

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret  
Faculté des Sciences Appliquées  
Département de Génie Mécanique



## MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

**Domaine** : Sciences et Technologie  
**Filière** : Génie Mécanique  
**Parcours** : Master  
**Spécialité** : Construction Mécanique

### Thème

Simulation numérique d'une plaque  
d'aluminium en présence des défauts  
sous chargement cyclique

Préparé par :

KOURAK Abdnacer & KECHICHET Abdelkrim

Soutenu publiquement le : / 11 / 2020, devant le jury composé de :

M. HADJI Lazreg

Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun) Président

M. AISSATSahraoui

Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun) Examineur

M. MOULGADA Abdelmadjud

Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun) Examineur

M. ZAGANE Mohammed El Sallah Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun) Encadreur

Année universitaire : 2019 - 2020

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail qui est le fruit de plusieurs Années d'études à : Mes chers et respectueux parents en récompense de leurs sacrifices et leur clairvoyance qui m'a servi et me servirait tout au long de ma vie mes chers frères (Ilias et Mouadh) et ma sœur (Afaf) Tous mes amis du travail, tout en leur souhaitant la réussite dans tout ce qu'ils entreprennent A toutes les personnes que j'aime et qui m'aiment*

KECHICHET Abdelkrim

*Je dédie d'abord ce travail à ma très chère maman et je lui souhaite le rétablissement À mes chère parents, Que je les souhaite la bonne santé et longue vie À tous mes proches de la famille kourak, et plus particulièrement, mes sœurs et mes frères (Houria, Houda, Asmaa, Amine, Fatima, Nabila, khadidja, Abdelkader, kheira) À mon binôme Abdou et tous mes chers amis Et à tout ce qui ont enseigné moi au long de ma vie scolaire. Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci*

KOURAK Abdnacer

# Remerciements

Je remercie ALLAH le tout puissant de m'avoir donné le Privilège et la chance d'étudier et de suivre le chemin du Savoir et de la connaissance.

Je tiens à remercier

Mon encadreur Mr. ZEGANE MOHAMMED EL SALLAH Maire conférence "B" à l'université Tiaret de votre compétence, votre encadrement ont toujours suscité mon profond respect. Je vous remercie pour votre accueil et vos conseils. Veuillez trouver ici, l'expression de mes gratitudee et de ma grande estime aux membres de jury à Mr. AISSAT SAHRAOUI Maitre conférence "A" à l'université de Tiaret et Mr. MOULGADA ABDELMAJID Maitre conférence "A" à l'université de Tiaret qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'être les examinateurs de cette contribution et de disposer de leurs temps pour pouvoir juger ce travail, et je vous remercie le président Mr. HADJI LAZREG Maitre conférence "B" à l'université de Tiaret pour avoir accepté de présider le jury de notre mémoire. Je veux remercier aussi tous les enseignants pour leurs qualités scientifiques et pédagogiques

Et Je remercie tous les gens de mon passage, que j'ai connu ou rencontré dans ma vie sociale et universitaire.

# Résumé

La connaissance de la résistance à la fissuration par fatigue est nécessaire pour toute structure soumise en service à des chargements cycliques. Le but de ce travail est une étude de l'effet des différents matériaux utilisés (l'acier, l'aluminium et magnésium), qui étudie de l'effet des propriétés mécaniques (module d'Young), dimension de l'entaille, l'épaisseur de la plaque et le rapport de la charge sur la propagation d'une fissure émanant d'une entaille. 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. les six modèles (les éprouvettes), dont la vitesse de la propagation est plus importante pour l'acier que l'aluminium et magnésium. La simulation sera réalisée à l'aide du code de calcul AFGROW.

**Mots clés:** Fatigue, Propagation de fissure, défauts, Durée de vie

## ملخص:

تعد معرفة مقاومة التكسير بالإجهاد ضرورية لأي هيكل يخضع للخدمة للتحميل الدوري. الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير المواد المختلفة المستخدمة (الصلب و الألومنيوم والمغنيسيوم) والتي تدرس تأثير الخواص الميكانيكية (معامل يونغ)، أبعاد الشق، سمك الصفيحة و نسبة الحمل إلى انتشار الشق الناتج عن الشق. بينت النتائج المتحصل عليها أن الزيادة في نسبة الحمولة زادت من معدل التكسير. أدت الزيادة في سعة التحميل إلى تقليل عمر الخدمة. النماذج الستة (أنابيب الاختبار)، التي تعد سرعة انتشارها أكثر أهمية بالنسبة للصلب من الألومنيوم والمغنيسيوم. يتم تنفيذ المحاكاة باستخدام كود حساب AFGROW.

**الكلمات المفتاحية:** الكلال، انتشار الشق، عيب، مدة العمل

## Abstract:

Knowledge of fatigue cracking resistance is necessary for any structure subjected in service to cyclic loading. The aim of this work is a study of the effect of the different materials used (steel, aluminum and magnesium), which study of the effect of mechanical properties (Young's modulus), dimension of the notch, l thickness of the plate and the ratio of the load to the propagation of a crack emanating from a notch. The results obtained show that the increase in the load ratio increased the rate of cracking. The increase in the loading amplitude reduced the service life. the six models (the test tubes), whose speed of propagation

is more important for steel than aluminum and magnesium. The simulation will be carried out using the AFGROW calculation code.

**Keyword:** Fatigue, Crack propagation, Defect, Service life

# LISTES DES FIGURES

## Chapitre I

<b>Figure. I.1</b> : Courbe contrainte/déformation .....	5
<b>Figure. I.2</b> : Exemple de rupture fragile .....	6
<b>Figure. I.3</b> : Exemple de rupture ductile.....	6
<b>Figure. I.4</b> : Les trois modes de rupture.....	7
<b>Figure. I.5</b> : Les trois modes de rupture Figure. I.5 : Comparaison de l'approche classique (a) et de l'approche utilisant la MLR (b) .....	8
<b>Figure. I.6</b> : Différents paramètres géométriques définissant une entaille simple .....	10
<b>Figure. I.7</b> : Définition de la contrainte globale, maximale et nominale .....	10
<b>Figure. I.8</b> : Champ des contraintes au voisinage de la fissure .....	12
<b>Figure. I.9</b> : Zone délimitant le voisinage d'une pointe de fissure .....	14

## Chapitre II

<b>Figure. II.1</b> : Cycle de contrainte en fatigue.....	21
<b>Figure. II.2</b> : Forme de cycle de contrainte .....	21
<b>Figure. II.3</b> : Différents types de sollicitations .....	22
<b>Figure. II.4</b> : Partitionnement de la courbe de Wöhler.....	23
<b>Figure. II.5</b> : Formation d'intrusions et extrusions dans des bandes de glissement .....	24
<b>Figure. II.6</b> : Amorçage d'une fissure de fatigue, (a) sur une inclusion de céramique su. Surfactive, (b) sur une porosité, alliage à base de Nickel N18 élaboré par métallurgie des poudres .....	26
<b>Figure. II.7</b> : Amorçage de micro-fissures de fatigue dans une fonte à graphite sphéroïdal, les fissures s'amorcent sur les nodules ou sur les porosités, les porosités sont sévères .....	26
<b>Figure. II.8</b> : (a) Amorçage d'une fissure de fatigue par corrosion sous contrainte .....	27
<b>Figure. II.9</b> : Mécanisme de formation d'extrusion et intrusion à la surface d'un échantillon sollicité en fatiguesous l'effet d'une déformation plastique cyclique localisée et présentant une certaine irréversibilité.....	28
<b>Figure. II.10</b> : Evolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de cycle .....	30
<b>Figure. II.11</b> : Représentation schématique des différents régimes de propagation.....	31

<b>Figure. II.12</b> : Evolution du phénomène d'endommagement en fissuration d'une Éprouvette .....	32
<b>Figure. II.13</b> : Variation du comportement en propagation de fissures courtes par rapport à la courbe de fissuration de fissures longues .....	33
<b>Figure. II.14</b> : Les stades de propagation .....	34
<b>Figure. II.15</b> : Effet du rapport de charge sur vitesse de fissuration (2024 T351).....	36
<b>Figure. II.16</b> : Effet du rapport de charge sur la durée de vie a $\sigma_{max}$ constante .....	36
<b>Figure. II.17</b> : Différents modes de variation de contrainte applique en fonction du temps ....	37

## Chapitre III

<b>Figure III.1</b> : Fenêtre principale d'AFGROW .....	42
<b>Figure III. 2</b> : Fenêtre de géométrie .....	43
<b>Figure III.3.</b> : Fenêtre matériau .....	46
<b>Figure III.4</b> : Fenêtre de chargement .....	47
<b>Figure III. 5</b> : Spectre de chargement .....	47

## Chapitre IV

<b>Figure IV.1</b> : Effet de la nature des matériaux sur la propagation de la fissure pour les différents modèles .....	54
<b>Figure IV.2.</b> : Effet du rapport de charge « R » sur la propagation de la fissure pour les différents modèles .....	58
<b>Figure IV .3</b> : L'effet de la variation du rapport de charge en fonction du nombre de cycles à la rupture pour tous les modèles .....	59
<b>Figure IV.4</b> : Effet de la variation de l'épaisseur de l'éprouvette sur la propagation de la longueur de fissure pour les différents modèles .....	63
<b>Figure IV.5</b> : Effet de la longueur de la fissure initial sur la propagation de la fissure pour les différents modèles .....	66
<b>Figure IV.6</b> : Variation de la fissure initiale en fonction du nombre de cycles à la rupture ...	67
<b>Figure IV.7</b> : Effet de la variation de diamètre d'entaille sur la propagation de la fissure pour les différents modèles .....	69
<b>Figure IV.8</b> : Variation du diamètre de l'entaille en fonction de nombre de cycles à la rupture.....	70

# LISTE DES TABLEAUX

## Chapitre III

<b>Tableau III. 1:</b> Géométrie des modèles utilisés .....	44
<b>Tableau III. 2:</b> Caractéristiques mécanique des matériaux suivant .....	46
<b>Tableau III. 3 :</b> Paramètres du modèle de propagation matériaux utilisé par le modèle de NASGRO .....	48

## Chapitre IV

<b>Tableau IV.1 :</b> les différents matériaux utilisé dans notre étude .....	52
..... <b>Tableau IV.2 :</b> les différents rapports de charge utilisé dans notre étude .....	55
<b>Tableau IV .3 :</b> les différents d'épaisseur utilisé dans notre étude .....	60
<b>Tableau IV.4 :</b> la différente longueur de fissure utilisé dans notre étude .....	64
<b>Tableau IV.5 :</b> les différents diamètres d'entailles utilisés dans notre étude .....	68

# LISTE DES SYMBOLES

Variable	Désignation	Unité
$\sigma$	Contrainte appliquée	MPa
$\sigma E$	La limite d'élasticité du matériau	MPa
$Kc$	La ténacité critique	MPa.m <sup>1/2</sup>
$Kt$	facteur de concentration de contraintes	
a	profondeur de l'entaille	mm
$\rho$	rayon d'entaille	mm
$\alpha$	facteur de correction géométrique	
$\sigma_{max}$	la contrainte maximale	MPa
$\sigma_{min}$	la contrainte minimale	MPa
$\sigma_g$	la contrainte globale	MPa
$\sigma_{nom}$	la contrainte nominale	MPa
$\sigma_m$	La contrainte moyenne	MPa
$\sigma_a$	L'amplitude de contrainte	MPa
K	Facteur d'intensité de contrainte	MPa.m <sup>1/2</sup>
KI	Facteur d'intensité de contrainte en mode I	MPa.m <sup>1/2</sup>
$r, \theta$	les coordonnées polaires d'un point P	
$\sigma_{xx}$	Contrainte suivant la direction x.	MPa
$\sigma_{yy}$	Contrainte suivant la direction y.	MPa
$\sigma_{ij}$	Tenseur de contrainte	MPa
$\epsilon_{ij}$	Tenseur de déformation	
E	Le module d'Young	MPa
$\Delta\sigma$	L'étendue de variation de contrainte	
R	Rapport de charge	...
da/dN	Vitesse de fissuration	Mm/cycle
C	Constants	...
$\Delta K$	Amplitude du facteur d'intensité de contrainte	MPa.m <sup>1/2</sup>
$\Delta K_{th}$	Valeurs de $\Delta K$ au seuil de non fissuration	MPa.m <sup>1/2</sup>
$\Delta K_{eff}$	Amplitude du facteur d'intensité de contrainte effective	MPa.m <sup>1/2</sup>
$K_{pic}$	Valeur de $K_{max}$ au moment de surcharge	MPa.m <sup>1/2</sup>
$K_{max}, K_{min}$	Valeurs maximale et minimale de K pendant un cycle	MPa.m <sup>1/2</sup>
J	L'intégrale de contour	...
C, n, p, q	Paramètres empiriques	
$K_{crit}$	Le facteur d'intensité de contrainte critique	MPa.m <sup>1/2</sup>

# Sommaire

<b>Dédicace</b> .....	<b>I</b>
<b>Remerciements</b> .....	<b>II</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>III</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>V</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>VII</b>
<b>Liste des symboles</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>

## **Chapitre I : GENERALITES SUR LA MECANIQUE DE LA RUPTURE**

I.1. Introduction .....	4
I.2 LA MECANIQUE DE LA RUPTURE .....	4
I.2.1 La mécanique linéaire et non linéaire de la rupture .....	4
I.2.1.1 La rupture fragile .....	5
I.2.1.2 La rupture ductile .....	5
I.3 MODE DE RUPTURE .....	7
I.4 UTILISATION DE LA MECANIQUE DE LA RUPTURE CONCEPTION .....	8
I.4.1 Facteur de concentration de contraintes .....	9
I.4.2 Facteur d'intensité des contraintes .....	11
I.4.3 Champs de contraintes et de déplacements .....	12
I.5 ZONE PLASTIQUE AU NIVEAU DE LA POINTE DE LA FISSURE .....	14
I.6 CONCLUSION .....	15

## **Chapitre II : LA PROPAGATION DES FISSURES PAR FATIGUE**

II.1 INTRODUCTION .....	18
II.2 ENDOMMAGEMENT PAR FATIGUE .....	18
II.2.1 Le phénomène de fatigue .....	18
II.2.2 Les étapes de l'endommagement par fatigue .....	19
II.2.2.1 Cycle de contrainte en fatigue .....	19
II.2.2.2 Types de cycles de contraintes .....	22
II.2.2.3 Courbe de Wöhler .....	23
II.3 AMORCAGE DE FISSURES DE FATIGUE .....	23
II.3.1 Définition d'amorçage .....	25

II.3.2	Phase d'amorçage .....	25
II.3.3	Période d'amorçage.....	27
II.3.4	Amorçage par micro-plasticité cyclique .....	27
II.3.5	Aspects microscopiques de la rupture .....	28
II.4	LA FISSURATION .....	29
II.4.1	Définitions .....	29
II.4.2	Propagation d'une fissure de fatigue .....	29
II.4.3	Stades de fissuration par fatigue .....	29
II.4.4	Domaines de fissurations par fatigue .....	30
II.4.5	Différents types de fissures .....	32
II.4.5.1	Fissures longues .....	32
II.4.5.2	Fissures courtes .....	32
II.4.6	Période de propagation .....	34
II.5	Paramètres influençant la fissuration par fatigue .....	34
II.5.1	Paramètres d'ordre mécanique et géométrique .....	34
II.5.1.1	Influence du rapport de charge .....	34
II.5.1.2	Influence de la contrainte moyenne .....	36
II.5.2	Nature du chargement .....	37
II.5.3	Influence de l'environnement .....	38
II.5.4	Paramètres d'ordre métallurgique .....	38
II.6	Modèles décrivant la propagation d'une fissure.....	38
II.6.1	Loi de Paris .....	39
II.6.2	Loi de Forman .....	39
II.6.3	Modèle NASGRO .....	39
II.6.4	Modèle de McEvily .....	40
II.	CONCLUSION .....	40

## **CHAPITRE III OUTILE DE SIMULATION (AFGROW)**

III.1	INTRODUCTION .....	42
III.2	GEOMETRIE .....	43
III.2.1	Les modèles étudiés .....	43
III.3	MATERIAUX ETUDIE .....	46
III.4	COMMANDE SPECTRUM .....	47

III.5	Modèle de propagation appliqué .....	48
-------	--------------------------------------	----

## **CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS**

IV.1	INTRODUCTION .....	51
IV.2	ANALYSE ET RESULTAT .....	51
IV.2.1	Effet de la nature des matériaux .....	51
IV.2.2	Effet du rapport de charge .....	55
IV.2.3	Effet d'épaisseur .....	59
IV.2.4	Effet de la longueur de la fissure initial .....	63
IV.2.5	Effet de diamètre de l'entaille .....	68
IV.3	CONCLUSION .....	70

	CONCLUSION GENERALE .....	73
--	---------------------------	----

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

# INTRODUCTION GENERALE

La mécanique de la rupture est une science assez récente qui a eu la majeure partie de ces développements théoriques durant le XX<sup>ème</sup> siècle. En parallèle, le phénomène de fatigue a intéressé la communauté scientifique une centaine d'années plus tôt, dès le début du XIX<sup>ème</sup> siècle. La problématique de ces deux domaines de la mécanique est identique : il s'agit pour le chercheur de prévoir le comportement des structures jusqu'à leur ruine. Les avancées scientifiques dans la prévision du comportement des structures et le besoin de réduire les coûts rendent ces problématiques de plus en plus importantes dans le processus de conception au sein de l'industrie mécanique, par exemple les pipelines. [1]

Les chargements cycliques appliqués sur les structures mener à de grandes variations dans son comportement allant de la propagation des fissures jusqu'à la rupture en passant par la fatigue. L'étude de la propagation des fissures en fatigue dépend de la nature des chargements appliqués (chargement à amplitude constante / chargement avec surcharges).

Ces chargements sont caractérisés par plusieurs paramètres dont leurs influences sur la durée de vie en fatigue et la vitesse de fissuration sont très significatives 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 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 [2].

Ce mémoire intitulé par : 'Simulation numérique d'une plaque d'aluminium en présence des défauts sous chargement cyclique '. Nous focalisons dans ce travail sur l'effet des différents matériaux utilisés (l'acier, l'aluminium et magnésium), de l'effet des propriétés mécaniques (module d'Young), dimension de l'entaille, l'épaisseur de la plaque et le rapport de la charge sur la propagation d'une fissure émanant d'une entaille. Et pour cela ont utilisé un code de calcul « AFGROW»

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres en plus d'une introduction, une conclusion et des références bibliographiques:

- **Au premier chapitre** on a essayé de donner quelque généralité sur la mécanique de la rupture.

- **Le deuxième chapitre** est consacré à un rappel de quelques notions sur la propagation des fissures par fatigue.
- **Le troisième chapitre** présente l'outil de simulation ainsi que la géométrie, le matériau étudié et le modèle de prédiction de la durée de vie en fatigue.
- **Le quatrième chapitre** présente les différents résultats obtenus de l'effet des paramètres de chargement cycliques sur la fissuration par fatigue sur l'aluminium

Plusieurs paramètres ont été mis en évidence à savoir:

- Influence des matériaux sur la propagation de la fissure
- Influence du rapport de charge sur la propagation de la fissure
- Influence de la taille de la fissure initiale sur la propagation de la fissure
- Influence du diamètre de l'entaille sur la propagation de la fissure
- Influence de l'épaisseur de l'éprouvette sur la propagation de la fissure

Une discussion des paramètres étudiés est intégrée dans ce chapitre.

Enfin, une conclusion générale sur les principaux aspects abordés dans cette étude et les résultats obtenus sur l'importance de l'analyse numérique sur le comportement mécanique des plaques fissurées sous chargement cyclique, et des discussions des résultats obtenus ont été présentés.

CHAPITRE I  
GENERALITES SUR  
LA MECANIQUE DE  
LA RUPTURE

# CHAPITRE I GENERALITES SUR LA MECANIQUE DE LA RUPTURE

## **I.1 INTRODUCTION :**

La mécanique de la rupture est la science qui étudie le comportement des structures fissurées, elle est un outil d'analyse essentiel. Elle fournit les outils nécessaires pour l'analyse de l'intégrité de structures, ce domaine scientifique est apparu après la première guerre mondiale cela signifie qu'il est relativement récent notamment avec les études de Griffith en 1920 et d'Irwin en 1957.

Les premiers travaux réalisés en mécanique de la rupture visaient à établir, de façon précise, les champs mécaniques au voisinage d'une fissure statique. La difficulté d'une telle étude réside dans la prise en compte de la singularité introduite par la pointe d'une fissure. Le calcul précis de paramètres mécaniques tels que les facteurs d'intensité des contraintes, ou le taux de restitution d'énergie réside en grande partie dans la bonne prise en compte de cette singularité. Ces paramètres mécaniques ainsi calculés, il est possible de prévoir la propagation ou non de la fissure. Suivant le type de matériau étudié, et le chargement appliqué, la propagation pourra être qualifiée de stable (la fissure a besoin de plus d'énergie pour reprendre sa progression) ou d'instable (la fissure poursuit sa progression jusqu'à la ruine de la structure, sans nécessiter d'énergie supplémentaire) [3].

## **I.2 LA MECANIQUE DE LA RUPTURE :**

La mécanique de la rupture a permis de connaître le risque de propagation de fissure, des expériences de rupture seront toujours nécessaires pour en évaluer le risque. Mais la mécanique de la rupture permet d'extrapoler les résultats expérimentaux.

### **I.2.1 La mécanique linéaire et non linéaire de la rupture :**

La rupture désigne la séparation d'un corps en plusieurs parties sous l'action d'une contrainte de nature statique, c'est-à-dire qu'elle est constante ou qu'elle varie peu avec le temps. Il peut s'agir d'une contrainte de traction, de compression, de cisaillement ou de torsion. Les deux modes de rupture des matériaux à usage industriel sont la rupture ductile et la rupture fragile. Une telle classification repose sur la capacité d'un matériau à subir une déformation plastique. Le comportement lié au rapport entre la contrainte de traction et la déformation à ces deux types de rupture est illustré dans la figure I.1 [4].

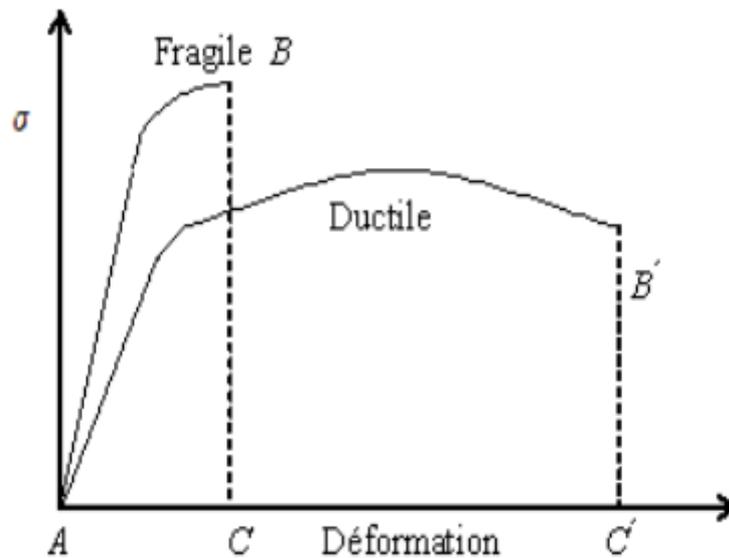


Figure. I.1 : Courbe contrainte/déformation [4]

Pour ces types de rupture, les sollicitations extérieures imposées auront une influence sur elle.

### **I.2.1.1 La rupture fragile :**

Quand il y a rupture fragile, la propagation des fissures se très rapidement et n'être assorties que d'une très légère déformation plastique (mécanique linéaire de la rupture). De telles fissures sont dites instables, et dans le cas de sa commencé continue de se propager. La direction de cette propagation est presque perpendiculaire à la direction de la contrainte de traction appliquée et il en résulte une surface de rupture relativement unie avec des caractéristiques qui leur sont propres. (Figure I.2)

### **I.2.1.2 La rupture ductile :**

Lorsqu'il y a une déformation plastique près des fissures de propagation (mécanique non linéaire de la rupture), cela indique qu'il y a une rupture ductile. Une telle fissure est dite stable, et souvent nous pouvons prédire avec contrairement à la rupture fragile qui a un caractère soudain et brutal, et rend donc possible l'application de mesures et procédures préventives. (Figure I.3)

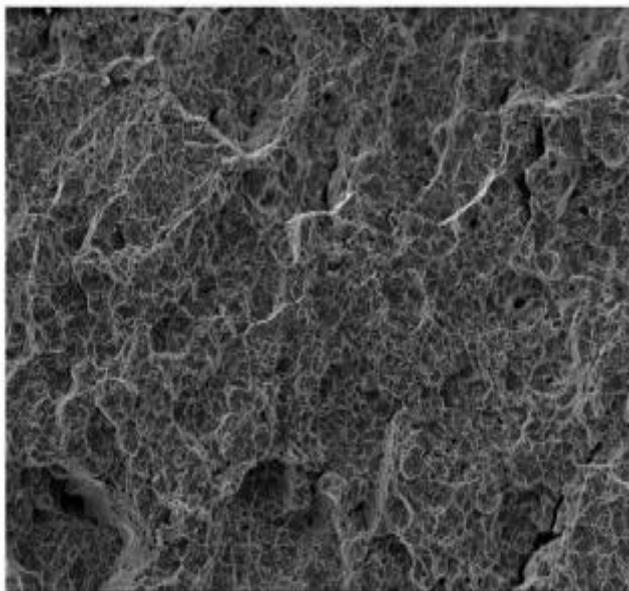


Figure. I .2 : Exemple de rupture fragile [5]

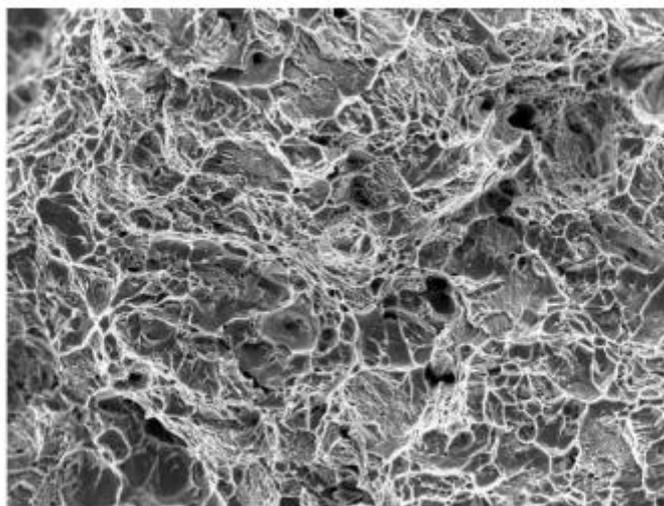


Figure. I.3 :Exemple de rupture ductile [5]

## **I.3 MODE DE RUPTURE :**

La rupture désigne la séparation du matériau en deux parties sous sollicitations d'une contrainte, appelées lèvres de la fissure, ce qui introduit une discontinuité au sens des déplacements. Les mouvements possibles des lèvres de chaque fissure sont des combinaisons de trois modes indépendants (figure I.4) :

**Le mode I :** (mode d'ouverture), où les déplacements aux lèvres de la fissure sont perpendiculairement au plan de propagation.

**Le mode II :** (mode de cisaillement dans le plan), où les déplacements aux lèvres de la fissure sont parallèles au le plan de propagation.

**Le mode III :** (mode de cisaillement hors plan), où les déplacements aux lèvres de la fissure sont parallèles au front de fissure.

- Dans le cas général, les ruptures brutales résultent souvent de la propagation des fissures en mode I, et dans le cas des modes II et III les lèvres de fissures restent en contact. Ces deux modes sont ainsi généralement moins dangereux.

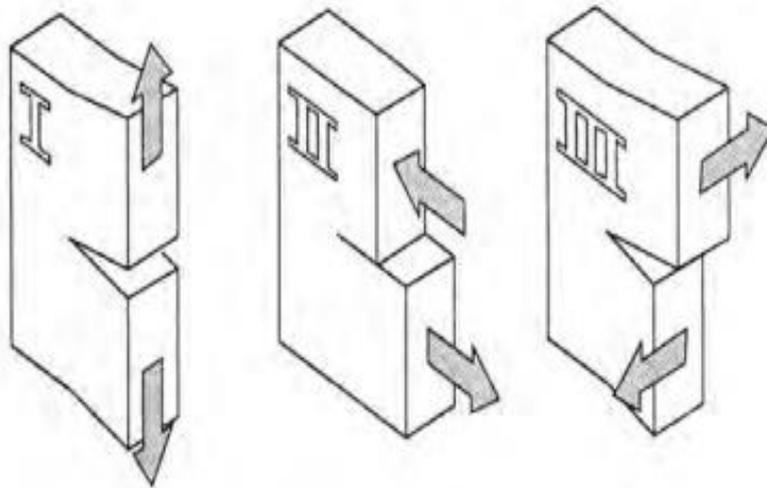


Figure. I.4 :les trois modes de rupture

**I.4 utilisation de la mécanique de la rupture en conception :**

Le schéma (figure I.5) (a) compare l'approche classique pour le dimensionnement des structures basée sur la limite d'élasticité du matériau  $\sigma_e$  à l'approche utilisant le concept de ténacité  $K_{Ic}$  issu de la mécanique linéaire de la rupture (MLR).

Dans le premier cas, on dimensionne les structures pour que les contraintes appliquées  $\sigma$  restent inférieures à la limite d'élasticité ( $\sigma < \sigma_e$ ). On utilise en général un coefficient de sécurité pour prévenir tout risque de rupture fragile ( $\sigma < \alpha \sigma_e$  avec  $\alpha < 1$ ). Cette approche est à deux variables  $\sigma$  et  $\sigma_e$  ; elle fait abstraction de l'existence d'éventuels défauts sous forme de microfissures par exemple.

L'approche basée sur la mécanique linéaire de la rupture est à trois variables : la contrainte appliquée, la ténacité  $K_{Ic}$  qui remplace la limite d'élasticité et une variable additionnelle qui est la taille du défaut. Il y a cependant deux approches alternatives de la mécanique de la rupture : l'une utilisant le concept d'intensité des contraintes critique (ténacité du matériau) et l'autre un critère d'énergie. Ces deux approches sont équivalentes dans certaines conditions. On va les présenter brièvement avant de préciser les hypothèses qui les sous-tendent et de rentrer dans les détails des calculs qu'elles mettent en œuvre. [6]

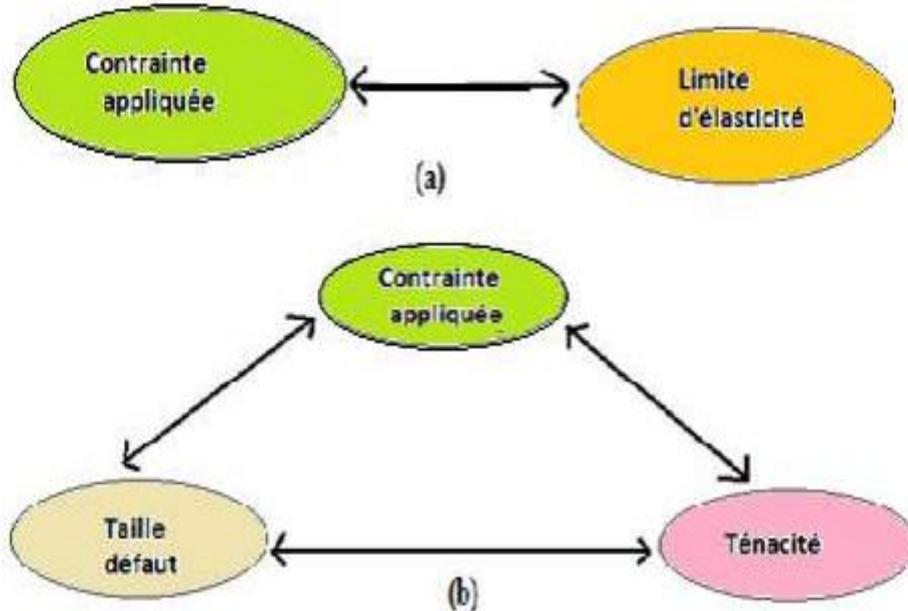


Figure. I.5 : Comparaison de l'approche classique (a) et de l'approche utilisant la MLR (b)

# CHAPITRE I GENERALITES SUR LA MECANIQUE DE LA RUPTURE

## **I.4.1 Facteur de concentration de contraintes :**

Les paramètres de rupture (K ou J) sont très sensibles à la présence de concentration de contraintes d'hétérogénéités, issues des formes de pièces ou de contraintes dues à la façon dont elles sont assemblées. Ces zones de concentrations sont des sites préférentiels d'amorçage. Pour étudier ce phénomène, des entailles artificielles sont créées sous différentes formes et tailles. L'angle d'entaille  $\phi$  et le rayon  $\rho$  en fond d'entaille sont donnés en Figure.I.6. Le facteur de concentration de contrainte ( $K_t$ ) relie la contrainte nominale de chargement à la contrainte maximale que va subir l'extrémité à l'entaille. Ce facteur dépend uniquement des dimensions géométriques relatives de l'entaille (plus le rapport  $a/\rho$  augmente et plus  $K_t$  augmente) et son expression analytique diffère selon le chargement [7].

Peterson [8] définit le facteur de concentration des contraintes  $K_t$  de deux manières : la première étant le rapport de la contrainte maximale  $\sigma_{max}$  (ou du cisaillement maximal  $\tau_{max}$ ) en fond d'entaille à la contrainte nominale  $\sigma_n$  (ou de cisaillement nominal  $\tau_n$ ) dans la section correspondante de la pièce entaillée. Dans le cas d'une plaque semi-infinie comportant des entailles en U et semi elliptiques (figure I.6), Baratta et Neal [9] ont procédé aux calculs des facteurs de concentration de contraintes  $K_t$  pour différents rapports  $a/\rho$ . Ces auteurs [9] regroupent les valeurs des rapports du facteur de concentration de contraintes correspond à l'entaille en U et celui de l'entaille semi elliptique obtenus par Bowie [8]. Pour le calcul, ces auteurs divisent la contrainte circonférentielle par la contrainte globale appliquée. Pour une plaque comportant un trou elliptique, Inglis [10] utilise la formule du facteur de concentration de contraintes suivante :

$$K_t = 1 + \sqrt{a/\rho} \quad (1.1)$$

Avec  $a$  profondeur de l'entaille et  $\rho$  rayon d'entaille. Cet auteur obtient des facteurs de concentration de contraintes identiques à ceux de Baratta [9] et Bowie [8]. Dans le cas d'une plaque de largeur finie et une entaille de bord en U, Isida [11] a proposé un facteur de correction permettant le passage du cas d'une plaque infinie à celui d'une plaque de largeur finie. La forme générale du facteur de concentration de contraintes peut s'écrire selon [12] sous la forme :

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_g} \quad (1.2)$$

## CHAPITRE I GENERALITES SUR LA MECANIQUE DE LA RUPTURE

Où,  $K_t$ ,  $\sigma_{max}$  et  $\sigma_g$  sont respectivement le facteur de concentration de contraintes, la contrainte élastique maximale au fond d'entaille et la contrainte globale à laquelle la structure est soumise.

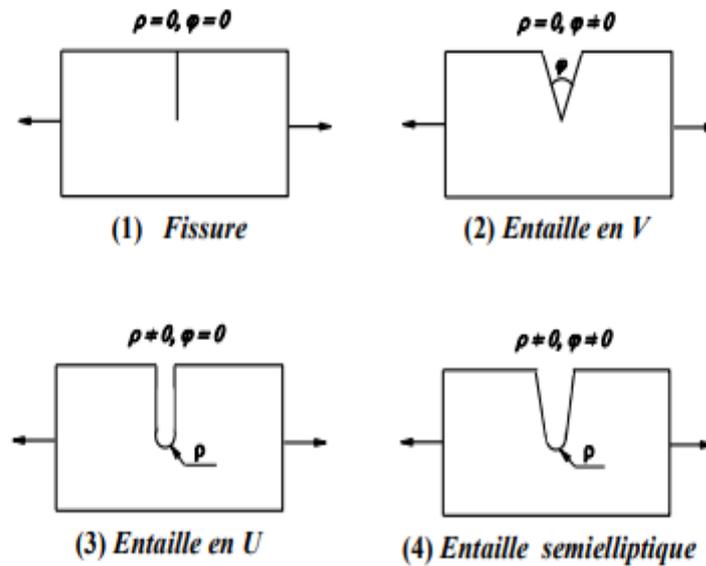


Figure.I.6 : Différents paramètres géométriques définissant une entaille simple selon [8] et [9]

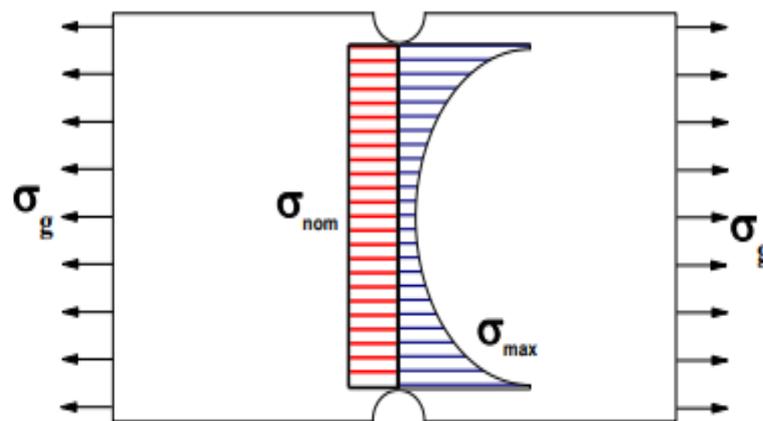


Figure.I.7 : Définition de la contrainte globale, maximale et nominale [12]

Pour [12] le facteur de concentration de contrainte élastique est relié à la contrainte nominale  $\sigma_{nom}$  selon la relation suivante :

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad (1.3)$$

## CHAPITRE I GENERALITES SUR LA MECANIQUE DE LA RUPTURE

La définition de la contrainte maximale, de la contrainte globale et de la contrainte nominale est donnée en Figure. I.7 par [12].

Les contraintes maximales  $\sigma_{max}$  et  $\tau_{max}$  sont déterminées numériquement par éléments finis ou expérimentalement par la méthode de la photoélasticimétrie. Les contraintes nominales  $\sigma_{nom}$  et  $\tau_{nom}$  sont données par les équations de la résistance des matériaux. Ces contraintes sont déterminées mathématiquement au moyen des équations établies à la suite des travaux de Neuber [13] (formule de Peterson). Smith, (1978) [14] indique que la propagation de la fissure sera gérée uniquement par la contrainte nominale.

L'apparition de fissure non propageant, correspond à un niveau de contrainte dans un tout petit volume, de sorte que le facteur d'intensité de contraintes associé à cette fissure ne facilite pas la propagation. Le fait qu'une fissure se propage, dépend à la fois du chargement nominal et de l'acuité de l'entaille. Plus  $K_t$  est élevé et plus la contrainte nominale doit être élevée pour participer à l'amorçage.

### **I.4.2 Facteur d'intensité des contraintes :**

La théorie de l'élasticité permet de développer une formulation analytique pour la contrainte dans la région de la pointe de fissure. Les composants du tenseur  $\sigma$  peuvent s'écrire sous la forme :

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (1.4)$$

**K** : est le facteur d'intensité de contrainte défini par la relation :

$$K = \alpha \times \sigma \times \sqrt{\pi a} \quad (1.5)$$

Ou :

$\sigma$  est la contrainte à l'infini

$a$  est la profondeur d'entaille

$\alpha$  est un facteur de correction géométrique.

Quand le facteur d'intensité de contrainte atteint une valeur critique, les contraintes sont tellement importantes en pointe de fissure qu'il y a rupture brutale. Cette valeur seuil est appelée ténacité, elle est notée cela correspond à un facteur d'intensité de contrainte critique KIC. [15]

# CHAPITRE I GENERALITES SUR LA MECANIQUE DE LA RUPTURE

## I.4.3 Champs de contraintes et de déplacements :

On donne les résultats correspondant successivement aux modes I, II, III.

Où  $r$  et  $\theta$  sont les coordonnées polaires d'un point  $P$  par rapport au front de fissure (Figure I.8). Ainsi la singularité du champ de contraintes est connue dès que l'on connaît l'expression des F.I.C. (Facteur d'intensité de contrainte). [16].

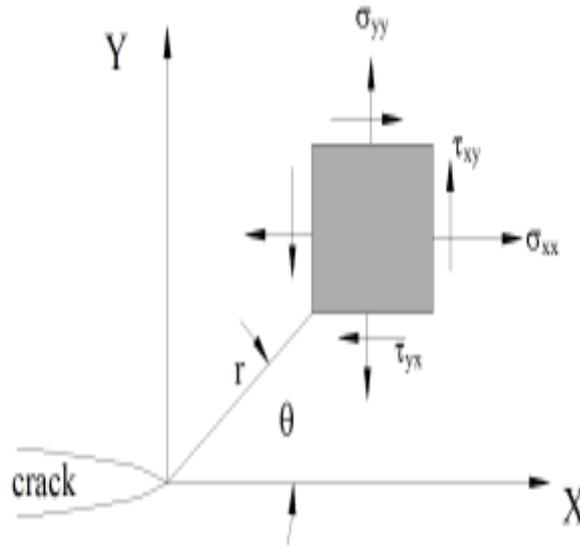


Figure. I.8 : Champ des contraintes au voisinage de la fissure

### Mode I :

#### a) Contraintes :

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) ; \text{ En déformation plane} \quad (1.6)$$

$$\sigma_{zz} = 0 ; \text{ En contrainte plane}$$

## CHAPITRE I GENERALITES SUR LA MECANIQUE DE LA RUPTURE

b) Déplacements :

$$\begin{aligned}u_x &= \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left( k - 1 + 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \\u_y &= \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left( k + 1 - 2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) \\k &= 3 - 4\nu ; \text{ En déformation plane} \\k &= \frac{3-\nu}{1-\nu} ; \text{ En contrainte plane}\end{aligned} \tag{1.7}$$

**Mode II :**

a) Contraintes:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left( -\sin \frac{\theta}{2} \right) \left( 2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_{yy} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left( \sin \frac{\theta}{2} \right) \left( \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_{xy} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left( \cos \frac{\theta}{2} \right) \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_{zz} &= \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) ; \text{En déformation plane} \\ \sigma_{zz} &= 0 ; \text{En contrainte plane}\end{aligned} \tag{1.8}$$

b) Déplacements :

$$u_x = \frac{K_{II}}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left( \sin \frac{\theta}{2} \right) \left( k + 1 + 2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right)$$

$$u_y = \frac{K_{II}}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left( -\cos \frac{\theta}{2} \right) \left( k - 1 - 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \tag{1.9}$$

**Mode III :**

a) Contraintes :

$$\sigma_{33} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \left( -\sin \frac{\theta}{2} \right)$$
$$\sigma_{y3} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \left( \cos \frac{\theta}{2} \right) \quad (1.10)$$

b) Déplacements :

$$u_3 = \frac{2K_{III}}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left( \sin \frac{\theta}{2} \right) \quad (1.11)$$

**I.5 ZONE PLASTIQUE AU NIVEAU DE LA POINTE DE LA FISSURE :**

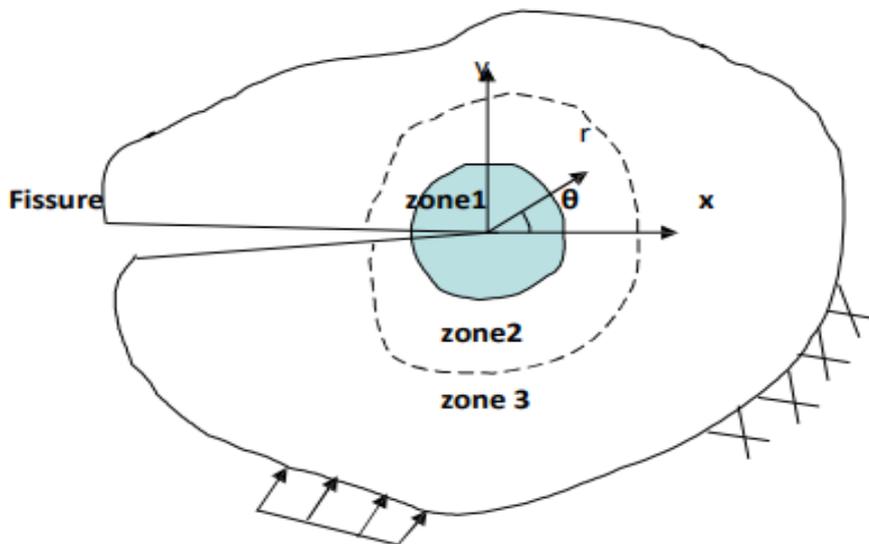


Figure. I.9 : Zone délimitant le voisinage d'une pointe de fissure. [3] :

**La zone d'élaboration 1:**

L'étude de cette zone est très complexe et plus difficile, résultat des contraintes importantes qui ont fortement endommagé le matériau. Elle est discontinue au sens de la mécanique des solides. A cause de ce qui été laissé pendant la propagation de la fissure. Pour les problèmes plans la théorie classique de la mécanique de la rupture réduit cette zone à un point, et pour les problèmes tridimensionnels réduit cette zone à une courbe.

# CHAPITRE I GENERALITES SUR LA MECANIQUE DE LA RUPTURE

## **La zone singulière 2:**

Dans laquelle les champs de déplacements, déformations et contraintes sont continus et possèdent une formulation indépendante de la géométrie lointaine de la structure. On démontre que dans cette zone, les composantes de champ de contraintes sont infinies au voisinage du front de fissure ( $r \rightarrow 0$ ). Plus exactement, la singularité est en  $(1/\sqrt{r})$  en milieu élastique linéaire. Le matériau ayant une limite élastique, il existe un rayon  $r_0$  autour de la pointe de fissure qui détermine la forme de la zone plastique. En fonction de la valeur de  $r_0$  on dira que la rupture est fragile pour  $r_0$  petit et qu'elle est ductile pour  $r_0$  grand. Cette distinction sur la base du paramètre  $r_0$  est très importante car elle conditionne la validité de la théorie utilisée[3] :

- La Mécanique Linéaire de la Rupture pour les ruptures fragiles.
- La Mécanique Non Linéaire de la Rupture dans le cas de zone plastique non négligeable (rupture ductile).

## **La zone extérieure3 :**

Extérieure comprenant les champs lointains se raccordant d'une part, à la zone singulière, et d'autre part aux conditions aux limites en charges et en déplacements. Dans cette zone, les champs de déplacements, déformations et contraintes varient peu et peuvent être approximatés par des polynômes communément utilisés dans la méthode des éléments finis.

Diverses méthodes d'analyse permettent d'étudier les champs de déplacements, déformations et contraintes au voisinage d'une fissure. On regroupe l'ensemble de ces méthodes sous deux types d'approches [3] :

Approches directes : qui sont fondées sur l'utilisation des fonctions d'Airy ; ces approches résolvent des problèmes plans et font appel à la recherche de fonctions analytiques. En particulier dans notre étude, nous avons utilisé l'expansion de Williams qui est basée sur ce type d'approches.

Approches énergétiques : qui sont basées sur l'analyse énergétique du milieu continu contenant une fissure. Il s'agit d'un bilan énergétique global intégrant le taux de restitution d'énergie dû à un accroissement virtuel de la fissure.

## **I.6 Conclusion :**

Les méthodes de la Mécanique de la rupture permettent d'estimer les effets des défauts. Elles aident à choisir les procédures d'inspection des structures lors de la fabrication et les niveaux

## CHAPITRE I GENERALITES SUR LA MECANIQUE DE LA RUPTURE

d'acceptation des fissures, Le comportement à la rupture d'une structure fissurée peut être décrit soit par l'approche globale basée sur un bilan énergétique soit par l'approche locale basée sur le champ de contraintes en pointe de fissure.

Dans ce chapitre ce chapitre nous avons mis le point sur la mécanique de la rupture et des lois qui gèrent cette science ainsi que certains des critères appliqués, nous avons aussi vu que les fissures étant omniprésentes dans les pièces mécaniques, la prévision de leur propagation est un enjeu crucial. Nous avons présenté quelques aspects de la mécanique linéaire de la rupture, permettant de modéliser la fissuration, et notamment la définition du facteur d'intensité des contraintes

CHAPITRE II  
LA PROPAGATION  
DES FISSURES PAR  
FATIGUE

## CHAPITRE II LA PROPAGATION DES FISSURES PAR FATIGUE

### **II.1 INTRODUCTION :**

La fatigue est une forme de défaillance qui se produit dans des structures (ponts, aéronefs, pièces de machines, etc.) subissant des chargements cycliques constants, variables ou aléatoires. Elle est susceptible de se manifester même lorsque la contrainte est nettement inférieure à la résistance à la traction ou à la limite conventionnelle d'élasticité dans le cas d'une charge statique. Une telle défaillance porte le nom de fatigue parce qu'elle succède habituellement à une longue période de cycles de déformation et de contrainte [17].

La propagation des fissures de fatigue s'appuie sur le concept de «tolérance au dommage». Le principe de base de cette démarche est qu'un corps contenant un défaut initial subit un endommagement progressif lorsqu'il est soumis à un chargement cyclique, même pour des niveaux de contraintes appliquées bien en deçà des limites statiques, par exemple, la limite d'élasticité. Par conséquent, pour une structure donnée et à l'intérieur des moyens de détection disponibles, une application pratique de cette théorie peut permettre de déterminer la taille critique de défauts admissibles pour une vie souhaitée. À l'inverse, la vie restante d'une structure peut aussi être déterminée selon son défaut le plus critique [18].

La fatigue est un processus qui, sous l'action de contrainte ou de 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.[19]

### **II.2 ENDOMMAGEMENT PAR FATIGUE :**

L'endommagement est l'apparition de dommages dans un matériau caractérisé par une extension de surface libre à l'intérieur du matériau, accompagnée d'une augmentation de fraction volumique de vide. Cette apparition est causée par une attaque physique ou chimique. Il conduit à une dégradation de ses capacités physiques pouvant conduire à la rupture. Un niveau d'endommagement peut être relié directement à des propriétés physiques parce que l'endommagement est caractérisé par des modifications en principe observables. Les phénomènes d'endommagement tels que les microdéformations, la dégradation des surfaces, les microfissures, les microcavités, la corrosion, et le vieillissement. Sont tous observables, mais parfois ils sont difficiles à mettre en évidence.[20].

#### **II.2.1 Le phénomène de fatigue :**

Le phénomène de fatigue se caractérise par une dégradation progressive d'un matériau soumis à une contrainte ou déformation cyclique d'amplitude variable ou constante.

## CHAPITRE II LA PROPAGATION DES FISSURES PAR FATIGUE

En générale le cycle de la fatigue est caractérisé par :

f : une fréquence.

$\Delta\sigma$  : une amplitude de sollicitation.

$\sigma_m$  : une contrainte moyenne.

R : rapport de charge (un ratio de la contrainte minimale sur la contrainte maximale).

### **II.2.2 Les étapes de l'endommagement par fatigue :**

Il existe différents stades de l'endommagement par fatigue 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 catastrophique. Le développement de cet endommagement peut schématiquement se décrire de la façon suivante :

- 1) Des modifications microstructurales engendrent l'apparition d'un dommage irréversible.
- 2) L'apparition de microfissures.
- 3) La croissance et la coalescence de défauts microscopiques forment des fissures principales qui peuvent éventuellement mener à la rupture catastrophique.
- 4) La propagation stable d'une fissure principale.
- 5) La rupture finale.

Ainsi l'examen d'une surface rompue fait ressortir généralement trois zones :

- ✓ Un site d'amorçage.
- ✓ Une zone de propagation stable.
- ✓ Une surface de rupture finale.

Les sites préférentiels pour l'amorçage sont le plus souvent situés en surface, dans des zones de fortes contraintes comme les entailles, les rayures, les pics de corrosion, sur une inclusion etc. [21]

#### **II.2.2.1 Cycle de contrainte en fatigue :**

Les essais de fatigue sont définis par des normes, et ils sont de plusieurs types :

- ❖ Traction – compression
- ❖ Flexion plane
- ❖ Flexion rotative
- ❖ Flexion trois points
- ❖ Torsion

## CHAPITRE II LA PROPAGATION DES FISSURES PAR FATIGUE

Les éprouvettes sont soumises à des sollicitations périodiques. La contrainte passe par un maximum  $\sigma_{max}$  et par un minimum  $\sigma_{min}$ .

Dans le cadre de ce travail, nous étudions les sollicitations de types sinusoïdales de flexion rotative dont le cycle est :

On en déduit :

- La contrainte moyenne :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (2.1)$$

- L'amplitude de contrainte :

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (2.2)$$

- L'étendue de variation de contrainte :

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = 2\sigma_a \quad (2.3)$$

- Rapport de charge R :

C'est le rapport de la contrainte minimale sur la contrainte maximale :

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (2.4)$$

Dans la figure.II.1, nous présentons les termes et symboles utilisés pour décrire le cycle de Contrainte.

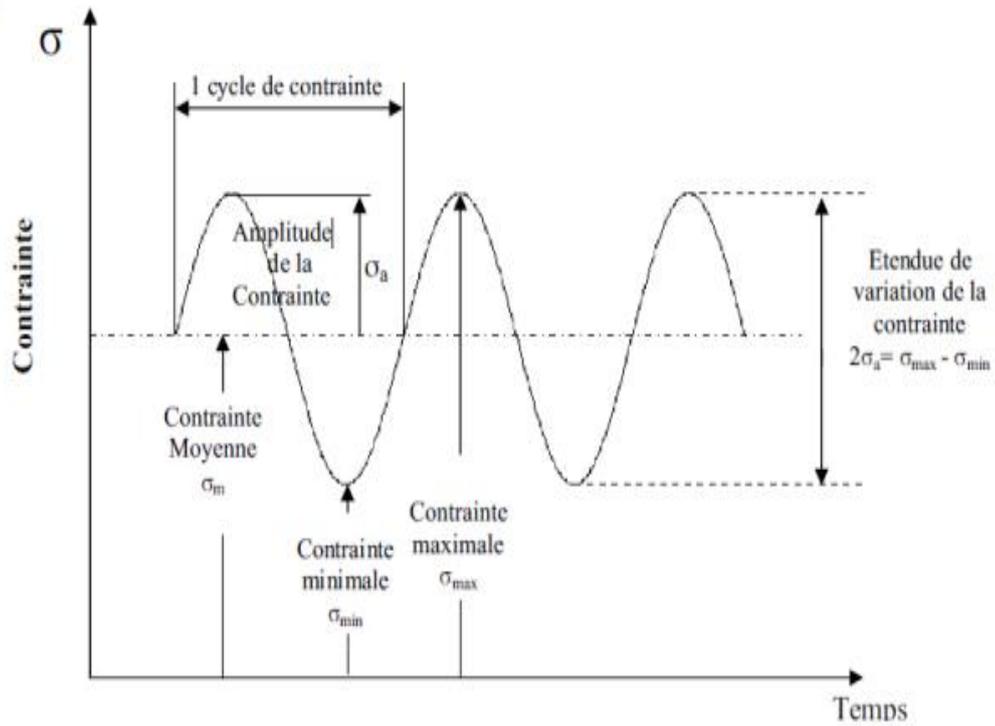


Figure.II.1 : cycle de contrainte en fatigue [19].

Les formes possibles de cycle de contraintes sont présentées dans la figure. II.2

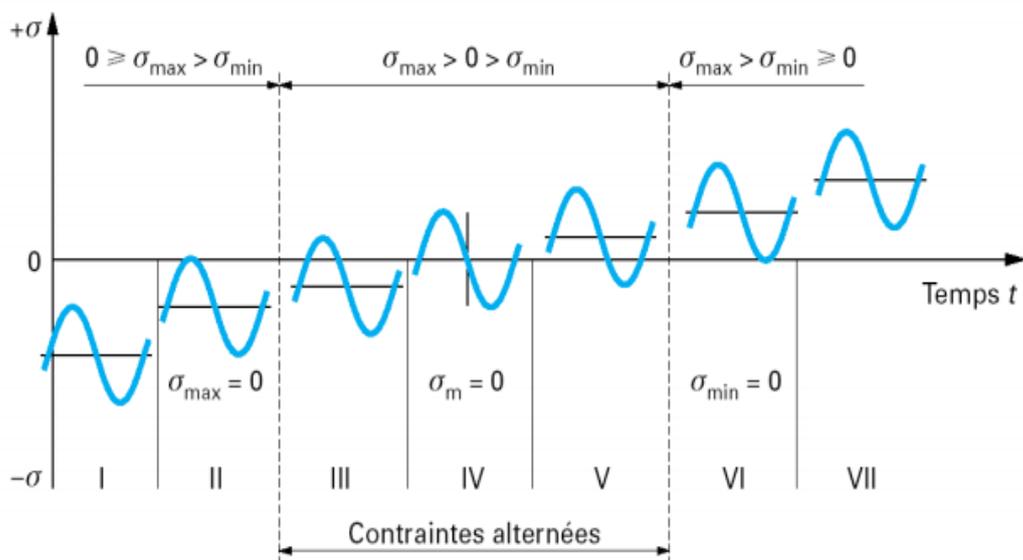


Figure. II.2 : Forme de cycle de contrainte [19].

## CHAPITRE II LA PROPAGATION DES FISSURES PAR FATIGUE

- I. Contrainte ondulée de compression :  $1 < R < +\infty$
- II. Contrainte répétée de compression :  $R\sigma \rightarrow +\infty$
- III. Contrainte alternée dissymétrique :  $-\infty < R < -1$
- IV. Contrainte purement alternée :  $R\sigma = -1$
- V. Contrainte alternée dissymétrique :  $-1 < R\sigma < 0$
- VI. Contrainte répétée de traction :  $R\sigma = 0$
- VII. Contrainte ondulée de traction :  $0 < R\sigma < 1$

### II.2.2.2 Types de cycles de contraintes :

On trouve :

- contrainte purement alternée : contrainte qui varie entre des valeurs égales, dans le sens positif et négatif [22].
- contrainte alternée : contrainte qui évolue entre une valeur maximale positive et une valeur minimale négative dont les valeurs absolues sont différentes ( $0 < \sigma_m < \sigma_a$ ).
- contrainte répétée : contrainte qui varie entre la valeur 0 et une valeur maximale positive, ou entre 0 et une valeur minimale négative ( $\sigma_a = \sigma_m$ ).
- contrainte ondulée : contrainte qui varie entre les valeurs maximale et minimale qui sont de même signe ( $\sigma_m > \sigma_a$ ).

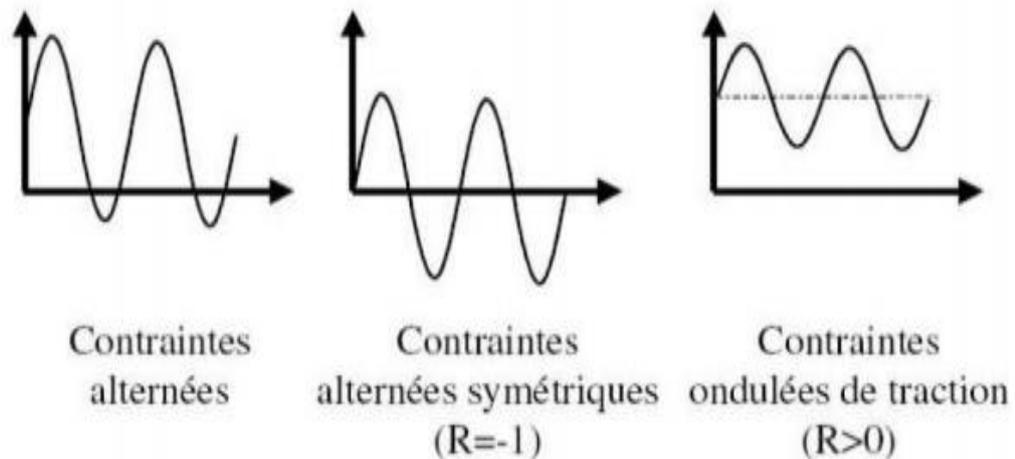


Figure. II.3 : Différents types de sollicitations [23].

## CHAPITRE II LA PROPAGATION DES FISSURES PAR FATIGUE

### II.2.2.3 Courbe de Wöhler :

La courbe de Wöhler est dite aussi courbe S-N (Stress-number of cycles), qui représente une relation entre la contrainte appliquée  $\sigma$  et le nombre de cycles à rupture  $N_r$ .

La trace d'une telle courbe est l'analyse statistique d'essais de fatigue, on réalise généralement des essais à contrainte moyenne constante et on fait varier l'amplitude du cycle de contrainte appliquée.

La courbe de Wöhler comprend trois domaines :

- ✓ le domaine de la fatigue oligocyclique où les ruptures, surviennent après un Petit nombre de cycle.
- ✓ le domaine d'endurance limitée où les ruptures, surviennent systématiquement après un nombre limité de cycles croissant, avec la décroissance de la contrainte.
- ✓ le domaine de l'endurance illimité, où les ruptures ne se produisent pas avant un nombre de cycles supérieur à la durée de vie envisagée de la pièce.

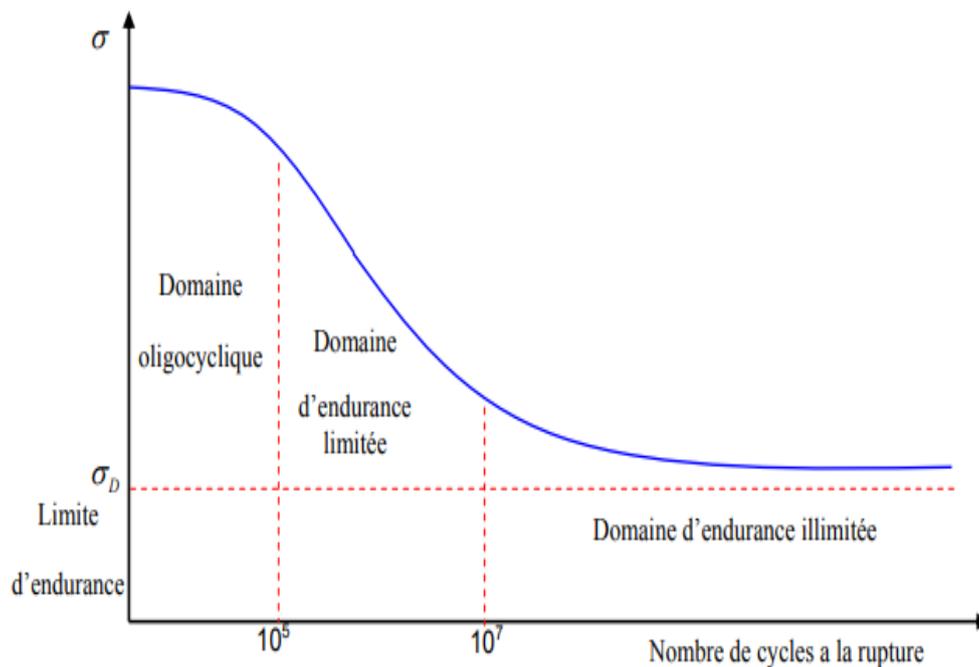


Figure. II.4 : Partitionnement de la courbe de Wöhler. [24]

### II.3 AMORCAGE 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.

## CHAPITRE II LA PROPAGATION DES FISSURES PAR FATIGUE

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 [25]. Plusieurs auteurs [26-27] 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. 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 [28,29].

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 ou par réunion entre elles. 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 [30]. Le mécanisme de formation des intrusions et extrusions à la surface est illustré sur la figure II-5.

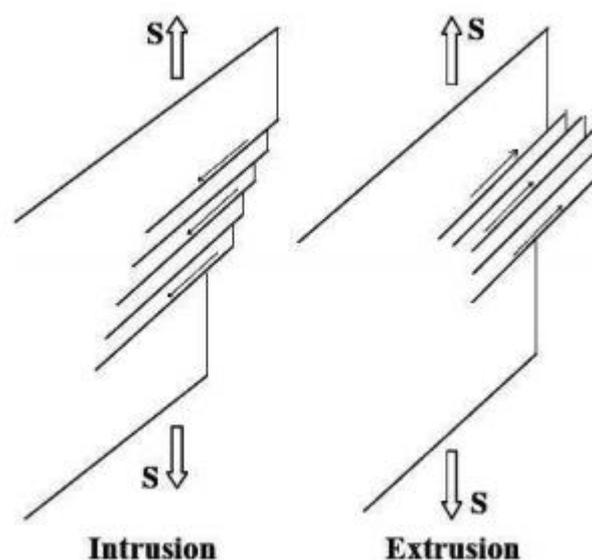


Figure. II.5: Formation d'intrusions et extrusions dans des bandes de glissement

## CHAPITRE II LA PROPAGATION DES FISSURES PAR FATIGUE

### **II.3.1 Définition d'amorçage :**

Plusieurs définitions ont été données mais elles dépendent souvent des types de sollicitations qui intéressaient les chercheurs. Plus fréquentes sont les études concernant la fissuration par fatigue sur un élément de volume. Notons, pour ne citer que ceux-là, Lieurade et al [31], qui définissent plusieurs étapes d'évolution des microfissures à la surface d'éprouvettes cylindriques lisses avant d'arriver à la coalescence de ces microfissures pour former une macrofissure principale. De même, C. Levillant [32] a retrouvé les mêmes évolutions concernant l'acier 316L tôle SP à haute température et avec des essais de fatigue continue

### **II.3.2 Phase d'amorçage :**

- Amorçage sur défaut.

Les défauts qui sont susceptibles de conduire à l'amorçage d'une fissure de fatigue sont nombreux. Quelques exemples de défauts sont donnés ci-dessous, selon la méthode d'élaboration :

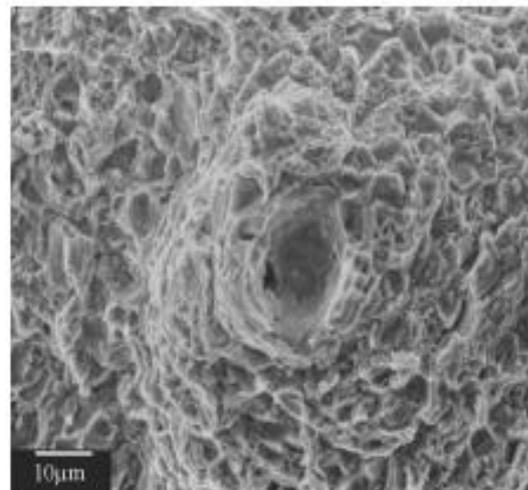
Dans les pièces de fonderie les défauts principaux que l'on rencontre sont des ségrégations, des inclusions (figure. II.6(a)) ou encore des retassures. Dans les matériaux frittés, le défaut principal rencontré est la porosité du matériau due à une absence de cohésion entre grains de poudres (figure. II.6(b)). Dans les pièces forgées, les défauts sont ceux du lingot, modifiés par la déformation de corroyage.

Les inclusions par exemple, sont brisées et leurs fragments dispersés au cours du corroyage.

Il peut aussi exister dans le matériau des fissures internes liées au procédé de mise en forme ou aux traitements thermiques. Ces fissures sont rares dans les alliages métalliques mais leur répartition n'est pas aléatoire et correspond souvent à un défaut du procédé de mise en forme.



(a)



(b)

## CHAPITRE II LA PROPAGATION DES FISSURES PAR FATIGUE

Figure. II.6: Amorçage d'une fissure de fatigue, (a) sur une inclusion de céramique surfacique, (b) sur une porosité, alliage à base de Nickel N18 élaboré par métallurgie des poudres, [33]

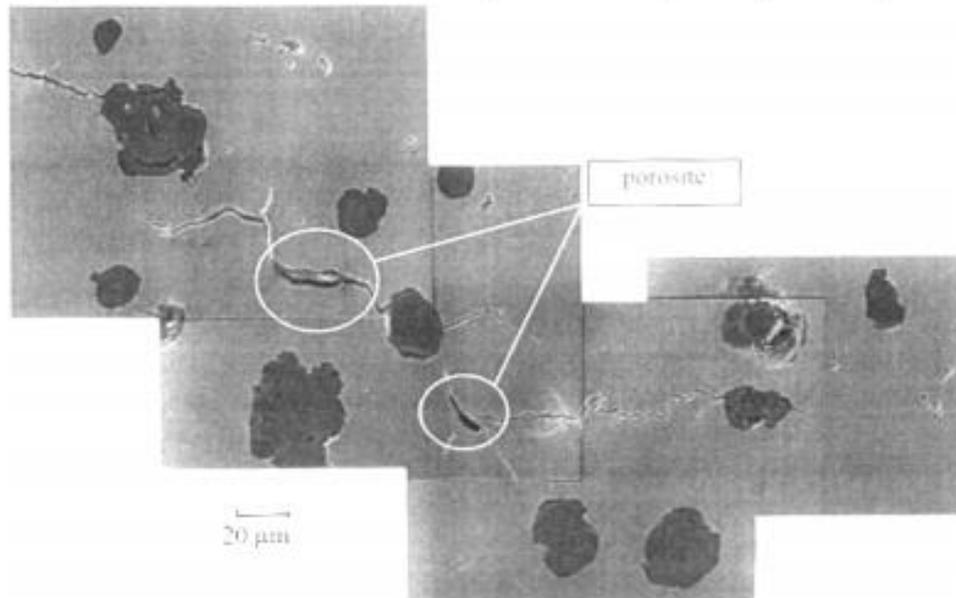


Figure. II.7: Amorçage de micro-fissures de fatigue dans une fonte à graphite sphéroïdal, les fissures s'amorcent sur les nodules ou sur les porosités, les porosités sont sévères. [33]

Les « défauts » peuvent aussi être des constituants du matériau, tels que des particules de seconde phase ou les joints de grains. Sur la figure. II.7, extraite de la thèse de P. Dierickx, on peut voir des micro-fissures de fatigue qui se sont formées à la surface d'une fonte à graphite sphéroïdal. Ces microfissures proviennent de porosités et de nodules de graphite.

Pour terminer, l'amorçage est aussi couramment associé aux effets de l'environnement. Comme on le voit sur la figure. II.8 (a), des fissures de fatigue peuvent s'amorcer en surface sur une piqûre de corrosion. D'autre part, il a été montré par Murakami[33], qu'une espèce fragilisant (ici l'hydrogène) en solution dans des inclusions, peut être libérée peu à peu dans le métal sous l'effet de la sollicitation mécanique et du temps. Une zone fragilisée se forme alors autour des inclusions, dont la dimension augmente avec le nombre de cycles et dont la frontière avec la fissure de fatigue est repérable par une modification du contraste en microscopie optique (figure. II.8 (b)). Lorsque cette zone est suffisamment grande, une fissure de fatigue peut se propager jusqu'à la rupture, et cela même pour un niveau de contrainte très faible. Ce mécanisme conduit à des ruptures d'éprouvettes pour des durées de vie supérieures à  $10^7$  cycles.

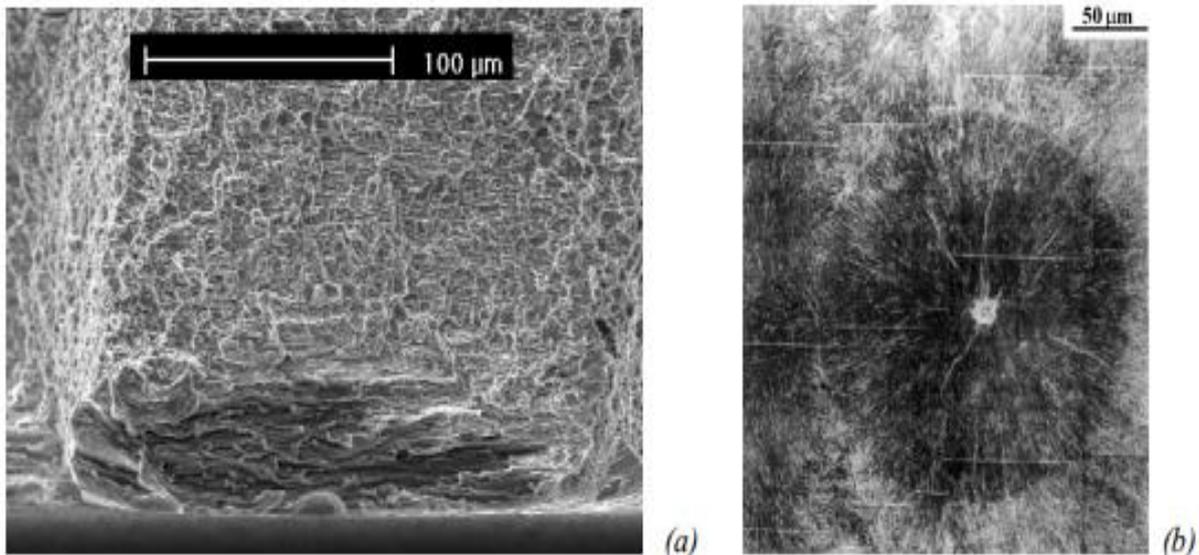


Figure. II.8 : (a) Amorçage d'une fissure de fatigue par corrosion sous contrainte, (b) optically dark area [33]

### **II .3.3 Période d'amorçage :**

Les phénomènes mis en jeu de cette période sont de très grande finesse et seuls des moyens puissants de laboratoire sont capables de mettre en évidence les signes annonciateurs d'un endommagement. En effet, jusqu'à un certain seuil de ce dernier il est possible, par de judicieux traitements mécaniques et (ou) thermiques, de faire disparaître celui-ci et donc de revenir à un état initial non endommagé. Lorsque cette opération reste infructueuse, la structure subit un endommagement irréversible et commence d'entrée dans la période de propagation à partir des microfissures formées. [24]

### **II.3.4 Amorçage par micro-plasticité cyclique.**

La seconde famille de mécanismes d'amorçage comprend les différents mécanismes d'amorçage associés à une déformation plastique cyclique en surface.

De très nombreux auteurs ont discuté des mécanismes permettant la formation des fissures par micro-plasticité cyclique. La formation d'intrusions et d'extrusions en surface, est généralement invoquée pour expliquer ce mécanisme. Lorsque le matériau est déformé dans son domaine d'élasticité macroscopique, il existe néanmoins des grains qui sont favorablement orientés pour le glissement ou qui sont soumis à une surcontrainte locale et qui entrent en plasticité. Comme cette déformation plastique reste très localisée, elle est quasi-indélectable à l'échelle macroscopique, on parle alors de micro-plasticité.

## CHAPITRE II LA PROPAGATION DES FISSURES PAR FATIGUE

Alors comme la déformation plastique est localisée sur des plans de glissements « intenses » des dislocations, des extrusions et intrusions se forment en surface. Au pied de ces reliefs, se forment progressivement des fissures qui se propagent ensuite par fatigue. [33]

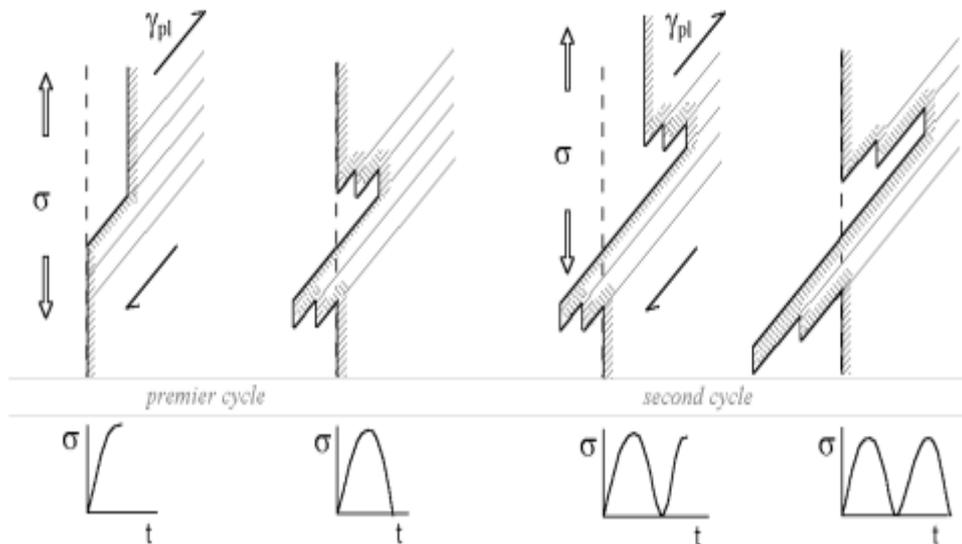


Figure. II.9 :Mécanisme de formation d'extrusion et intrusion à la surface d'un échantillon sollicité en fatigue sous l'effet d'une déformation plastique cyclique localisée et présentant une certaine irréversibilité.

### II.3.5 Aspects microscopiques de la rupture

Dans cette partie, les faciès de rupture correspondant aux différents modes de rupture ainsi qu'aux différents matériaux sont présentés. L'observation des faciès est importante pour déterminer l'origine de la rupture. Elle peut se révéler très utile lors d'expertises de pièces ayant rompu. Compte tenu de la diversité des modes de rupture des matériaux, les exemples suivants ne prétendent pas à l'exhaustivité.

De manière générale, les faciès de rupture peuvent être examinés à deux échelles différentes : (i) faciès macroscopique à l'échelle de la pièce, (ii) faciès microscopique à l'échelle de la microstructure. Les deux observations peuvent contribuer à la détermination des modes de rupture

## II.4 LA FISSURATION :

### II.4.1 Définitions :

La fissuration est le résultat de l'endommagement local des plans cristallographiques provoqué, généralement, par une sollicitation mécanique répétée. Malgré le fait que la

## CHAPITRE II LA PROPAGATION DES FISSURES PAR FATIGUE

contrainte maximale ne dépasse pas la contrainte d'écoulement du matériau, des déformations plastiques permanentes. Ces dernières se traduisent par une cession des plans cristallographiques menant à une décohésion du grain. Suite à cette décohésion, des vallées sont produites d'où peuvent s'amorcer les fissures [34,35].

### **II.4.2 Propagation d'une fissure de fatigue**

Le principe de base de cette démarche est qu'un corps contenant un défaut initial subit un endommagement progressif lorsque soumis à un chargement cyclique, même pour des niveaux de contraintes appliquées bien en deçà des limites statiques. Au cours des cycles de fatigue, la microfissure initiale devient grande par rapport à la taille du grain, et les différentes microfissures vont coalescer. Une macro-fissure apparaît ainsi et sa direction est généralement imposée par les contraintes d'ouverture, maximum des contraintes principales de traction [36].

### **II.4.3 Stades de fissuration par fatigue :**

Dans une pièce mécanique il ya différents stades de fissuration par fatigue 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:

- ✓ Un stade de croissance rapide des fissures, qui atteignent des longueurs de l'ordre de quelques microns en surface après quelques millions de cycles.
- ✓ Un stade de progression plus lente de la fissure en surface, dont la durée dépend de l'amplitude de la contrainte.
- ✓ Un stade de progression rapide, qui précède de peu la rupture finale brutale.

### **II.4.4 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

## CHAPITRE II LA PROPAGATION DES FISSURES PAR FATIGUE

considère 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 constante, on constate que cette croissance continue jusqu'à la rupture (figure. II.10) [37].

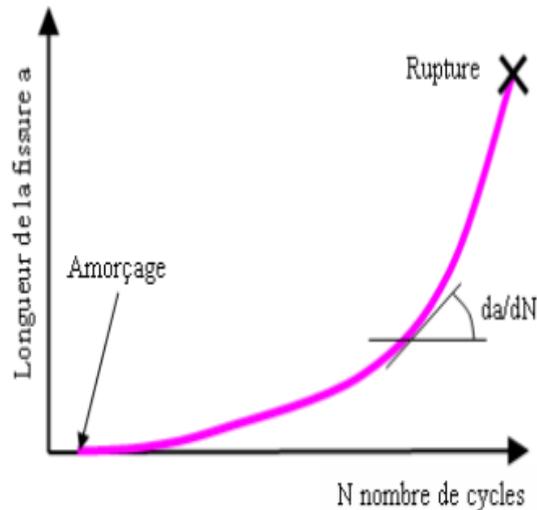


Figure. II.10 : Evolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de cycle

En générale l'expérience nous montre 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. II.11 représente en échelle logarithmique la vitesse de fissuration  $da/dN$  en fonction de  $\Delta K$ . [17]

## CHAPITRE II LA PROPAGATION DES FISSURES PAR FATIGUE

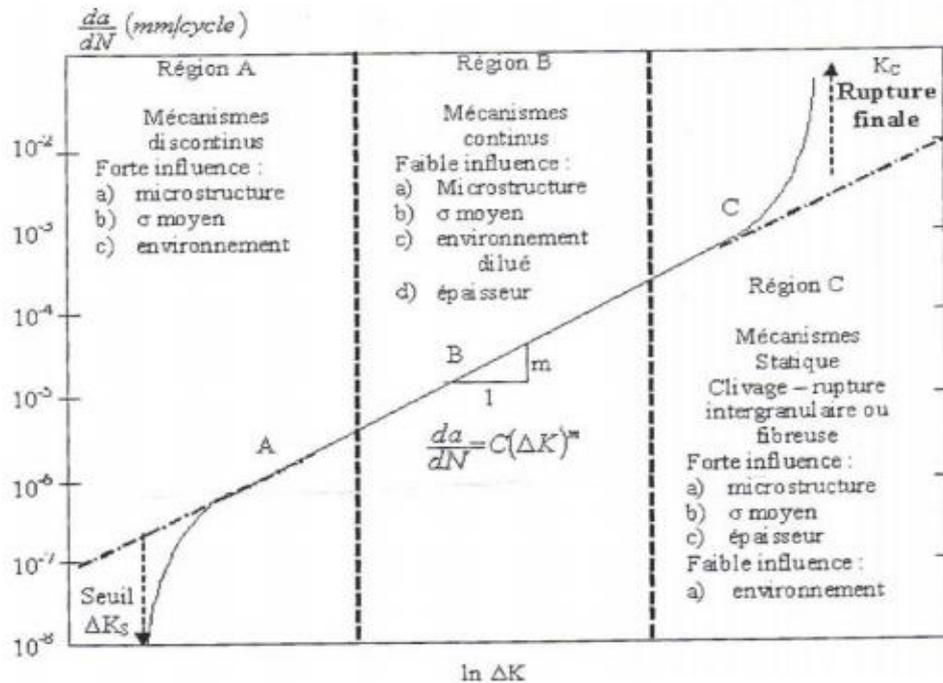


Figure. II.11 : Représentation schématique des différents régimes de propagation

### Domaine A :

Si le chargement est en dessous d'un certain seuil, la fissure ne se propage pas au niveau macroscopique. C'est un stade de croissance rapide des micro-fissures qui atteignent des longueurs de l'ordre de quelques microns en surface après quelques millions de cycles.

### Domaine B :

Dans ce domaine on obtient une relation linéaire entre  $(da/dN)$  et  $\Delta K$  pour plusieurs métaux. De nombreuses relations empiriques permettant de relier la vitesse de propagation au facteur d'intensité de contrainte ont été établies, telle que la loi de Paris. La loi de propagation dite de Paris [38] s'écrit sous la forme

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (2.5)$$

### Domaine C :

Ce domaine caractérise par une accélération de la vitesse de propagation de fissure en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte qui se termine par la rupture brutale lorsque le niveau de sollicitation approche la condition de la rupture, caractérisé par  $K_{max} = K_{IC}$ , ( $K_{IC}$  est le facteur d'intensité de contrainte critique à la rupture) [39].

## CHAPITRE II LA PROPAGATION DES FISSURES PAR FATIGUE

### II.4.5 Différents types de fissures :

D'une façon générale la rupture en fatigue résulte de l'amorçage et de la propagation d'une fissure de fatigue. La succession de processus physiques du premier cycle à la rupture totale de la structure peuvent se décomposer de la manière suivante (figure. II.12) [2]

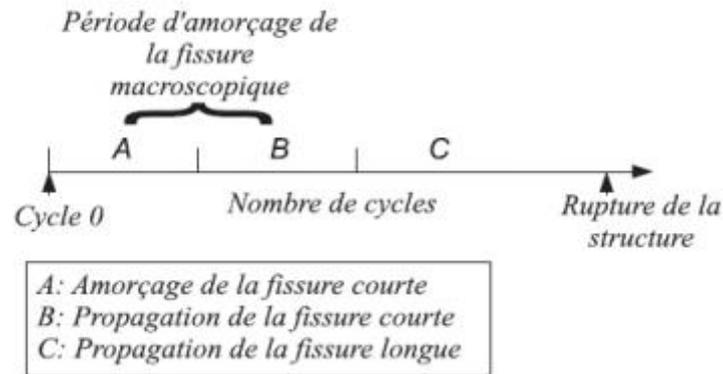


Figure. II.12 : Evolution du phénomène d'endommagement en fissuration d'une Éprouvette [2]

Les sous paragraphes suivants elle explique les fissures longues et courtes.

#### II.4.5.1 Fissures longues (Taille $\geq 1$ cm) :

La propagation des fissures longues de fatigue est décrite dans le cadre de la Mécanique Elastique Linéaire de la Rupture (MELR) qui s'appuie sur une solution analytique des contraintes au voisinage de la pointe de fissure et l'introduction d'un facteur d'intensité des contraintes K [40].

#### II.4.5.2 Fissures courtes (taille $\cong 0,1$ mm) :

La problématique des fissures courtes se résume par le fait que la propagation de ces fissures ne suit pas la loi de Paris. Les observations concernant les alliages d'aluminium, rapportent l'observation de fissures très courtes se propageant avec des vitesses supérieures ou égales à celles de fissures longues sollicitées dans les mêmes conditions de chargement ou peu variées, c'est à dire même  $\Delta K$  ou même peu inférieur. Les lois de fissurations des fissures longues sont déterminées dans des essais normalisés à amplitude de facteur d'intensité de contrainte décroissante, aboutissant à la détermination d'un seuil de non propagation  $\Delta K_s$ . La propagation des fissures courtes, se fait quand a elle à amplitude croissante (puisqu'elle part

## CHAPITRE II LA PROPAGATION DES FISSURES PAR FATIGUE

de Zéro) et en particulier on observe la propagation pour des valeurs inférieures au seuil  $\Delta K_s$  [40], comme il est montré en figure. II.13

Suresh et Ritchie (1984 ; 1991) proposent les différents types de fissures courtes tels que suivantes :

- Fissures micro structurellement courtes : la taille de fissure est comparable à la taille caractéristique de la microstructure, comme la taille de grain pour les matériaux monolithique
- Fissures mécaniquement courtes : la taille de la zone plastique est comparable avec la taille de fissure
- Fissures physiquement courtes : la taille de fissure est supérieure à la taille des grains et à la taille de zone plastique mais ne dépasse pas un millimètre
- Fissures chimiquement courtes : le comportement de la fissure peut être défini par une analyse basée sur la MLR mais elle présente certaines anomalies liées à la dépendance des effets de fatigue / corrosion à la taille de la fissure [41]

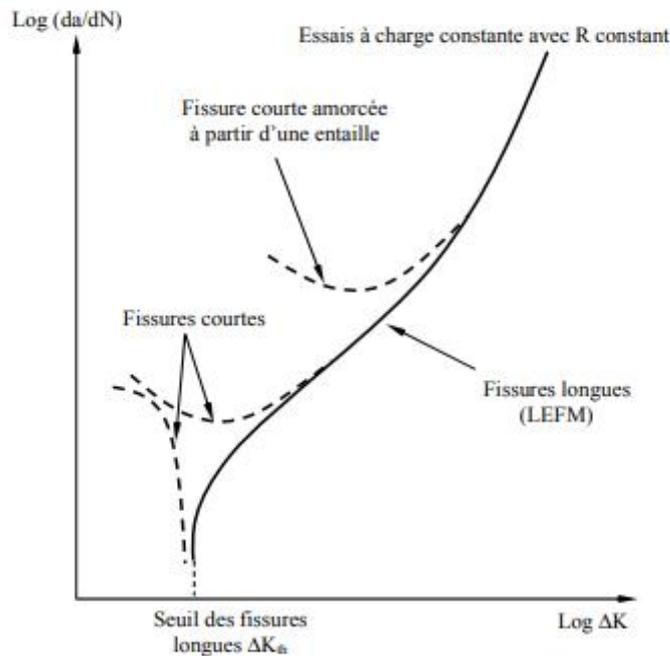


Figure. II.13 :Variation du comportement en propagation de fissures courtes par rapport à la courbe de fissuration de fissures longues. [42]

## CHAPITRE II LA PROPAGATION DES FISSURES PAR FATIGUE

### **II .4.6 Période de propagation:**

Cette période peut, elle-même, être partagée en deux phases distinctes montrées dans la figure.II.14 [24] :

- Stade I ou stade de propagation interne des microfissures.
- Stade II ou stade de propagation d'une des microfissures qui devient alors la fissure de fatigue, qui conduira à la ruine de la structure.

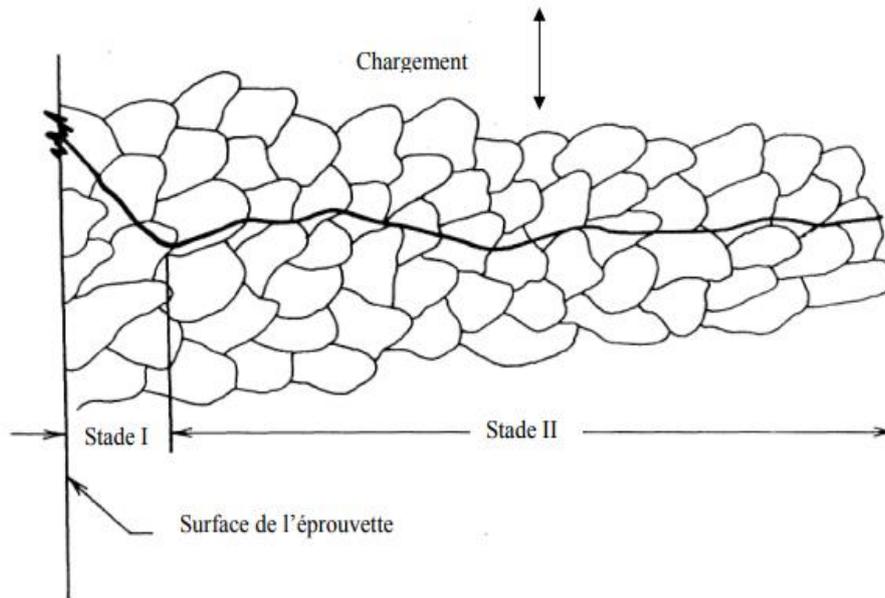


Figure. II.14 : Les stades de propagation

### **II .5 Paramètres influençant la fissuration par fatigue:**

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

#### **II .5.1 Paramètres d'ordre mécanique et géométrique**

##### **II .5.1.1 Influence du rapport de charge:**

Parmi les paramètres importants qui ont été largement étudiés, figure le paramètre « rapport de charge :  $R$  », il est ( $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ ) probablement le paramètre qui a le plus d'effet sur les vitesses de fissuration et sur de propagation. Cette influence se traduit expérimentalement par un décalage des courbes de fissuration vers la gauche lorsque  $R$  croît, en d'autres termes un rapport de charge élevé se traduit par une vitesse de propagation plus forte.

## CHAPITRE II LA PROPAGATION DES FISSURES PAR FATIGUE

L'effet du rapport de charge sur la propagation des fissures longues (figure. II.15) de l'alliage d'aluminium 2024 T3 a été étudié expérimentalement par Kujawski[43] pour des valeurs positives et négatives. Benachour et al [44], ont étudié l'influence du rapport de charge sur la durée de vie en fatigue de la propagation d'une fissure semi elliptique dans l'alliage d'aluminium 2024 T3. L'augmentation du rapport de charge a fait augmenter la durée de vie (figure. II.16).

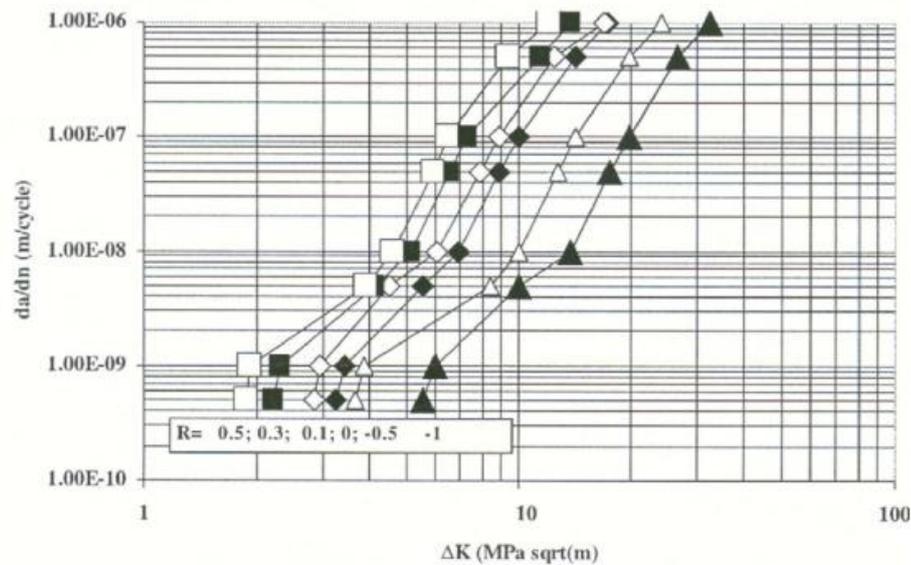


Figure. II.15 : Effet du rapport de charge sur vitesse de fissuration (2024 T351) [43]

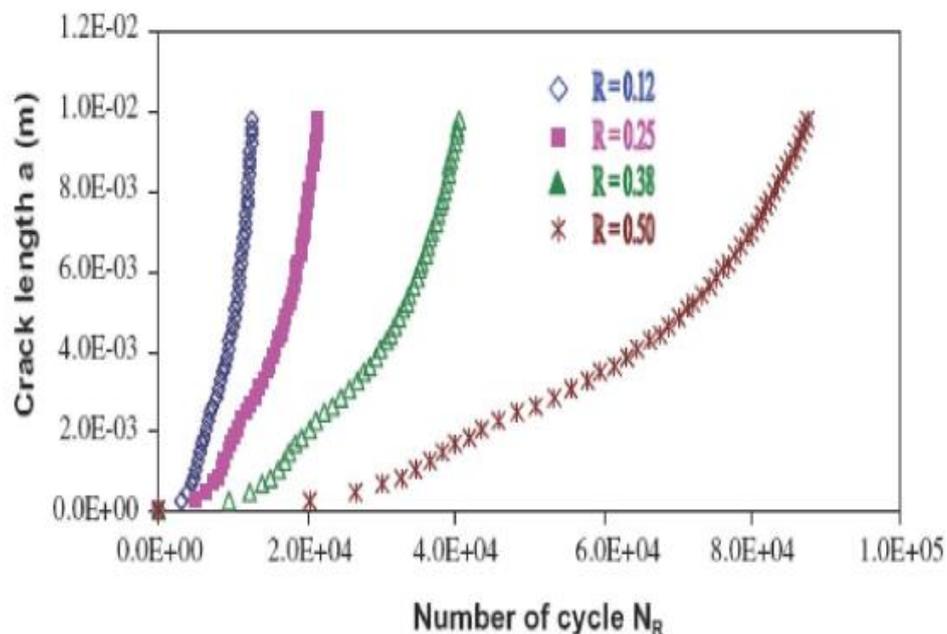


Figure. II.16 : Effet du rapport de charge sur la durée de vie a  $\sigma_{max}$  constante [44]

## CHAPITRE II LA PROPAGATION DES FISSURES PAR FATIGUE

Les résultats des essais expérimentaux sur le comportement en fatigue des alliages d'aluminium 2024 T3 et 6061 T6, obtenus par Donald et al. [45], ont montré que la vitesse de propagation ne dépend pas seulement de  $\Delta K_{eff}$  mais dépend en plus de  $K_{max}$ .

Les études de l'effet du rapport de charge sur la vitesse de fissuration des alliages 7475 T7351 et 2024 T851 menés respectivement par Guo et al. [46], et Kermani et al. [47] ont montré un décalage des courbes de fissurations vers les hautes vitesses.

L'effet de l'augmentation du rapport de charge "R" sur la vitesse de fissuration "da/dN" a été étudié sur plusieurs matériaux [48,49]. Il a été remarqué que l'augmentation du rapport "R" augmente aussi la vitesse de fissuration pour un même facteur d'intensité de contrainte  $\Delta K$ . Les travaux menés par Lee et al. [50] ont montré que la vitesse de fissuration da/dN augmente et le facteur d'intensité de contrainte seuil  $\Delta K_{th}$  diminue avec l'augmentation du rapport de charge "R" pour des chargements cycliques à amplitude constante sous différents environnements. L'effet du rapport de charge a été aussi expliqué par l'effet de fermeture de fissure. L'effet de fermeture a été initié initialement par Elber [51, 52]. Le modèle régissant la propagation et le concept de fermeture de fissure sont détaillés dans la section suivante (modèles de propagation).

### **II .5.1.2 Influence de la contrainte moyenne:**

A amplitude de chargement constante, si  $\sigma_m$  augmente la durée de vie diminue. La période de signal a en générale peu d'influence sur la durée de vie. Cette règle est confirmée quand le phénomène de fatigue est associé à l'endommagement en fonction du temps : fatigue-corrosion, fatigue-fluage, ou lorsque la rapidité des sollicitations produit un échauffement. Dans le cas des chargements variables, les paramètres prépondérants sont :

-La présence de surcharge : la répétition d'une surcharge peut retarder la propagation de fissure.

-L'ordre d'apparition de cycles [53].

La contrainte appliquée peut être assimilée à une traction ou une compression, à une flexion ou à une torsion. En général, le rapport entre la contrainte variable et le temps écoulé se présente sous modes distincts (figure.II.17) :

- a) La contrainte varie de façon régulière et sinusoïdale en fonction du temps.
- b) Les contraintes max et min sont asymétriques par rapport à une contrainte nulle.
- c) Le cycle de contraintes variables [53].

## CHAPITRE II LA PROPAGATION DES FISSURES PAR FATIGUE

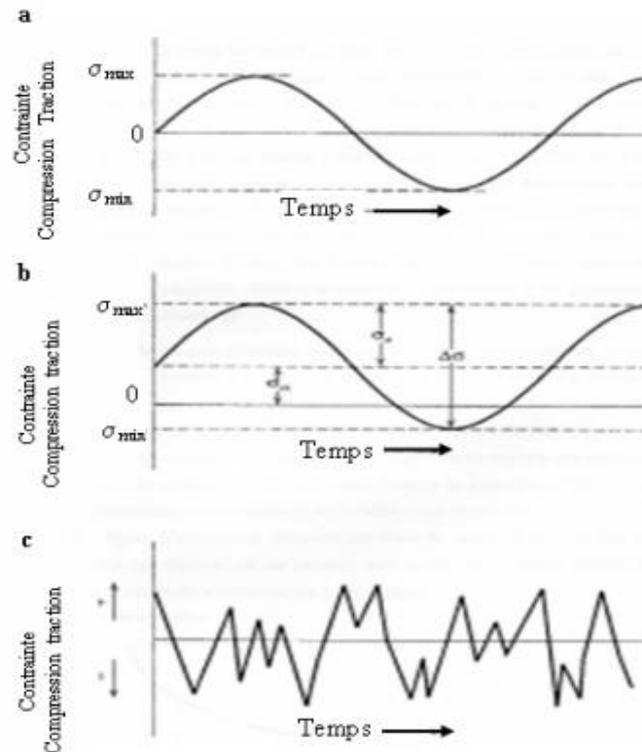


Figure. II.17:différents modes de variation de contrainte appliquée en fonction du temps

### II.5.2 Nature du chargement :

Le chargement peut être monotone ou variable (et même aléatoire, 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  $\sigma_{moy}$  augmente, la durée de vie diminue.
- ✓ En général, 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, les paramètres prépondérants sont :

- ✓ la présence de surcharges : la répétition périodique d'une surcharge peut causer en retard significativement la propagation de fissures.
- ✓ l'ordre d'apparition des cycles.

## CHAPITRE II LA PROPAGATION DES FISSURES PAR FATIGUE

### **II .5.3 Influence de l'environnement :**

Le phénomène de fatigue est exacerbé par l'environnement agressif (température élevée, milieux corrosifs...), qui à son tour conduit à la création de nouveaux phénomènes comme le fluage ou la corrosion. Leur action est proportionnelle au temps d'exposition.

### **II .5.4 Paramètres d'ordre métallurgique :**

La réalisation d'une pièce passe toujours par des opérations mécaniques et thermiques, qui agissent sur l'état métallurgique du matériau utilisé donc sur ses caractéristiques mécaniques d'utilisation.

- ✓ Taille des grains :

Les structures à grains fins sont plus résistantes en fatigue que les structures à gros grains.

- ✓ Taux d'écroutissage :

L'écroutissage résultant des opérations de formage a pour effet de consolider le matériau (augmentation de la limite d'élasticité), et par suite, améliore la tenue en fatigue.

- ✓ Traitement thermique :

Suivant que le traitement thermique provoque un adoucissement ou un durcissement du matériau, la tenue en fatigue sera diminuée ou augmentée. De plus, le traitement thermique peut modifier la taille des grains.

- ✓ Défauts métallurgiques de l'alliage :

Les défauts métallurgiques (lacunes, défauts interstitiels, précipités, inclusions) peuvent être à l'origine de l'endommagement par fatigue. Par incompatibilité des déformations, ils provoquent des concentrations de contrainte locales. [54]

### **II .6 Modèles décrivant la propagation d'une fissure :**

Plusieurs modèles ont été proposés pour prédire la durée de vie et la vitesse de fissuration " $da/dN$ " sous différentes conditions [55].

## CHAPITRE II LA PROPAGATION DES FISSURES PAR FATIGUE

### **II .6.1 Loi de Paris :**

Pour décrire l'évolution de la propagation de fissures de fatigue dans le régime B de la figure II.11 De nombreuses lois ont été proposées. La loi proposée par Paris [38], reste toujours la plus abondamment utilisée par les ingénieurs. Cette dernière reliant la vitesse de fissuration à l'amplitude de facteur d'intensité de contrainte  $\Delta K$

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^m \quad (2.7)$$

### **II. 6.2 Loi de Forman:**

Pour tenir compte de l'augmentation asymptotique de la vitesse de fissuration quand  $K_{max}$  tend vers  $K_{IC}$ , Forman [56] a proposé la relation :

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \cdot (\Delta K_I)^m}{(1-R) \cdot K_{IC} - \Delta K_I} \quad (2.8)$$

Cette loi a été vérifiée sur plusieurs alliages d'aluminium et est couramment utilisées en aéronautique pour  $da/dN$  supérieure à  $10^{-5}$  mm/cycle et  $m$  de l'ordre de 4. Toutefois, 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.

Pour rendre compte de l'effet de seuil dans la région I, Klesnil et Lucas [57] proposèrent quant à eux une modification de la relation sous la forme :

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^m}{(1-R)(K_{IC} - K_{max})} \quad (2.9)$$

### **II .6.3 Modèle NASGRO:**

Les modèles de propagation ont subi un grand développement, en tenant compte de nombreux paramètres et conditions de service de laboratoire, ce qui à son tour travaille à répandre les fissures. Ces paramètres peuvent être classés en deux catégories à savoir :

## CHAPITRE II LA PROPAGATION DES FISSURES PAR FATIGUE

- Les paramètres intrinsèques qui dépendent du matériau : module de Young, limite d'élasticité, propriétés cycliques et état métallurgiques du matériau.

- Les paramètres extrinsèques qui dépendent des conditions de l'essai, différemment de la nature du matériau étudié : température, fréquence, environnement, dimensions des éprouvettes, rapport de charge...etc.

$$\frac{da}{dN} = C \left[ \left( \frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right]^n \frac{(1-\frac{\Delta K th}{K_{max}})^p}{(1-\frac{K_{crit}}{K_{max}})^p} \quad (2.10)$$

Le modèle de NASGRO utilisé dans la prédiction de la vitesse de propagation de fissuration de fatigue a été développé par Forman et Newman [58].

### **II.6.4 Modèle de McEvily :**

En 1974, McEvily [59] a proposé un modèle qui 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 inclus (équation 18).

$$\frac{da}{dN} = \frac{8}{\pi E^2} (\Delta K^2 - \Delta K_{th}^2) \quad (2.11)$$

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.

$$\frac{da}{dN} = \frac{8}{\pi E^2} (\Delta K^2 - \Delta K_{th}^2) \left( 1 + \frac{\Delta K}{K_c - K_{max}} \right) \quad (2.12)$$

L'amplitude du facteur d'intensité de contrainte seuil  $\Delta K_{th}$  est exprimée par la relation (2.13) :

$$\Delta K_{th} = \frac{1.2(\Delta K_{th0})}{1+0.2\left(\frac{1+R}{1-R}\right)} \quad (2.13)$$

### **II.7 CONCLUSION :**

Dans ce chapitre, nous montrons que de nombreuses recherches ont été menées dans le but de déterminer une relation pouvant décrire correctement la fissuration par fatigue, pour différents matériaux, en prenant en compte différentes sollicitations de chargement et d'environnement pendant la propagation, nous avons aussi vu que les fissures étant omniprésentes dans les pièces mécaniques, la prévision de leur propagation est un enjeu crucial.

CHAPITRE III  
OUTILS DE  
SIMULATION  
(AFGROW)

## CHAPITRE III OUTIL DE SIMULATION (AFGROW)

### III.1 INTRODUCTION :

AFGROW (Air Force Growth) 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 pour le profit de la NASA. La version du code AFGROW utilisé, travail sous une interface sous Windows XP (figure III.1).

Le code AFGROW contient deux fenêtres principales, la fenêtre "modèle géométrique" (Figure III.2) et la fenêtre "Matériaux" (Figure III.3). De plus, il travaille par des interfaces intermédiaires ou auxiliaires, d'introduire les spectres de chargement (figure III.4), les modèles d'amplitude et plusieurs d'autre fonction comme la fonction « Repair Menu ». Il permet la possibilité d'introduire des matériaux différents et 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  $da/dN=f(\Delta K)$ .

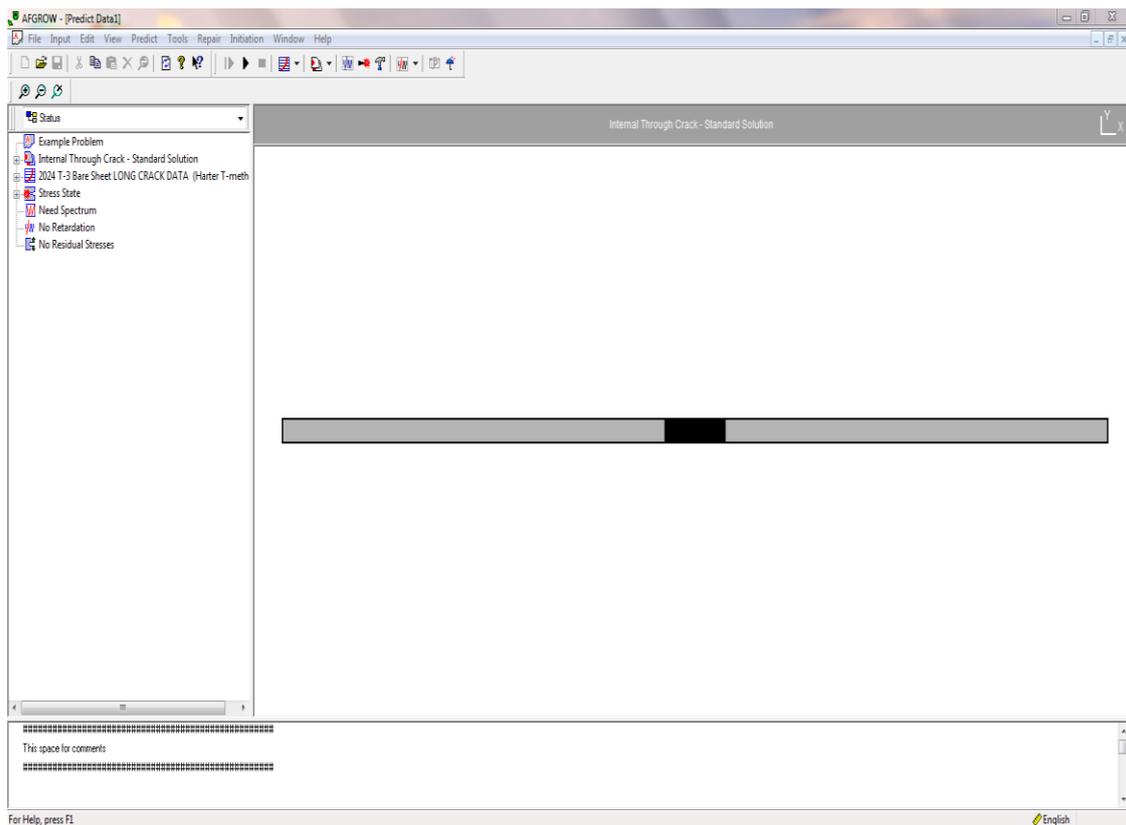


Figure III.1 : Fenêtre principale d'AFGROW

# CHAPITRE III OUTIL DE SIMULATION (AFGROW)

## III.2 GEOMETRIE :

La figure suivante représente l'interface qui permet de choisir le modèle étudié et spécifier les dimensions.

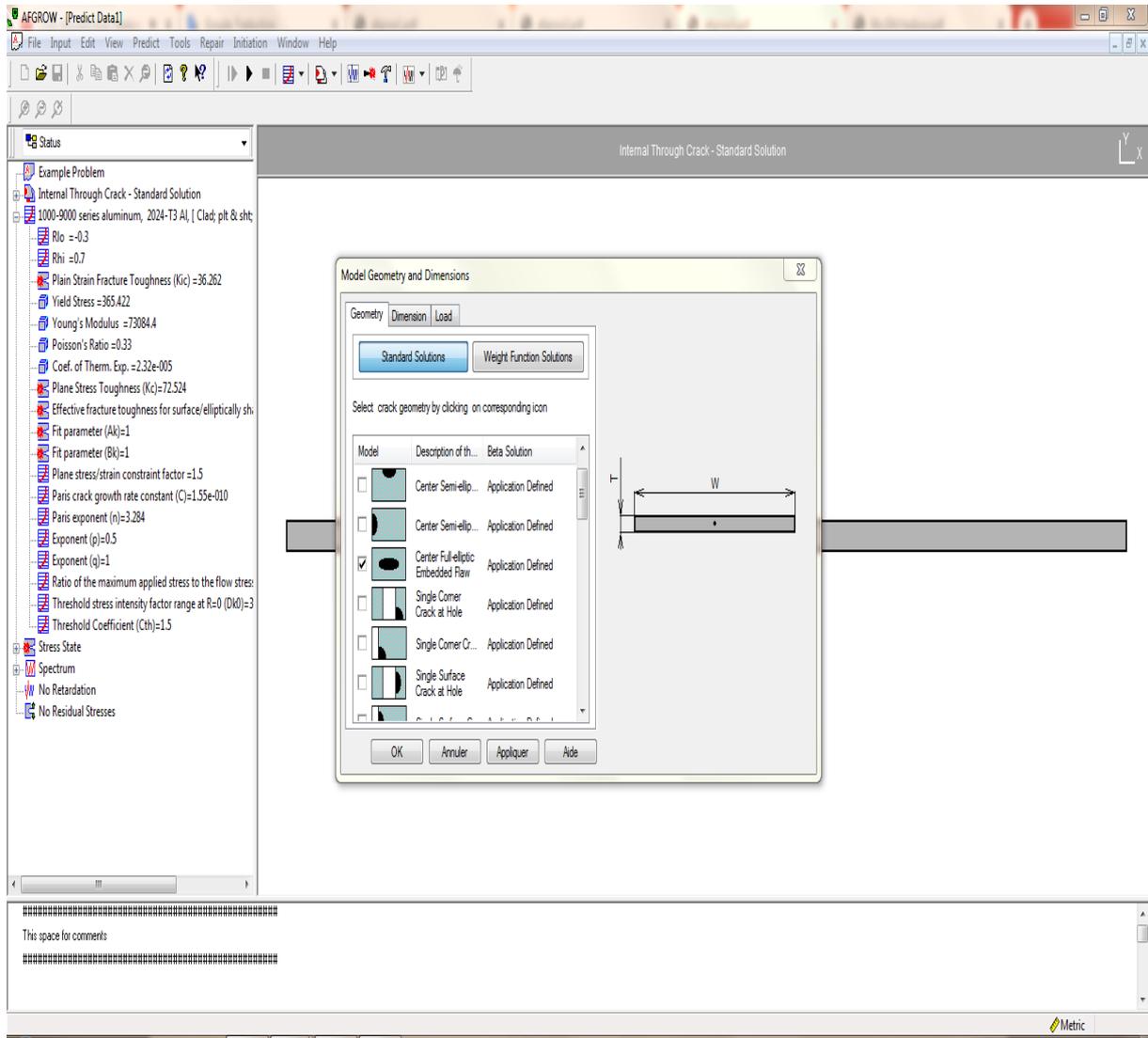


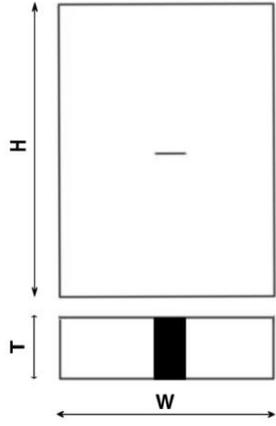
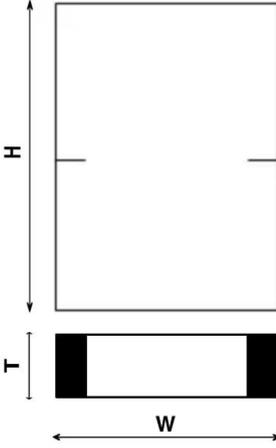
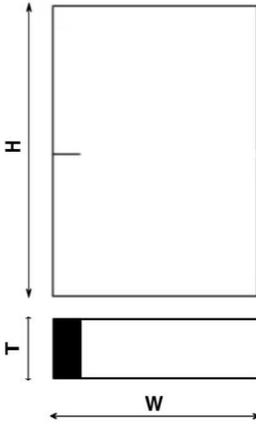
Figure III.2 : Fenêtre de géométrie

### III.2.1 Les modèles étudiés :

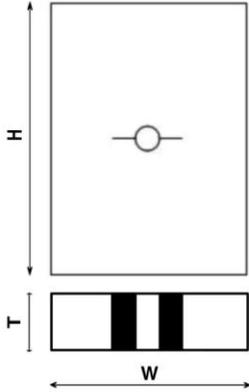
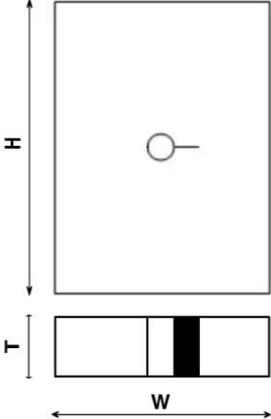
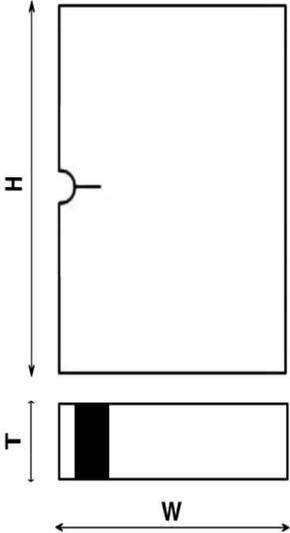
Dans notre étude nous avons utilisé des modèles différents, les modèles utilisés sous forme d'une plaque rectangulaire sont illustrés dans le tableau ci-dessous.

## CHAPITRE III OUTIL DE SIMULATION (AFGROW)

Tableau III. 1 : Géométrie des model utilisé

Les modèles	Schéma de l'éprouvette
<p data-bbox="379 412 584 501">Modèle 1 Fissure centrale</p>	
<p data-bbox="336 936 627 1025">Modèle 2 Double fissure latérale</p>	
<p data-bbox="384 1487 584 1576">Modèle 3 Fissure latérale</p>	

## CHAPITRE III OUTIL DE SIMULATION (AFGROW)

<p>Modèle 4 Double fissure émanant d'un trou circulaire central</p>	
<p>Modèle 5 Fissure émanant d'un trou circulaire central</p>	
<p>Modèle 6 Fissure émanant d'une entaille latérale semi-circulaire</p>	

## CHAPITRE III OUTIL DE SIMULATION (AFGROW)

### III.3 MATERIAUX ETUDIÉS :

Dans notre étude nous avons utilisé trois matériaux différents (Acier M50, Magnésium AM503 et Al 2024T3). Les caractéristiques mécaniques sont énumérées dans le tableau III.2.

Tableau III. 2: Caractéristiques mécaniques des matériaux étudiés

<b>Matériaux</b>	<b><math>\sigma_e</math></b> <b>(MPa)</b>	<b>E</b> <b>(MPa)</b>	<b><math>K_C</math></b> <b>(MPa m<sup>1/2</sup>)</b>	<b><math>K_{IC}</math></b> <b>(MPa m<sup>1/2</sup>)</b>	<b><math>\nu</math></b>
Acier M50	2240.8	206843	14.834	14.285	0.33
Magnésium AM503	110316	44815.9	18.68	13.816	0.35
Aluminum2024- T3	365.422	73084.4	50.547	36.262	0.33

Pour le choix du matériau à utiliser, la fenêtre suivante nous permet de fixer le matériau choisi et d'introduire les différentes propriétés mécaniques équivalentes.

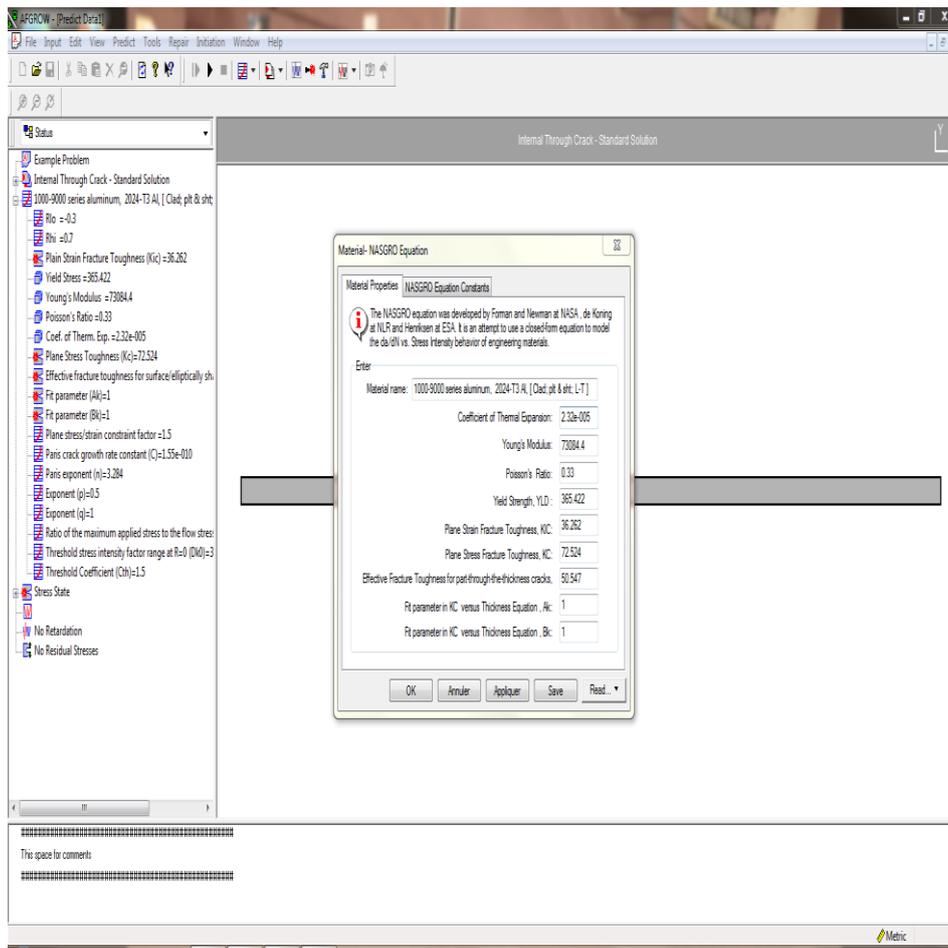


Figure III.3 : Fenêtre matériau

## CHAPITRE III OUTIL DE SIMULATION (AFGROW)

### III.4 COMMANDE SPECTRUM :

Afgrow offre plusieurs types de chargement, soit des chargements à amplitude constant ou des chargements à amplitude variable. Concernant le chargement à amplitude variable nous avons deux alternatives. La première consiste à faire entrer les données à spectre manuellement et la seconde permet de lire les données du spectre à partir d'un fichier. La figure III.4 représente la fenêtre de chargement.

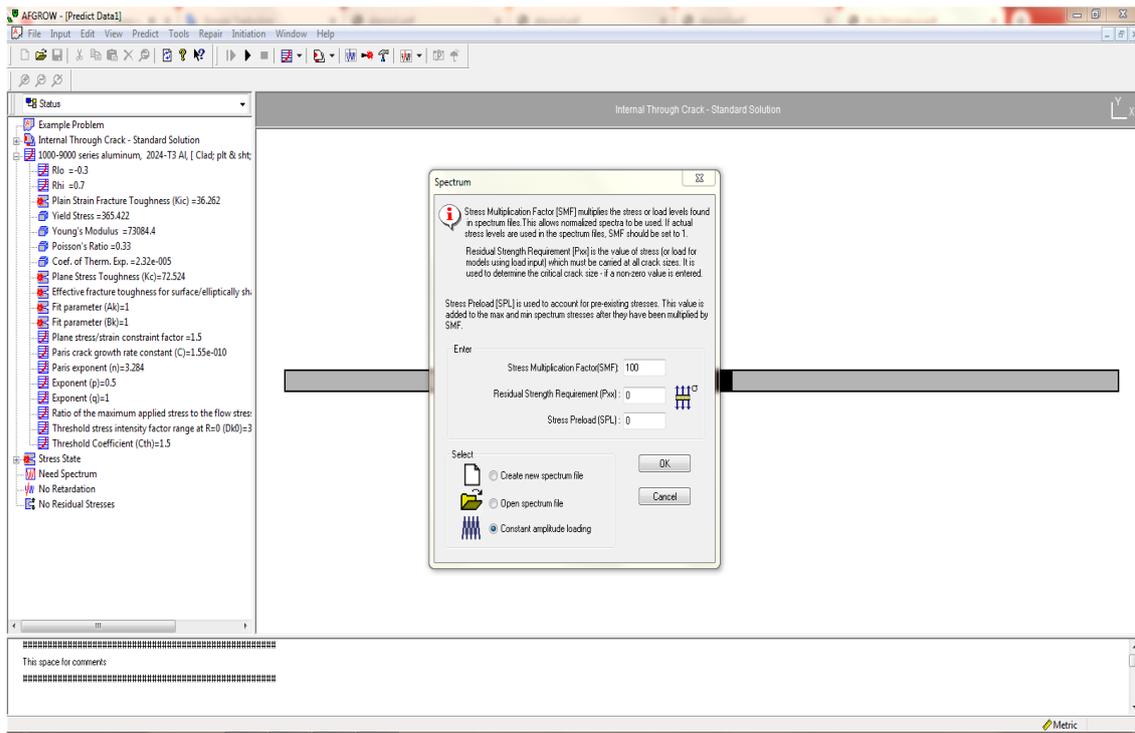


Figure III.4 : Fenêtre de chargement

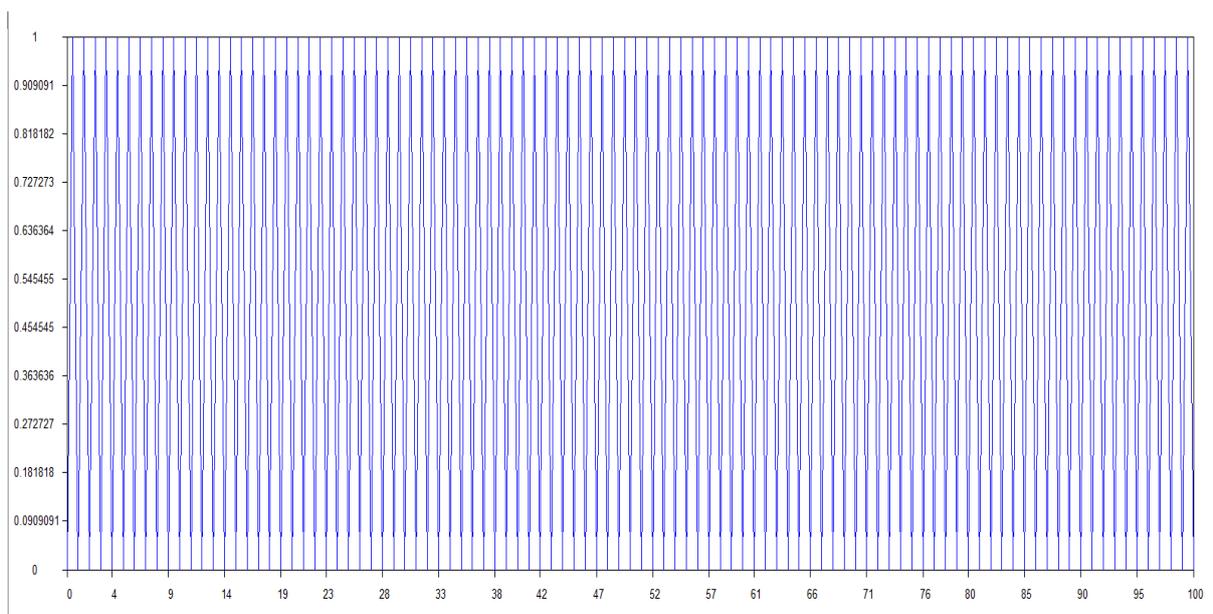


Figure.III.5 : Spectre de chargement

## CHAPITRE III OUTIL DE SIMULATION (AFGROW)

### III.5 MODELE DE PROPAGATION APPLIQUE :

Le modèle de propagation utilisé dans cette étude est le modèle de NASGRO (équation 3.1). Les paramètres de propagation pour les matériaux étudiés sont portés sur le tableau III. 2. La vitesse de fissuration est évaluée par la méthode de la sécante à partir des résultats obtenus du couple (a, N).

$$\frac{da}{dN} = C \left[ \left( \frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right]^n \frac{\left( 1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left( 1 - \frac{K_{max}}{K_{crit}} \right)^q} \quad (3.1)$$

Tableau III. 3: Paramètres du modèle de propagation des matériaux utilisé par le modèle de NASGRO

Matériaux	$\Delta K_{th}$ MPa $\sqrt{m}$	$K_{Ic}$ MPa $\sqrt{m}$	$K_c$ MPa $\sqrt{m}$	n	p	q	c
M50	2.637	14.285	14.834	3.18	0.1	0.1	$2.635 \cdot 10^{-11}$
AM503	0.824	13.816	18.68	3.183	0.25	0.25	$5.7202 \cdot 10^{-9}$
AL 2024 T3	3.187	36.262	50.547	3.284	0.5	1	$1.5451 \cdot 10^{-10}$

CHAPITRE IV  
RESULTATS ET  
DISCUSSIONS

## CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

### **IV.1 INTRODUCTION :**

La connaissance de la résistance à la fissuration par fatigue est nécessaire pour toute structure soumise en service à des chargements cycliques. Puisque la plupart des pièces comportent des défauts, il est donc important de bien connaître leur développement éventuel et de caractériser leur résistance à la fatigue. Ainsi de connaître les différents paramètres qu'il faut prendre en compte et qui ont une grande influence lors de la fissuration par fatigue.

Pour connaître des paramètres qui influents sur la propagation d'une fissure au niveau d'une entaille (trou, demi-trou), on a étudié l'effet des propriétés mécaniques (Module de Young), dimension de l'entaille, l'épaisseur de la plaque et le rapport de charge sur la propagation d'une fissure émanant d'une entaille.

Dans ce chapitre on va présenter les différents résultats relatifs et leur interprétation des effets de chargement cyclique pour la fissuration par fatigue des trois matériaux (Acier M50, Magnésium AM503 et Al 2024T3).

Les effets de chargement sont considérés dans cette étude sont :

- Effet de la nature des matériaux
- Effet de rapport de charge
- Effet de la longueur de la fissure
- Effet d'épaisseur
- Effet de l'entaille de diamètre

### **IV.2 ANALYSE ET RESULTAT :**

#### **IV.2.1 Effet de la nature des matériaux :**

Dans cette partie on présente une comparaison en durées de vie et de fissuration prédites pour trois matériaux différents (Module de Young), (Tableau IV.1)

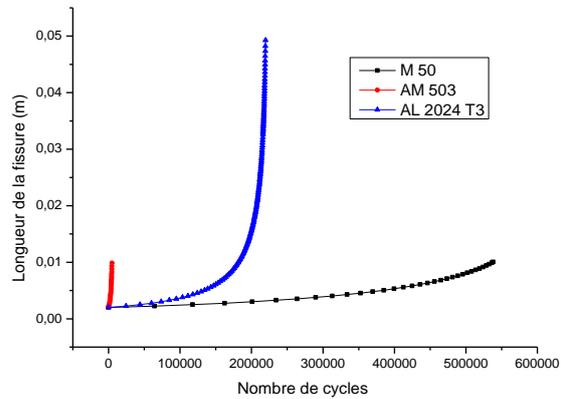
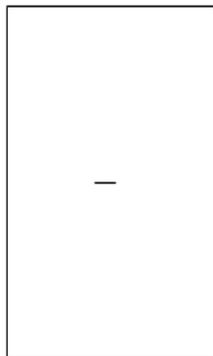
Cette comparaison est faite sous les conditions qui sont mentionné dans le tableau suivant :

## CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

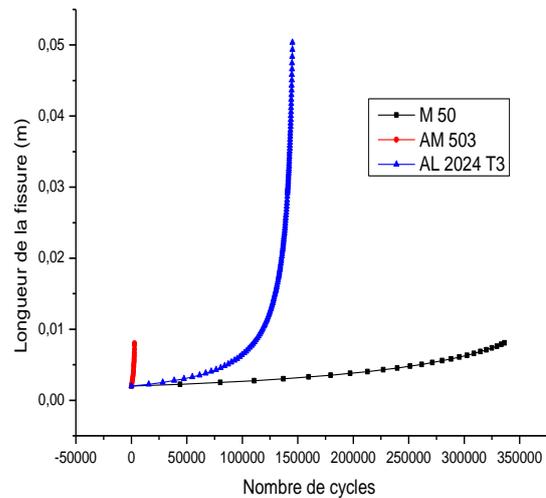
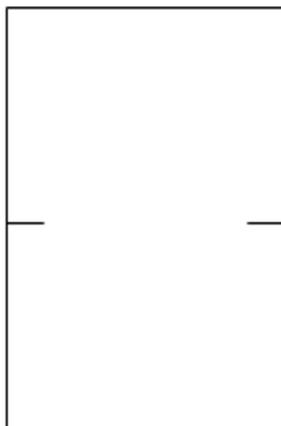
Tableau IV.1 : les différents matériaux utilisés dans notre étude

Rapport de charge R	Largeur W(m) de la plaque	Longueur de la fissure initiale C(m)	L'épaisseur T(m) de la plaque	Matériau	Module de Young (MPa)
0.1	0.2	0.002	0.02	<b>Acier M50</b>	<b>206843</b>
0.1	0.2	0.002	0.02	<b>Magnésium AM503</b>	<b>44815.9</b>
0.1	0.2	0.002	0.02	<b>AL 2024T3</b>	<b>73084.4</b>

### Modèle 1 : Fissure centrale

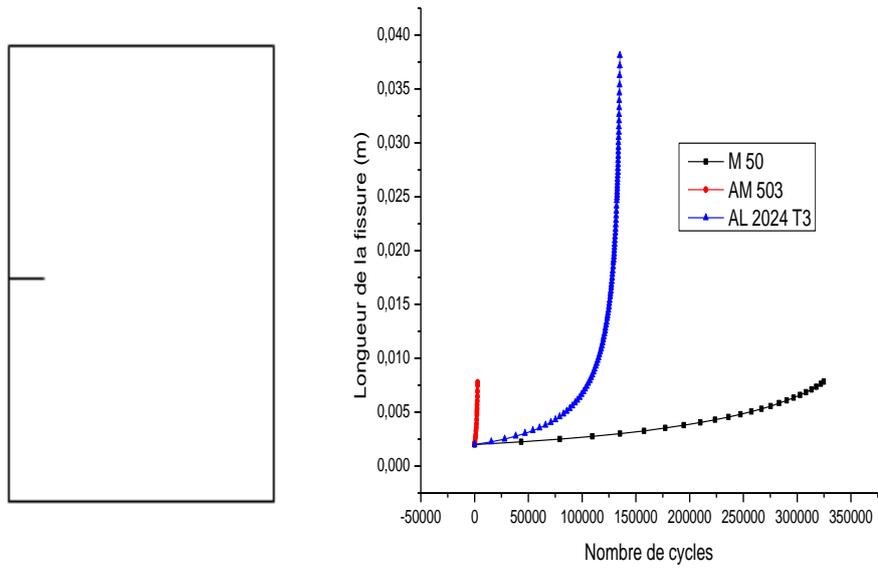


### Modèle 2 : Double fissure latérale

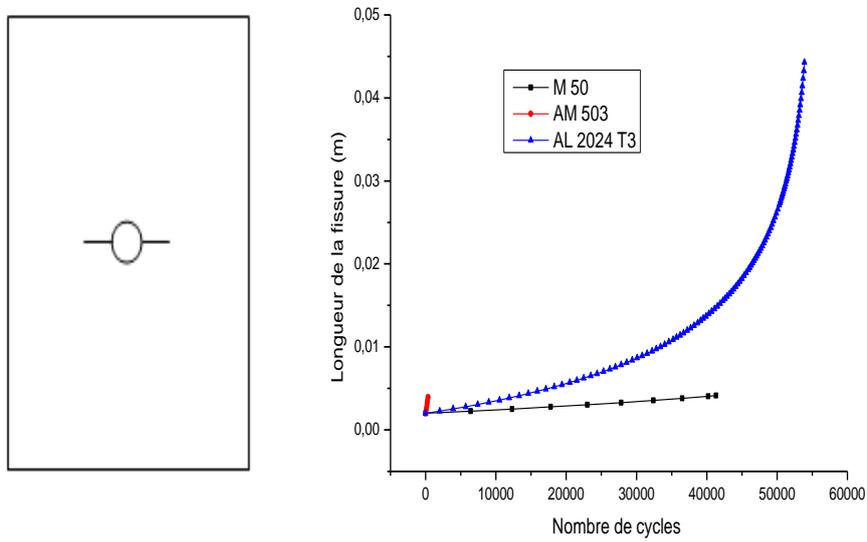


### Modèle 3 : fissure latérale

## CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

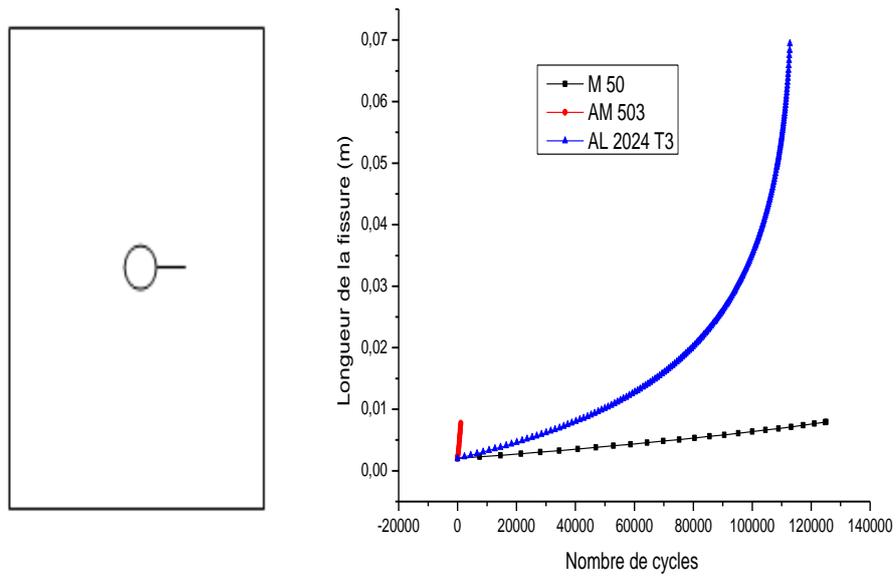


### **Modèle 4 : Double Fissure émanant d'un trou circulaire central**



### **Modèle 5 : Fissure émanant d'un trou circulaire central.**

## CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS



**Modèle 6 :** Fissure émanant d'une entaille latérale semi-circulaire

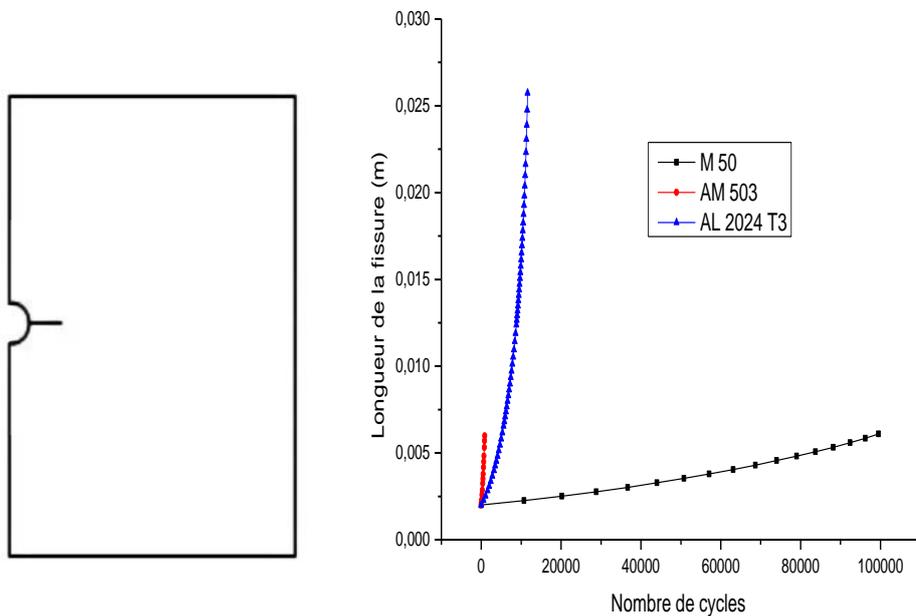


Figure IV.1 : Effet de la nature des matériaux sur la propagation de la fissure pour les différents modèles.

Ces figures représentent l'effet de la nature des matériaux sur la durée de vie pour les trois matériaux (M50, AM503, et Al2024 T3).

## CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

On remarque que la propagation de la fissure est identique dans tous les modèles quelle que soit sa position (centrale, latérale et émanant ou non émanant d'une entaille), sauf que le nombre de cycles à la rupture est trop réduit.

D'autre part on observe que le nombre de cycles à la rupture dans l'acier très élevé comparé aux autres matériaux tels que l'aluminium et le magnésium. Le magnésium est présente une durée de vie assez courte par rapport aux autres matériaux. L'acier présente une rupture brutale en comparant avec l'aluminium qui a une rupture ductile, donc ce comportement de l'aluminium a une durée de vie plus élevée puisque sa ductilité

### **IV.2.2 Effet du rapport de charge :**

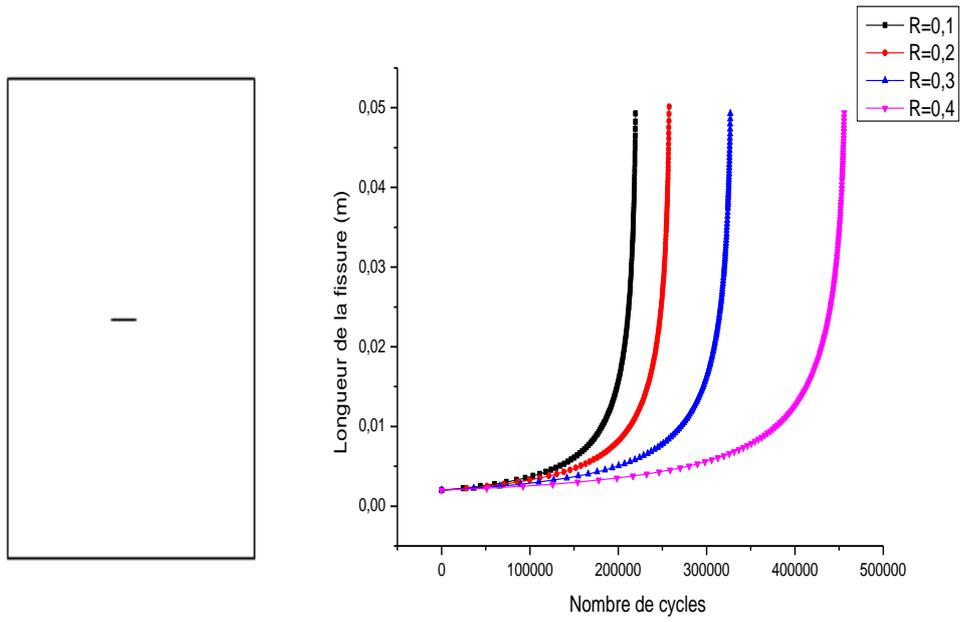
Le rapport de charge est probablement le paramètre qui a le plus d'effets sur les vitesses de fissuration et sur le seuil de propagation. Dans cette partie nous avons conduit des essais de simulation de fissuration en fatigue sous un chargement maximal constant, et pour des rapports de charges variés. Le tableau suivant représente les différents paramètres de cette simulation.

Tableau IV.2 : Les différents rapports de charge utilisé dans notre étude

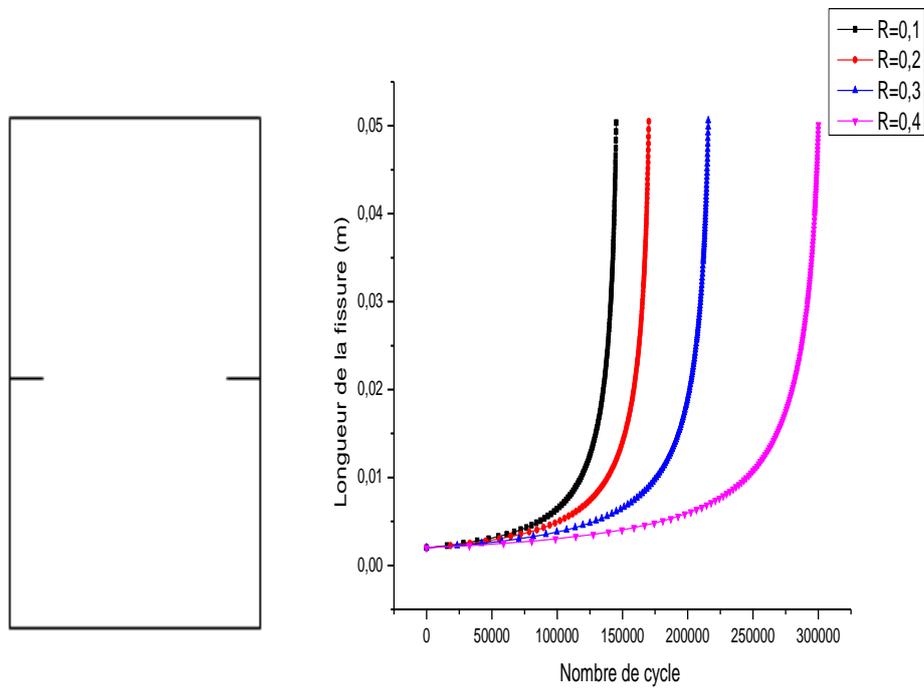
<b>Rapport de charge R</b>	Largeur W(m)	Longueur de la fissure initiale C(m)	L'épaisseur T(m)	Matériau	Module de Young(MPa)
<b>0.1</b>	0.2	0.002	0.02	Al 2024T3	73084.4
<b>0.2</b>	0.2	0.002	0.02	Al 2024T3	73084.4
<b>0.3</b>	0.2	0.002	0.02	Al 2024T3	73084.4
<b>0.4</b>	0.2	0.002	0.02	Al 2024T3	73084.4

# CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

## Modèle 1: Fissure centrale

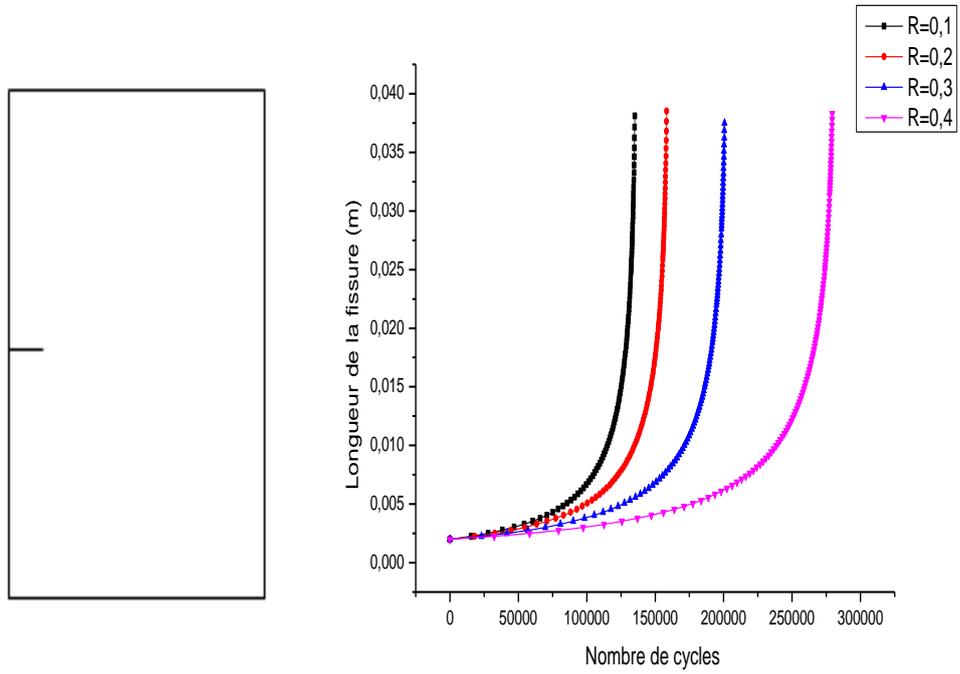


## Modèle 2: Double fissure latérale

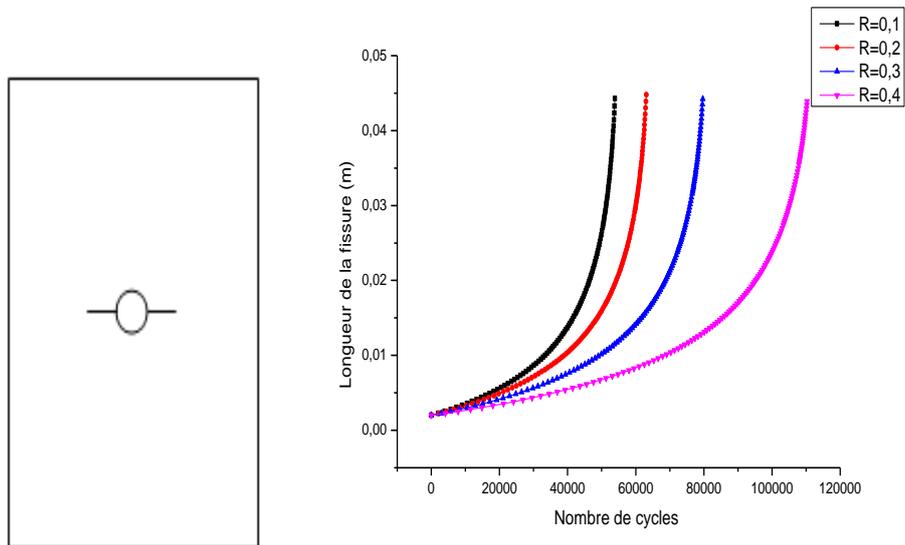


# CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

## Modèle3: fissure latérale

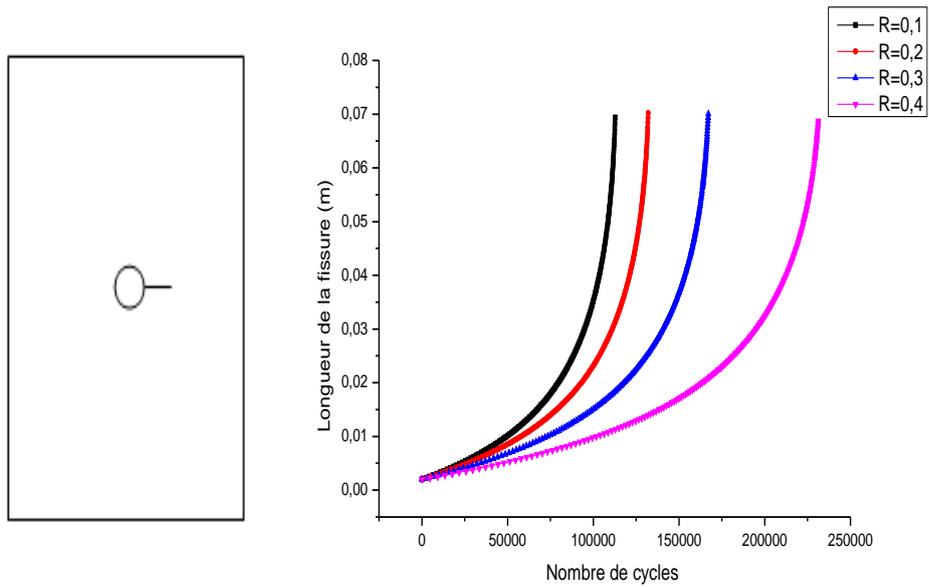


## Modèle4: DoubleFissure émanant d'un trou circulaire central



## CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

### Modèle5:Fissure émanant d'un trou circulaire central



### Modèle6:Fissure émanant d'une entaille latérale semi-circulaire

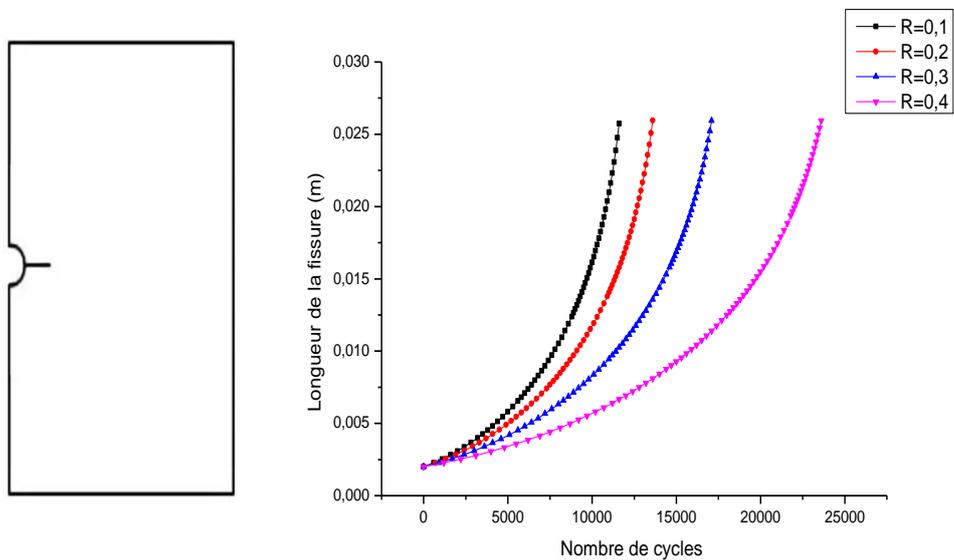


Figure IV.2 : Effet du rapport de charge « R » sur la propagation de la fissure pour les différents modèles

## CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

D'après la Figure IV.2 qui montre l'effet du rapport de charge « R » sur la durée de vie de la longueur de la fissure en fonction du nombre de cycles, on remarque que l'augmentation du rapport de charge la vitesse de fissuration diminue, quand un matériau est sollicité à R plus élevé, sa résistance à la fissuration est plus élevée, par contre cette vitesse de propagation est plus rapide pour des faibles de rapport de charge. Donc lorsque le rapport de charge augmente, la durée de vie aussi augmente.

Afin de voir clairement ce changement, nous avons tracé un graphique montrant le changement du rapport du charge avec le nombre de cycles à la rupture (Figure IV.3).

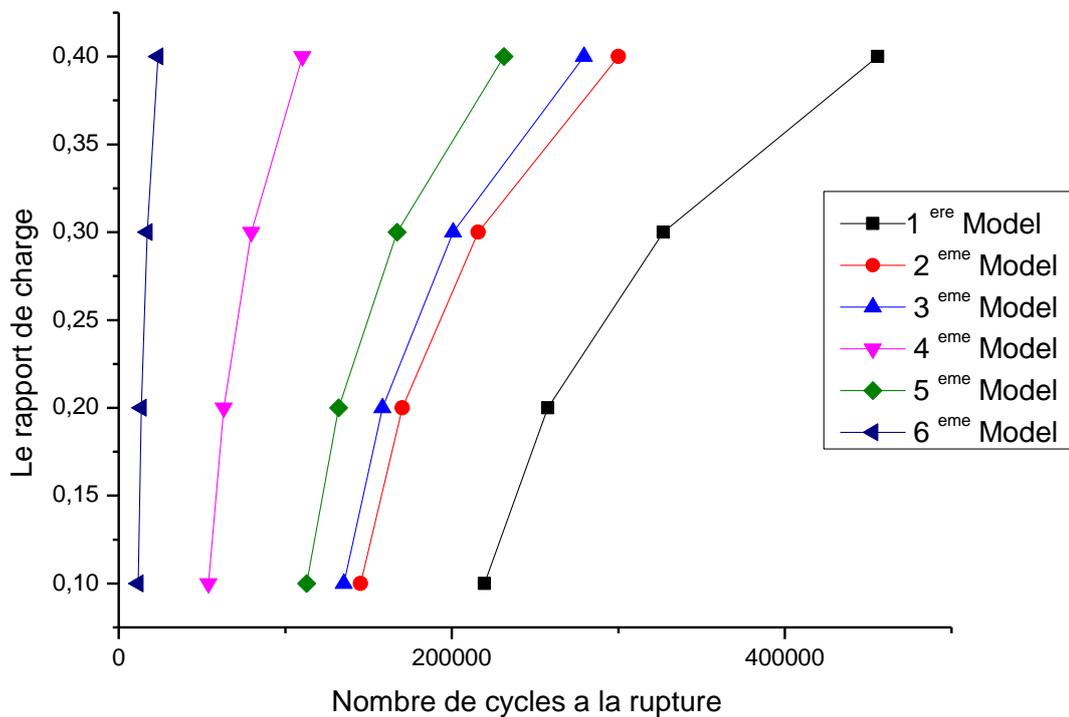


Figure IV.3 : L'effet de la variation du rapport de charge en fonction du nombre de cycles à la rupture pour tous les modèles.

### **IV.2.3 Effet de l'épaisseur :**

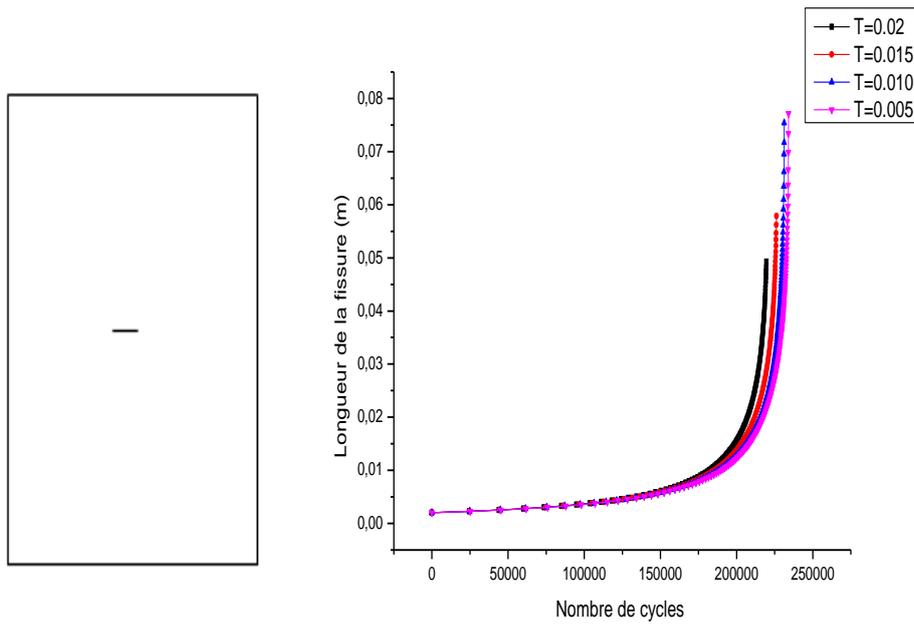
L'épaisseur de la plaque joue un rôle important dans la propagation des fissures de fatigue. Pour voir cet effet, nous avons modifié l'épaisseur de la plaque. Sa valeur est indiquée dans le tableau suivant:

## CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

Tableau IV.3 : les différents d'épaisseur utilisé dans notre étude

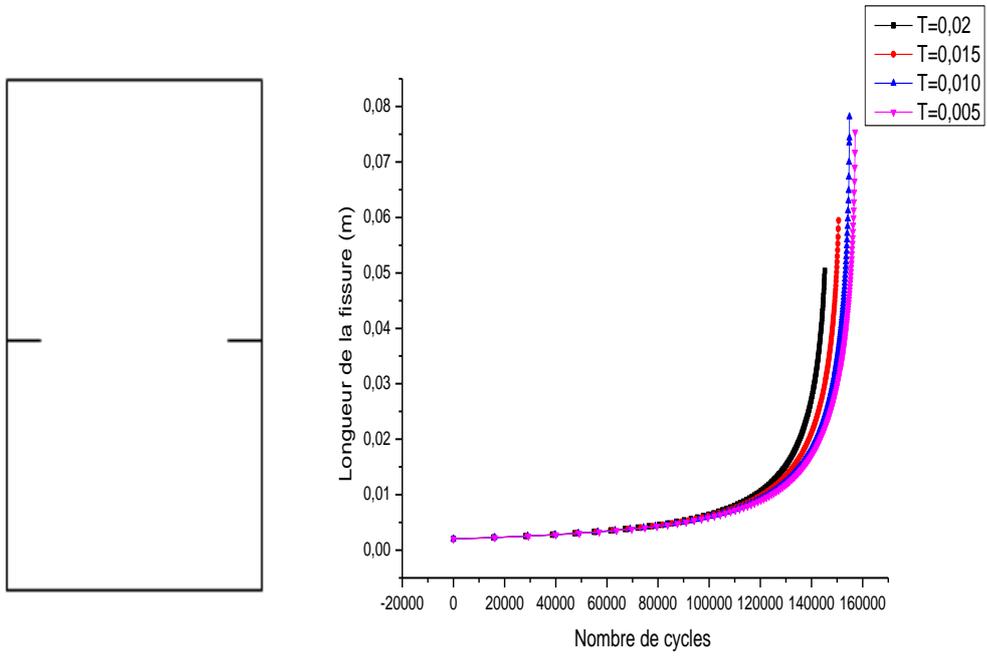
Rapport de charge R	Largeur W(m)	Longueur de la fissure initiale C(m)	L'épaisseur T(m)	Matériau	Module de Young(MPa)
0.1	0.2	0.002	<b>0.020</b>	AL 2024T3	73084.4
0.1	0.2	0.002	<b>0.015</b>	AL 2024T3	73084.4
0.1	0.2	0.002	<b>0.010</b>	AL 2024T3	73084.4
0.41	0.2	0.002	<b>0.005</b>	AL 2024T3	73084.4

### Modèle 1:Fissure centrale

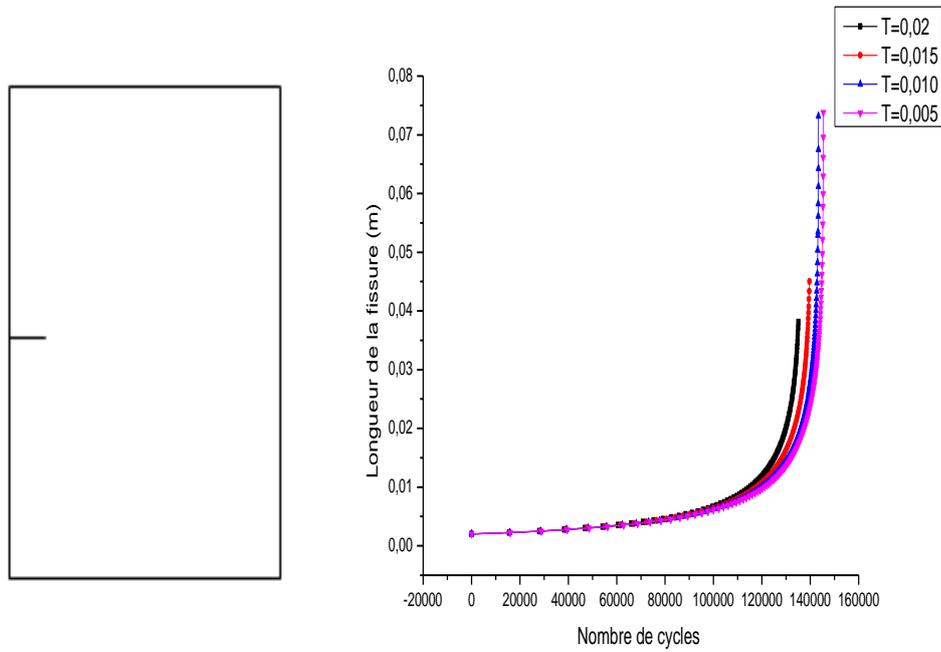


# CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

## Modèle 2: Double fissure latérale

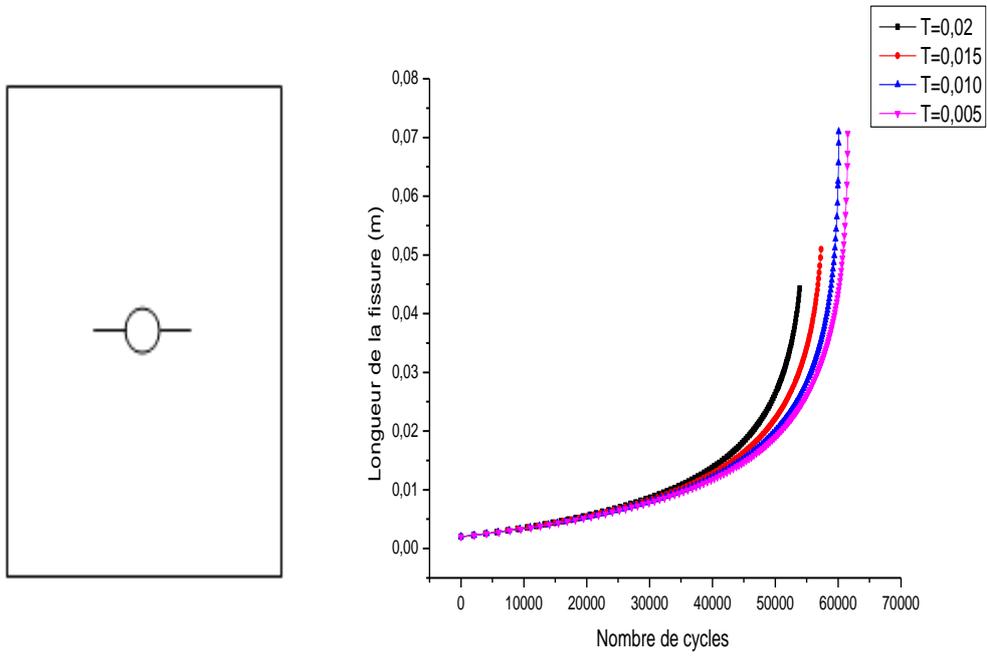


## Modèle 3: fissure latérale

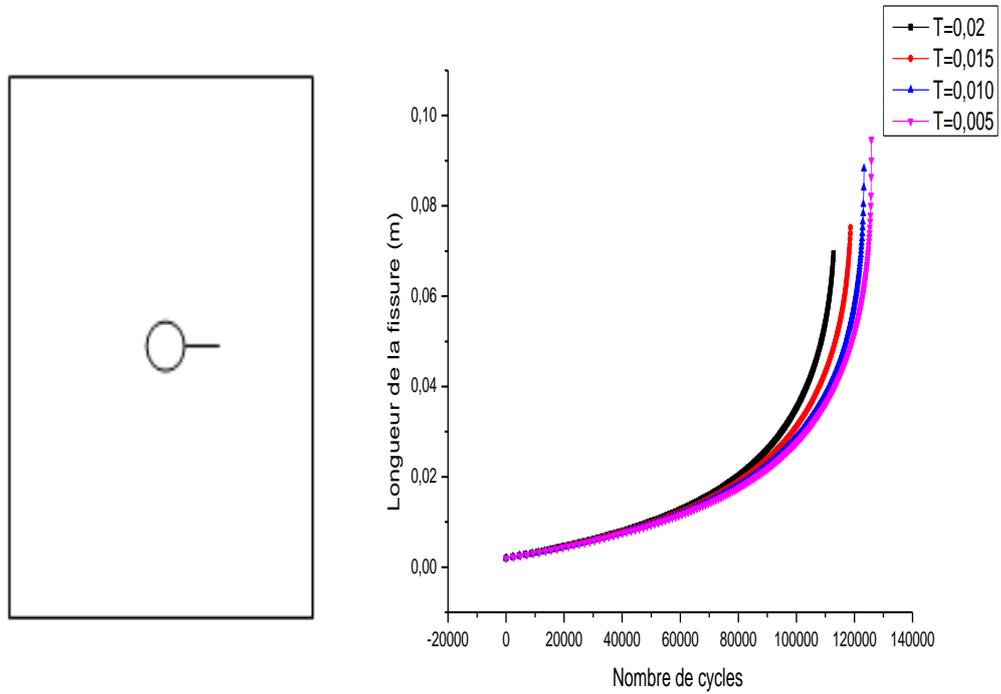


## CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

### Modèle 4: DoubleFissure émanant d'un trou circulaire central



### Modèle 5: Fissure émanant d'un trou circulaire central



### Modèle 6: Fissure émanant d'une entaille latérale semi-circulaire

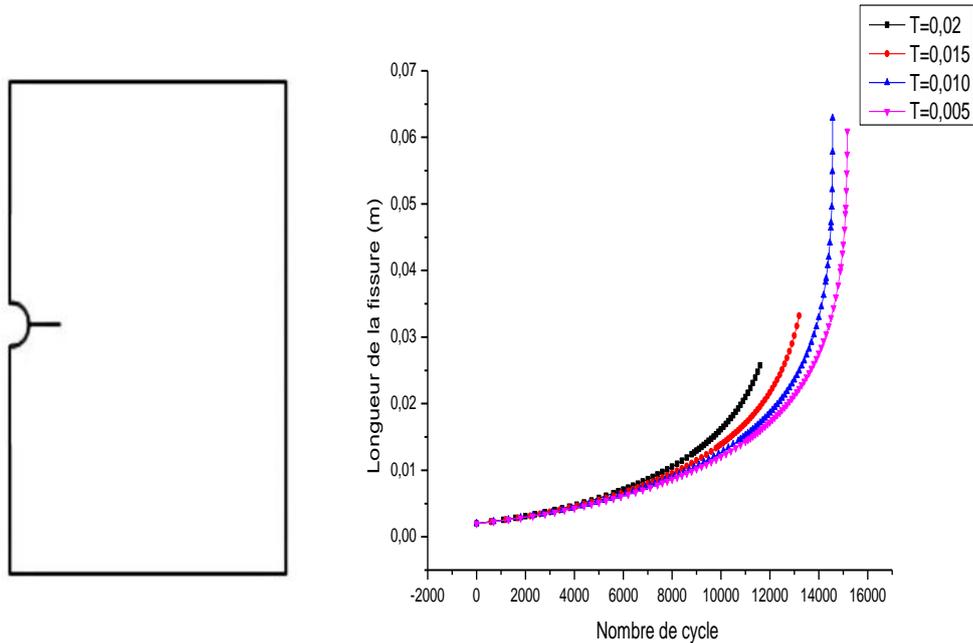


Figure IV.4 : Effet de la variation de l'épaisseur de l'éprouvette sur la propagation de la longueur de fissure pour les différents modèles.

La figure IV.4 montre la variation de la longueur de la fissure avec le nombre de cycles dans des plaques d'épaisseurs différentes.

On remarque que la variation du nombre de cycle est infiniment petite en fonction de la variation de l'épaisseur. Donc on peut dire que la variation de la longueur de la fissure la même quelle que soit l'épaisseur de la plaque.

Si la fissure occupe toute l'épaisseur de la plaque, la propagation vers le bord libre de la plaque se fait de la même façon que soit la dimension de l'épaisseur de la plaque, aussi sa propagation est identique pour tous les modèles géométriques sauf que la valeur du nombre de cycles à la rupture diffère.

#### IV.2.4 Effet de la longueur de la fissure initiale:

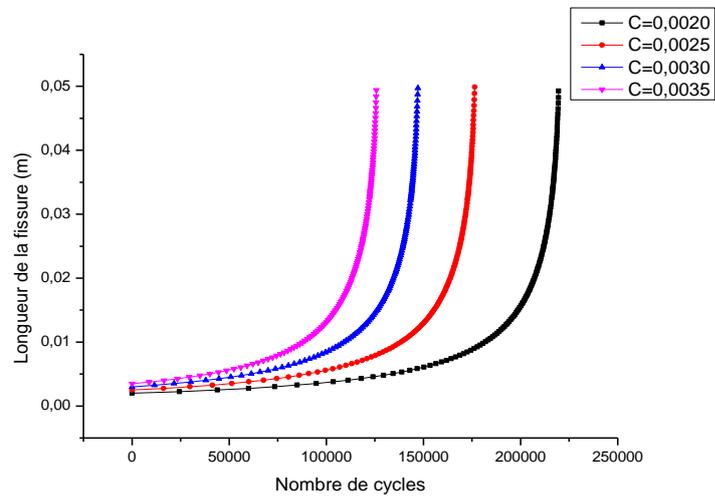
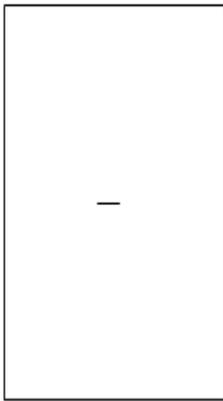
Pour la suite des simulations, nous avons fait des changements à la longueur de la fissure initiale.

## CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

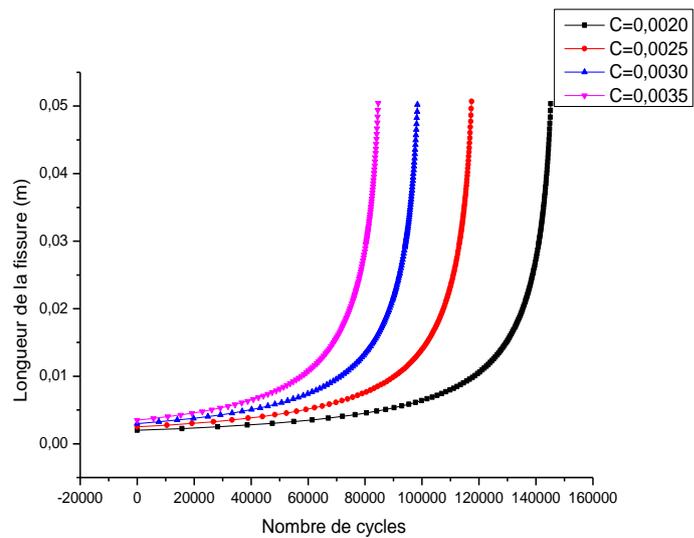
Tableau IV.4 : les différentes longueurs de fissure utilisé dans notre étude

Rapport de charge R	Largeur W(m)	Longueur de la fissure initiale C(m)	L'épaisseur T(m)	Matériau	Module de Young(MPa)
0.1	0.2	<b>0.002</b>	0.02	AL 2024T3	73084.4
0.1	0.2	<b>0.0025</b>	0.02	AL 2024T3	73084.4
0.1	0.2	<b>0.0030</b>	0.02	AL 2024T3	73084.4
0.1	0.2	<b>0.0035</b>	0.02	AL 2024T3	73084.4

### Modèle 1:Fissure centrale

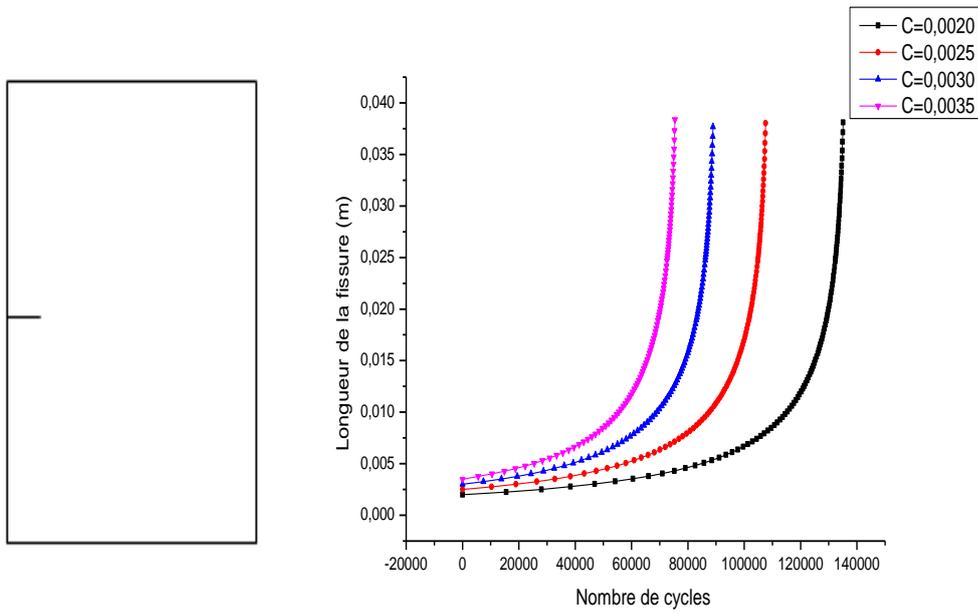


### Modèle 2:Double fissure latérale

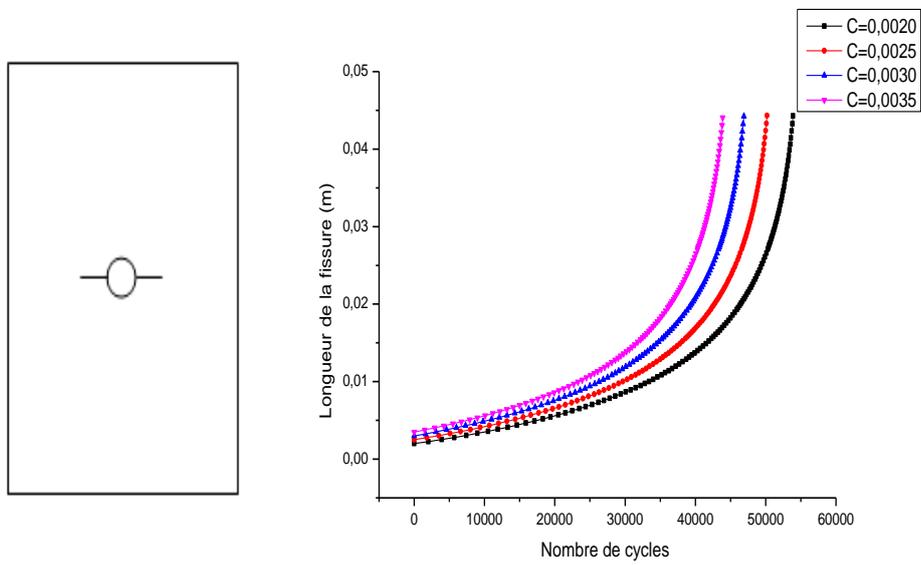


# CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

## Modèle 3: fissure latérale

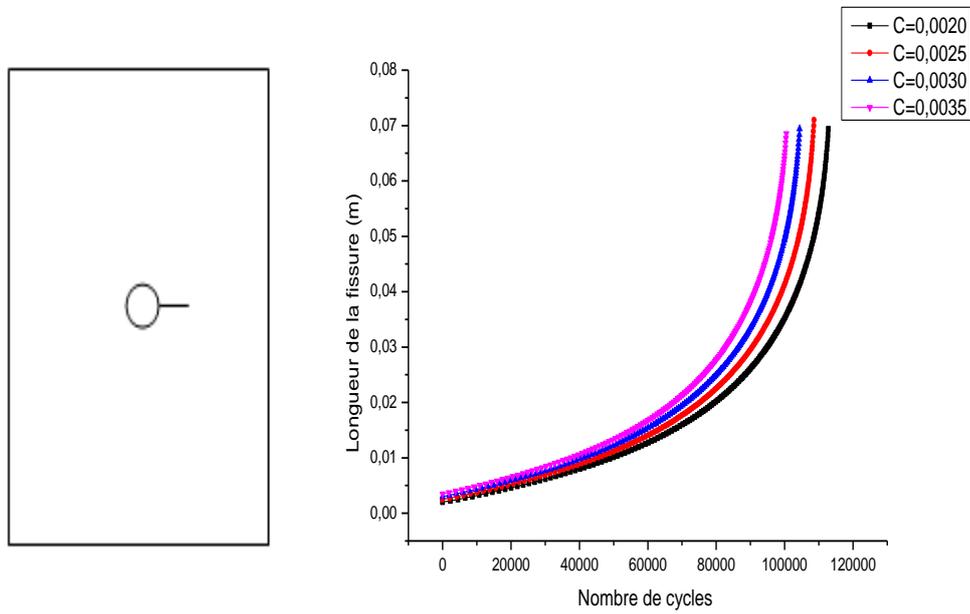


## Modèle 4: DoubleFissure émanant d'un trou circulaire central



## CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

### Modèle 5: Fissure émanant d'un trou circulaire central



### Modèle 6: Fissure émanant d'une entaille latérale semi-circulaire

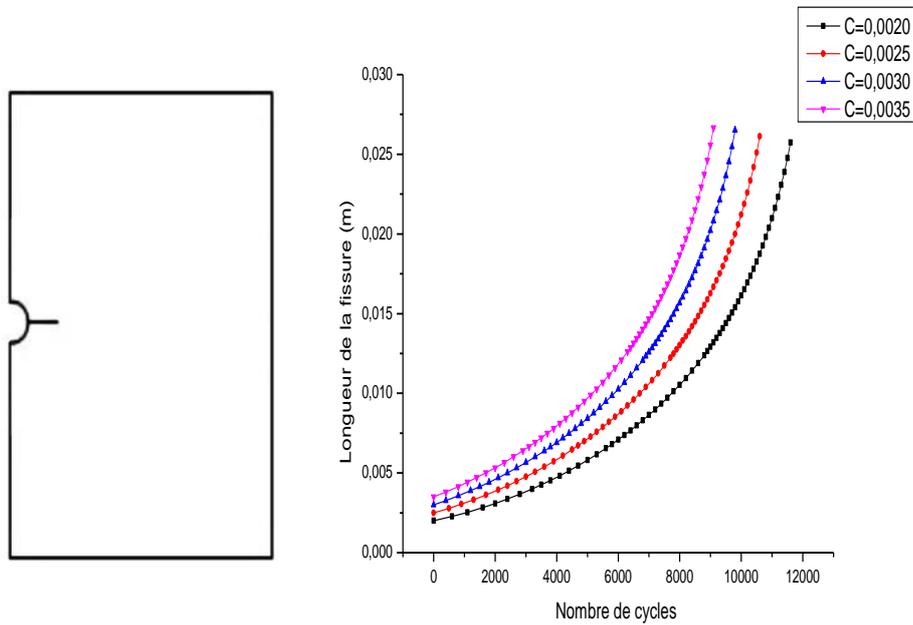


Figure IV.5 : Effet de la longueur de la fissure initiale sur la propagation de la fissure pour les différents modèles

## CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

D'après la figure IV.5, on peut noter que si la longueur de la fissure initiale est importante, le nombre de cycles de fracture est faible, donc la durée de vie de la structure sera limitée par le temps.

Si la longueur de la fissure initiale est importante, la durée de vie de la structure est raccourcie. Le nombre de cycles à la rupture est inversement proportionnel à la longueur de la fissure. Afin de bien voir ces résultats, on a tracé un graphique représente la longueur de la fissure en fonction du nombre de cycles à la rupture (figure IV.6).

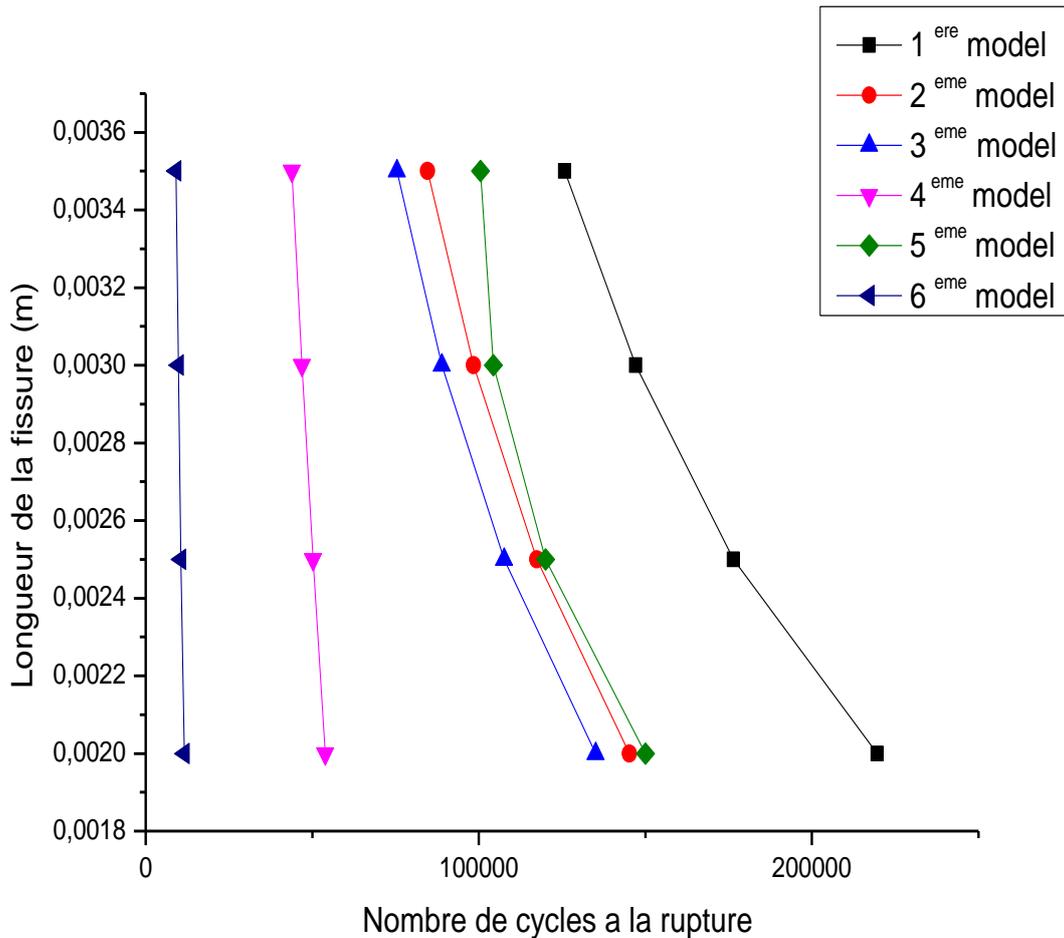


Figure IV.6 : Variation de la fissure initiale en fonction du nombre de cycles à la rupture.

Notez que si la longueur de la fissure initiale est importante, la durée de vie de la structure sera raccourcie. Le nombre de cycles à la rupture est inversement proportionnel à la longueur de la fissure initiale.

## CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

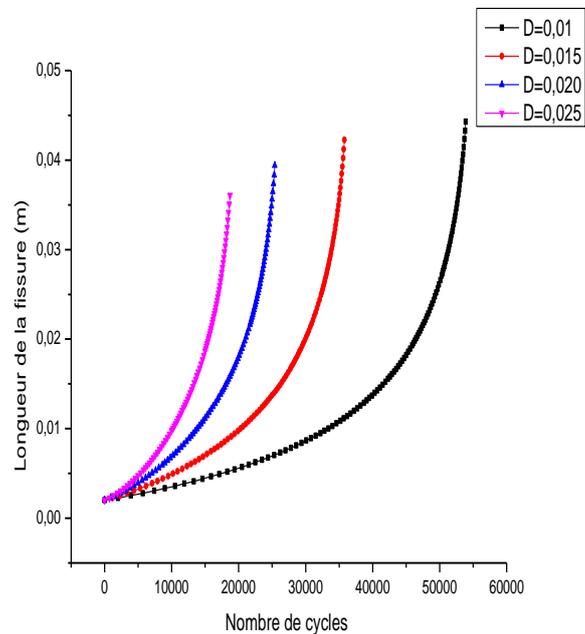
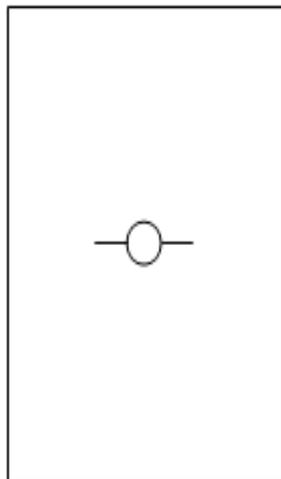
### IV.2.5 Effet de diamètre del'entaille:

Pour cette situation, considérons les deux modèles géométriques illustrés à la figure IV.7. Afin d'étudier l'influence du diamètre de l'entaille sur la propagation de la fissure initiale, le diamètre de l'entaille a été modifié comme indiqué dans le tableau suivant.

**Tableau IV.5** : les différents diamètres d'entailles utilisés dans notre étude.

Rapport de charge R	Diamètre D(m)	Largeur W(m)	Longueur de la fissure initiale C(m)	L'épaisseur T(m)	Matériau	Module de Young(MPa)
0.1	<b>0.010</b>	0.2	0.002	0.02	AL 2024T3	73084.4
0.2	<b>0.015</b>	0.2	0.002	0.02	AL 2024T3	73084.4
0.3	<b>0.020</b>	0.2	0.002	0.02	AL 2024T3	73084.4
0.4	<b>0.025</b>	0.2	0.002	0.02	AL 2024T3	73084.4

**Modèle 4** :DoubleFissure émanant d'un trou circulaire central



## CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

### **Modèle 5 : Fissure émanant d'un trou circulaire central**

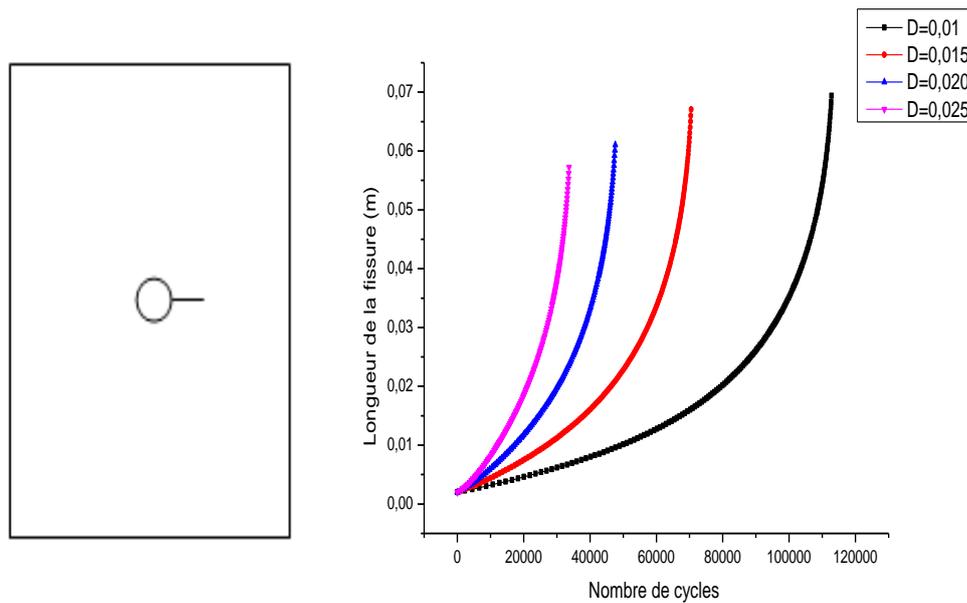


Figure IV.7 : Effet de la variation de diamètre d'entaille sur la propagation de la fissure pour les différents modèles.

On remarque que la variation du nombre de cycles à la rupture en fonction de la longueur de la fissure est identique sauf que les valeurs diffèrent.

Notez que plus la taille du diamètre réduit plus la durée de vie en service de la structure est élevée, par contre c'est la taille du diamètre est élevée la durée de vie de la structure et assez courte, Étant donné que le bord libre est situé près de l'entaille, donnant ainsi à une concentration de contraintes assez élevée.

La fissure se propage rapidement de la fente au bord libre sans rupture brusque. Par contre, pour un petit rayon d'entaille, la fissure se propageant lentement vers le bord libre de la plaque, une rupture ductile se produira.

Afin de voir clairement l'influence du diamètre de l'entaille sur le nombre de cycles à la rupture, la courbe représentée sur la figure IV.8 a été dessinée.

## CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

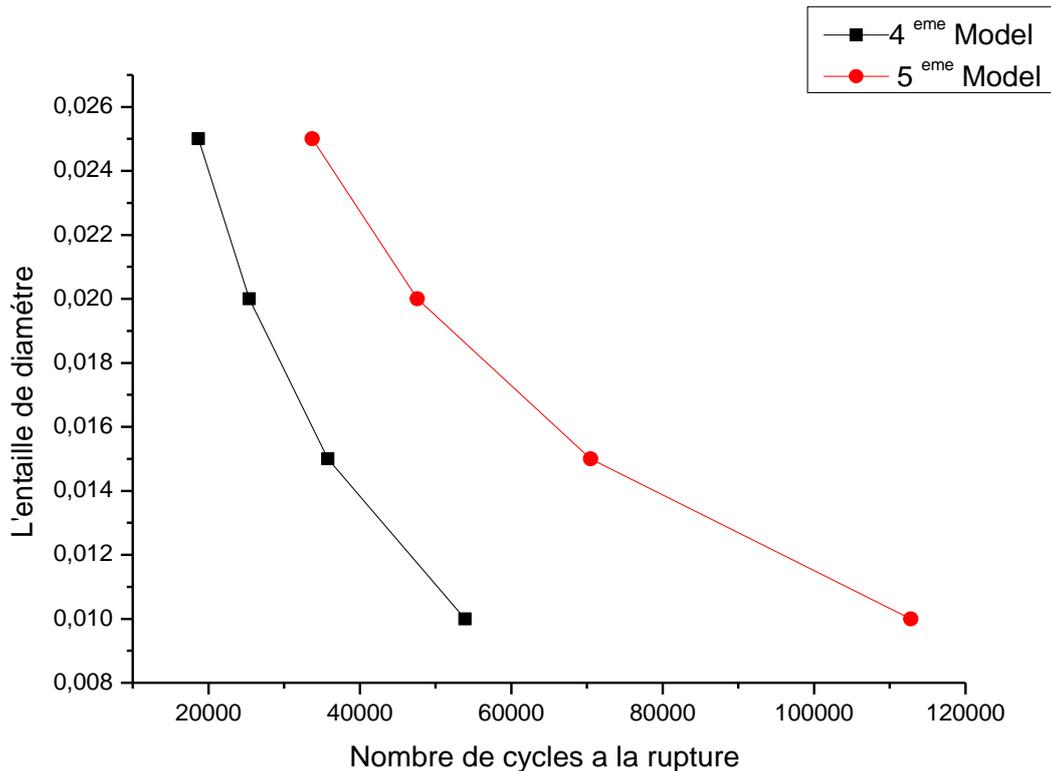


Figure IV.8 : Variation du diamètre de l'entaille en fonction de nombre de cycles à la rupture.

On remarque que le nombre de cycles diminue significativement avec l'augmentation de la taille de l'entaille et de la position de la fissure, donc cette réduction est affectée par la position de la fissure.

### **IV.3 CONCLUSION :**

Nous remarquerons dans les figures de l'influence du matériau sur la propagation de la fissure que la durée de vie de l'acier est supérieure à celle de l'aluminium et magnésium pour les six modèles (les éprouvettes), dont la vitesse de la propagation est plus importante pour l'acier que l'aluminium et magnésium. L'acier étant plus résistant que les autres matériaux et les paramètres de propagation sont très élevés pour l'acier, mais ce comportement est vrai seulement si les conditions de la mécanique linéaire de la rupture (MLR) sont satisfaisantes, c'est-à-dire, lorsque les deux matériaux ont un comportement élastique, dans le cas contraire, ça veut dire que les deux matériaux ont un comportement élasto-plastique, la plastification en tête de fissure créer une zone écrasée au tour de la fissure, ce qui frein l'avancement de la fissure.

## CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

Dans ce type de comportement l'aluminium a une durée de vie plus élevée puisque cette ductilité lui offre des propriétés élasto-plastiques plus importantes que celles de l'acier.

# CONCLUSION GENERALE

# Conclusion générale

Dans cette étude l'objectif de ce présent travail a été consacré à faire une l'analyse numérique, qui porte sur l'influence des plaques fissurées sous chargement cyclique sur le comportement à la rupture.

Dans un premier temps, a permis de fixer le cadre dans lequel s'inscrit notre sujet de recherche. Présente les bases de la mécanique de la rupture nécessaires pour aborder la simulation numérique de propagation de fissure.

En second lieu, concentré sur le principe de base de cette démarche est qu'un corps contenant un défaut initial subit un endommagement progressif lorsque soumis à un chargement cyclique.

Le troisième, nous avons utilisé le code de calcul AFGROW, dans sa version 4.12, qui représente l'un des outils numériques basés sur la propagation des fissures de fatigue et la prévision de la durée de vie, afin de traiter le problème d'une plaque contenant un défaut de différents cas.

Le quatrième et dernier chapitre ont été conduite en vue de simuler la propagation des fissures de fatigue des trois matériaux (Acier M50, Magnésium AM503 et Al 2024T3). Pour des chargements cycliques, de plus on étudie les effets de la nature des matériaux, effets de rapport de charge, effets de la longueur de la fissure, effets d'épaisseur et effets de l'entaille de diamètre. L'analyse des résultats obtenus qui ressortent de l'effet du chargement cyclique se résument comme suites :

- Le magnésium présente une durée de vie assez courte par rapport aux autres matériaux (acier et l'aluminium)
- l'augmentation du rapport de charge a fait augmenter la durée de vie.
- la diminution d'épaisseur a fait augmenter le nombre de cycles à rupture.
- la diminution de la longueur de la fissure a fait augmenter le nombre de cycles à rupture.
- l'augmentation de diamètre de l'entaille a fait diminuer le nombre de cycles à rupture.
- L'augmentation du rapport de charge a fait diminuer la vitesse des fissurations.
- L'augmentation de l'amplitude de chargement a fait diminuer la durée de vie.
- la diminution de l'épaisseur a fait augmenter le nombre de cycles à rupture.
- la diminution de la longueur de la fissure a fait augmenter le nombre de cycles à rupture.
- l'augmentation de diamètre de l'entaille a fait diminuer le nombre de cycles à rupture.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] : ELGUEDJ Thomas. Simulation numérique de la propagation de fissure en fatigue par la méthode des éléments finis étendus : prise en compte de la plasticité et du contact-frottement. Thèse de doctorat de génie mécanique école doctorale : mécanique, énergétique. France 2006
- [2] : HADJI HICHAM, Effets des chargements variables sur la fissuration par fatigue des aciers pour pipelines, diplôme de MASTER, Université AboubakrBelkaïd– Tlemcen, 2016
- [3] : BekkarBaghdad, Etat de l'art sur le comportement en fissuration par fatigue des alliages d'aluminium a durcissement structural, THÈME de master, université Abou bekrbelkaid Tlemcen ,2014
- [4] : DAHAOUI Mourad, EFFET DES PREDEFORMATIONS SUR LE COMPORTEMENT EN FATIGUE DES ALLIAGES D'ALUMINIUM A DURCISSEMENT STRUCTURAL, THÈME de Magistère, université Abou bekrbelkaid Tlemcen, 2013
- [5]: Jacques Besson - SIMULATION DE LA DÉCHIRURE DUCTILE, Centre des Matériaux, Mines ParisTech, 2012.
- [6] : Meslikamel, Lakehal Mohammed El Habib, ETUDE PAR ELEMENTS FINIS DE LA PROPAGATION DE LA FISSURE D'UNE PLAQUE, Mémoire MASTER II ACADEMIQUE, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2019
- [7]: J.P. Faurie, P. Monnier, A. Niku-Lari, – Guide de dessinateur, les concentrateurs de contraintes. Publications CETIM, 2000.
- [8] : O. L. Bowie – Analysis of edge notches in a semi-infinite region, Army Materials and Mechanics Research Center AMRA TR 66-07, June ( 1966).
- [9] : F.I. Baratta, D.M.Neal – Stress concentration factors in U shaped and semi-elliptical edge notches, Journal of Strain Analysis, Vol.5, N°.2, pp 121-27. (1970).
- [10]: C.E. Inglis. – Stress in a plate due to the presence of cracks and sharp corners, Trans. Instn Nav. Archit, Vol.55, pp 219, (1913).
- [11]: M. Isida., On the tension of the strip with semicircular notches, Trans. Japan Soc. Mech. Engrs, Vol. 19, N°.83, pp5, (1953).
- [12]: Peterson R.E. Stress concentration factors, USA, John Willey et Sons, 1974, P: 317.
- [13]: H. Neuber, N.E. Frost, K. Marsh enad L.P. Pook – Effect of stress concentration and cracks on fatigue strength. Metal Fatigue, Ed Oxford U., London W.I, pp 130-200, (1974).
- [14]: R.A. Smith, K.J Miller, – Prediction of fatigue regimes in notched components. Int. J. Mech. Sci., Vol. 20, pp 201-206, (1978).
- [15] : BELABED Abdelmadjid, Analyse des défauts et étude de la fissuration par fatigue dans les soudures d'angles, thème de MASTER, Université Abou BekrBelkaid – Tlemcen, 2017
- [16]: Jia li, Naman Recho, « Méthodes asymptotique en mécanique de la rupture ». Edition Hermès Lavoisier, Paris, 1996

- [17] : BELMOKHTAR Abdelkader, Contribution au développement d'un modèle de propagation pour la prédiction de la durée de vie en fatigue, diplôme en Post-Graduation Magister, Université Abou BekrBelkaid – Tlemcen ,2013.
- [18] : Trudel alexandre, ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA PROPAGATION DE FISSURES DE FATIGUE DANS LA ZONE AFFECTÉE THERMIQUEMENT DE JOINTS SOUDÉS DE ROUES DE TURBINES HYDRAULIQUES, diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées, UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL, 2003
- [19]: Abdulkader ZALT. Endommagement par fatigue et prédiction de la durée de vie des jointe soudés de type caisson, THÈSE Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Lorraine, 2012
- [20]: Achour, Toufik. Étude des techniques de réparation. Constantine : s.n., 2010/2011
- [21] : ABBOUCHI, Houssein. Etude de la fatigue de contact de roulement.Approche expérimentale dans un matériau fragile. s.l. : École Doctorale des Sciences pour l'Ingénieur, 11 décembre 2008.
- [22] : Introduction à la résistance des matériaux Cours RDM / A.U : 2012-2013x
- [23] : Berrehili, Abdelmoutalib. Comportement cyclique et tenue en fatigue sous. s.l. : Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique, 16juin2010.
- [24] : BENDOUBA Mostefa, Etude de la fatigue des structures sous l'effet d'un état de contraintes multiaxiales, THESE de Doctorat, UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES, 2013
- [25]: Miller, K.J. and De Los Rios E.R.The behavior of Short Cracks, Mechanical Engg. Pubs 1980.
- [26]: Newman, J.C. JR, Wu, X. R., Venneri, S.L. and Li, C.G. Small-Crack Effects in High Strength Aluminum Alloys, A NASA/CAE Cooperative Program. NASA Reference Publication 1309. May 1994
- [27]: Gérard, N. Thèse. Université de Tours. 2003
- [28] : Lazzarin P. et al. International Journal of Fatigue. 19. 1997. 647 p.
- [29]: Shin, S. and Smith, R.A. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 1988. 301 p
- [30]: Subra Suresh. Fatigue of Materials.Second Edition.Cambridge University Press.1998.
- [31] :H.P. Lieurade, M. Truchon, J.F. Flavenot (1992) "La prévision de l'amorçage des fissures en fatigue à partir d'entaille" Bulletin SFM, Revue Française de Mécanique.
- [32] :C. Levaillant (1984) : "Approche métallographique de l'endommagement d'aciers inoxydables austénitiques sollicités en fatigue plastique ou en fluage : description et interprétation physique des interactions fatigue-fluage-oxydation" Thèse de doctorat es Sciences Physiques à l'Université de Technologie de Compiègne.

- [33]: Selvie Pommier ' matériaux, mécanique des matériaux) école normale supérieure paris- scalay pp 118-119
- [34] : Forsyth, P. J. E. (1957). Slip-Band Damage and Extrusion. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 242(1229), 198-202. doi:10.1098/rspa.1957.0168
- [35]: Wood, W. A. (1958). Formation of Fatigue Cracks. Phil. Mag, 3, 692-699. Yamada,
- [36]: A. Guedri. " Conception et simulation numérique des caractéristiques mécaniques des pipelines ". Thèse de doctorat, Université de Annaba, (2008).
- [37]: S. Roy Swanson (1974), "Handbook of fatigue testing". American Society of Testing and Materials.
- [38]: 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.
- [39]: S. Suresh, "Fatigue of materials". Cambridge University Press, 1998.
- [40] : Ali Debih, Contribution à l'Etude de la Fatigue des Alliages Légers, Thèse de Doctorat, UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF – 1, 2018
- [41] : Seyed Mohammad SEYEDI « FORMATION, PROPAGATION ET COALESCENCE DANS UN RESEAU DE FISSURES EN FATIGUE THERMIQUE». Thèse Doctorat, 16 février 2004
- [42] : Saverio FIORDALISI, Modélisation tridimensionnelle de la fermeture induite par plasticité lors de la propagation d'une fissure de fatigue dans l'acier 304L, DOCTEUR DE L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE MECANIQUE ET D'AEROTECHNIQUE, 24/11/2014
- [43]: D. Kujawski. "Correlation of long and physically short-crack growth in aluminum alloys", International Journal of Fatigue, 68(12): 1357-1369, 2001.
- [44]: M. Benachour, M. Benguediab, A. Hadjoui, F. Hadjoui, N. Benachour, "Fatigue crack growth of a double fillet weld", Computational Materials Science 44 (2008), pp 489–495.
- [45]: K. Donald, P.C Paris. "An evaluation of  $\Delta K_{eff}$  estimation procedures on 6061-T6 and 2024 T3 aluminum alloys", International Journal of Fatigue, 21: S47–S57, 1999.
- [46]: W. Guo, C.H. Wang, and L.R. Froese, Fatigue Fracture Engineering Materials Structural 22, pp 437-444, (1999).
- [47]: AL. TH. Kermanidis and SP. G. Pantelakis, Fatigue Fracture Engineering Materials Structural 24, pp 679-710, (2001).
- [48]: M. Katcher, M. Kaplan, ASTM STP 559, American Society for Testing and Materials, pp. 264–292, (1974).
- [49]: C.S. Kusko, J.N. Dupont, A.R. Marder, "Influence of Stress Ratio on Fatigue Crack Propagation Behavior of Stainless Steel Welds". Welding Journal, February 2004, 59S-64S, (2004).

- [50]: E.U. Lee, G. Glinka, A.K. Vasudevan, N. Iyyer, N.D. Phan, *International Journal of Fatigue* 31, pp 1858-1864, (2009).
- [51]: Elber, W., 1970. "Fatigue crack closure under cyclic tension". *Engineering Fracture Mechanics*, 2, pp. 37-45.
- [52]: Elber, W., 1971. "The significant of fatigue crack closure". In: *Damage tolerance in aircraft structures*, ASTM STP 486. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, pp. 230-242.
- [53] : R. Cazaud, G. Pomey, P. Rabbe, C. Janssen, "La fatigue des matériaux". Ed. Dunod 1969.
- [54] : MECHERNENE Abderrahim, *Etude du comportement en fatigue des aciers pour Pipelines*, thèse de master, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMCEM, 2013.
- [55]: S. M. Beden, S. Abdullah, A. K. Ariffin, "Review of fatigue crack propagation models for metallic components". *European Journal of Scientific Research*, 28(3), pp.364-397, 2009.
- [56]: Forman, R. G., 1972. "Study of fatigue crack initiation from flaws using fracture mechanics theory". *Engineering Fracture Mechanics*. 4(2), pp. 333–345
- [57]: Klesnil, Lukas, "Effect of stress cycle asymmetry on fatigue crack growth' *Mater. Sci. Engng.* 9 (1972) pp 231-240.
- [58] : 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. Ernst, A. Saxena, D.L. Mc Dowell, eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1992.
- [59]: 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