **II. MECANISMES DE LA FISSURATION PAR FATIGUE :**

### ***II-1 Stades d'endommagement par fatigue***

Après de nombreuses études sur les mécanismes de rupture par fatigue (figure 1.3), notamment des analyses macroscopiques et microscopiques, les scientifiques ont identifié trois phases distinctes dans d'endommagement par fatigue [3].

- ♦ **Amorçage de la fissure**

Phase d'apparition de la fissure qui illustre le comportement de la structure entre son état initial et celui où une microfissure se forme. Cette étape d'amorçage survient généralement à proximité des défauts intrinsèques, susceptibles de provoquer des concentrations de contraintes.

- ♦ **Propagation de la fissure**

Phase de progression lente et stable d'une fissure macroscopique (figure 1.4). La fissure peut s'étendre à des vitesses variables, en fonction des propriétés du matériau et de l'intensité du chargement critique.

- ♦ **rupture finale:**

Cette étape finale se produit lorsque la fissure a suffisamment grandi pour atteindre son point d'instabilité.

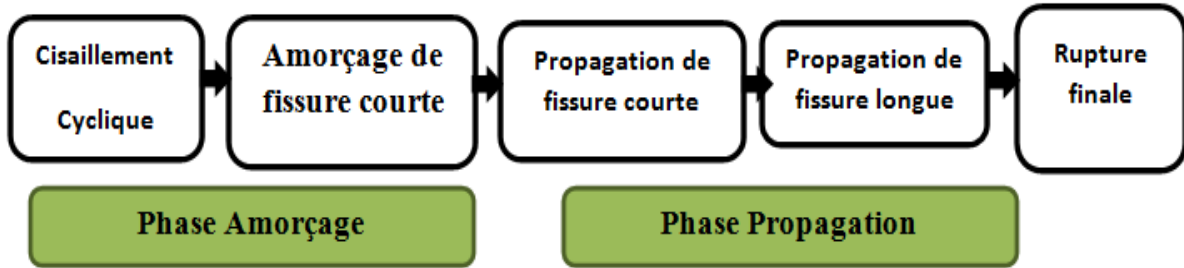


Figure 1.3. Schématisation des différentes phases d'endommagement par fatigue [4]

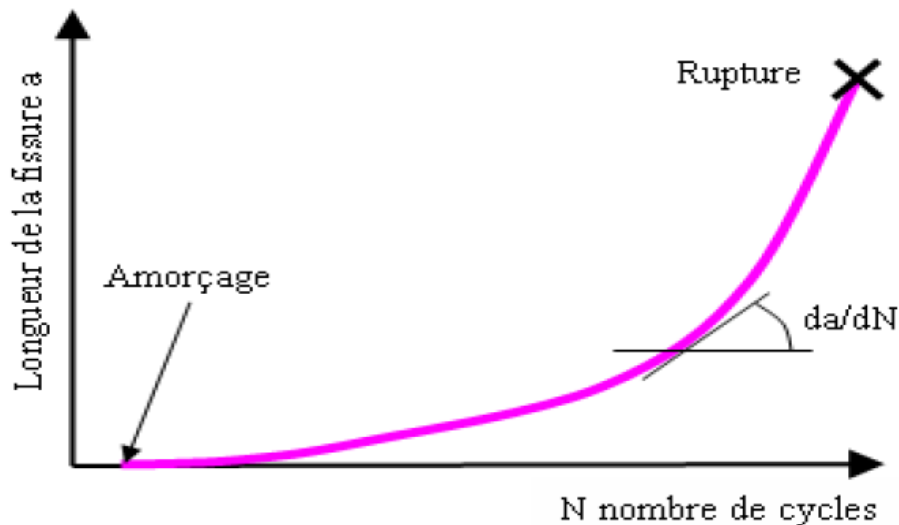


Figure 1.4 : Variation de la longueur de la fissure / Nombre de cycle appliqué

## II.2. Régimes de propagation

Pour dimensionner une structure en fatigue soumise à des chargements cycliques, il est essentiel de définir une limite du critère de résistance. Cette définition est étroitement liée aux trois phases distinctes du processus de fissuration, chacune impliquant des mécanismes spécifiques. La figure 1.5 montre les différentes étapes de la propagation par fatigue et les paramètres affectant chaque stade.

- \* Domaine I: Domaine de faibles vitesses de propagation avec effets de l'environnement et de la microstructure dominant. Les tests sont généralement réalisés en réduisant progressivement les valeurs de  $K$  afin d'identifier la valeur seuil  $K_s$ .

- \* Domaine II: Vitesses intermédiaires, souvent appelé domaine de Paris [5], est caractérisé par une loi de puissance linéaire entre la vitesse de fissuration et le facteur d'intensité de contraintes  $\Delta K$  [6].
- \* Domaine III: Ce domaine correspond à des chargements intenses. Les vitesses de propagation sont extrêmement élevées, entraînant rapidement la rupture (pour  $K_{\max} = K_{IC}$ ).

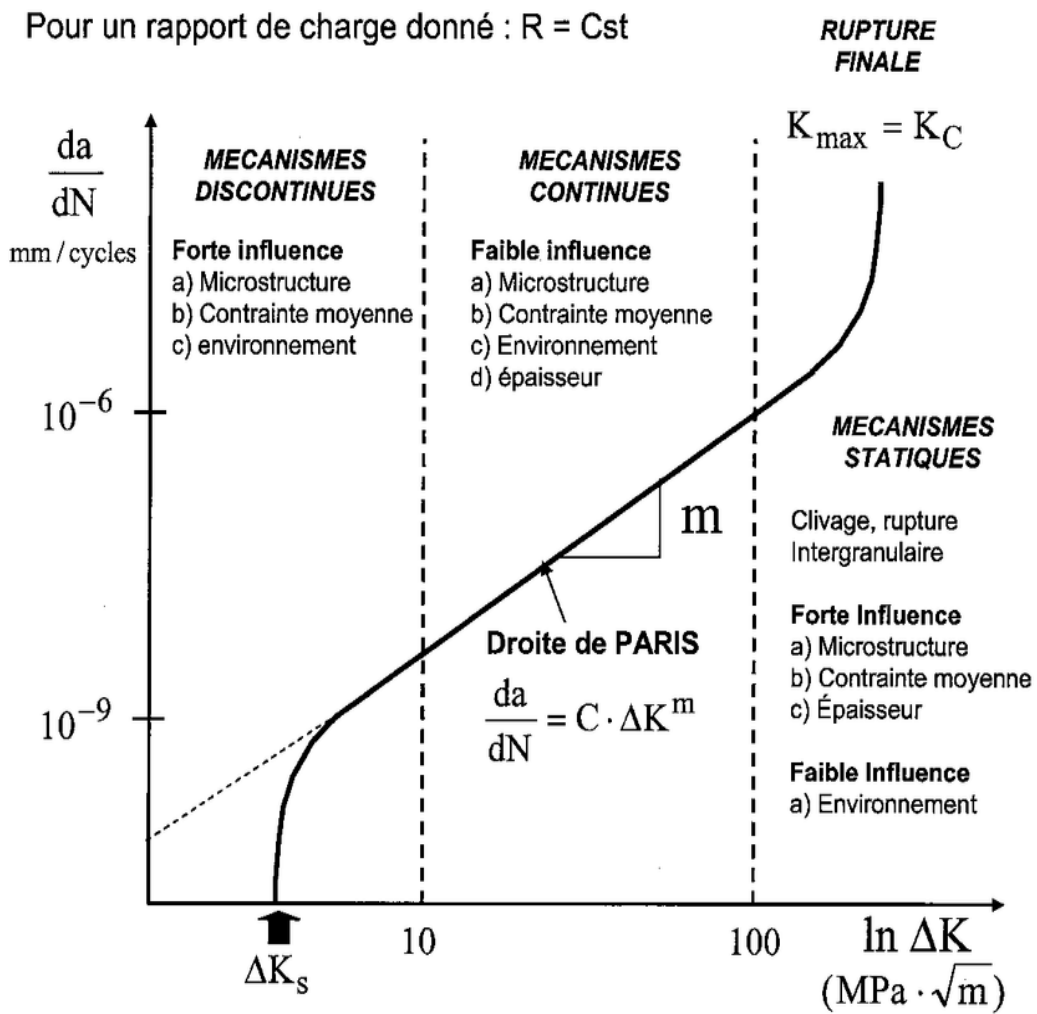


Figure 1.5 : Régimes de propagation [7]

### **II.3. Modèle de propagation à amplitude constante :**

Il existe de nombreux modèles de propagation de fissures sous des chargements à amplitude constante développés depuis 1960.

#### **\* Modèle de Paris**

Paris et al. [5] ont introduit l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte  $\Delta K$  pour modéliser la propagation stable dans le cadre de l'élasticité linéaire. Pour les matériaux présentant un comportement élastique, plusieurs chercheurs, dont Suresh [8], ont confirmé la validité de cette expression proposée par Paris.

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m \quad (1.1)$$

#### **\* Modèle de Walker :**

La loi de Paris présente une lacune majeure : elle ne parvient pas à intégrer l'effet du rapport de charge. Walker [9] a souligné cette limitation et a proposé une amélioration de la loi de Paris en y incorporant l'influence du rapport de charge représenté par :

$$\frac{da}{dN} = C_W \left[ \frac{\Delta K}{(1-R)^{1-\gamma}} \right]^{m_W} \quad (1.2)$$

$C_W$  et  $m_W$ : paramètres empiriques.

#### **\* Modèle NASGRO**

Les chercheurs Forman et Mettu (1992) [10] ont proposé un modèle empirique qui englobe les phases de la fissuration par fatigue. Ce modèle est formulé pour prédire la vitesse de fissuration par fatigue. Ce modèle est définie par l'équation 1.3, qui s'applique aux trois domaines de fissuration

$$\frac{da}{dN} = C \left[ \left( \frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right]^n \frac{\left( 1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left( 1 - \frac{K_{max}}{K_{crit}} \right)^q} \quad (1.3)$$

$C, n, p, q$  : Paramètre empiriques

$K_{max}$  : Facteur d'intensité de contrainte maximale

$K_{crit}$  : Facteur d'intensité de contrainte critique

$f$  : Coefficient de contribution de fermeture de fissure

## II.4. Paramètres d'effets sur la propagation

La croissance des fissures de fatigue est influencée par plusieurs paramètres mécaniques et microstructuraux, dont l'importance dépend du domaine de fissuration et des conditions d'essais.

### \* Effet de rapport de charge

Les effets du rapport de charge  $R$  sur la fissuration par fatigue des matériaux métalliques a fait l'objet de diverses recherches, principalement dans le domaine de l'aéronautique. Kujawski [11] a mené une étude expérimentale pour analyser l'influence du rapport  $R$  sur la fissuration dans l'alliage 2024 T351 (figure 1.6). Par ailleurs, les travaux de Benachour et al. [12] ont permis d'analyser l'impact du rapport de «  $R$  » sur la durée de vie en fatigue de l'alliage 2024 T351 (figure 1.7). La vitesse et la durée ont été augmenté par l'augmentation du rapport «  $R$  ».

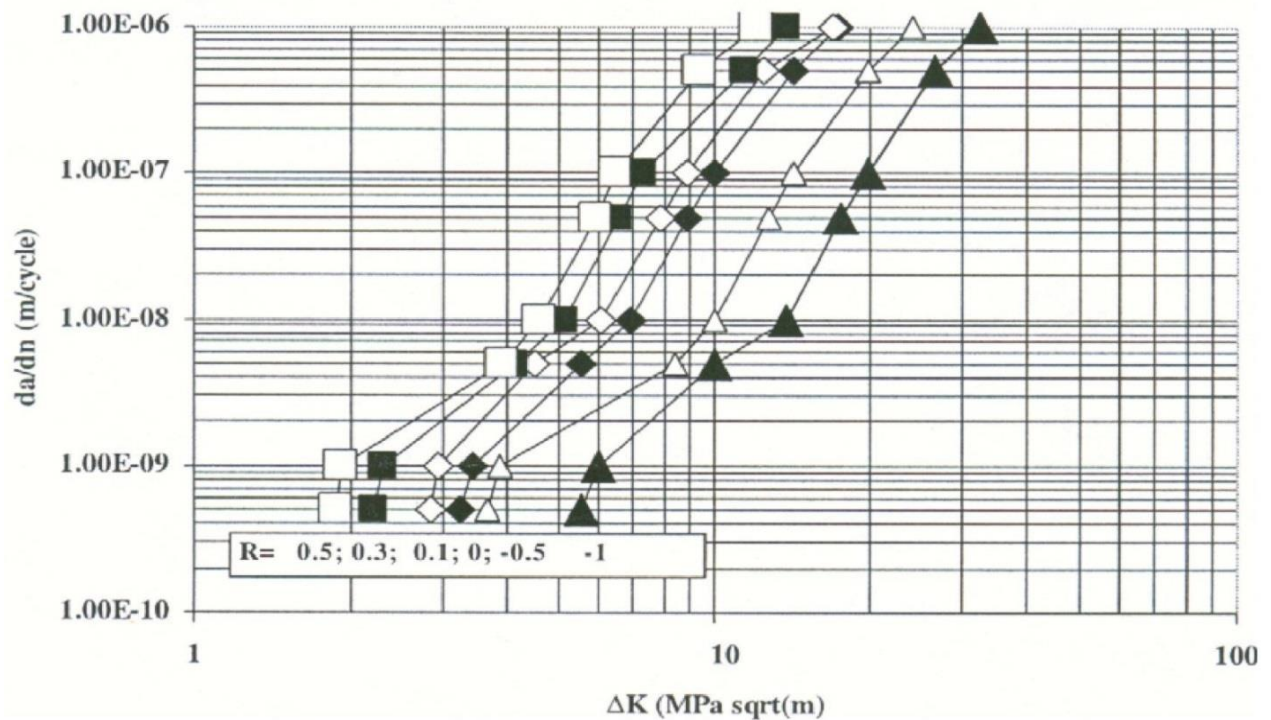


Figure 1.6 : Effet du rapport de charge sur la vitesse de fissuration *du 2024 T351* [10]

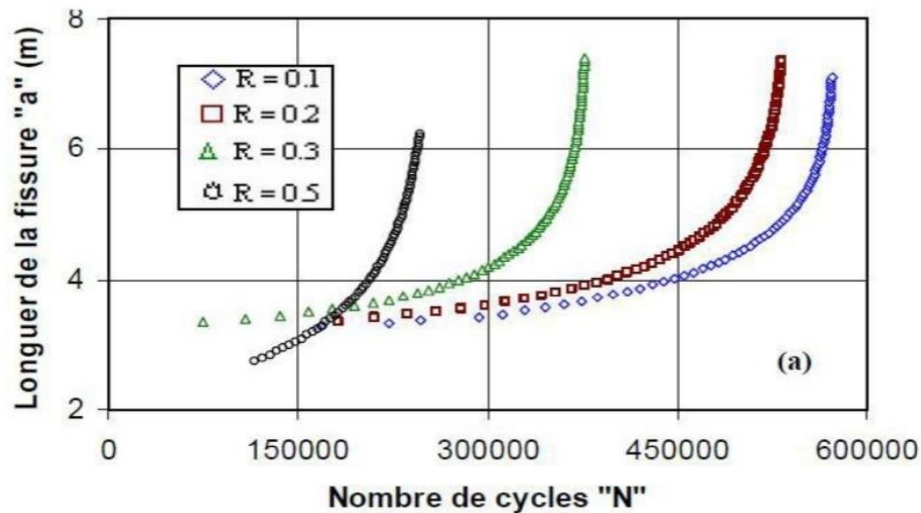


Figure 1.7: Influence du rapport « R » sur la durée de vie [11]

### \* Contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles sont communément définies comme des tensions internes présentes dans une pièce mécanique, même en l'absence de toute sollicitation extérieure. Ces contraintes, générées par différents processus jouent un rôle déterminant dans le comportement en fatigue d'une pièce. Ces dernières années, de nombreuses recherches ont émergé afin de mieux comprendre l'influence de ces contraintes résiduelles sur les propriétés mécaniques des matériaux [13].

### \* Influence des contraintes résiduelles sur la fatigue

La propagation des fissures de fatigue est fortement influencée par les contraintes résiduelles, un sujet qui a suscité un grand intérêt dans la communauté scientifique et fait l'objet de nombreuses recherches [14, 15]. L'application de contraintes résiduelles via l'expansion des trous dans les alliages d'aluminium [16] a montré des résultats remarquables, avec une nette amélioration de la durée de vie et une réduction notable de la vitesse de fissuration comparativement aux trous qui n'ont pas subi aucun traitement mécanique.

### \* Influence du chargement moyen

A amplitude de chargement constante, si la contrainte moyenne augmente, la durée de vie en fatigue est réduite et dans le cas des chargements variables qui est représenté de surcharge, on remarque un retarder la propagation de fissure [17].

## REFERENCES CHAPITRE I

- [1] <https://perspective.usherbrooke.ca/bilan/servlet/BMEve/1957>
- [2] <https://www.britannica.com/topic/Tacoma-Narrows-Bridge>
- [3] Lemaignan, C. (2003). *Fatigue des matériaux : mécanismes et prévision*. Presses Universitaires de France
- [4] Schive J. (2007) *Fatigue of structures and materials (2nd Edition)* ; Netherland, Kluwer Academic Publishers.
- [5] Paris, P.C., Gomez, M.P., and Anderson, W.P., “A rational analytic theory of fatigue”, *The Trend Eng*, vol. 13, pp 9-14, 1961.
- [6] R.C. Dimitriu, H.K.D.H. Bhadeshia (2010), *Fatigue crack growth rate model for metallic alloys*. *Materials and Design* 31, pp 2134–2139.
- [7] D. Fronçois, A. Pineau, A. Zaoui. (1995). *Comportement mécanique des matériaux*. Eds Hermes, France.
- [8] S. Suresh, R.O. Ritchie, “On the influence of fatigue underload on cyclic crack growth at low stress intensities”. *Materials Sciences and Engineering*, 51: 61-69, 1981.
- [9] Walker, EK. (1970). *The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7076-T6 aluminum*”, ASTM STP 462. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, pp.1–14.
- [10] 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
- [11] D. Kujawski (2001). *Correlation of long and physically short-crack growth in aluminum alloys*”, *International Journal of Fatigue*, 68(12), pp 1357-1369.
- [12] Benachour, M., et al., *Stress ratio effect on fatigue behavior of aircraft aluminum alloy 2024 T351*. *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 2010. 1276: p. 7.
- [13] Dahaoui Mourad (2013). *Effets des prédéformations sur le comportement en fatigue des alliages d’aluminium à durcissement structurale*. Mémoire de Magister, Université de Tlemcen.
- [14] Nelson, D.V., *Residual Stress Effects in Fatigue*, ASTM STP 776, American Society for Testing and Materials.
- [15] Stephens.R.I., Fatemi.A., Stephens.R.R., Fuchs.H.O. (2001) “*Metal Fatigue in Engineering*” John Wiley & Sons, New York.
- [16] Poussard C., Pavier M.J., Smith D.J. (1995). *Analytical and Finite Element Predictions of Residual Stresses in Cold Worked Fastener Holes*,” *Journal of Strain Analysis*, Vol. 30, No. 4.
- [17] Djemai Mohamed, Bendouma Mohamed Réda (2023). *Influence du chargement sur la propagation des fissures de fatigue dans une plaque réparée par patch composite*. Mémoire de Master, Université Aïn Temouchent.

# *Chapitre 2 :*

## *Etat de l'art – Effets des contraintes résiduelles par expansion*

## I. GENERALITES :

L'étude du phénomène de fatigue en présence des contraintes résiduelles a présenté jusqu'à ce jour un champ d'investigation très diversifiés dont le but d'améliorer le comportement en fatigue et évaluer la durée de vie résiduelle sous des chargements cycliques complexes. Les contraintes résiduelles sont des contraintes existantes au sein des assemblages et pièces mécaniques en absence d'efforts extérieurs. Les contraintes résiduelles sont dues à plusieurs effets principalement d'origine de déformations plastique ou déformations thermiques. Les champs des contraintes résiduelles sont de deux types, contraintes résiduelles de compression bénéfique [1-3] et contraintes résiduelles de tension [4, 5]. Les contraintes résiduelles d'origines mécaniques dues aux déformations plastiques sont diversifiées selon le but de leur génération [6-9]. L'amélioration des trous de rivetage des assemblages aéronautiques pour leur résistance en fatigue est assurée par la méthode d'expansion à froid [10, 11].

## II. METHODES DE GENERATIONS DES CONTRAINTES RESIDUELLES PAR EXPANSION

La technique d'expansion à froid renforce les matériaux autour des trous via une déformation plastique induite par l'insertion d'outils surdimensionnés (bille, mandrin conique ou manchon segmenté). Ces méthodes génèrent des contraintes « CRC » améliorant la résistance à la fatigue. Les méthodes les plus utilisées dans la pratique sont quatre techniques d'expansion à froid [12]. Le niveau des contraintes « CRC » introduites est définie par le degré d'expansion en pourcentage "DCE"

$$DCE = \frac{D-d}{d} \times 100 \quad (1)$$

### II.1. Expansion périphérique des trous

Le procédé d'expansion périphérique des trous consiste à déformer la bordure d'un trou à l'aide d'un poinçon conique à haute résistance ou d'une bille rigide, soumis à une force axiale F (Figure 2.1). Cette action induit une déformation plastique localisée près du bord, générant une zone de contraintes « CRC » autour du trou. Toutefois, la partie centrale de la paroi n'étant pas directement affectée. Cette méthode

est donc principalement adaptée aux tôles minces, où la déformation périphérique suffit, et nécessite souvent des expansions itératives pour optimiser les performances. Les études expérimentales confirment son efficacité pour les structures en tôle, mais son application aux plaques épaisses est exclue en raison d'un renforcement insuffisant [13].

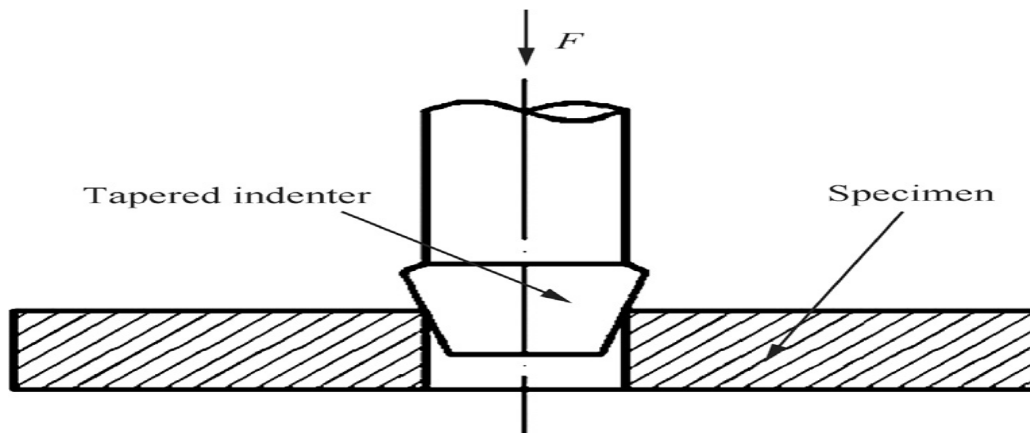


Figure 2.1 : Expansion périphérique des trous

## ***II.2. Expansion par mandrin***

Le procédé d'expansion par mandrin direct, développé initialement par la société Douglas pour l'industrie aéronautique, consiste à insérer un outil conique lubrifié dans un trou afin de provoquer une déformation plastique permanente. Cette technique, illustrée par la figure 2.2, génère des contraintes « CRC » autour du trou lorsque le matériau essaye de retrouver sa forme initiale après retrait du mandrin. Ces contraintes améliorent la résistance à la fatigue en retardant l'apparition et la propagation des fissures. Facile à mettre en œuvre, cette méthode est largement adoptée pour les pièces structurelles d'aéronefs, ses mécanismes de renforcement ayant été validés par des études approfondies [14–18].

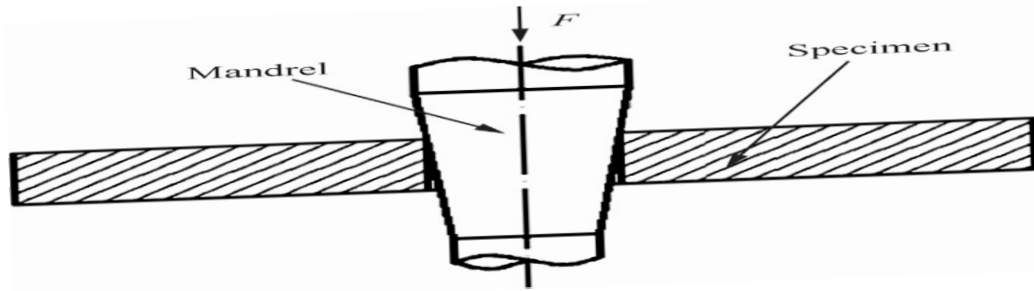


Figure 2.2 : Expansion par mandrin.

### **II.3. Expansion de la bille**

La technique d'expansion à bille consiste à faire passer une sphère en acier dur, lubrifiée à diamètre plus élevé à celui du trou, à travers une plaque perforée, puis à la retirer du côté opposé (Figure 2.3) [19, 20]. Grâce à une zone de contact localisée entre la bille et la paroi du trou, les frottements sont réduits par rapport à l'expansion par mandrin, ce qui rend cette méthode idéale pour renforcer la résistance à la fatigue de petits trous dans des plaques en acier allié.

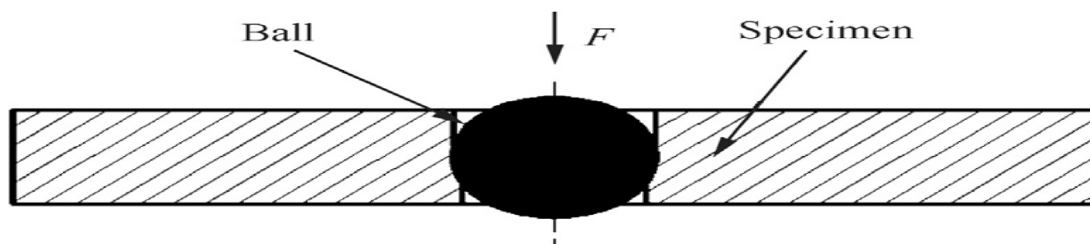


Figure 2.3 : Expansion de la bille

### **II.4. Expansion à froid par manchon**

L'expansion à froid par manchon (Figure 2.4) répond aux limites des méthodes traditionnelles (bille ou mandrin), qui endommagent la surface des trous lors de la déformation. Cette technique utilise un manchon segmenté en acier inoxydable, pré-lubrifié, glissé sur un outil conique. Lors du passage de la dimension la plus large de l'outil, le manchon transmet une pression uniforme, déformant plastiquement le matériau sans contact direct avec les parois. Au retrait, une récupération élastique partielle stabilise les contraintes de compression résiduelles, tandis que le manchon est retiré, laissant un trou élargi et une répartition optimale des contraintes [21].

Contrairement aux autres techniques, il est privilégié pour les zones difficiles d'accès lors du montage dans les structures aéronautiques [22–24].

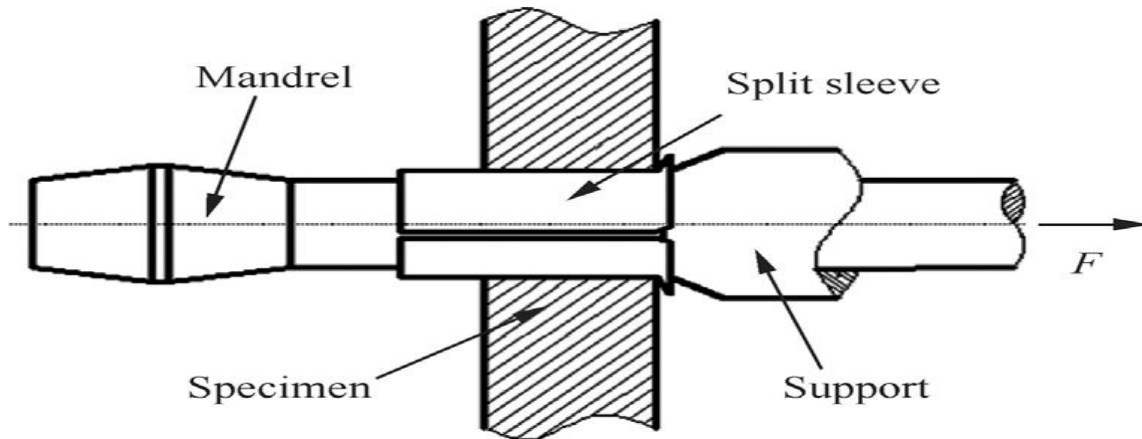


Figure 2.4 : Expansion par manchon fendu

La figure 2.5 montre que lors du processus d'expansion des trous, les contraintes résiduelles évoluent selon plusieurs phases. Ces contraintes peuvent être soit en traction, soit en compression au niveau des bords du trou. Lorsqu'un manchon conique ou une bille est inséré dans le trou, les contraintes sont en traction, Une fois l'outil retiré, une zone déformée se forme, générant des contraintes résiduelles de compression sur la plaque [25].

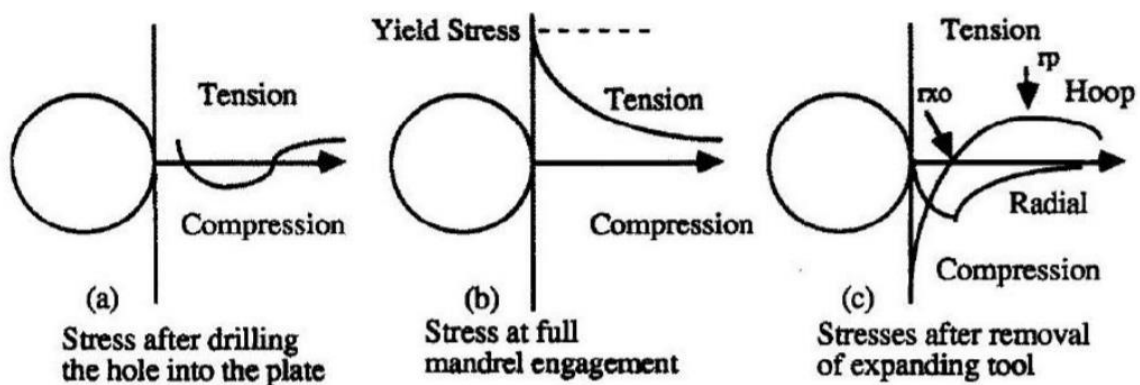


Figure 2.5 : Processus de l'expansion du trou [26]

### III. DISTRIBUTION DES CONTRAINTES RESIDUELLES

CHAKHERLOU et al. [26] ont conclu dans leurs recherches que les contraintes résiduelles est maximale au centre de l'épaisseur et plus faible dans la face d'entrée (figure 2.6). Liu et al [27] montre que les contraintes résiduelles en sortie du trou sont supérieures par rapport aux contraintes de face d'entrée et à mi- épaisseurs (Figure 2.7). Ces résultats sont approuvés par les travaux de Lacarac [28] (Figure 2.8).

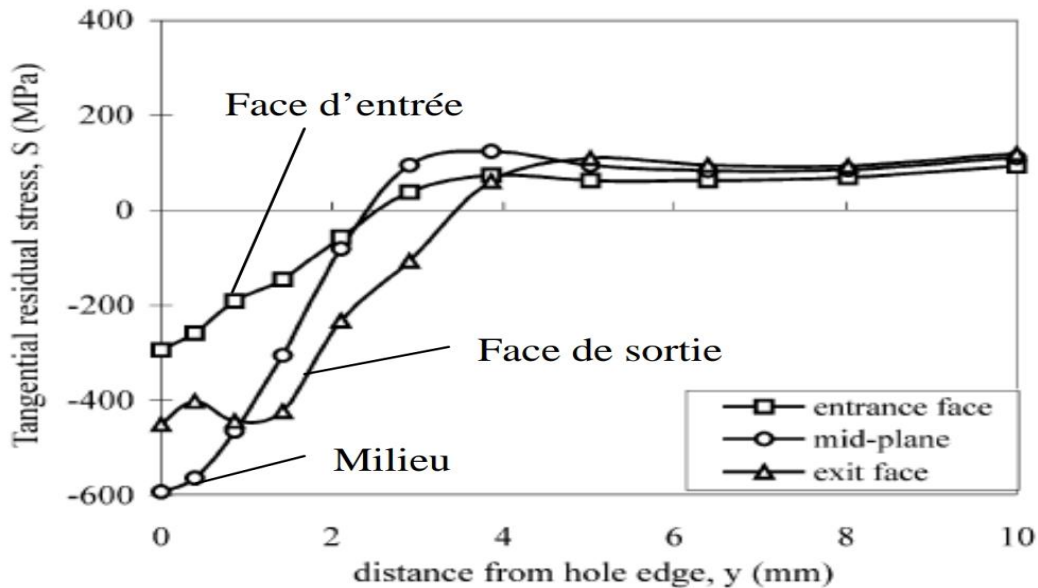


Figure 2.6 : Evolution des contraintes résiduelles - modèle 3D [26]

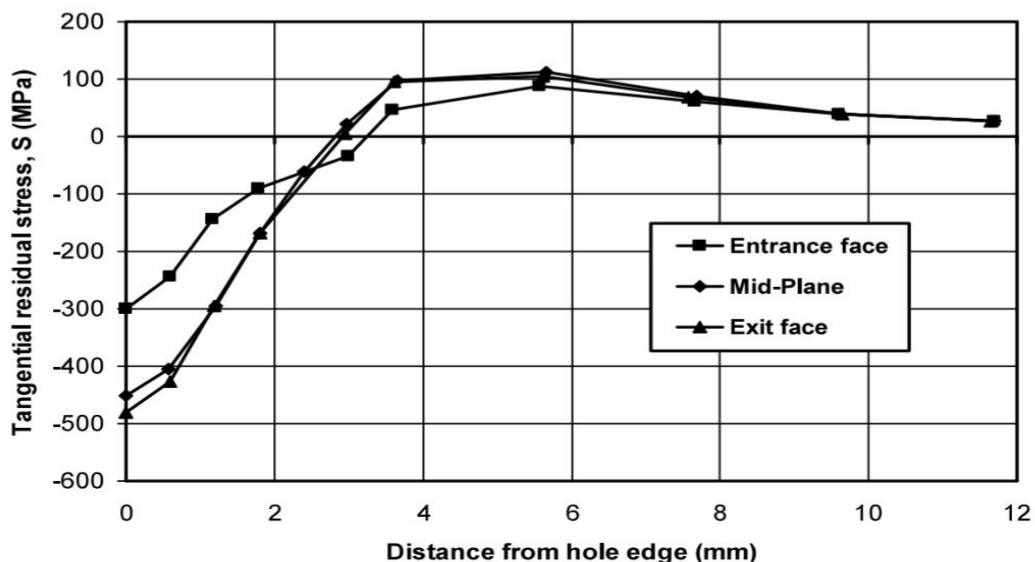


Figure 2.7 : Distribution des contraintes résiduelles sur les trois faces [27]

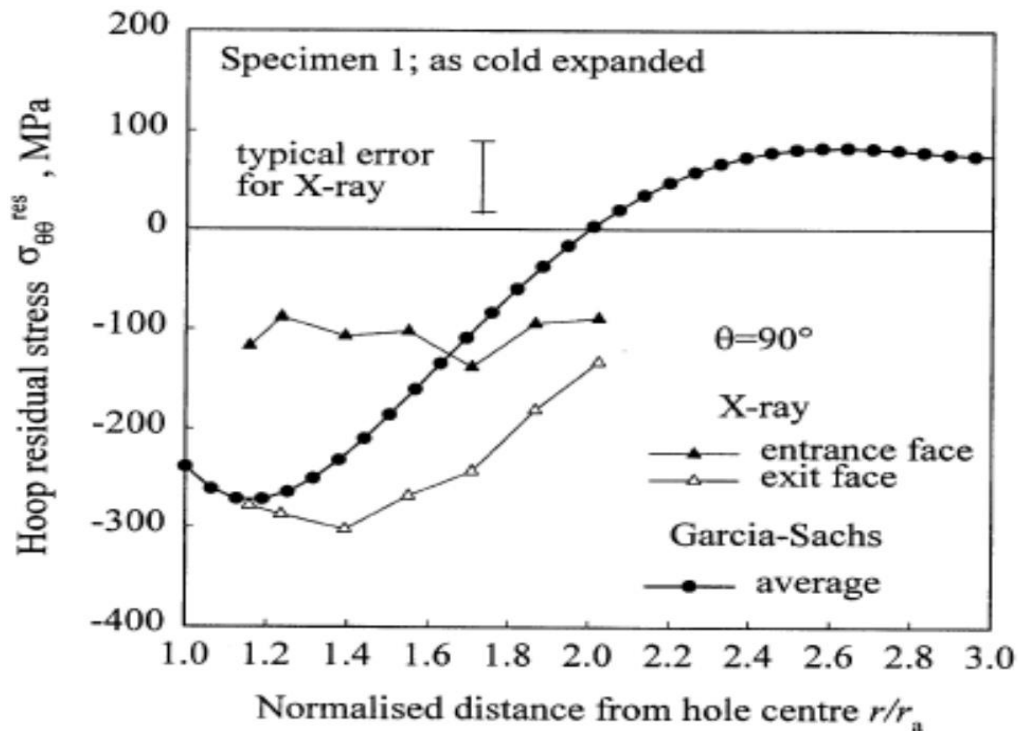


Figure 2.8 : Différence des contraintes résiduelles de la face entrée et de la face sortie [28]

#### IV. EFFET DES CONTRAINTES RESIDUELLES SUR LA FISSURATION PAR FATIGUE

Benachour et al [29] ont investigués l'effet de contraintes résiduelles générées par préchargement en flexion sur l'initiation des fissures de fatigue dans les échantillons de type Charpy. Leur approche inclut une modélisation du champ de contraintes intégrant les effets d'écroutissage isotrope. Les résultats montrent que la durée nécessaire à l'apparition d'une fissure de 0,2 mm augment avec l'intensification des contraintes « CRC » localisées aux entailles (Figure 2.9). La phase d'initiation représente une moyenne 45 % de la durée de vie complète des échantillons. Les recherches menées par Chakherlou et Vogwell [30] sur l'alliage 7075-T6 révèlent qu'un trou traité par expansion à froid multiplie par 10 la durée de vie en fatigue (Figure. 2.10).

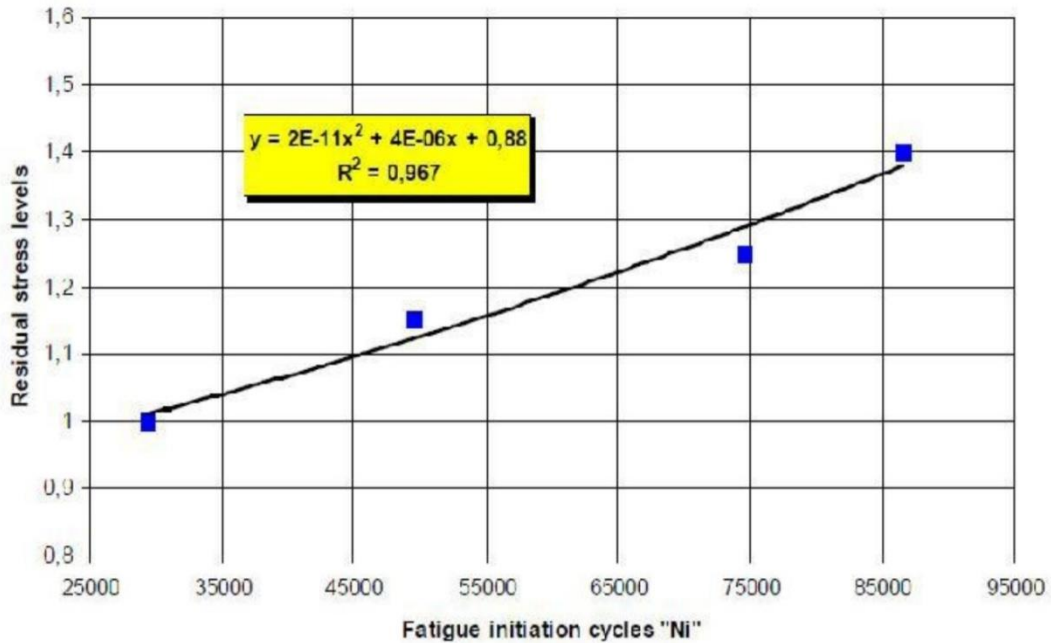


Figure 2.9. Effet des contraintes résiduelles par pré chargement mécanique sur la durée de vie à l'initiation de l'alliage 2024 1351[29]

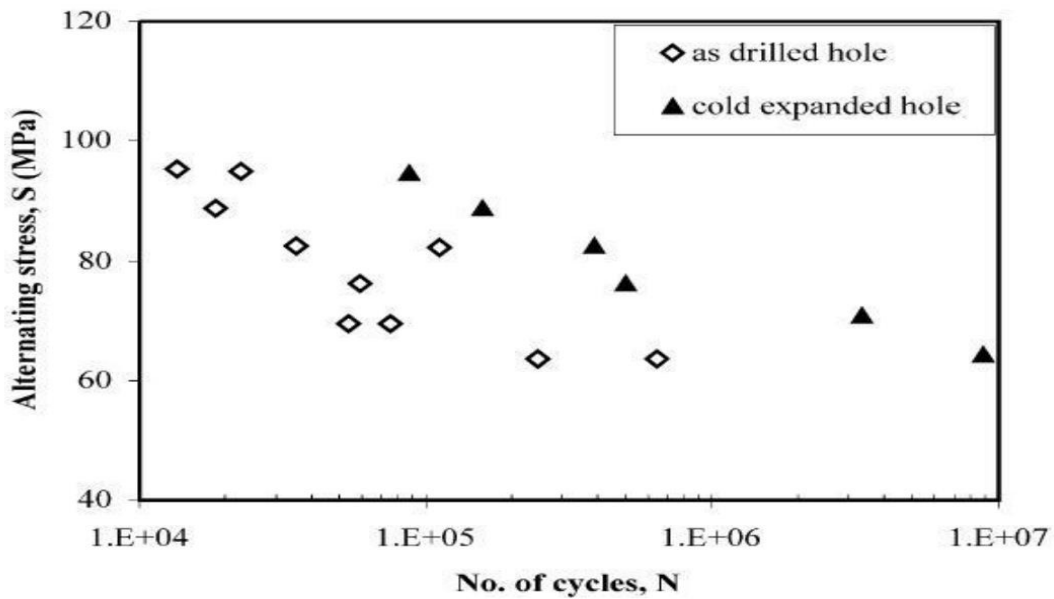


Figure 2.10. Influence de l'expansion de trou à froid sur le nombre de cycle de rupture [30]

Une étude menée par Ghfiri [31] sur l'alliage 6082-T6, démontrant que la durée de vie avant l'initiation de fissures augmente avec le niveau de contraintes « CRC », lié au degré d'expansion "1,7 % à 4,3 %" (Figure 2.11). Cependant, un sur-étirage (au-delà de 7 %) provoque un endommagement plastique local, réduisant cette durée. Ces

résultats soulignent l'importance d'un équilibre optimal entre le taux d'expansion et la préservation de l'intégrité structurale.

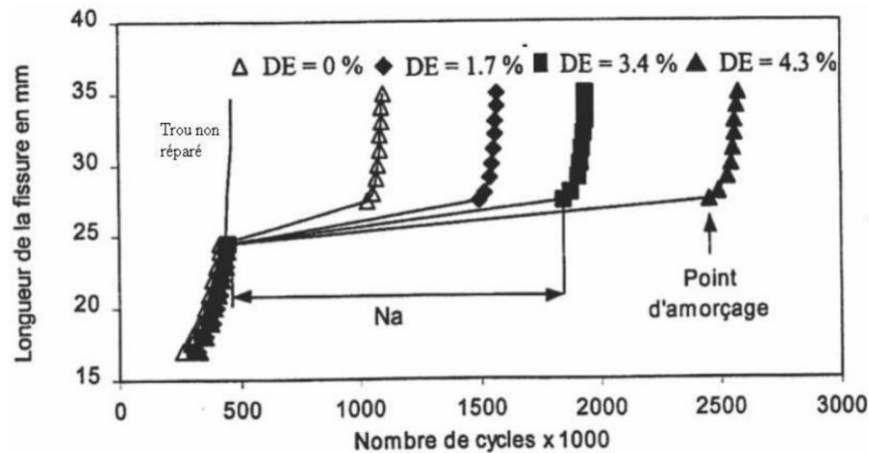


Figure 2.11. Influence de DCE sur la durée de vie à l'initiation [31]

Une étude réalisée par Kumar et al. [32] a révélé que l'application d'une expansion à un trou percé dans une plaque en alliage d'aluminium peut augmenter considérablement la résistance à la fatigue. Plus précisément, un trou expansé de 5 % présente une durée de vie en fatigue multipliée par 5,39 comparativement à un trou non expansé. Par ailleurs, des investigations expérimentales menées par Viveros et al. [33] sur des assemblages soudés ont confirmé ces résultats. Ils ont observé que l'introduction de contraintes résiduelles via l'expansion d'un trou de réparation réduit significativement la vitesse de fissuration, comparé à une configuration sans expansion (Figure 2.12).

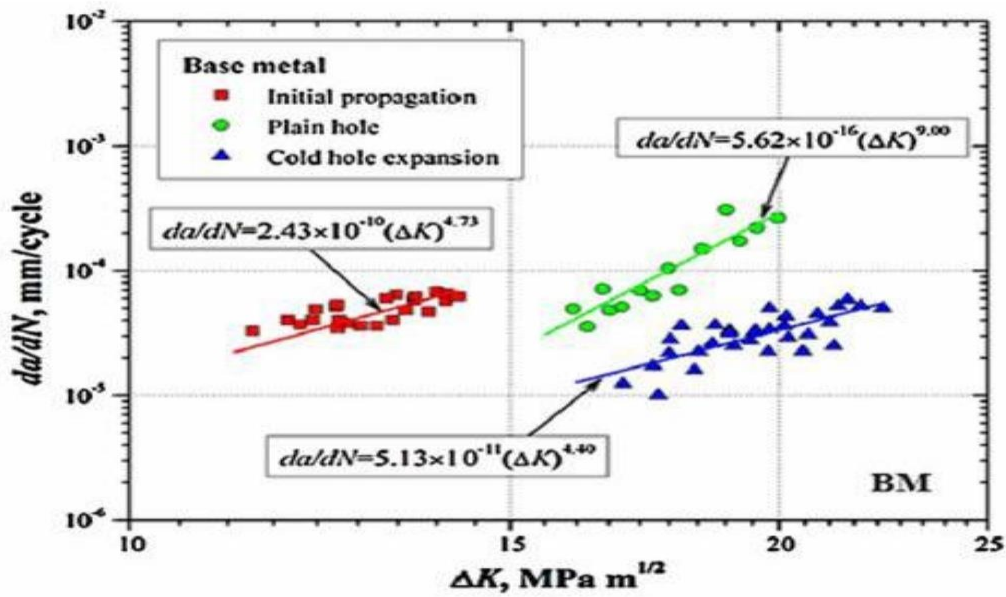


Figure 2.12. Influence du trou percé et du trou expansé sur la vitesse de fissuration de l'alliage 6061 16 [33]

Dans une étude récente, Faghiih [34] a confirmé à travers des essais expérimentaux que le niveau d'expansion idéal varie en fonction de l'épaisseur de la plaque. Par ailleurs, il a été observé que la durée de vie avant rupture par fatigue s'améliore de manière significative avec l'augmentation du degré DEC (Figure 2.13).

L'étude de Yongshou et al. [35] met en évidence que les fissures de fatigue s'initient sur la face d'entrée des trous, où les contraintes « CRC » sont moins que sur la face de sortie. Un traitement d'expansion à froid de 4 % à 6 % a permis de multiplier par six la durée de vie en fatigue par rapport à des trous non expansés (voir figure 2.14).

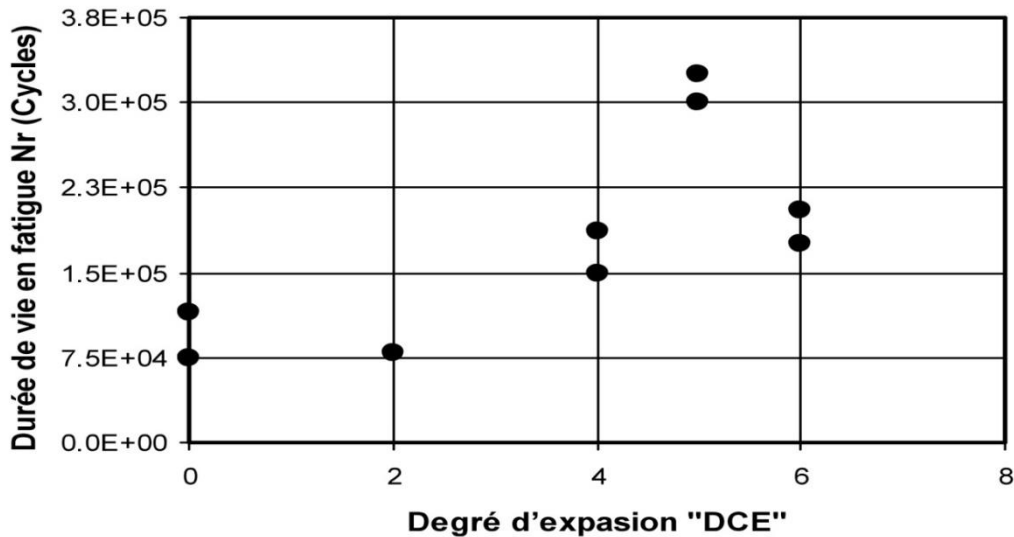


Figure 2.13. Effet du DCE sur la durée de vie à la rupture d'alliage de magnésium [34]

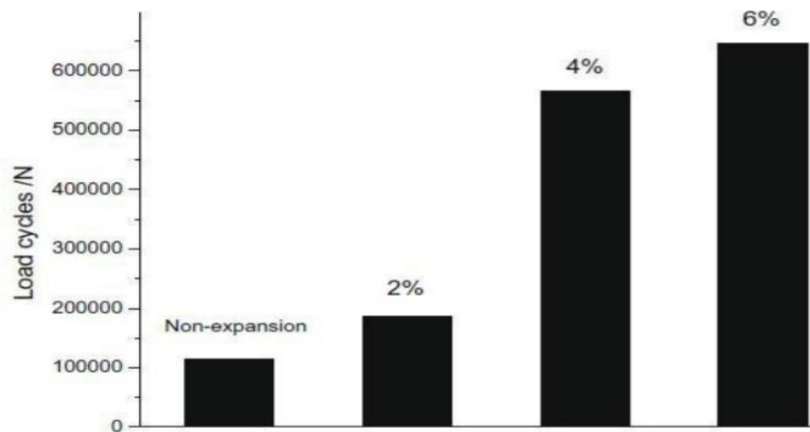


Figure 2.14. Influence du DCE sur la durée de vie à la rupture de l'alliage LY12-CZ [35]

Dans une étude récente, Pucillo et al. [36] ont étudié l'effet de l'expansion à froid (2% et 4%) sur la vitesse de propagation. A parti des résultats obtenus, il a été démontré qu'il y a un retard à l'amorçage des fissures de fatigue et que ce retard augmente avec l'augmentation du DCE. L'investigation récente conduite par Huang et al. [37] en appliquant la technique d'expansion à froid avec manchon fendu a montré à travers les résultats obtenus que l'expansion à froid avec manchon fendu induit des contraintes de compression résiduelle sur les bords du trou. La durée de vie en fatigue du matériau étudié a été prolongée de 6,2 fois, avec des contraintes résiduelles de compression comparativement par rapport à des trous non expansés.

## REFERENCES CHAPITRE 2

- [1] Bianchetti C., Delbergue, D., Bocher, P., Lévesque, M. (2019). "Analytical fatigue life prediction of shot peened AA 7050-T7451". *International Journal of Fatigue*, 118, pp 271-281
- [2] Seifi, R. (2018). Total fatigue lives, crack growth paths and cycles in cold expanded adjacent holes. *International Journal of Fatigue*, 113, pp. 69-77.
- [3] Kumar S.A., Mahendra Babu, N.C., (2018), "Sequential cold expansion and resulting beneficial residual stress prediction around adjacent fastener holes". *Materials Physics and Mechanics*, 37, pp 92-99.
- [4] Liu, Z.C., Jiang, C., Li, B.C., Wang, X.G. (2018). "A residual stress dependent multiaxial fatigue life model of welded structures". *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 41(2), pp. 300-313.
- [5] Diana A. Lados, Diran Apelian, Libo Wang (2010). Minimization of residual stress in heat-treated Al–Si–Mg cast alloys using uphill quenching: Mechanisms and effects on static and dynamic properties, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 527, Issues 13–14, pp 3159-3165.
- [6] Maligno, A.R., Citarella, R. Silberschmidt, V.V. (2017). "Retardation effects due to overloads in aluminium alloy aeronautical components". *Fatigue and Fracture of Engineering Materials & Structures*, 40(9), pp. 1484-1500.
- [7] Jones, K.W., Dunn, M.L. (2008). "Fatigue crack growth through a residual stress field introduced by plastic beam bending," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, pp. 863-875.
- [8] 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.
- [9] Newman Jr. J.C., Daniewicz, S.R. (2014). "Predicting crack growth in specimens with overloads and cold-worked holes with residual stresses". *Engineering Fracture Mechanics*, 127, pp 252-266.
- [10] 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
- [11] Shahriary, P., Chakherlou, T.N. (2018). "Investigating the effect of cold expansion on frictional force evolution during fretting fatigue tests of AL2024-T3 plates". *International Journal of Mechanical Sciences*, 135, pp. 146-157
- [12] Fu Yucan, Ge Ende, Su Honghua, Xu Jiuhua, Li Renzheng (2015). Cold expansion technology of connection holes in aircraft structures: A review and prospect. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China.

- [13] Yang XY, Dong LW, Zheng XM, Zhao FX. Simulation of extrusion strengthening of pressure equalizing hole of an engine compressor disc and design of extrusion heads. *J Aerosp Power* 2013;28(8):1769–76 Chinese.
- [14] Chakherlou TN, Aghdam AB. An experimental investigation on the effect of short time exposure to elevated temperature on fatigue life of cold expanded fastener holes. *Mater Des* 2008; 29:1504–11.
- [15] Chakherlou TN, Aghdam AB, Akbari A, Saedi K. Analysis of cold expanded fastener holes subjected to short time creep: finite element modelling and fatigue tests. *Mater Des* 2010; 31(6):2858–66.
- [16] Liu J, Shao XJ, Liu YS, Yue ZF. Effect of cold expansion on fatigue performance of open holes. *Mater Sci Eng A* 2008;477 (1–2):271–6.
- [17] Kim C, Kim DJ, Seok CS, Yang WH. Finite element analysis of the residual stress by cold expansion method under the influence of adjacent holes. *J Mater Process Technol* 2004; 153–154:986–91.
- [18] Maximov JT, Duncheva GV, Ganev N. Enhancement of fatigue life of net section in fitted bolt connections. *J Constr Steel Res* 2012;74:37–48
- [19] Maximov JT, Duncheva GV. A new 3D finite element model of the spherical mandrelling process. *Finite Elem Anal Des* 2008;44(6–7):372–82.
- [20] Semari Z, Aid A, Benhamena A. Effect of residual stresses induced by cold expansion on the crack growth in 6082 aluminum alloy. *Eng Fract Mech* 2013; 99:159–68..
- [21] Leon A. Benefits of split mandrel coldworking. *Int J Fatigue* 1998; 20(1):1–10
- [22] Karabina ME, Barlat F, Schultz RW. Numerical and experimental study of the cold expansion process in 7085 plate using a modified split sleeve. *J Mater Process Technol* 2007; 189 (1–3):45–57.
- [23] Gopalakrishna HD, Murthy Narasimha HN, Krishna M, Vinod AV, Suresh AV. Cold expansion of holes and resulting fatigue life enhancement and residual stresses in Al 2024 T3 alloy – An experimental study. *Eng Fail Anal* 2010;17(2):361–8.
- [24] Ozdemir AT, Hermann R. Effect of expansion technique and plate thickness on near-hole residual stresses and fatigue life of cold expanded holes. *J Mater Sci* 1999;34 (6): 1243–52.
- [25] CHEHAT Abdelillah. MEBARKI Zine el abidine. Effet de l'expansion à froid de trous de fixation sur la répartition des contraintes résiduelles induites par cette technique 2019/2020
- [26] T.N. CHAKHERLOU, J. VOGWELL The effect of cold expansion on improving the fatigue life of fastener holes, *Engineering Failure Analysis*, 10:13–24, 2003.
- [27] Liu, J., Shao, X.J., Liu, Y.S. Yue, Z.F... (2008). "Effect of cold expansion on fatigue performance of open holes". *Materials Science and Engineering A*, 477, pp. 271-276.

- [28] V.D. LACARAC, D.J. SMITH, M.J. PAVIER The effect of cold expansion on fatigue crack growth from open holes at room and high temperature, *International Journal of Fatigue*, 23: 161– 170, 2001.
- [29] 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.
- [30] Chakherlou, T.N. Vogwell, J. (2003). "The effect of cold expansion on improving the fatigue life of fastener holes". *Engineering Failure Analysis* 10, pp 13-24.
- [31] 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.
- [32] Kumar S.A., Bhattacharya, A., Mahendra Babu, N.C., (2014). "Fatigue crack growth life prediction around cold expanded hoel using finite element method". *Procedia Materials Science*, 5, pp 316-325.
- [33] Viveros K.C. et al.(2014). Cold hole expansion effect on the fatigue crack growth in welds of a 6061–T6 aluminum alloy. *J Mater Process Technol*.
- [34] Faghih Sasan (2018). "Experimental and numerical investigation of split sleeve cold expansion of AZ31B magnesium alloy". Master Thesis, Waterloo University, Ontario, Canada.
- [35] Liu Yongshou, Shao Xiaojun, Liu Jun, Yue Zhufeng (2010). Finite element method and experimental investigation on the residual stress fields and fatigue performance of cold expansion hole, *Materials & Design*, Volume 31, Issue 3, pp1208-1215.
- [36] Giovanni Pio Pucillo, Giovanniluca De Vita, Eugenio Fedeli (2022). Fatigue crack growth rate dependency on cold expansion degree in railway steel, *Procedia Structural Integrity*, Volume 39, pp. 700-710.
- [37] Lei Huang, Shoucai Wang, Haikun Ma, Ru Su, Changzhou Xu, Wenzhong Liu, Dayong Wu, Jie Kang (2024). Investigation on fatigue performance and microstructure of split sleeve cold expansion of TC4 holes, *Engineering Fracture Mechanics*, Volume 311, 110587.

*Chapitre 3 :*  
*Résultats & Interprétations*

## I. INTRODUCTION

Ce chapitre est réservé à la présentation et interprétations des résultats obtenus de la fissuration par fatigue à travers des trous expansés à froid sous l'influence des contraintes « CRC » et le type de chargement appliqué (chargement constant "CAL" et chargement variable à block "mMm", "MmM"). La durée de vie et la vitesse de fissuration est prédite en appliquant le modèle de Nasgro [1] inclut dans le code AFGROW [2].

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

## II. MATERIAU D'ETUDE & MODELE GEOMETRIQUE

L'éprouvette utilisée pour étudier la fissuration par fatigue est donné par la figure 3.1, présentant deux fissures à forme semi-circulaire de 0.5 mm au bord du trou à partir de la face d'entrée d'expansion des trous. Les paramètres du modèle NASGRO de l'alliage d'aluminium 2024 T351 sont donnés par le Tableau 3.1

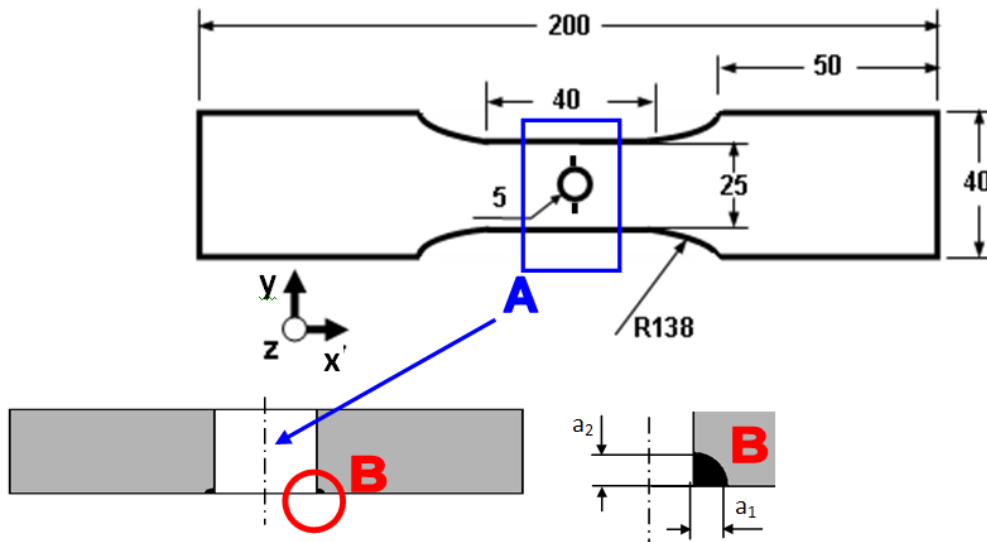


Figure 3.1. Plaque trouée pour la prédiction du comportement en fatigue [3]

## III. CHARGEMENTS CYCLIQUES APPLIQUEES ET CONTRAINTES RESIDUELLES PAR EXPANSION

Les chargements cycliques appliqués sont définis par les figures 3.2, 3.3 et 3.4 à savoir le chargement constant, les chargements à blocks variables "mMm" et "MmM"

introduits dans le code AFGROW à travers l'interface chargement "Spectrum". Les figures 3.3b et 3.4b représente respectivement les interfaces d'introduction du chargement cyclique à blocks variables mMm et MmM.

Les contraintes résiduelles par expansion à froid (figure 3.5) appliquées pour notre étude ont été déterminées par El Habiri [3] pour l'alliage 2024 T351.

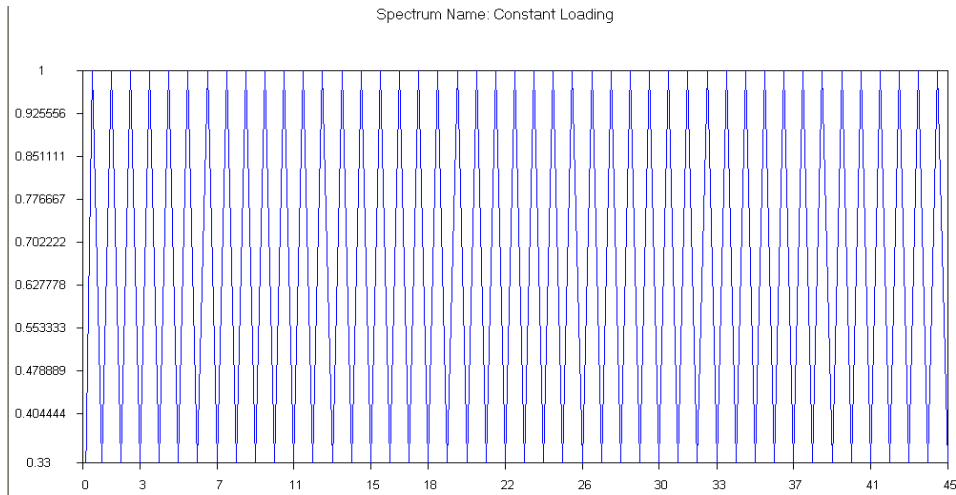


Figure 3.2 Chargement cyclique à constant

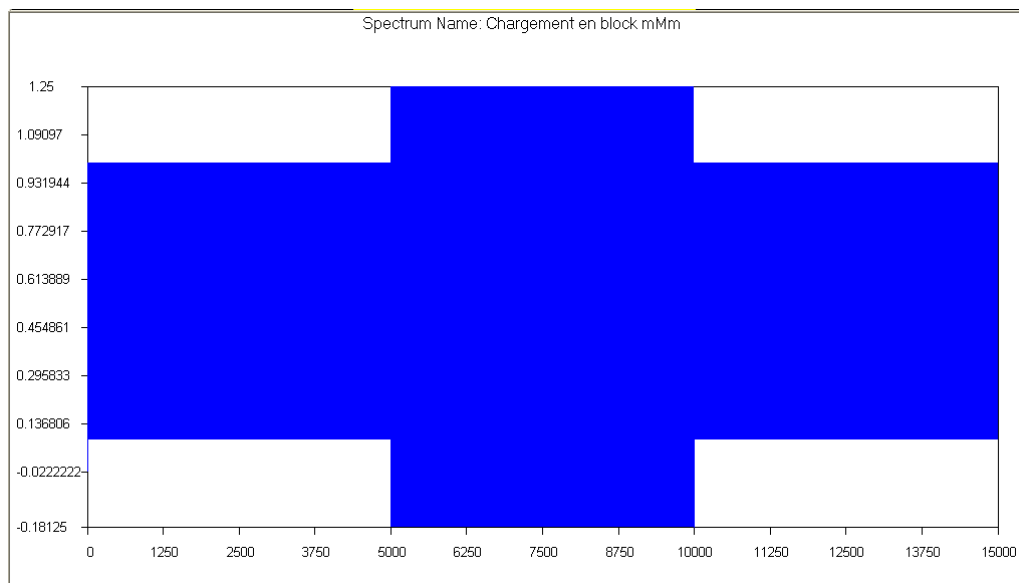


Figure 3.3a Chargement cyclique à blocks variables mMm

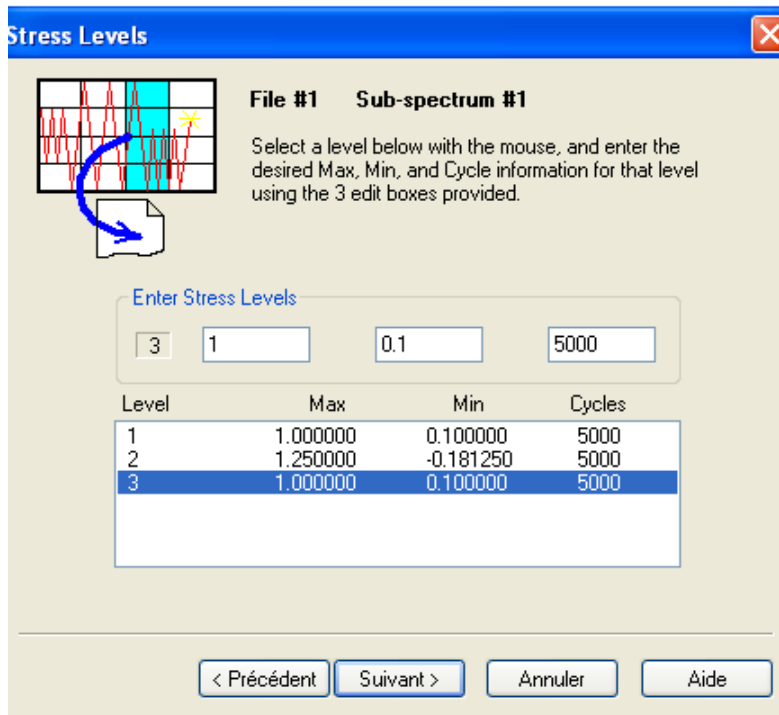


Figure 3.3b Interface d'introduction du chargement cyclique à blocks variables mMm

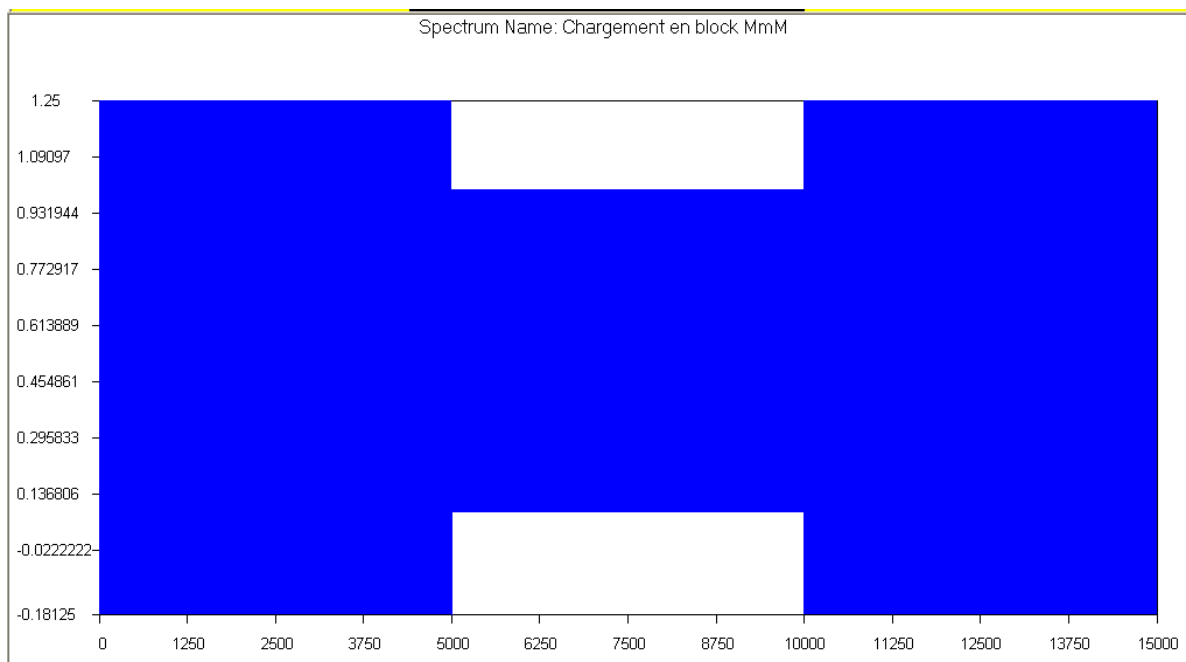


Figure 3.4a Chargement cyclique à blocks variables MmM

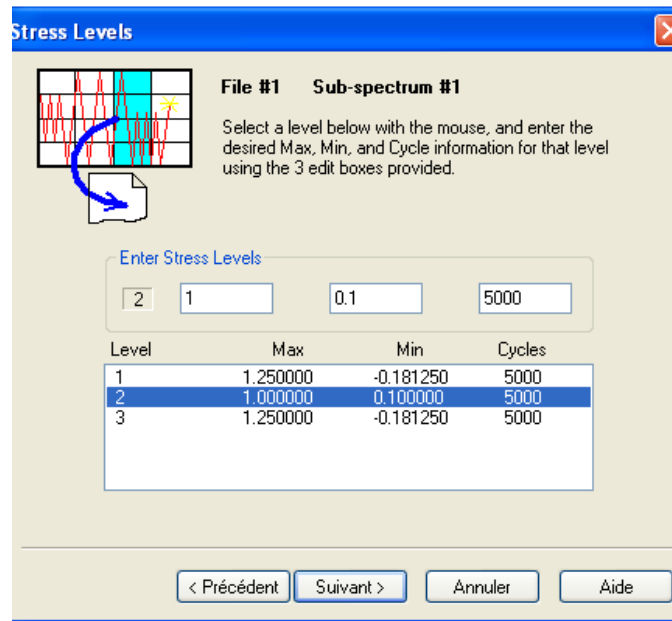


Figure 3.4b. Interface d'introduction du chargement cyclique à blocks variables MmM

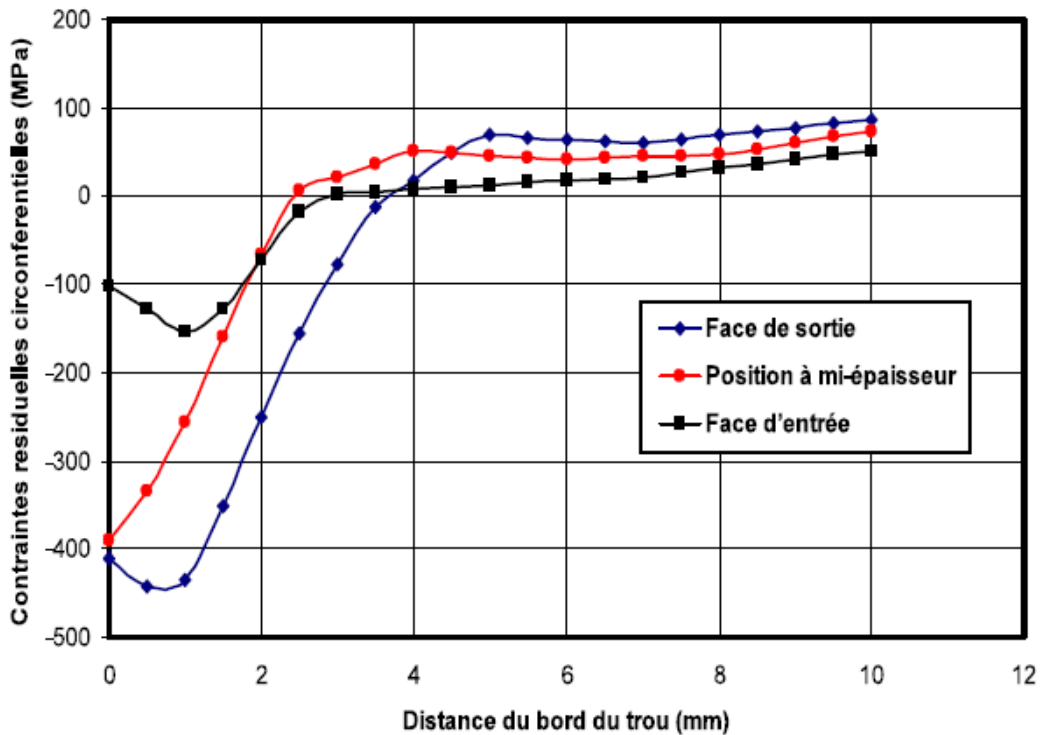


Figure 3.5. Distribution des contraintes résiduelles circonférentielles pour un degré d'expansion de 4.6 %

## IV. RESULTATS & INTERPRETATIONS

### IV.1. Effet du rapport de charge sans contraintes résiduelles

La figure 3.6 représente la variation de la longueur de la fissure en fonction du nombre de cycle sous l'effet du rapport de charge d'une plaque percée en absence des contraintes résiduelles suivant la direction « c ». La charge maximale appliquée pour tous les rapports de charge est de 200 MPa. On remarque que la variation du rapport de charge de 0.1 à 0.54 augmente la durée de vie de 3000 cycles à 12200 cycles. Ce gain en durée de vie se justifie par la diminution de l'amplitude de chargement qui passe de 180 MPa pour  $R = 0.1$  à 98 MPa pour  $R=0.54$ . Le taux d'augmentation est environ de 4 fois. Pour les rapports de charge  $R=0.25$  et  $0.33$  l'augmentation est de 1.33 et 1.66 par rapport à  $R=0.1$ . La longueur finale de rupture atteinte est de 7 mm. Suivant la direction de propagation « a » suivant l'épaisseur de la plaque à travers le trou (figure 3.7), la fissure maximale a atteint la valeur de l'épaisseur de la plaque. Les mêmes effets sont constatés par rapport aux effets dans la direction « c ».

L'influence du rapport « R » sur la vitesse de propagation suivant la direction « c » sont montrés respectivement sur les figures 3.8 et 3.9. On remarque l'augmentation du rapport de charge augmente la vitesse de propagation. L'effet du rapport R est plus constaté pour  $R=0.54$ . Pour  $R=0.25$  et  $0.33$ , la variation de la vitesse est presque négligeable. Le facteur d'intensité de contrainte initiale est de l'ordre de 11 MPa.Sqrt(m) et le facteur d'intensité de contrainte finale (rupture) est de 40 MPa.Sqrt(m) pour  $R=0.1$ . Par contre pour  $R=0.54$ , les facteurs de concentration de contrainte initial et final sont respectivement 6 et 20 MPa.Sqrt(m).

Suivant la direction « a » les facteurs d'intensités de contraintes initial et final pour  $R=0.1$  sont respectivement 13 et 39 MPa.Sqrt(m). Pour  $R=0.54$ , ces facteurs sont respectivement de 5.8 et 19.5 MPa.Sqrt(m). La vitesse maximale atteinte pour  $R=0.1$  dans la direction « c » est de  $5 \times 10^{-3}$  cycle/m et  $1 \times 10^{-4}$  cycle/m suivant la direction « a ». Cette vitesse diminue avec l'augmentation du rapport de charge.

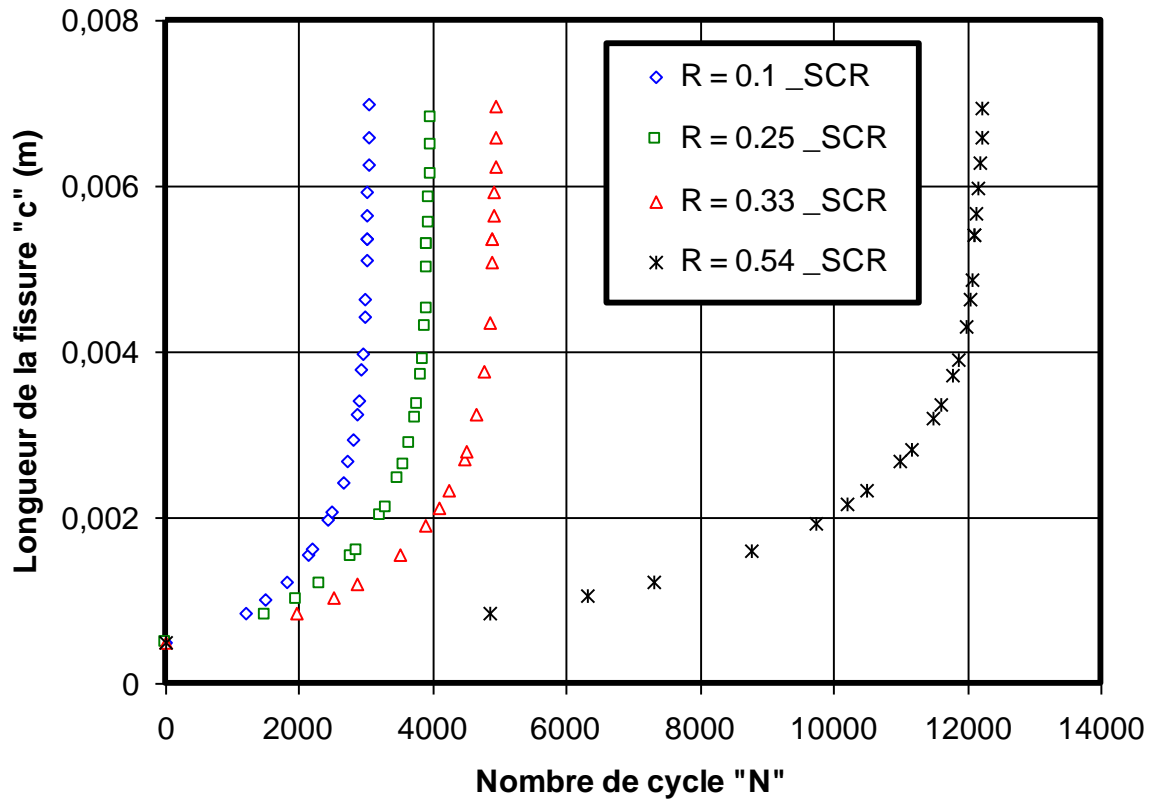


Figure 3.6 : Effet du rapport de charge sur la durée de vie en fatigue sans contraintes résiduelles dans la direction "c"

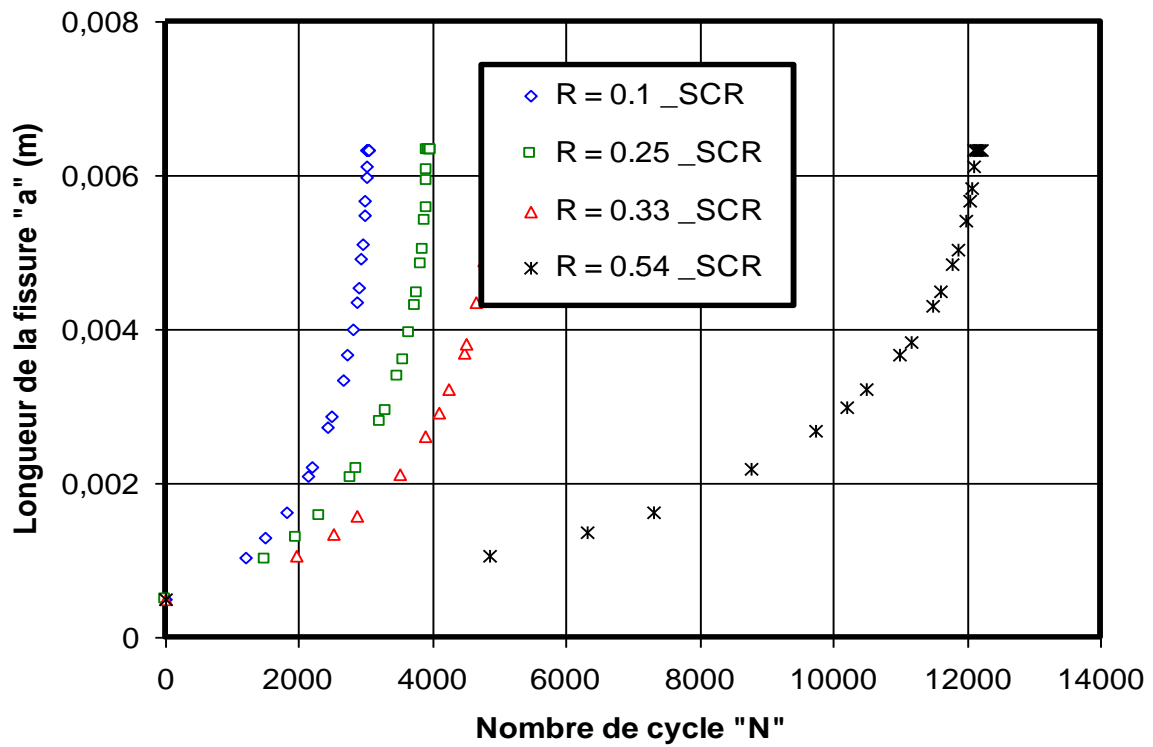


Figure 3.7 : Effet du rapport de charge sur la durée de vie en fatigue sans contraintes résiduelles dans la direction "a"

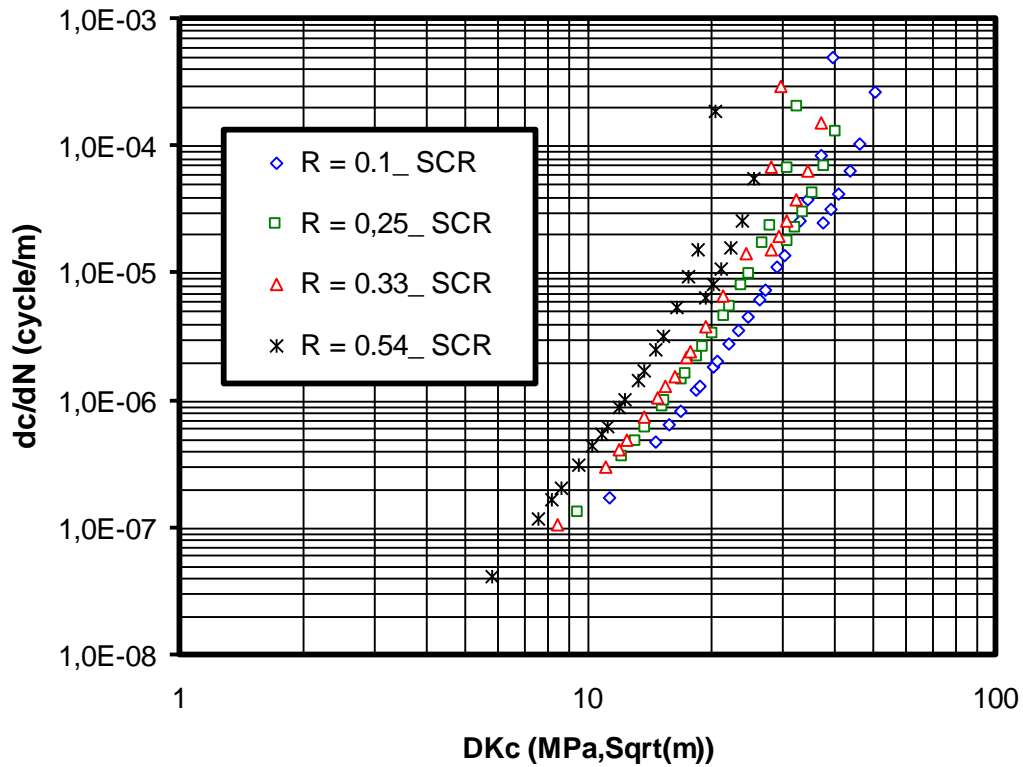


Figure 3.8 : Effet du rapport de charge sur la vitesse de propagation sans contraintes résiduelles suivant la direction "c"

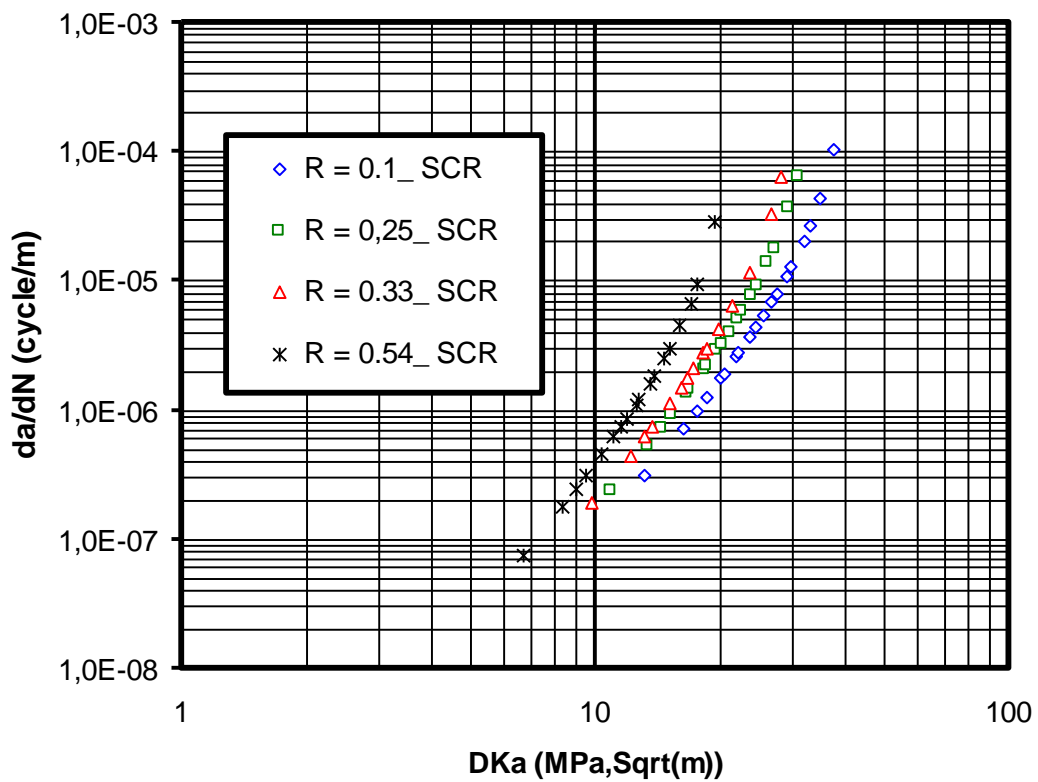


Figure 3.9 : Effet du rapport de charge sur la vitesse de propagation sans contraintes résiduelles suivant la direction "a"

## IV.2. Effet du rapport de charge en présence des contraintes résiduelles

Les figures 3.10 et 3.11 représentent la variation de la longueur de la fissure en fonction du nombre de cycle sous l'effet du rapport de charge d'une plaque percée en présence des contraintes résiduelles dues à l'effet d'expansion à froid (figure 3.5) suivant les directions « c » et « a ». La charge maximale appliquée est maintenue à 200 MPa.

L'effet du rapport de charge en présence des contraintes résiduelles de compression autour du trou est totalement négligeable. La longueur maximale atteinte pour les différents rapports de charge est de 10 mm suivant la direction « c » et 2.4 mm suivant la direction « a » sauf pour  $R=0.54$  où la longueur de la fissure est de 2.65 mm. La présence des contraintes résiduelles de compression et leur effets est montré par la non linéarité en début de propagation sur les courbes longueurs des fissures en fonction du nombre de cycle (figure 3.10 et 3.11). Vu le niveau de contraintes résiduelles important suivant l'épaisseur, la courbure de propagation suivant « a » est importante.

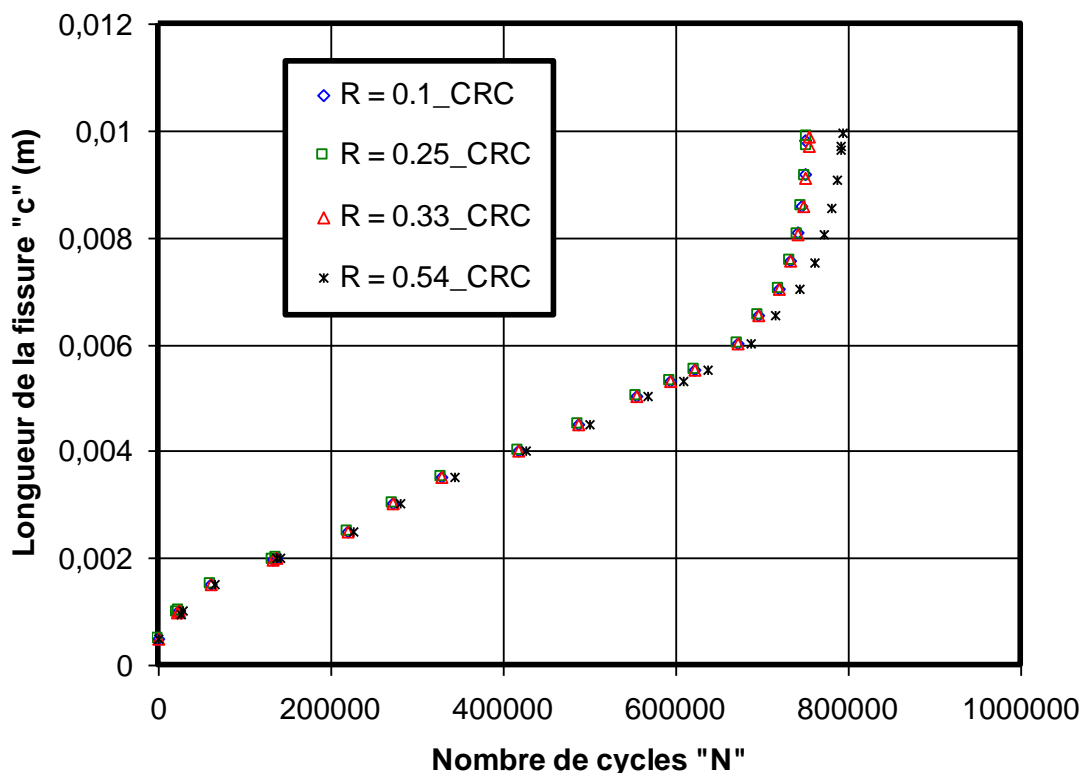


Figure 3.10 : Effet du rapport de charge sur la durée de vie en fatigue sans contraintes résiduelles dans la direction "c"

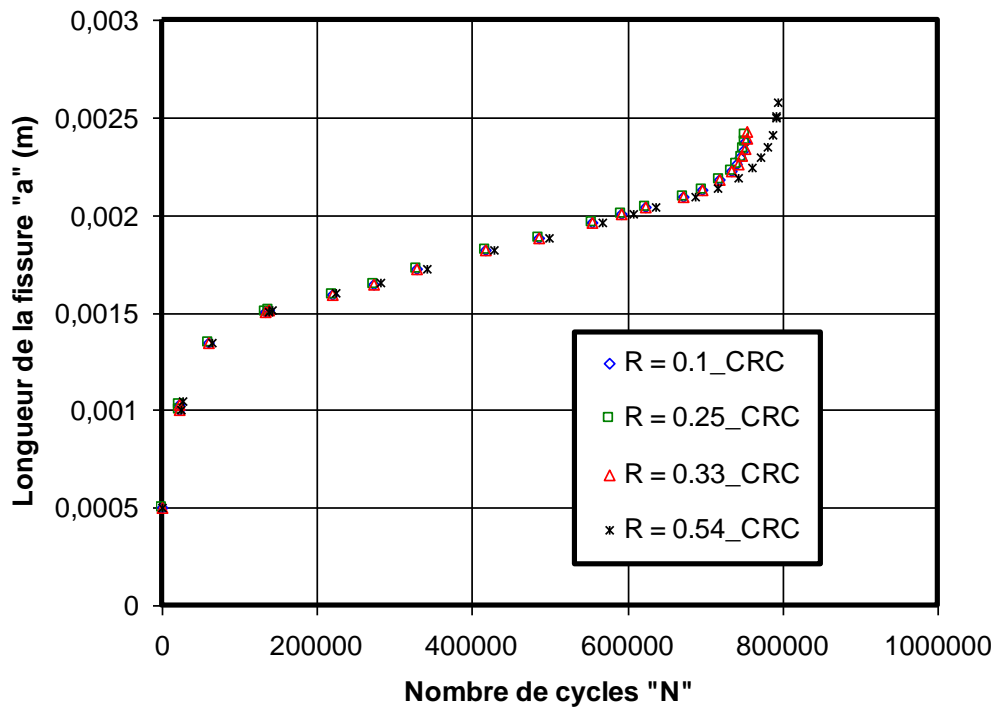


Figure 3.11 : Effet du rapport de charge sur la durée de vie en fatigue sans contraintes résiduelles dans la direction "a"

L'évolution des vitesses de propagation en présence des contraintes résiduelles de compression autour du trou et suivant l'épaisseur de la plaque sont reportés sur les figures 3.12 et 3.13 sous la variation du rapport de charge. Les résultats montrent que les effets des rapports de charge en présence des contraintes résiduelles sont atténués pour les vitesses suivant la direction « a ». Suivant la direction « c », l'effet du rapport R est atténué jusqu'à  $\Delta K=7 \text{ MPa}\cdot\text{Sqrt}(m)$ . Au-delà de  $7 \text{ MPa}\cdot\text{Sqrt}(m)$ , on note un décalage pour la courbe R=0.54, c.à.d. le rapport de charge R=0.54 est dominant dans cette zone (figure 3.12). L'évolution de la vitesse de propagation est liée principalement à la variation du facteur d'intensité de contraintes dû aux contraintes résiduelles suivant les deux directions « c » et « a » (figure 3.14 et 3.15). Les résultats des vitesses de propagation  $da/dN$  sont influencées par le rapport de charge effective  $R_{eff}$ . Le rapport  $R_{eff}$  suivant la direction « c » est totalement constant pour tous les rapports R jusqu'à une longueur de 8 mm et est de -0.3 (figure 3.16) et au delà de cette longueur on note l'influence du rapport de charge R. Pour R=0.54, Le rapport de charge effective dépend des contraintes résiduelles dues à l'expansion à froid et en

même temps du rapport  $R=0.54$  dont la variation est non linéaire. Suivant la direction « a » (figure 3.17), les rapports de charge sont atténués par la présence de fortes contraintes résiduelles de compression suivant l'épaisseur de la plaque et le rapport de charge effectif est dominé par les contraintes résiduelles de compression.

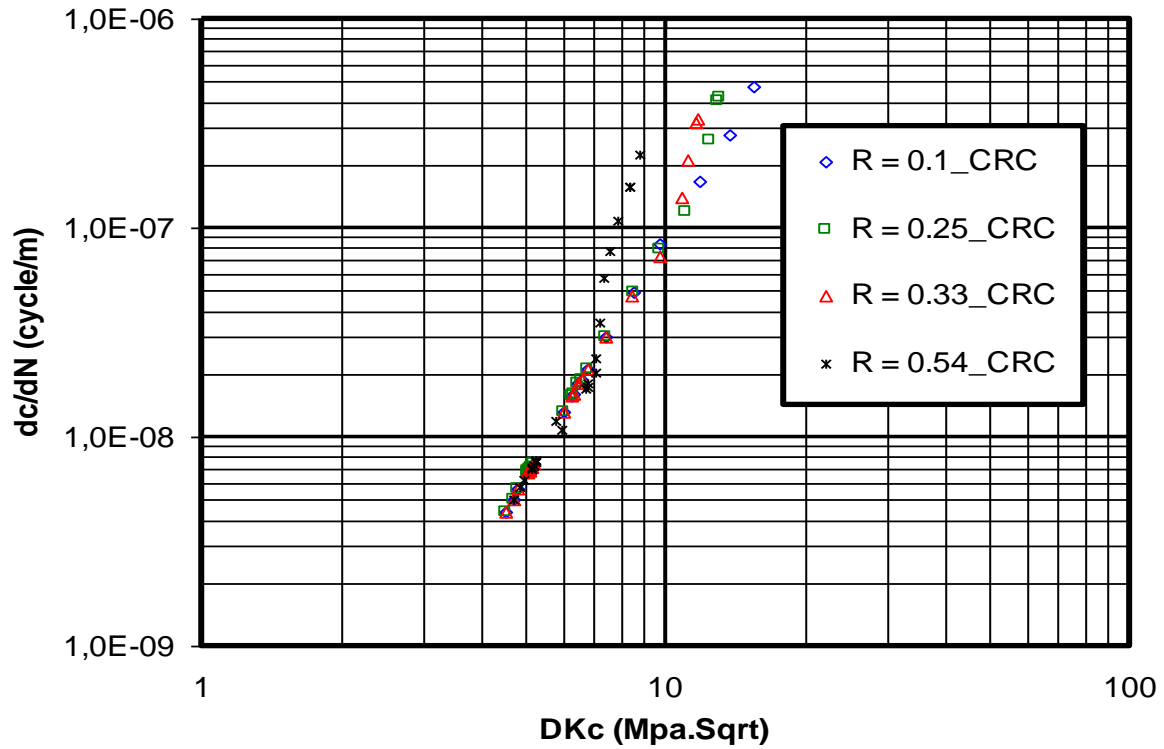


Figure 3.12 : Effet du rapport de charge sur la vitesse de propagation en présence des contraintes résiduelles suivant la direction "c"

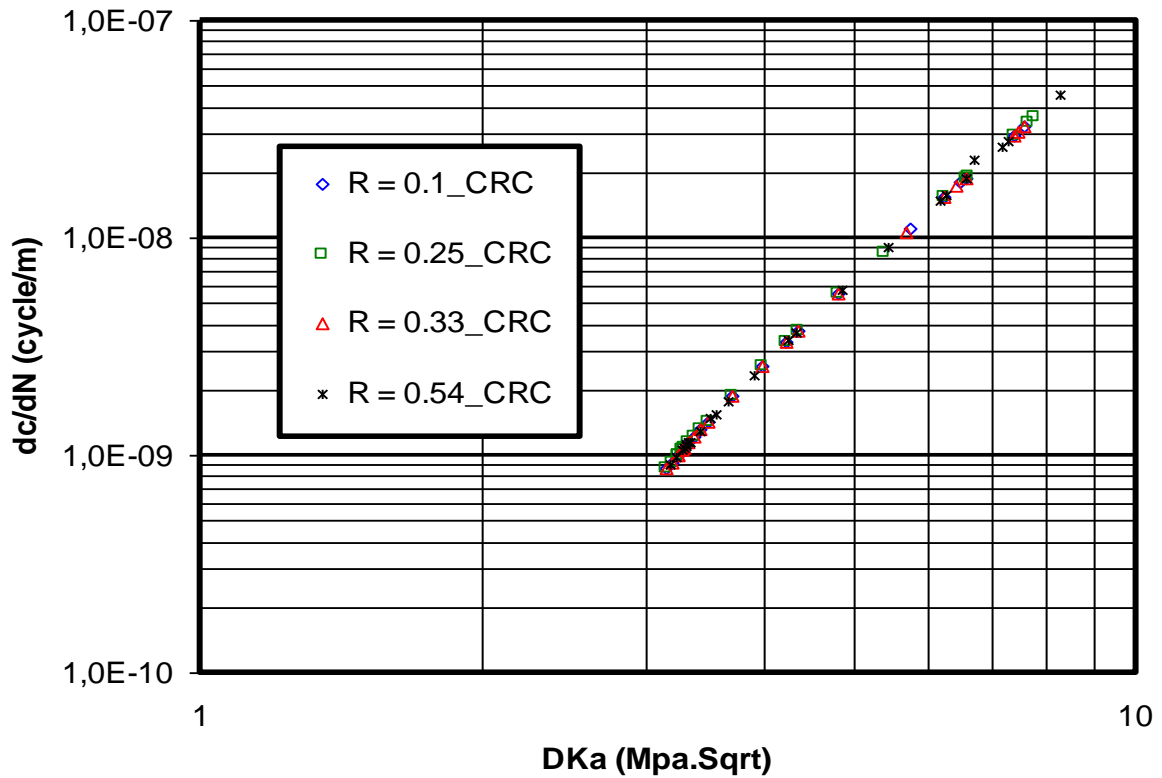


Figure 3.13 : Effet du rapport de charge sur la vitesse de propagation en présence des contraintes résiduelles suivant la direction "a"

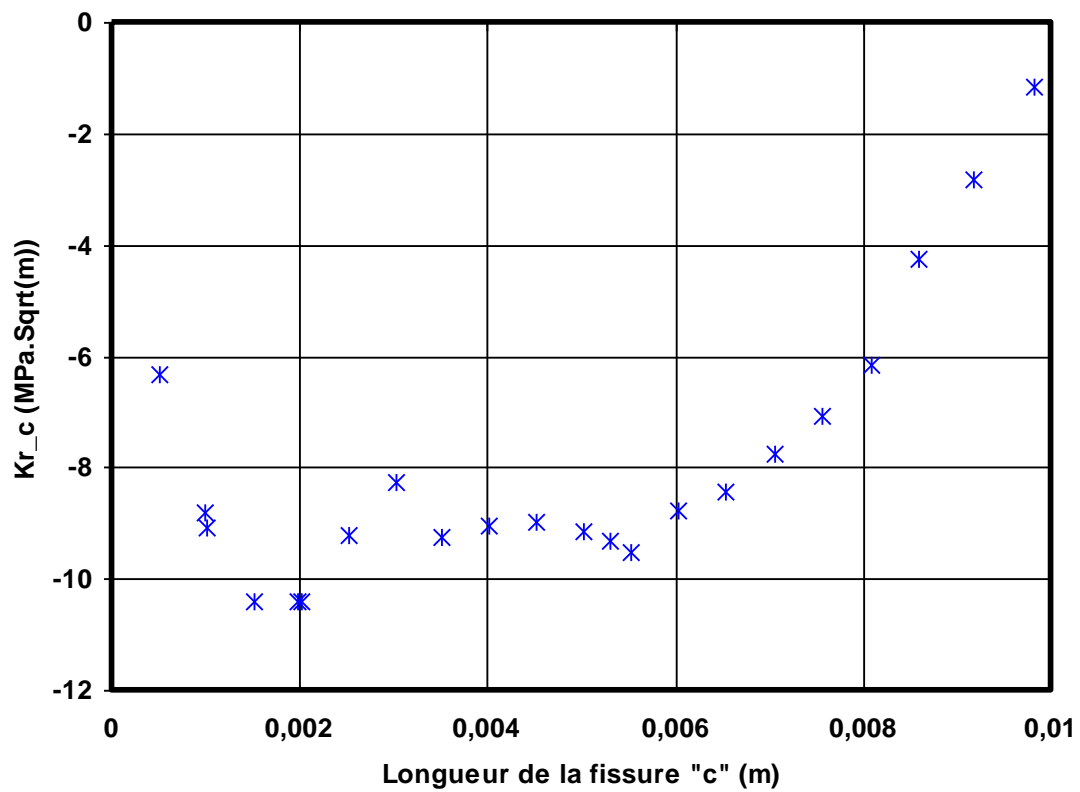


Figure 3.14 : Effet des contraintes résiduelles sur l'évolution du facteur  $Kr$  (direction "c")

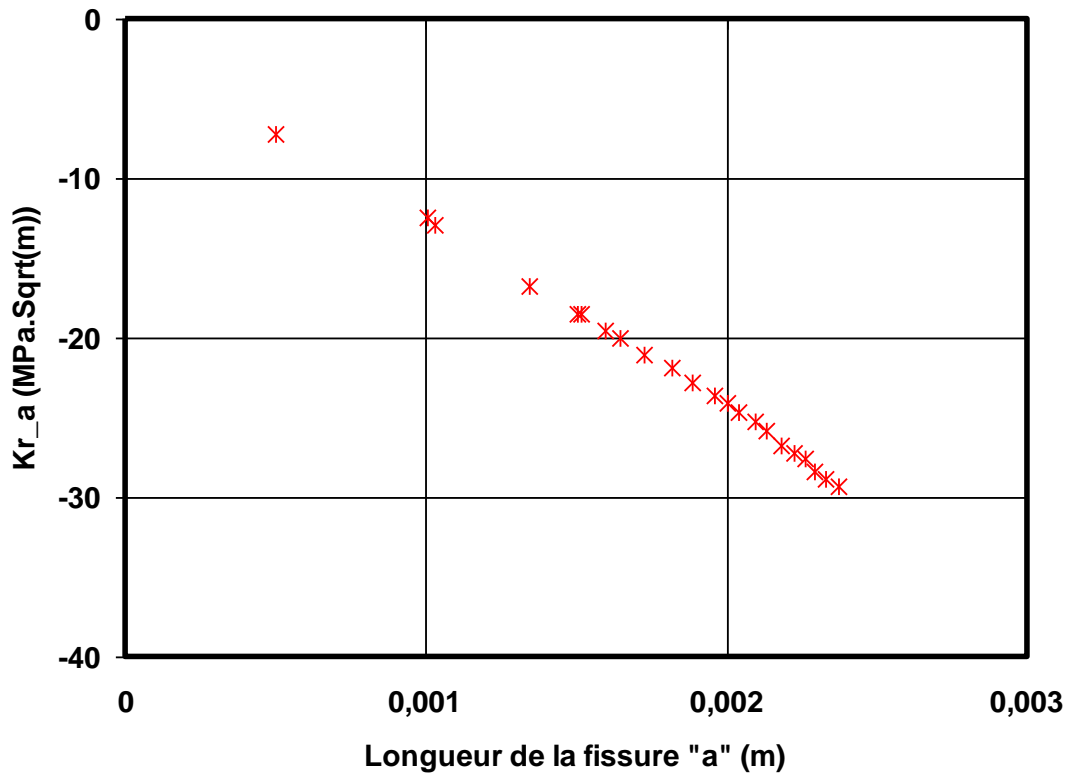


Figure 3.15 : Effet des contraintes résiduelles sur l'évolution du facteur Kr (direction "a")

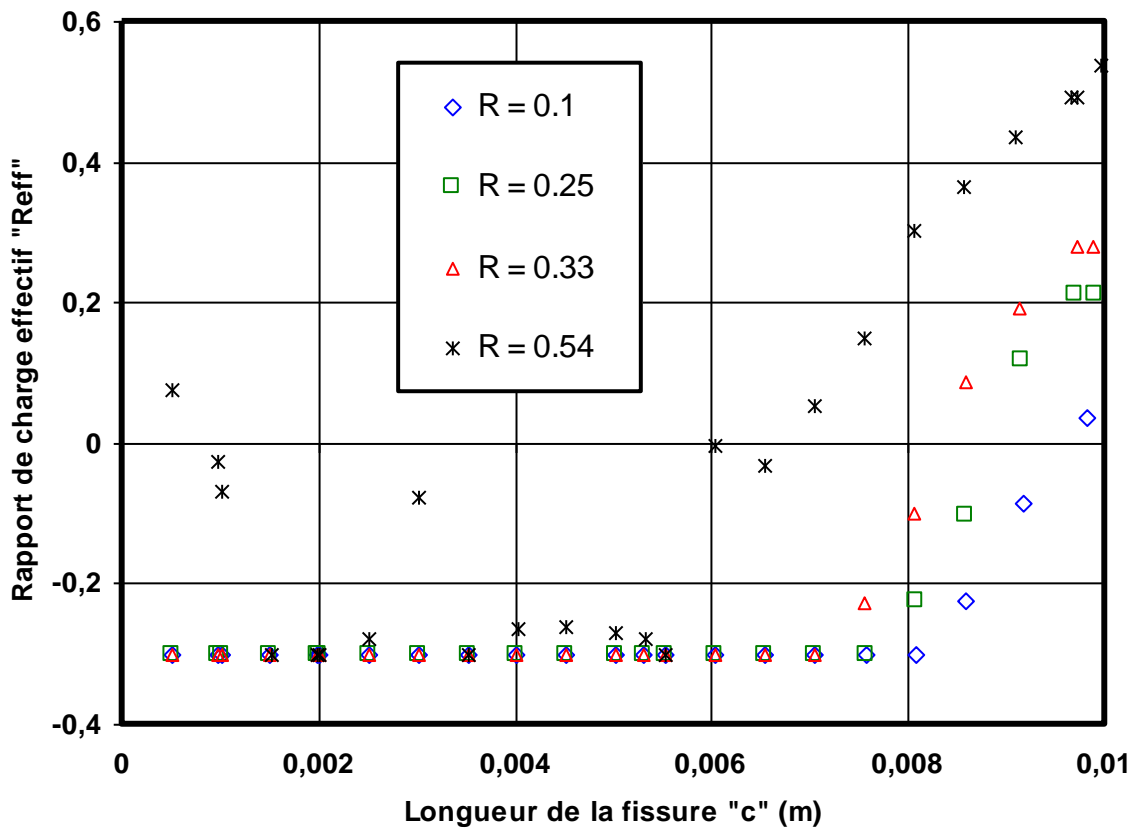


Figure 3.16 : Effets du rapport de charge et les contraintes résiduelles sur le rapport Reff (direction « c »)

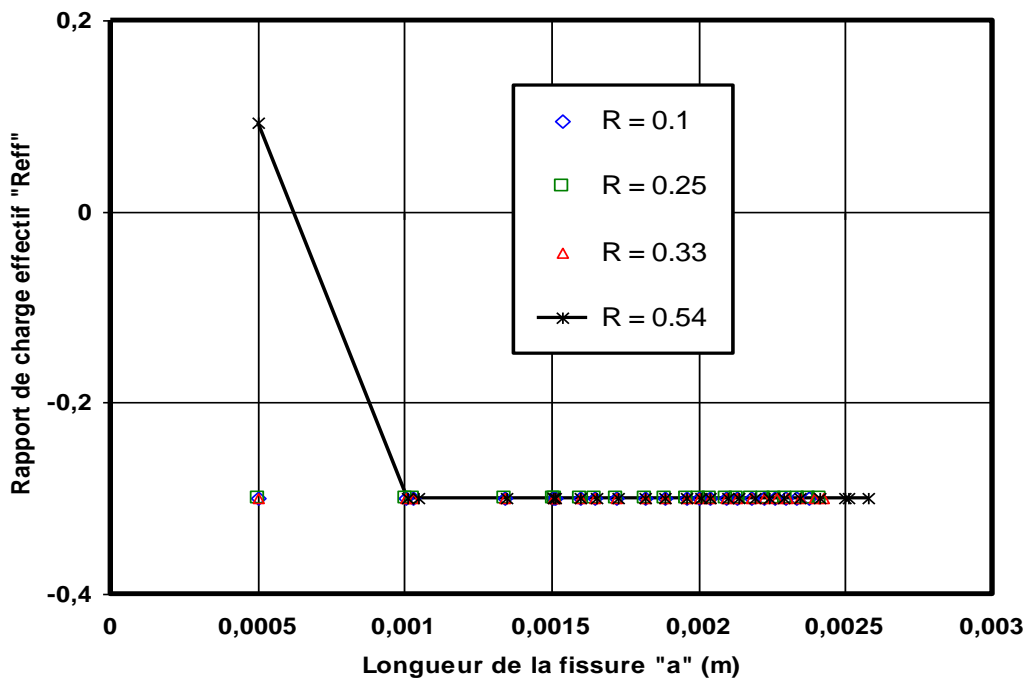


Figure 3.17 : Effets du rapport de charge et les contraintes résiduelles sur le rapport  $R_{eff}$  (direction « a »)

#### IV.3 Effets des contraintes résiduelles sous un chargement cyclique à blocs variables (mMm).

La figure 3.18 représente l'évolution de la longueur de la fissure en fonction du nombre de cycle sous blocs de chargements variables mMm définie par la figure 3.3a en absence et en présence des contraintes résiduelles dues à l'expansion à froid. On note que pour le chargement appliqué, la durée de vie en présence des contraintes résiduelles de compression a augmenté d'une façon significative par rapport à la courbe en absence des contraintes résiduelles. La durée de vie atteinte est de 380000 cycles. Le taux d'augmentation de cette durée de vie par rapport à la durée de vie (4800 cycles) sans contraintes résiduelles est environ de 80 fois selon la direction « c ». Les longueurs de fissures atteintes sont respectivement de 9.65 mm et 8.22 pour chargement mMm avec contraintes résiduelles et chargement mMm sans contraintes résiduelles. Suivant la direction « a » (figure 3.19), on note un même taux d'augmentation en durée de vie avec des longueurs de fissure de 6.32 mm et 2.55 mm en absence et en présence des contraintes résiduelles de compression respectivement.

L'évolution de la vitesse de propagation sous un chargement mMm est donnée par la figure 3.20 en absence et en présence des contraintes résiduelles de compression suivant les directions « c » et « a ». Sous l'application du chargement mMm et en absence des contraintes résiduelles, on note une augmentation de la vitesse de propagation et une décélération de la vitesse à une longueur « c=5.5mm » comparativement par rapport à la vitesse de propagation en présence des contraintes résiduelles de compression. On remarque aussi des décélérations suivant toute la longueur de propagation. La vitesse atteinte à 2 mm est de l'ordre de  $2 \times 10^{-9}$  cycle/m. À la même longueur et en absence des contraintes résiduelles, la vitesse est de  $1 \times 10^{-6}$  cycle/m. ce qui représente un taux d'augmentation de 500 fois. En présence des contraintes résiduelles sous le chargement mMm, la vitesse varie entre  $2 \times 10^{-9}$  cycle/m et  $9 \times 10^{-8}$  cycle/m entre la longueur « c » de 0.5 mm à 6 mm. Au-delà de 6 mm, on note une accélération jusqu'à rupture à la longueur « c=9.7 mm ». Suivant la direction « a » on remarque l'effet bénéfique des contraintes résiduelles de compression avec une décélération de la vitesse. La longueur finale de rupture est de 2.7 mm due au blocage par les contraintes résiduelles suivant l'épaisseur de la plaque.

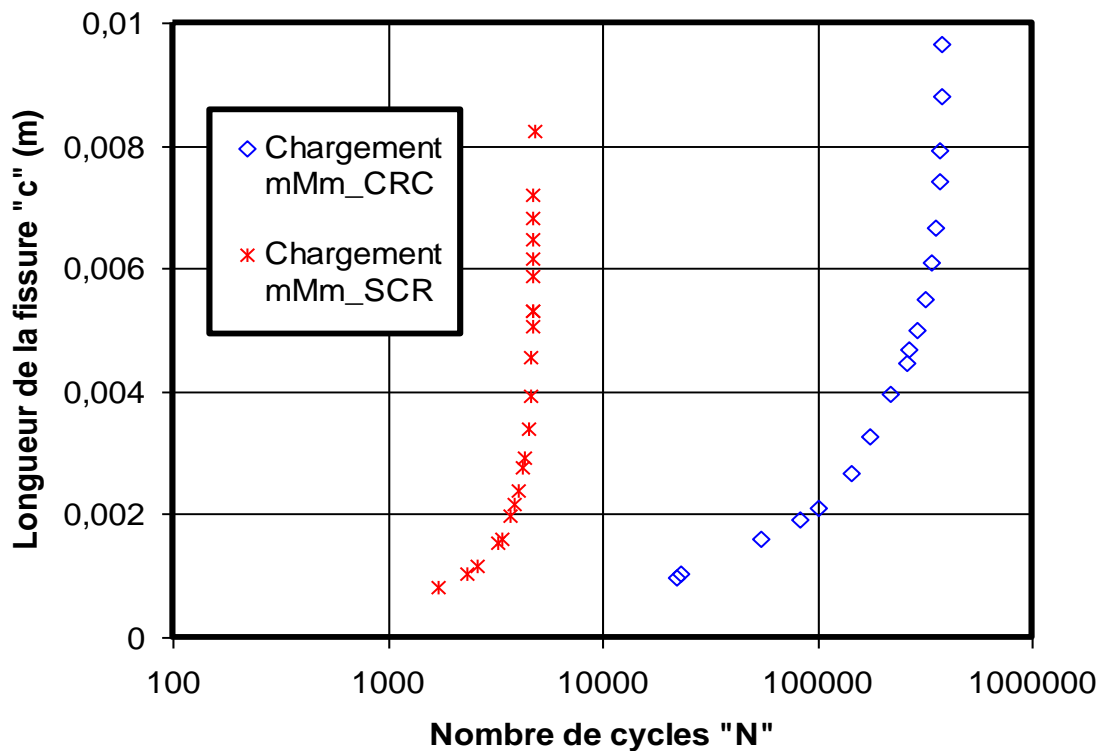


Figure 3.18 : Evolution de la longueur de la sous un chargement "mMm" et en présence des contraintes résiduelles dans la direction "c"

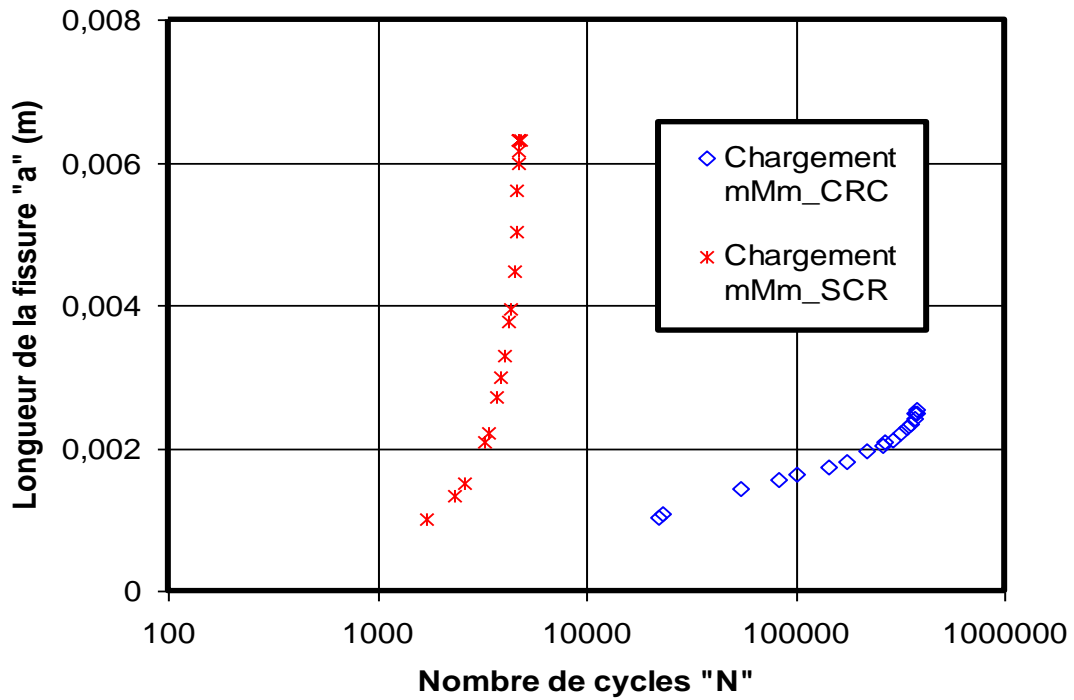


Figure 3.19 : Evolution de la longueur de la fissure sous un chargement "mMm" et en présence des contraintes résiduelles dans la direction "a"

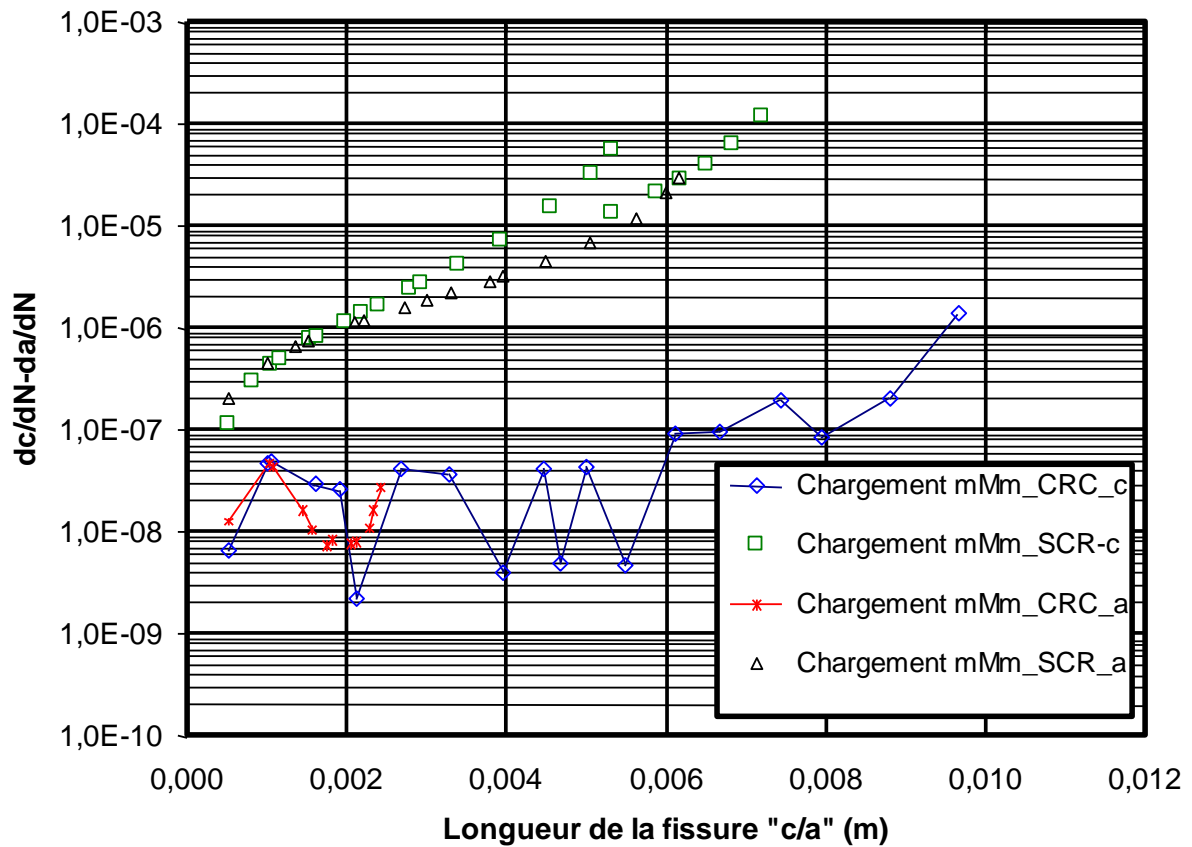


Figure 3.20 : Evolution de la vitesse de fissuration sous un chargement "mMm" et en présence des contraintes résiduelles dans la direction "c/a"

#### **IV.4. Effets des contraintes résiduelles sous un chargement cyclique à blocks variables (MmM)**

L'évolution de la longueur de la fissure suivant la direction « c » et « a » sont donnés respectivement par les figures 3.21 et 3.22 sous un block de chargement MmM (figure 3.4a). On note une augmentation de la durée de vie en présence des contraintes résiduelles de compression dues à l'expansion à froid comparativement par rapport à la propagation sans contraintes résiduelles.

La durée de vie en présence des contraintes résiduelles de compression a augmenté de 136 fois (207000 cycles) à une longueur de fissure de 9.6 mm. Par contre la durée de vie en absence des contraintes résiduelles est de 1520 cycles à une longueur de fissure de 5.04 mm. Suivant la direction « a » (figure 3.22), la longueur de la fissure en absence des contraintes est de 5.82 mm à une durée de vie de 1520 cycles, par contre la longueur de la fissure en présence des contraintes résiduelles a atteint une valeur de 2.66 mm et une durée de vie de 207000 cycles.

Les évolutions des vitesses de fissuration suivant les directions « c » et « a » sont données sur la figure 3.23 Pour la direction « c » et en présence des contraintes résiduelles de compression, on note une diminution significative de la vitesse avec des décélérations dues au chargement MmM appliqué. De même pour les vitesses suivant la direction « a ». Suivant la direction « c » la vitesse maximale de rupture est de  $2 \times 10^{-6}$  cycle/m par contre suivant la direction « a ». La vitesse est de  $2 \times 10^{-7}$  cycle/m. En absence des contraintes résiduelles, en appliquant le chargement MmM, on note une diminution de la vitesse de fissuration suivant « a » par rapport à la direction « c » à partir de la longueur de fissure de 2 mm jusqu'à rupture.

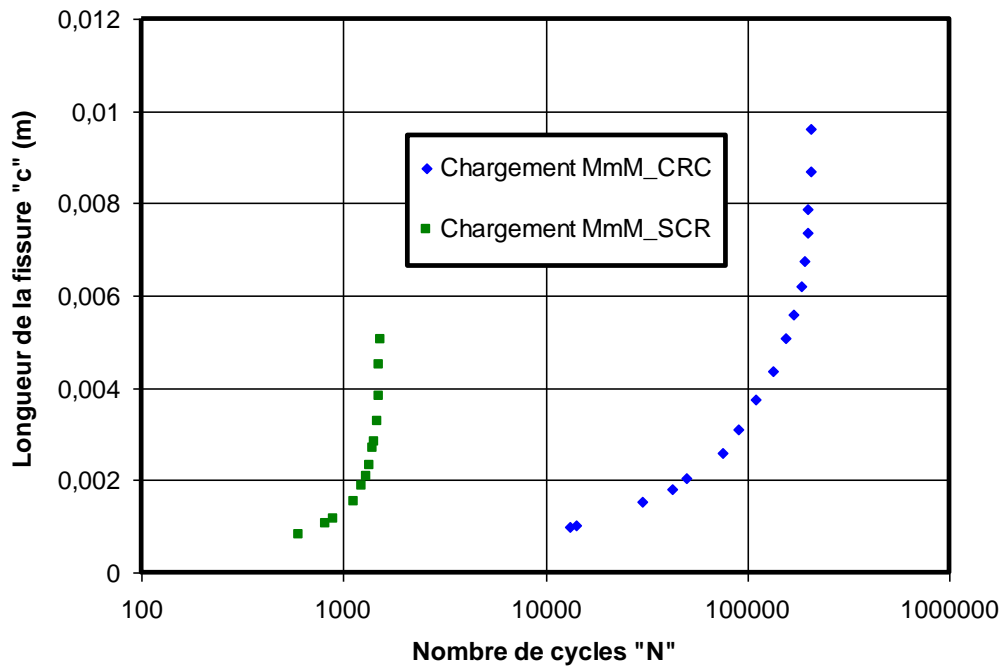


Figure 3.21 : Evolution de la longueur de la fissure sous un chargement "MmM" et en présence des contraintes résiduelles dans la direction "c"

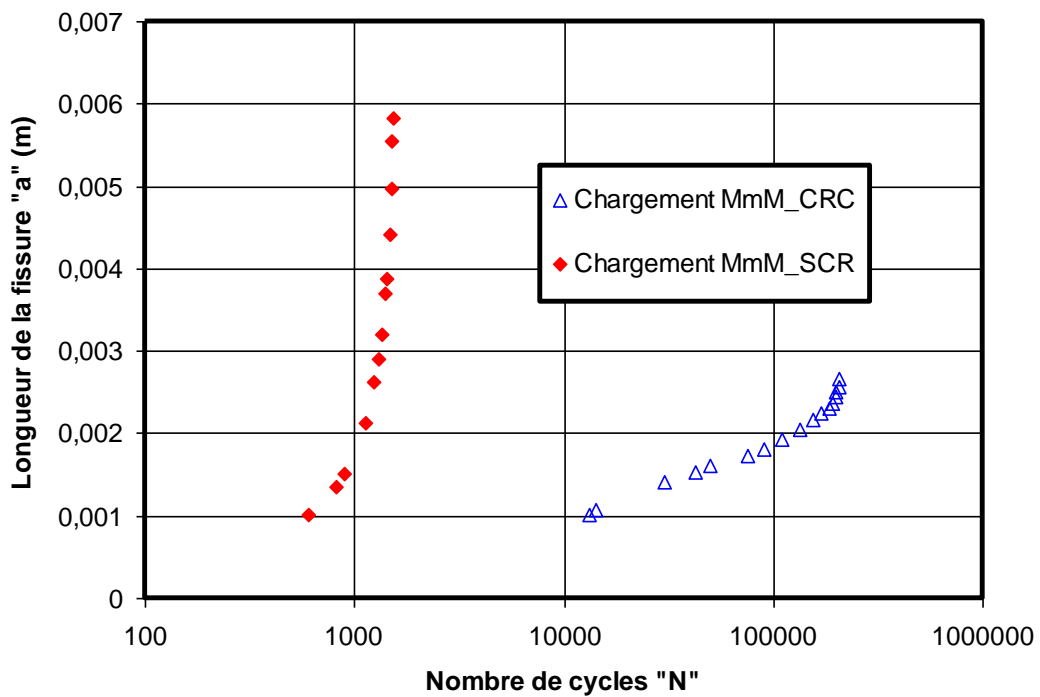


Figure 3.22 : Evolution de la longueur de la fissure sous un chargement "MmM" et en présence des contraintes résiduelles dans la direction "a"

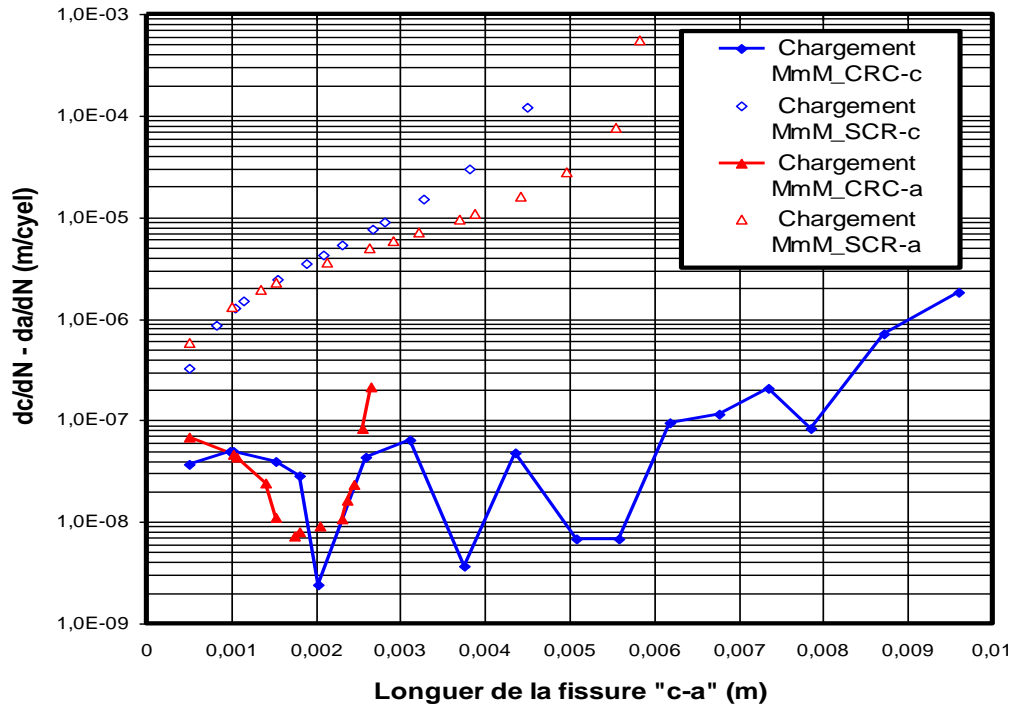


Figure 3.23 : Evolution de la vitesse de fissuration sous un chargement "MmM" et en présence des contraintes résiduelles dans la direction "c/a"

## **REFERENCES CHAPITRE 3**

- [1] 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 22<sup>nd</sup> Symposium, Vol. 1, ASTM STP 1131, H.A. Saxena and D.L. McDowell, eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- [2] Harter JA, “AFGROW Users Guide and Technical Manual, AFRL-VA-WP-1999-3016”. Air Force Research Laboratory, Wright-Patterson, OH, Feb 1999.
- [3] El Habiri Mohamed (2019). Effet d’expansion des trous sur l’amorçage et la propagation des fissures de fatigue. Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen

## **CONCLUSION & PERSPECTIVES**

Ce travail s'intéresse à l'influence de l'expansion à froid des trous de rivetage sur la propagation des fissures de fatigue dans des plaques soumises à des chargements cycliques, en mettant en lumière les effets bénéfiques des contraintes « CRC » induites par cette technique. Les résultats issus de cette analyse, ont montré que l'introduction des contraintes « CRC » permet non seulement de ralentir la vitesse de propagation des fissures, mais également d'augmenter la durée de vie des structures, en particulier lorsque celles-ci sont soumises à des sollicitations variables.

L'étude a d'abord présenté les fondements du comportement en fatigue, en insistant sur les mécanismes de propagation et de rupture, tout en s'appuyant sur des modèles classiques comme ceux de Paris. Ensuite, un état de l'art approfondi sur les différentes méthodes d'expansion à froid (mandrin, bille, manchon, etc.) a permis de mieux comprendre comment ces procédés génèrent des contraintes compressives capables de retarder la propagation. Enfin, les résultats obtenus sous l'environnement AFGROW ont démontré que les chargements de type « mMm » pouvaient entraîner une durée de vie 1,84 fois supérieure à celle observée pour les chargements « MmM", et que la présence des contraintes « CRC » permet d'atténuer l'effet du rapport de charge sur la vitesse  $da/dN$ . Ces constats ouvrent la voie à plusieurs perspectives, notamment l'optimisation des paramètres d'expansion (tels que la géométrie de l'outil ou le taux d'expansion), le développement de modèles plus fins pour simuler des conditions de chargement complexes, et l'extension de cette technique à d'autres matériaux ou configurations, en particulier dans les domaines aéronautique et automobile où la résistance à la fatigue est un enjeu majeur.