

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب  
Université -Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département Génie Mécanique



Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
Filière : Génie Mécanique  
Spécialité : Construction Mécanique  
Thème

**Influence du chargement sur la propagation des fissures de fatigue  
dans une plaque réparée par patch composite**

Présenté Par :

- 1) M. DJEMAI Mohamed
- 2) M. BENDOUMA Mohamed Réda

Devant le jury composé de :

Dr Belhamiani Mohamed	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent) Président
Dr Assem Hasen	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent) Examineur
Dr. Bahram kaddour	MCA	UAT.B. B (Ain Temouchent) Encadrant

*Année universitaire 2022/2023*

---

## **Remercîments**

---

### **Remercîments**

Nous souhaitons exprimer nos sincères remerciements à Allah, le Tout-Puissant et Miséricordieux, pour nous avoir accordé la force, la volonté et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail modeste.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué au succès de ce mémoire et qui nous ont apporté leur précieuse aide tout au long de sa rédaction.

En premier lieu, nous aimerions adresser nos remerciements les plus sincères à notre directeur de mémoire, le Dr Bahram Kaddour, pour sa patience, sa disponibilité et ses conseils judicieux qui ont grandement enrichi notre réflexion.

Nous exprimons également notre reconnaissance envers les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail, notamment le Dr. BELHMIANI Mohamed en tant que président du jury et le Dr. Assem Hasen en tant qu'examineur.

Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude envers l'ensemble de nos professeurs du département de génie mécanique pour leur enseignement précieux et leur soutien constant.

## **Dédicace**

Nous dédions humblement ce travail à plusieurs personnes qui ont joué un rôle essentiel dans notre éducation, notre bien-être et notre réussite.

En premier lieu, nos parents méritent une reconnaissance inestimable pour les sacrifices qu'ils ont consentis tout au long de notre parcours éducatif. Leur soutien inconditionnel et leur dévouement sont inégalables. Que Dieu les protège et les préserve.

Nous exprimons également notre profonde gratitude envers notre famille et nos chers amis, qui nous ont soutenus durant les moments les plus difficiles. Leur présence et leur encouragement ont été une source de réconfort et de motivation inestimable.

Nous tenons à remercier chaleureusement tous nos formateurs ainsi que l'équipe pédagogique et administrative du département de Génie Mécanique. Leur soutien constant et leur dévouement envers les étudiants ont joué un rôle essentiel dans notre formation.

Enfin, nous souhaitons exprimer notre reconnaissance envers toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à notre développement et à notre formation. Leurs conseils, leur expertise et leur inspiration ont enrichi notre parcours académique de manière significative.

## **Résumé**

L'objectif principal de cette étude est d'analyser la manière dont les fissures de fatigue se propagent dans une structure réparée par patch composite en fonction de différentes conditions de chargement.

La première partie de ce travail de recherche est consacrée à une revue de littérature qui examine les études précédentes sur les mécanismes de propagation des fissures de fatigue dans les matériaux composites et les techniques de réparation utilisant des patches composites.

Dans la deuxième partie de l'étude, nous utilisons la simulation avec AFGROW pour étudier l'impact du chargement sur la propagation des fissures de fatigue. Nous prenons en compte des facteurs tels que le type de chargement (constant ou variable), le taux de surcharge, ainsi que l'effet d'une simple surcharge ou d'un bloc de surcharge. Les résultats obtenus nous permettent d'identifier les conditions de chargement critiques et de développer des stratégies de réparation plus efficaces pour les structures aéronautiques.

Mots clés :

Structure réparée-Patch composite-Chargement-AFGROW-Surcharge

## ***Abstract***

---

### **Abstract**

The main objective of this study is to analyze the propagation of fatigue cracks in a structure repaired with a composite patch under different loading conditions.

The first part of this research work is dedicated to a literature review that examines previous studies on the mechanisms of fatigue crack propagation in composite materials and the repair techniques using composite patches.

In the second part of the study, we utilize AFGROW simulation to investigate the impact of loading on fatigue crack propagation. We consider factors such as the type of loading (constant or variable), the overload rate, and the effect of a single overload or a block overload. The obtained results allow us to identify critical loading conditions and develop more effective repair strategies for aerospace structures.

Repaired structure - Composite patch - Loading - AFGROW - Overload

## الملخص

الهدف الرئيسي لهذه الدراسة هو تحليل انتشار تشققات الإجهاد في هيكل تم إصلاحه بواسطة قطعة مركبة تصلحية تحت ظروف تحميل مختلفة.

الجزء الأول من هذا العمل البحثي مكرس لمراجعة الأدبية التي تستعرض الدراسات السابقة حول آليات انتشار تشققات الإجهاد في المواد المركبة وتقنيات الإصلاح باستخدام قطع مركبة تصلحية.

في الجزء الثاني من الدراسة، نستخدم محاكاة AFGROW لاستقصاء تأثير التحميل على انتشار تشققات الإجهاد. ننظر في عوامل مثل نوع التحميل (ثابت أو متغير) ومعدل الزيادة الزائدة وتأثير زيادة واحدة أو زيادة مجموعة. النتائج التي تم الحصول عليها تمكننا من تحديد ظروف التحميل

الحرارة وتطوير استراتيجيات إصلاح أكثر فاعلية لهياكل الطيران.

الهيكل المُصلح - الشريحة المركبة -  
التحميل - AFGROW - الحمل الزائد

## **Table des matières**

<b>Remerciement</b>	
<b>Dédicace</b>	
<b>Résumé</b>	
<b>Abstract</b>	
<b>الملخص</b>	
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur la mécanique de la rupture</b>	
I.1 Approche globale de la mécanique de la rupture : .....	4
I.2 Mode de fissuration en fatigue : .....	4
I.3 Méthodes d'évaluation de la fatigue : .....	5
I.4 Les méthodes analytiques pour prédire la durée de vie en fatigue des structures : .....	7
I.4.1 Approche de la contrainte maximale : .....	7
I.4.2 Approche de la contrainte moyenne : .....	7
I.4.3 Approche des dommages cumulatifs : .....	7
I.5 Champ de contraintes au niveau de la pointe de la fissure : .....	8
I.6 ZONE PLASTIQUE AU NIVEAU DE LA POINTE DE LA FISSURE : .....	9
I.7 Domaines de fissuration : .....	11
I.8 Paramètres influençant la fissuration par fatigue : .....	15
I.9 Modèle de propagation à amplitude constante : .....	17
I.9.1 Modèle de Paris : .....	17
I.9.2 Modèle de Walker : .....	18
I.9.3 Modèle de Forman .....	19
I.9.4 Modèle de Baptista : .....	19
I.9.5 Modèle d'Elber basé sur la fermeture de la fissure : .....	20
I.9.6 Modèle de Forman : .....	21
I.10 Effet de retard de propagation des fissures après application d'une surcharge : .....	22
I.10.1 Effet du rapport de charge et fermeture de fissure : .....	23
I.11 Effet de l'amplitude de chargement : .....	29
I.12 La fissuration sous chargement d'amplitude variable : .....	31
I.12.1 Modèles décrivant la propagation à amplitude variable : .....	32
I.12.2 Le modèle de Willenborg : .....	33



## **Table des matières**

---

### **Chapitre II : Généralités sur le chargement en fatigue**

II.1 Les différents types de surcharge : .....	37
II.2 Cas d'une sous charge : .....	40
II.3 Surcharges multiples : .....	41
II.4 Effets combinés : .....	42
II.5 Analyse phénoménologique de l'influence d'une surcharge sur le comportement d'une fissure de fatigue : 43	
II.6 Le nombre de cycles de retard $N_d$ : .....	46
II.7 La longueur de fissure affectée par le retard $a_d$ : .....	46
II.8 La vitesse minimale $(da/dN)_{min}$ atteinte après surcharge et sa longueur de fissure associée $a_{min}$ : .....	47
II.9 Les mécanismes qui peuvent expliquer le retard : .....	47

### **Chapitre III : Généralité sur les patchs composites**

III.1 Définition du patch composite : .....	50
III.2 La fabrication des patchs composites : .....	50
III.3 Le principe de fonctionnement des patchs : .....	55
III.4 Caractéristiques et propriétés des patchs : .....	56
III.5 Applications des patchs dans l'industrie : .....	57
III.6 La réparation des patchs composites : .....	58
III.7 La réparation par patchs composites : .....	59
III.8 Procédures et techniques de réparation : .....	60
III.9 Limitations et défis de la réparation par patch composite : .....	61
III.10 Le comportement des patchs composites en fatigue : .....	62
III.11 Effets de la fatigue sur les patchs composites : .....	63

### **Chapitre IV : Simulation numérique**

IV.1 Présentation du logiciel : .....	66
IV.2 Présentation du matériau étudié : .....	67
IV.3 Présentation du modèle géométrique : .....	68
IV.4 Influence du rapport de charge : .....	71
IV.5 Influence de la réparation : .....	73
IV.5.1 Sur la propagation des fissures : .....	73
IV.5.2 Sur la vitesse de propagation des fissures : .....	75
IV.6 Influence de l'application de la surcharge sur la propagation des fissures : .....	76

## **Table des matières**

---

IV.6.1 Éprouvette non réparée : .....	76
IV.6.2 Éprouvette réparée : .....	79
IV.7 Influence du taux de surcharge :.....	81
IV.7.1 Sur la propagation des fissures : .....	82
IV.7.2 Sur la vitesse de propagation des fissures : .....	85
<b>Conclusion générale :</b> .....	<b>88</b>
<b>Référence bibliographe :</b> .....	<b>90</b>

## Liste des figures

Figure 1 : Les modes de rupture .....	5
Figure 2 : Fissure en mode I - État de contrainte au niveau de la pointe de la fissure.....	9
Figure 3 : Distribution des contraintes en pointe de fissure (Zone plastique) .....	11
Figure 4 : Évolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de cycle appliqué .....	13
Figure 5 : Stades de fissuration .....	14
Figure 6 : Effet du rapport de charge R sur la propagation d'une fissure de fatigue .....	16
Figure 7: Domaine d'application de la loi de Paris .....	18
Figure 8 : Effet du rapport de charge sur la durée de vie en fatigue du 2024 T351 .....	23
Figure 9 : Effet du rapport de charge sur la vitesse de fissuration du 2024 T351 .....	24
Figure 10 : Courbes de propagation des fissures de fatigue.....	25
Figure 11 : Vitesse de fissuration $da/dN-\Delta K$ à différent rapport de charge .....	26
Figure 12 : Vitesse de fissuration expérimentale de l'alliage 7075 T6.....	27
Figure 13 : Vitesse de fissuration de l'alliage d'aluminium 2618 sous l'effet de rapport de charge.....	28
Figure 14 : Effet du rapport de charge et l'amplitude de chargement sur la vitesse de fissuration de l'alliage d'aluminium 2024 T3 .....	29
Figure 15 : Effet de l'amplitude de chargement sur la durée de vie à $R=0,1$ [37] .....	30
Figure 16 : Effet de l'amplitude de chargement sur la vitesse de fissuration à $R=0,1$ [37] .....	31
Figure 17 : Willenborg retardation model [39] .....	35
Figure 18 : schématisation des retards après application des surcharges [38].....	39
Figure 19 : Évolution du niveau d'ouverture et de la longueur de la fissure pendant un chargement par blocs [40].....	42
Figure 20: Description phénoménologique de l'effet d'une surcharge .....	44
Figure 21 : Principes d'une réparation par patch composite.....	50
Figure 22 : Moulage par transfert de résine (RTM) [47].....	52
Figure 23 : Le moulage par injection de résine liquide RTM (Resin Transfert Molding) [48] .....	53
Figure 24 : : Le laminage à plat fabrication manuelle [48] .....	54
Figure 25 : Procédé d'enroulement filamentaire .....	54
Figure 26 : Interface du logiciel AFGROW .....	66
Figure 27 : Model géométrique .....	69
Figure 28 : Présentation de la réparation .....	70
Figure 29: Présentation des orientations des fibres.....	70
Figure 30 : Avancée de fissure en fonction de nombre de cycle .....	72
Figure 31 : l'effet du rapport de charge sur la vitesse de propagation des fissures.....	73
Figure 32 :influence de la réparation sur la durée de vie .....	74
Figure 33 : influence de la réparation la vitesse de propagation des fissures .....	76
Figure 34 : influence d'une simple surcharge sur la durée de vie.....	77
Figure 35 : influence d'une simple surcharge sur la vitesse de fissuration .....	78
Figure 36 : Figure après application de surcharge (éprouvette réparée) .....	79

## **Liste des figures**

---

<b>Figure 37: Variation de la vitesse de fissuration en fonction du facteur d'intensité de contrainte après application de surcharge (éprouvette réparée) .....</b>	<b>80</b>
<b>Figure 38 : non réparée.....</b>	<b>82</b>
<b>Figure 39: Fissure réparée .....</b>	<b>83</b>
<b>Figure 40 : Sur éprouvette réparer .....</b>	<b>85</b>
<b>Figure 41 : Fissure réparée.....</b>	<b>86</b>

**Liste des tableaux**

---

**Liste des tableaux**

<b>Tableau 1 : Présentation du matériau à étudier (aluminium, 2024-T861).....</b>	<b>67</b>
<b>Tableau 2 : propriétés mécaniques de l'adhésive .....</b>	<b>68</b>
<b>Tableau 3 : propriétés mécaniques du patch .....</b>	<b>68</b>
<b>Tableau 4 : Les rapports de charge .....</b>	<b>71</b>

## Liste des abréviations

$\sigma_e$ :	La limite d'élasticité du matériau
C :	Taux de croissance de la fissure de Paris constant,
$K_{eff}$ :	Facteur d'intensité de contrainte efficace
$K_I$ :	Le facteur d'intensité de contrainte en mode I
$\Delta K$ :	Facteur d'intensité de contrainte
$\Delta K_{seuil}$ :	Facteur d'intensité de contrainte de seuil
$da/dN$ :	La vitesse de propagation
K :	Facteur d'intensité
$K_{max}$ :	Le facteur d'intensité de contrainte maximale
$K_{min}$ :	Le facteur d'intensité de contrainte minimum
KIC :	La ténacité du matériau
R :	Rapport de charge
$K_{crit}$ :	Facteurs d'intensité de contrainte critique
$da/dN$ :	Le taux de propagation de la fissure
a :	La longueur de la fissure,
N :	Nombre de cycles à la rupture
w :	La largeur de l'éprouvette
E :	Le module de Young
$R_e$ :	Résistance élastique du matériau
$\nu$ :	Coefficient de poisson
p et q :	Des coefficients empiriques qui déterminent la courbure de la courbe de taux de croissance dans les régions de la queue.
EL/ET :	Le module élastique dans la direction longitudinale et transversale

## **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

### **Introduction générale**

Les patchs composites sont des matériaux composites qui sont fabriqués en combinant des fibres de carbone, de verre ou d'autres matériaux renforcés avec une résine époxy ou autre matériau de liaison. Les patchs composites sont souvent utilisés pour renforcer des structures endommagées ou pour améliorer la résistance mécanique d'une structure existante[1, 2].

Le domaine d'utilisation des patchs composites est vaste et en constante évolution. Les patchs composites sont couramment utilisés dans l'industrie aéronautique, automobile et nautique pour renforcer les structures en matériaux composites et en métaux légers. Ils sont également utilisés dans d'autres domaines tels que la construction de ponts, de bâtiments et de pipelines pour renforcer les structures et prolonger leur durée de vie[2, 3].

La réparation des patchs composites est essentielle pour maintenir la fiabilité et la sécurité des structures renforcées. Les méthodes de réparation de composites sont utilisées pour retirer la partie endommagée de la structure, préparer la surface et installer un patch composite pour renforcer la zone réparée. Les méthodes de réparation par patchs et de réparation par infusion sont souvent utilisées pour la réparation de structures renforcées avec des patchs composites[4-6].

Cependant, les patchs composites sont également soumis à des sollicitations en fatigue, qui peuvent causer des dommages au fil du temps. Les sollicitations en fatigue sont une source de dégradation progressive des matériaux sous les contraintes cycliques. Les patchs composites peuvent être soumis à des charges cycliques telles que les vibrations, les chocs, les cycles thermiques, etc., ce qui peut entraîner des fissures et des défaillances. Il est donc important de surveiller la condition des patchs composites et de réparer rapidement les dommages pour éviter une défaillance catastrophique[7-9].

L'avenir de la réparation de patchs composites est prometteur, car les avancées technologiques permettent de développer de nouvelles méthodes pour améliorer la



## ***Introduction générale***

---

résistance et la fiabilité des structures renforcées. Les technologies telles que l'impression 3D et l'utilisation de matériaux plus résistants pour les patchs composites sont en cours d'étude pour améliorer leur performance en matière de réparation de structures endommagées. De plus, l'utilisation de capteurs pour surveiller en temps réel la santé des structures renforcées avec des patchs composites est également une piste de recherche prometteuse pour assurer la sécurité et la durabilité des structures renforcées[10-12].

La problématique de cette étude est donc de comprendre comment les fissures de fatigue se propagent dans une plaque réparée par patch composite sous différentes conditions de chargement pour améliorer la durabilité des réparations par patch composite dans les structures aéronautiques. L'objectif principal est de développer des stratégies de réparation plus efficaces pour les structures aéronautiques en identifiant les conditions de chargement critiques pour la propagation des fissures de fatigue dans une plaque réparée par patch composite[4, 13, 14].

Pour atteindre cet objectif, cette étude comprendra une revue de la littérature pour comprendre les mécanismes de propagation des fissures de fatigue dans les matériaux composites et les méthodes de réparation par patch composite. Ensuite, une simulation numérique avec AFGROW sera réalisée pour étudier l'influence du chargement sur la propagation des fissures de fatigue dans une plaque réparée par patch composite. Cette simulation permettra d'identifier les conditions de chargement critiques pour la propagation des fissures de fatigue et de développer des stratégies de réparation plus efficaces pour les structures aéronautiques.

## **Chapitre I**

### **Généralités sur la mécanique de la rupture**

### **I.1 Approche globale de la mécanique de la rupture :**

La mécanique de la rupture est une branche de la mécanique des matériaux qui s'intéresse à la manière dont les matériaux se cassent ou se déforment de manière permanente sous l'effet de contraintes appliquées. L'approche globale de la mécanique de la rupture consiste à étudier les propriétés globales d'un matériau plutôt que les propriétés locales[15].

Cette approche prend en compte plusieurs paramètres pour caractériser la résistance à la rupture d'un matériau, tels que la ténacité, la ductilité et la fragilité. La ténacité est la capacité d'un matériau à résister à une fissuration, tandis que la ductilité est sa capacité à se déformer de manière permanente avant de se rompre. La fragilité, quant à elle, représente la tendance d'un matériau à se rompre de manière brusque et sans avertissement[15].

L'approche globale de la mécanique de la rupture est largement utilisée dans l'industrie pour concevoir des structures et des produits qui résistent aux forces et aux contraintes appliquées. Les ingénieurs peuvent ainsi prédire la résistance d'un matériau à la rupture en utilisant des modèles mathématiques et des simulations informatiques avancées, ce qui permet de minimiser les risques de défaillance et d'accident[6].

### **I.2 Mode de fissuration en fatigue :**

1. Mode I : Le mode de fissuration par fatigue de type I se produit lorsque la fissure se propage perpendiculairement à la surface de la pièce. Ce mode de fissuration est souvent associé à des contraintes de traction dans la direction de la fissure. Dans ce mode, la fissure se propage en ouvrant la surface de la pièce, séparant les deux bords de la fissure en des directions opposées. Les matériaux à haute résistance à la traction ont tendance à subir une fissuration par fatigue de type I, car ils ont une plus grande résistance à l'étirement qu'à la compression[7].

2. Mode II : Le mode de fissuration par fatigue de type II se produit lorsque la fissure se propage parallèlement à la surface de la pièce, avec une composante de cisaillement. Dans ce mode, les deux bords de la fissure glissent les uns contre les autres, ce qui provoque une déformation de cisaillement. Ce mode de fissuration est souvent associé à des contraintes de cisaillement dans la direction de la fissure, et est plus commun dans les matériaux ductiles[7].
3. Mode III : Le mode de fissuration par fatigue de type III se produit lorsque la fissure se propage à un angle oblique par rapport à la surface de la pièce. Dans ce mode, les bords de la fissure subissent une torsion, ce qui peut provoquer une déformation en torsion. Ce mode de fissuration est souvent associé à des contraintes de torsion dans la direction de la fissure[7].

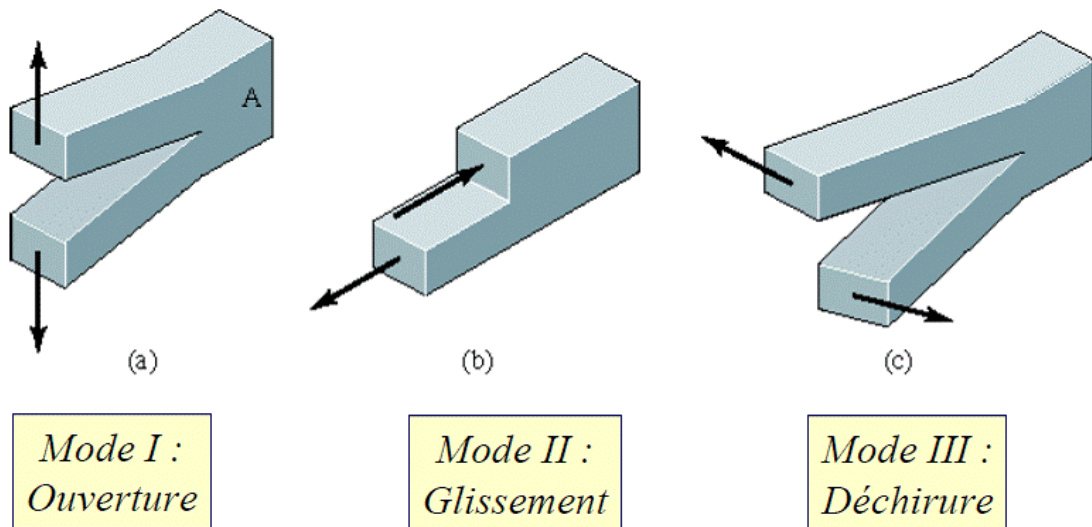


Figure 1 : Les modes de rupture

### I.3 Méthodes d'évaluation de la fatigue :

Il existe plusieurs méthodes d'évaluation de la fatigue, chacune ayant ses propres avantages et inconvénients. Voici quelques-unes des méthodes les plus courantes[16] :

- *Essais de fatigue en laboratoire* : Les essais de fatigue en laboratoire sont généralement effectués sur des échantillons de matériaux pour évaluer leur

---

résistance à la fatigue. Les échantillons sont soumis à des cycles de contraintes répétés jusqu'à ce qu'une fissure se développe. Les données recueillies au cours de ces essais permettent de déterminer les propriétés de fatigue du matériau, telles que la durée de vie en fatigue, les seuils de fissuration, etc. Les essais de fatigue sont généralement effectués selon les normes internationales pour assurer la reproductibilité des résultats.

- **Modélisation numérique** : La modélisation numérique est utilisée pour prédire le comportement en fatigue des structures et des composants en utilisant des logiciels de simulation. Cette méthode permet de simuler différentes conditions de chargement et de conception, ce qui permet de déterminer la durée de vie en fatigue et les seuils de fissuration. La modélisation numérique est souvent utilisée pour optimiser la conception des structures et des composants, ainsi que pour réduire les coûts et les temps d'essais.
- **Méthodes analytiques** : Les méthodes analytiques sont basées sur des équations mathématiques pour prédire la durée de vie en fatigue des structures et des composants. Ces équations prennent en compte les contraintes, les cycles de chargement et les propriétés des matériaux pour prédire la durée de vie en fatigue. Les méthodes analytiques sont souvent utilisées pour évaluer rapidement le comportement en fatigue des structures et des composants.
- **Inspections visuelles et non destructives** : Les inspections visuelles et non destructives sont utilisées pour détecter les fissures et les défauts dans les structures et les composants. Ces inspections peuvent être effectuées sur des échantillons de matériaux ou sur des composants en service pour surveiller leur comportement en fatigue. Les inspections visuelles et non destructives sont souvent utilisées pour évaluer l'intégrité des structures et des composants en service.

#### **I.4 Les méthodes analytiques pour prédire la durée de vie en fatigue des structures :**

##### **I.4.1 Approche de la contrainte maximale :**

Cette approche consiste à déterminer la contrainte maximale subie par la structure en utilisant des équations de contrainte-déformation, qui décrivent comment la structure réagit à une charge appliquée. La contrainte maximale est ensuite comparée à la limite de fatigue du matériau de la structure pour déterminer le nombre de cycles de charge que la structure peut supporter avant de se rompre. La limite de fatigue est déterminée par des essais en laboratoire sur des échantillons de matériau, et elle dépend de nombreux facteurs tels que la composition chimique, la microstructure et la température du matériau.

##### **I.4.2 Approche de la contrainte moyenne :**

Cette approche prend en compte à la fois la contrainte maximale et la contrainte moyenne subies par la structure. Elle est souvent utilisée pour les structures soumises à des charges de fatigue variables, telles que les pièces de machines tournantes. La contrainte moyenne est calculée en prenant la moyenne des contraintes appliquées sur une période donnée, tandis que la contrainte maximale est déterminée comme dans l'approche de la contrainte maximale. La relation entre la contrainte maximale et la contrainte moyenne est utilisée pour prédire le nombre de cycles de charge que la structure peut supporter avant de se rompre.

##### **I.4.3 Approche des dommages cumulatifs :**

Cette approche consiste à calculer le cumul des dommages subis par la structure au fil du temps, en utilisant une relation entre les contraintes appliquées et les dommages causés. Cette relation est souvent représentée par une courbe S-N, qui montre la résistance à la fatigue du matériau en fonction du nombre de cycles de charge. Les dommages cumulatifs sont calculés en multipliant le nombre de cycles de charge par le facteur de dommage pour chaque cycle. Le facteur de dommage est déterminé par la relation entre

la contrainte appliquée et la résistance à la fatigue du matériau, ainsi que par des facteurs tels que la taille de la fissure et la tension résiduelle[17].

### **I.5 Champ de contraintes au niveau de la pointe de la fissure :**

Au niveau de la pointe d'une fissure dans un matériau, le champ de contraintes est très complexe. La zone autour de la fissure est soumise à des contraintes très élevées, qui sont concentrées dans une petite région appelée la pointe de la fissure.

Le champ de contraintes autour de la pointe de la fissure est caractérisé par une augmentation rapide des contraintes en se rapprochant de la pointe de la fissure. Cette augmentation rapide des contraintes est appelée l'effet de concentration de contraintes, qui peut entraîner une fissuration progressive du matériau[17].

Dans la zone de contraintes élevées autour de la pointe de la fissure, le matériau peut subir une déformation importante, voire même une déformation plastique, ce qui peut entraîner une réduction de la résistance du matériau. Si la fissure atteint une certaine taille critique, la résistance résiduelle du matériau ne peut plus supporter les contraintes appliquées, ce qui peut conduire à une rupture catastrophique[18].

Le champ de contraintes au niveau de la pointe de la fissure est donc un paramètre clé pour comprendre le comportement de la rupture des matériaux. Les ingénieurs doivent prendre en compte cet effet de concentration de contraintes lors de la conception de structures et de produits pour éviter les défaillances prématurées. Des méthodes telles que la mécanique de la rupture linéaire et non-linéaire peuvent être utilisées pour caractériser le champ de contraintes au niveau de la pointe de la fissure et prédire le comportement de la rupture des matériaux[18].

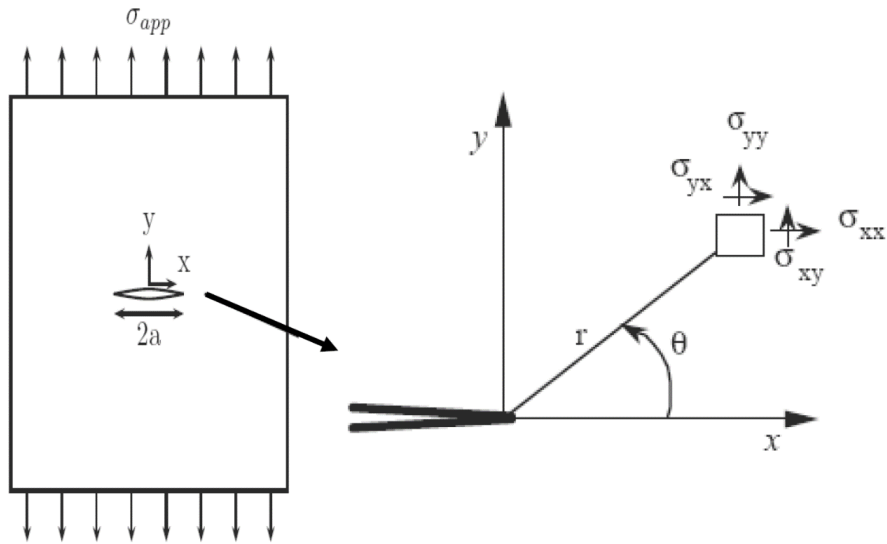


Figure 2 : Fissure en mode I - État de contrainte au niveau de la pointe de la fissure

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

Où

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

### I.6 ZONE PLASTIQUE AU NIVEAU DE LA POINTE DE LA FISSURE :

La mécanique de la rupture linéaire prédit des contraintes infinies à l'extrémité d'une fissure aiguë. Cependant, dans les métaux réels, les contraintes à l'extrémité d'une fissure restent finies car le rayon en fond de fissure n'est pas nul. Ces contraintes peuvent



dépasser la limite élastique du matériau, ce qui peut entraîner une déformation plastique et une relaxation des contraintes à l'extrémité de la fissure[17, 18].

Pour calculer la contrainte normale en contraintes planes en un point situé à une distance  $r$  de la pointe d'une fissure sollicitée en mode I ( $\theta=0$ ), on peut utiliser l'équation suivante :

$$\sigma_1 = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (2)$$

Selon l'hypothèse d'une zone plastifiée circulaire (Figure 3) proposée par Irwin [4], le rayon de la zone plastifiée peut être défini en utilisant l'équation suivante :

$$r_p = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_y^2} \quad (3)$$

La forme et la taille de la zone plastifiée sont largement influencées par l'état de contraintes appliqué sur le matériau. Dans le cas d'un état de déformation plane, Irwin propose la forme suivante pour la zone plastifiée :

$$r_p = \frac{K_I^2}{6\pi\sigma_y^2} \quad (4)$$

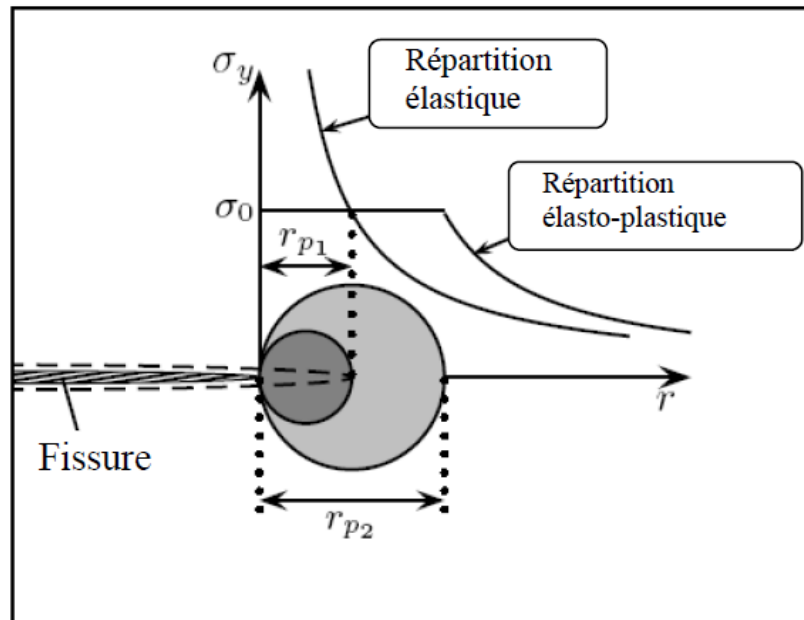


Figure 3 : Distribution des contraintes en pointe de fissure (Zone plastique)

### I.7 Domaines de fissuration :

Les domaines de fissuration sont des zones de matériaux où des fissures se forment et se propagent sous l'effet de contraintes mécaniques. Ces zones peuvent varier en taille et en forme en fonction des caractéristiques du matériau et des conditions de chargement.

Dans le cas d'un matériau homogène et isotrope, les fissures peuvent se développer à partir de défauts de surface, de points de concentration de contraintes, ou de fissures préexistantes. Les domaines de fissuration peuvent prendre des formes variées, telles que des fissures en ligne droite, des fissures ramifiées ou des fissures en chevron[18].

Les domaines de fissuration sont étudiés en mécanique de la rupture pour comprendre les mécanismes de propagation des fissures et prédire la durée de vie restante d'un matériau soumis à un chargement donné. Cette compréhension est essentielle pour garantir la sécurité et la durabilité des structures et des produits fabriqués à partir de ces matériaux[15].

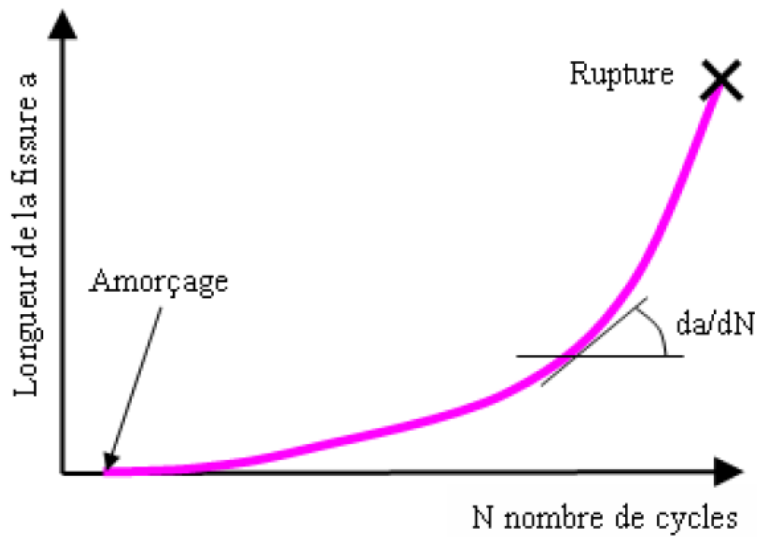
La fatigue des pièces métalliques survient lorsqu'une fissure macroscopique apparaît et se propage sous des charges répétées, même si ces charges sont généralement nettement inférieures à la résistance statique des structures. La ruine partielle ou totale d'une structure peut être causée par un nombre suffisant de charges répétées produisant une fissure importante[18].

Pour dimensionner une structure sous chargement cyclique, il est nécessaire de définir un "état limite" qui sera le critère de résistance, étant donné les trois étapes distinctes impliquées dans des mécanismes différents (Figure 4).

**La première étape** est l'initiation de la fissure, qui décrit le comportement de la structure entre l'état vierge et l'état où une fissure microscopique apparaît. Cette phase d'amorçage se produit généralement près des défauts intrinsèques qui peuvent induire des concentrations de contraintes.

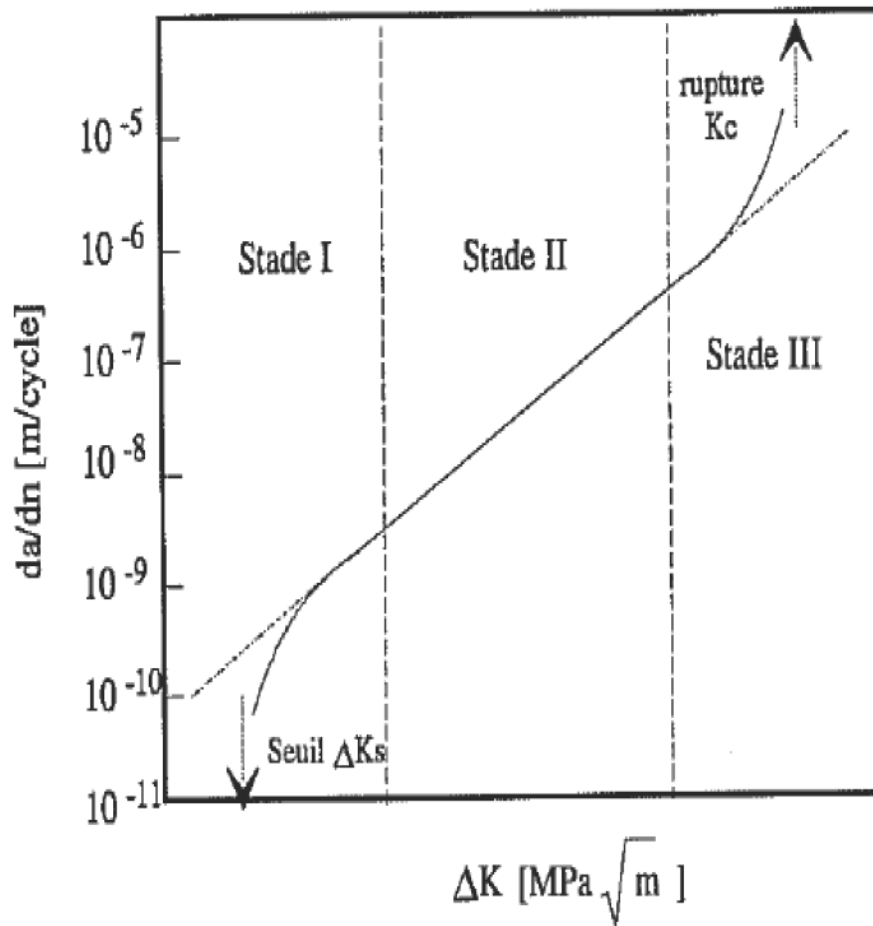
**La deuxième étape** est la propagation lente et stable d'une fissure macroscopique. Pendant cette phase, la fissure peut croître plus ou moins rapidement selon le matériau et l'intensité du chargement critique.

**La troisième étape** est la rupture ou la propagation instable, qui est l'étape finale du phénomène. Cela se produit lorsque la taille de la fissure a atteint son seuil d'instabilité.



**Figure 4 : Évolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de cycle appliqué**

En général, l'observation expérimentale montre que l'amorçage des fissures résulte de la concentration de déformation plastique dans un domaine de taille finie. Une fois que les fissures se sont amorcées, elles peuvent se propager de manière stable. La relation entre la vitesse de propagation de la fissure et l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte  $\Delta K$  permet de distinguer trois domaines de fissuration. La figure 5 représente en échelle logarithmique la vitesse de propagation  $da/dN$  en fonction de  $\Delta K$ [18].



**Figure 5 : Stades de fissuration**

On distingue généralement trois domaines de fissuration en fonction de la vitesse de propagation de la fissure en relation avec le facteur d'intensité de contrainte  $K$  [17].

*Dans le domaine I*, les effets de l'environnement et de la microstructure sont prédominants, et les vitesses de fissuration sont faibles. Les essais sont généralement effectués à des valeurs décroissantes de  $K$  pour déterminer la valeur de  $K_s$ .

*Le domaine II* correspond aux vitesses de propagation moyennes ou de Paris, où la vitesse de propagation varie linéairement avec  $K$  en échelle bi-logarithmique. La fissure se propage le plus souvent perpendiculairement à la direction de l'effort appliqué, et la loi de Paris est applicable.

---

*Dans le domaine III*, des chargements élevés provoquent une déchirure dans le matériau en pointe de fissure, conduisant à des vitesses de propagation très élevées, qui peuvent rapidement conduire à la rupture de la pièce pour une valeur maximale de  $K$  ( $K_{max}$ ) égale à la ténacité à la rupture en mode I ( $K$ ).

### I.8 Paramètres influençant la fissuration par fatigue :

Les modèles de propagation de fissures ont connu un important développement, prenant en compte plusieurs paramètres et conditions imposées en service ou en laboratoire qui peuvent influencer la propagation des fissures. Ces paramètres sont multiples et variés[18].

- **Amplitude de la contrainte cyclique** : Une contrainte cyclique élevée peut accélérer la propagation de la fissure et donc réduire la durée de vie en fatigue de la structure.
- **Type de chargement cyclique** : Les contraintes de traction-compression sont plus nocives que les contraintes de cisaillement.
- **Fréquence de chargement** : Une fréquence élevée de chargement peut également accélérer la propagation de la fissure.
- **Taille et forme de la pièce** : Une pièce de grande taille aura tendance à être plus sensible à la fissuration par fatigue en raison de l'amplification des contraintes et des concentrations de contraintes.
- **Rugosité de surface** : Une surface rugueuse peut favoriser l'amorçage de fissures.
- **Environnement** : Certains environnements peuvent accélérer la propagation de la fissure, comme la présence de liquides corrosifs.
- **Microstructure du matériau** : La microstructure du matériau peut avoir un impact important sur sa résistance à la fissuration par fatigue.
- **Température** : Les propriétés mécaniques des matériaux sont souvent altérées à haute température, ce qui peut influencer la propagation des fissures.
- **Traitements de surface et thermiques** : Certains traitements peuvent modifier les propriétés mécaniques du matériau et donc affecter sa résistance à la fissuration par fatigue.

- **Vieillessement** : Les matériaux subissent souvent des changements microstructuraux avec le temps, ce qui peut affecter leur résistance à la fissuration par fatigue.

Le paramètre « rapport de charge :  $R$  » est largement étudié car il a une influence importante sur la propagation des fissures. Lorsque  $R$  augmente, cela se traduit par un décalage des courbes de fissuration vers la gauche (Figure 6). Le chargement appliqué peut prendre la forme d'un spectre dans lequel les amplitudes maximales et minimales varient, ce qui peut avoir une influence significative sur le comportement en fatigue, contrairement à un chargement simple à amplitude constante. La variabilité des chargements appliqués a donc conduit au développement de modèles prenant en compte cette variation[19].

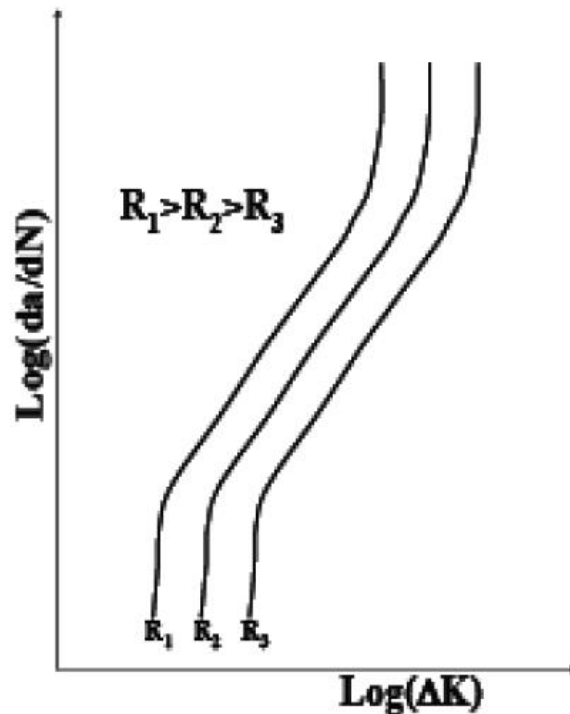


Figure 6 : Effet du rapport de charge  $R$  sur la propagation d'une fissure de fatigue

### I.9 Modèle de propagation à amplitude constante :

De nombreuses études expérimentales et numériques ont été menées pour élaborer des modèles de propagation de fissures sous des chargements à amplitude constante ou variable. Cependant, la plupart des modèles développés ne prennent pas en compte tous les paramètres qui influents sur la fissuration par fatigue.

#### I.9.1 Modèle de Paris :

La majorité des applications actuelles de la mécanique linéaire de la rupture élastique pour modéliser le comportement de fissure sont limitées à la région II de la courbe de propagation de fissure (Figure 5). Le modèle de Paris [6], qui est la première application de la mécanique de la rupture à la fatigue et décrit par l'équation 5, est souvent utilisé dans cette région.

Cependant, la loi de Paris ne peut pas décrire les régions (I) et (III) et est limitée par son application uniquement dans la région II où la propagation est stable. De plus, cette loi ne prend pas en compte l'effet du rapport de charge "R" et dépend du matériau utilisé. Afin de décrire plus complètement la courbe de propagation, certains auteurs ont intégré à la formulation les valeurs de  $K$  (seuil de propagation) et de  $K_c$  (valeur critique du facteur d'intensité de contrainte) pour la zone de propagation rapide et les vitesses de propagation très lentes[18].

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m \quad (5)$$



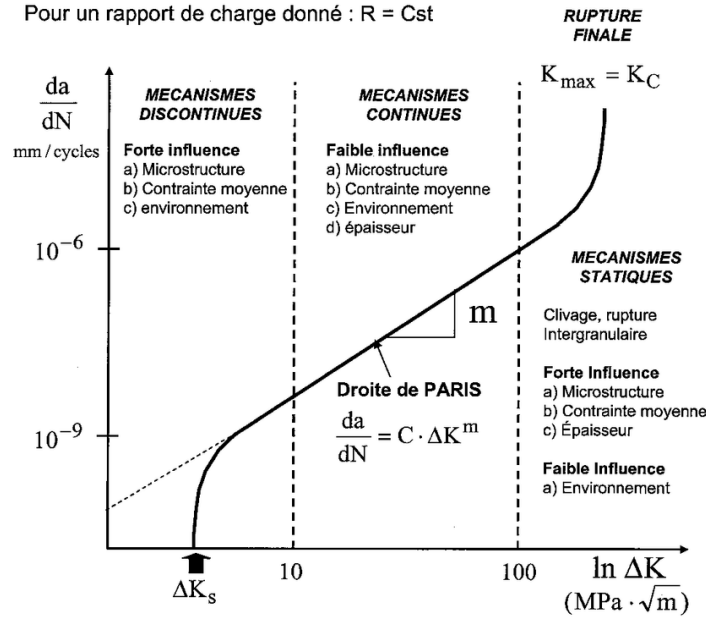


Figure 7: Domaine d'application de la loi de Paris

### 1.9.2 Modèle de Walker :

La loi de Paris présente une limite majeure, qui est l'incapacité à prendre en compte l'effet du rapport de charge. Ce problème a été soulevé par Walker [7], qui a proposé une amélioration du modèle de Paris en introduisant le paramètre  $K$ . Ce paramètre est équivalent au facteur d'intensité de contrainte pour un rapport de charge  $R$  égal à zéro, et permet de prédire la même vitesse de propagation pour une valeur réelle de  $K_{max}$ , en prenant en compte l'effet du rapport de charge. L'incidence de ce dernier est prise en compte en combinant la valeur de  $K$  avec le rapport  $R$ , selon l'équation suivante (équation 6) :

$$\overline{\Delta K} = K_{max}(1 - R)^{\gamma_w} \quad (6)$$

Où  $\Delta K_{max} = \Delta K / (1 - R)$

Et l'équation 6 devient :

$$\overline{\Delta K} = \Delta K / (1 - R)^{1 - \gamma_w} \quad (7)$$

Par conséquent, la loi de walker est représentée par :

$$\frac{da}{dN} = C_w \left[ \frac{\Delta K}{(1 - R)^{1 - \gamma_w}} \right]^{m_w} \quad (8)$$

Pour  $R=0$ , l'équation 8 est écrite sous la forme :

$$\frac{da}{dN} = C_w (\Delta K)^{m_w} \quad (9)$$

Le modèle de Walker est une amélioration du modèle de Paris, qui ne prend pas en compte l'effet du rapport de charge, selon Walker [7]. Pour intégrer cet effet, Walker a proposé d'ajouter un troisième paramètre " $\gamma_w$ " au modèle, qui est équivalent aux paramètres  $C$  et  $m$  de la loi de Paris. Les paramètres  $C_w$  et  $m_w$  du modèle de Walker sont donc similaires aux paramètres  $C$  et  $m$  de la loi de Paris.

### 1.9.3 Modèle de Forman

Le modèle de Forman 8 est une amélioration du modèle de Walker qui prend en compte l'effet du rapport de charge et est capable de décrire la région III de la courbe de vitesse de propagation. La loi de Forman est exprimée sous la forme de l'équation, où  $K_c$  est la valeur critique du facteur d'intensité de contrainte,  $m$  est le coefficient de la loi de Paris,  $C$ 'est une constante et  $K$  est le paramètre introduit par Walker :

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^m}{(1-R) \cdot (K_c - K_{max})} \quad (10)$$

Où  $K_c$  est la ténacité du matériau fonction de l'épaisseur considérée.

Le modèle de Forman permet de décrire la propagation de fissure dans la région II (propagation stable) et III (propagation instable). Cependant, pour tenir compte du facteur d'intensité de contrainte seuil dans la région I, Hartman et Schijve 9 ont proposé une modification du modèle de Forman. Le modèle modifié prend en compte le seuil de propagation de fissure, représenté par le paramètre  $K_{th}$ . Cette modification est formulée par l'équation 11.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K - \Delta K_{th})^m}{(1-R) \cdot K_c - \Delta K} \quad (11)$$

### 1.9.4 Modèle de Baptista :

Adib et Baptista [20] ont proposé récemment une nouvelle relation exponentielle (équation 12) pour améliorer la description de la vitesse de propagation des fissures. Cette équation est appelée modèle  $\alpha\beta$ .

$$\frac{da}{dN} = A_e^{\beta/\Delta K} \quad (12)$$

Où  $A = e^\alpha$

Ce modèle inclut un paramètre  $\gamma$  qui relie les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  à l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte  $K$ .

$$\gamma = \ln\left(\frac{da}{dN}\right) \Delta K = \alpha \Delta K + \beta \quad (13)$$

Les coefficients  $a$  et  $b$  sont utilisés pour décrire respectivement l'intersection et la pente des courbes  $\gamma=f(K)$ .

Le modèle  $\alpha\beta$ , développé par Adib et Baptista [21], a été appliqué aux résultats expérimentaux de propagation de fissures de fatigue du titane. Les résultats ont montré que la trajectoire du modèle  $\alpha\beta$  correspondait exactement aux résultats expérimentaux, en comparaison avec le modèle de Paris [6] appliqué aux mêmes résultats expérimentaux. Récemment, le modèle exponentiel de vitesse de fissuration développé par Adib et Baptista a été validé sur le comportement en fatigue de l'alliage d'aluminium 2524 T3 [21], présentant de meilleures performances que les modèles d'Elber [22] et Kujawski [23].

#### 1.9.5 Modèle d'Elber basé sur la fermeture de la fissure :

Elber [22, 24] a proposé l'idée que sous l'effet d'une charge de traction appliquée à une certaine distance de la zone de contraintes résiduelles de compression laissées derrière la pointe de la fissure, la fissure de fatigue peut se fermer. Ce phénomène de fermeture de fissure par plasticité l'on peut voir que la zone plastique qui se développe à la pointe de la fissure participe à la fermeture de celle-ci.

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K_{eff}^m \quad (14)$$

Où :  $\Delta_{eff} = K_{max} - K_{op}$

$C$  et  $m$  sont des paramètres expérimentaux du modèle d'Elber.

Le facteur d'intensité de contrainte peut être exprimé par la fonction U(R).

$$\Delta K_{eff} = U(R)\Delta K \quad (15)$$

Avec :

$$U(R) = \frac{K_{max} - K_{ouv}}{K_{max} - K_{min}} \quad (16)$$

Plusieurs recherches ont été menées pour déterminer la fonction U(R). La première a été effectuée par Elber [24] sur l'alliage d'aluminium 2024 T351 dans un état de contrainte plane.

$$U(R) = 0,5 + 0,4R \quad (17)$$

$$-0,1 \leq R \leq 0,7$$

#### 1.9.6 Modèle de Forman :

Pour tenir compte de tous les régimes de propagation de la fissure, Forman et Mettu [25] ont développé un modèle général appelé modèle NASGRO. Ce modèle permet de prédire la vitesse de propagation de fissuration de fatigue et est représenté par l'équation 18.

$$\frac{da}{dN} = C \left[ \left( \frac{1-f}{1-R} \right) \cdot \Delta K \right] \frac{\left( 1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left( 1 - \frac{K_{max}}{K_{crit}} \right)^q} \quad (18)$$

Le modèle NASGRO développé par Forman et Mettu [25] est un modèle général permettant de prédire la vitesse de propagation de fissure de fatigue en prenant en compte tous les domaines de propagation. Ce modèle est représenté par l'équation 18,

Où :

$\Delta K$  est l'amplitude de l'intensité de contrainte.

$\Delta K_{max}$  est l'amplitude maximale de l'intensité de contrainte.  $\Delta K_{TH0}$  est l'amplitude seuil de l'intensité de contrainte pour le rapport de contrainte R considéré.

$K_{crit}$  est le facteur d'intensité de contrainte critique.

$f$  est la fonction de fermeture de fissure de Newman [26].

Les paramètres  $C$ ,  $n$ ,  $p$  sont déterminés expérimentalement, où :

$C$  : est une constante pour le cas où le rapport de contrainte  $R=0$ .

$n$  : est la pente sur une échelle logarithmique.

$p$  et  $q$  sont des coefficients empiriques qui déterminent la courbure de la courbe de taux de croissance dans les régions de la queue.

Leurs valeurs sont sélectionnées pour ajuster la courbe de taux de croissance aux données expérimentales. Le coefficient  $p$  contrôle la courbe dans la région de faible taux de croissance (seuil), et  $q$  contrôle la courbe dans la région de taux de croissance élevé.

### **1.10 Effet de retard de propagation des fissures après application d'une surcharge :**

Lorsqu'une surcharge est appliquée à un matériau présentant des fissures, cela peut affecter la propagation des fissures en retardant leur progression. Ce phénomène est connu sous le nom d'"effet de retard de propagation des fissures" ou de "retard de propagation des fissures sous surcharge".

L'effet de retard de propagation des fissures est dû à plusieurs mécanismes physiques. Tout d'abord, la surcharge appliquée peut induire une fermeture partielle ou totale des fissures existantes, réduisant ainsi la quantité de contrainte appliquée sur les bords de la fissure. Cela peut empêcher la propagation de la fissure en réduisant la contrainte appliquée à la pointe de la fissure.

De plus, la surcharge peut modifier les propriétés mécaniques du matériau, telles que sa dureté ou sa résistance à la rupture, ce qui peut rendre le matériau plus résistant à la propagation de fissures.

Enfin, la surcharge peut induire des contraintes résiduelles dans le matériau, qui peuvent s'opposer aux contraintes appliquées par la fissure et réduire ainsi sa propagation.

### I.10.1 Effet du rapport de charge et fermeture de fissure :

Les effets du rapport de charge sur la propagation des fissures des matériaux métalliques ont été largement étudiés, notamment dans le secteur aéronautique. L'effet du rapport de charge a été introduit par Walker [27], qui a montré que l'augmentation de ce rapport a pour effet d'augmenter la vitesse de fissuration. Les travaux de Kujawski [28] ont permis de corréler l'effet du rapport de charge  $R$  sur la propagation des fissures longues de l'alliage d'aluminium 7055 T7511, en proposant un modèle de fermeture de fissure modifié (Figure 8) pour des valeurs positives et négatives. De même, Benachour et al. [29] ont étudié l'influence du rapport de charge sur la durée de vie en fatigue de la propagation d'une fissure de fatigue en flexion quatre points de l'alliage d'aluminium 2024 T351. Leurs résultats ont montré que l'augmentation du rapport de charge a pour effet d'augmenter à la fois la durée de vie et la vitesse de fissuration (Figures 9, 10). À des valeurs élevées du facteur d'intensité de contrainte, un effet de microstructure peut apparaître, entraînant une diminution de la vitesse de fissuration.

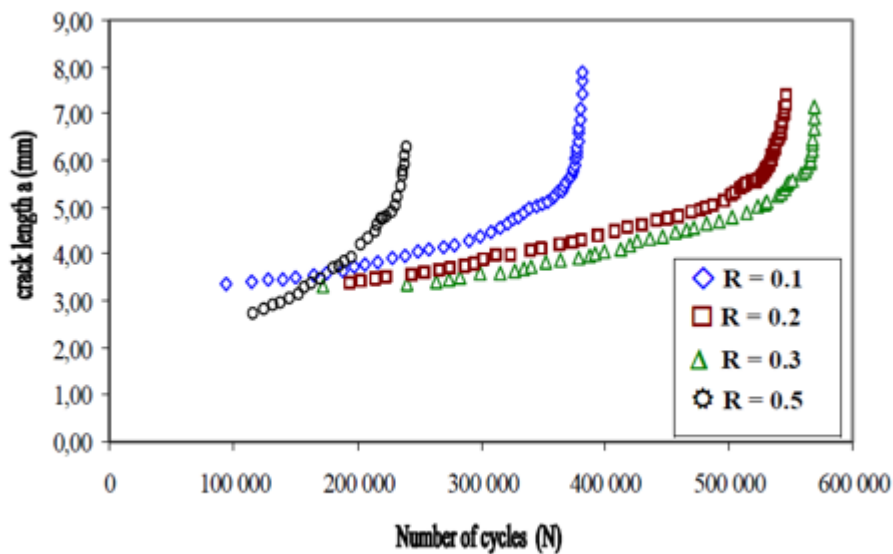
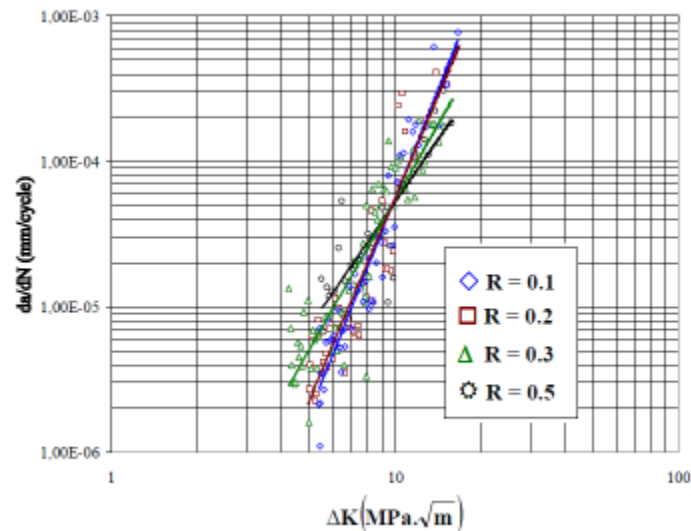


Figure 8 : Effet du rapport de charge sur la durée de vie en fatigue du 2024 T351



**Figure 9 : Effet du rapport de charge sur la vitesse de fissuration du 2024 T351**

Srivastava and Garg [30] ont mené une étude visant à examiner l'effet du rapport de charge,  $R$ , sur la fissuration par fatigue et l'effet de fermeture de fissure de l'alliage 6063 T6. Les résultats ont montré que la charge de fermeture dépendait du rapport de charge et de l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte  $K$ . La vitesse de fissuration était influencée par  $R$ , le coefficient de fermeture et  $K$ . En ce qui concerne la durée de vie, elle a été observée pour augmenter avec l'augmentation du rapport de charge pour le matériau étudié (figure 10). En ce qui concerne la vitesse de fissuration, les résultats ont été représentés graphiquement (figure 11).

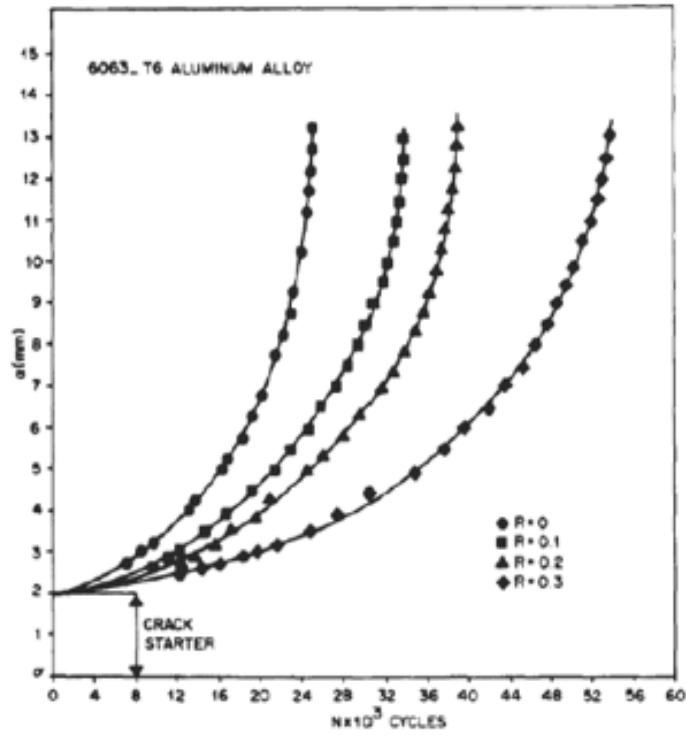
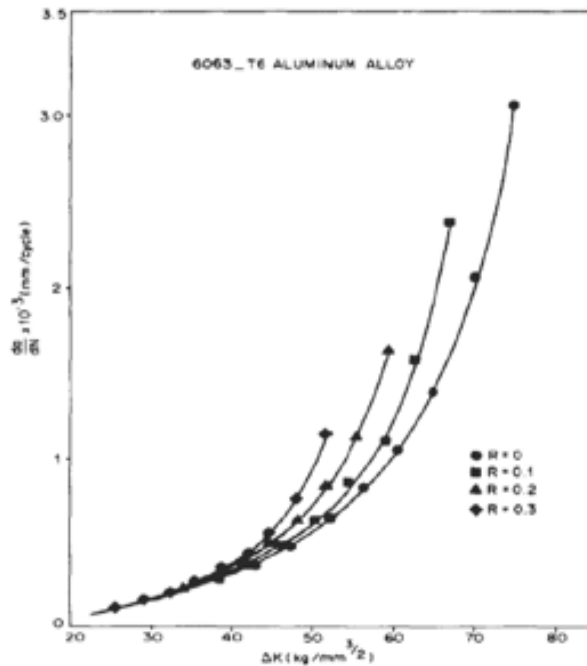


Figure 10 : Courbes de propagation des fissures de fatigue



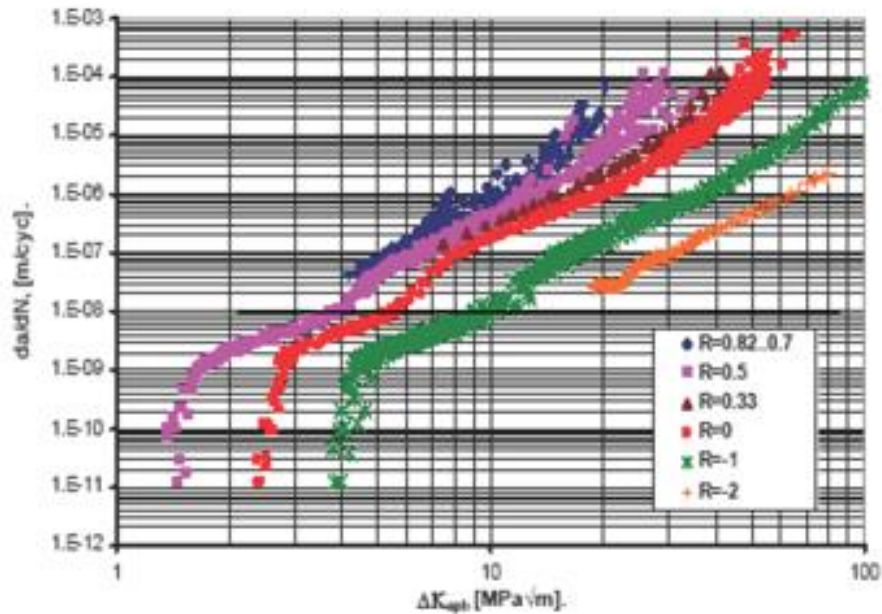


**Figure 11 : Vitesse de fissuration  $da/dN$ - $\Delta K$  à différent rapport de charge**

Les alliages d'aluminium 2024 T3 et 6061 T6 ont été étudiés en termes de comportement en fatigue par Donald et al [31]. Les résultats expérimentaux ont montré que la vitesse de propagation des fissures de fatigue ne dépendait pas seulement du facteur d'intensité de contrainte efficace  $K_{eff}$ , mais également de  $K_{max}$ . L'effet du rapport de charge sur la propagation des fissures de fatigue de l'alliage 7075 T6 a été investigué par Hudson et Scardina [32].

Les résultats expérimentaux ont montré que la vitesse de fissuration augmentait avec l'augmentation du rapport de charge  $R$  et qu'aux hautes valeurs du facteur d'intensité de contraintes, le décalage des vitesses de fissuration est devenu important. Newman [26] a obtenu des résultats expérimentaux sur l'alliage d'aluminium 7075 T6 pour six différents rapports de charge, montrant que les vitesses de fissuration étaient supérieures comparativement aux résultats de Hudson et Scardina [18] pour un même rapport de charge et même amplitude du facteur d'intensité de contraintes.

Par exemple, pour  $R=0.33$  et  $R=0.5$ , les vitesses de fissuration déterminées par Newman [26] étaient respectivement  $3 \cdot 10^{-7}$  m/cycle et  $4 \cdot 10^{-7}$  m/cycle, tandis que celles de Hudson et Scardina [32] étaient respectivement  $4 \cdot 10^{-8}$  m/cycle et  $9 \cdot 10^{-8}$  m/cycle.



**Figure 12 : Vitesse de fissuration expérimentale de l'alliage 7075 T6**

Les recherches menées par Singh et al.[33] sur l'effet du rapport de charge sur la vitesse de fissuration de l'alliage 2618 et celles menées par Schijve [34] sur l'alliage 2024 T851 ont montré un décalage des courbes de fissuration vers des vitesses plus élevées, comme le montrent les figures 13 et 14.

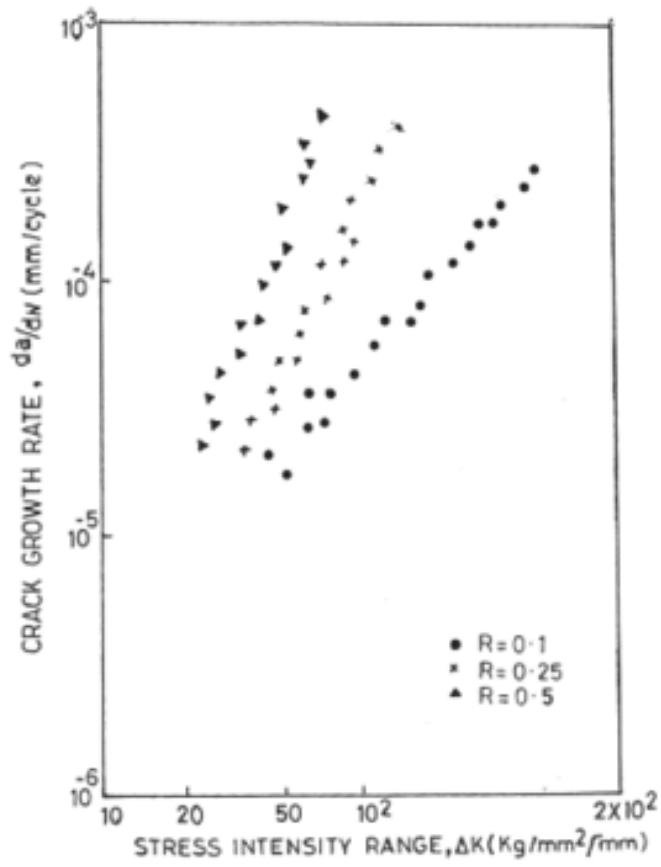
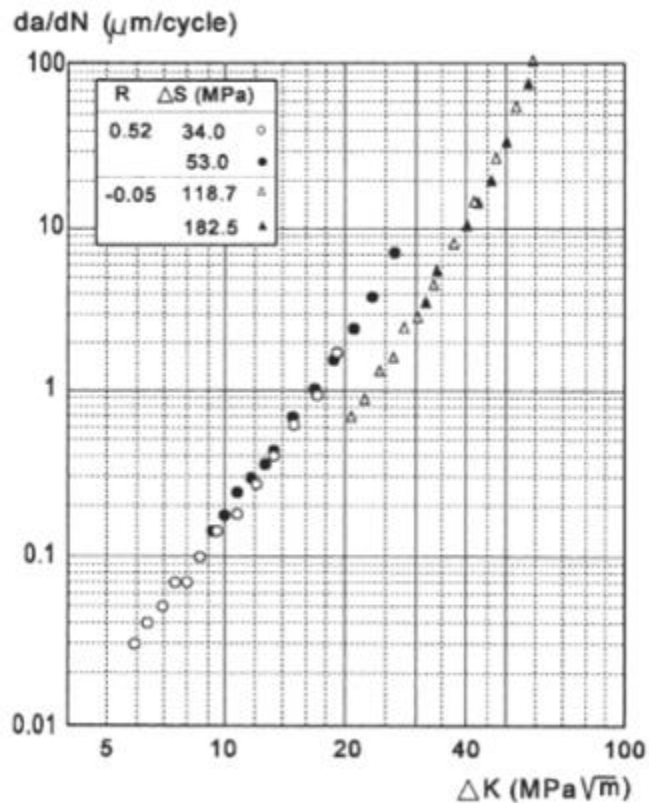


Figure 13 : Vitesse de fissuration de l'alliage d'aluminium 2618 sous l'effet de rapport de charge



**Figure 14 : Effet du rapport de charge et l'amplitude de chargement sur la vitesse de fissuration de l'alliage d'aluminium 2024 T3**

### I.11 Effet de l'amplitude de chargement :

Diverses études ont été menées pour évaluer l'effet de l'amplitude de chargement sur le comportement de fissuration par fatigue. Newman et Ruschau [35] ont montré que la contrainte normalisée d'ouverture de la fissure varie en fonction du niveau de chargement appliqué sur l'alliage d'aluminium 2024 T3 sous chargement à amplitude constante. Les résultats ont également montré que le niveau de chargement a une influence significative sur les contraintes planes par rapport aux déformations planes, et que l'augmentation du chargement maximal appliqué diminue la durée de vie en fatigue. Sur la base des résultats expérimentaux de la fissuration par fatigue de l'alliage d'aluminium 2024 T351, Maymonn [36] a développé un modèle de propagation de fissures de fatigue qui a

montré que la durée de vie est affectée par l'amplitude de chargement et le rapport de charge sous chargement à amplitude constante.

L'effet de l'amplitude de chargement sur la vitesse de fissuration de l'alliage d'aluminium 2024 T351 a été étudié en flexion quatre points sur une éprouvette de type Charpy par Benachour et al [37]. Les résultats ont montré que l'augmentation de l'amplitude de chargement diminue la durée de vie en fatigue, mais augmente la vitesse de fissuration. De plus, l'augmentation de la charge maximale de 10% pour  $R = 0,1$  a réduit la durée de vie en fatigue de 55% (une différence de durée de vie de  $25 \times 10^4$  cycles).

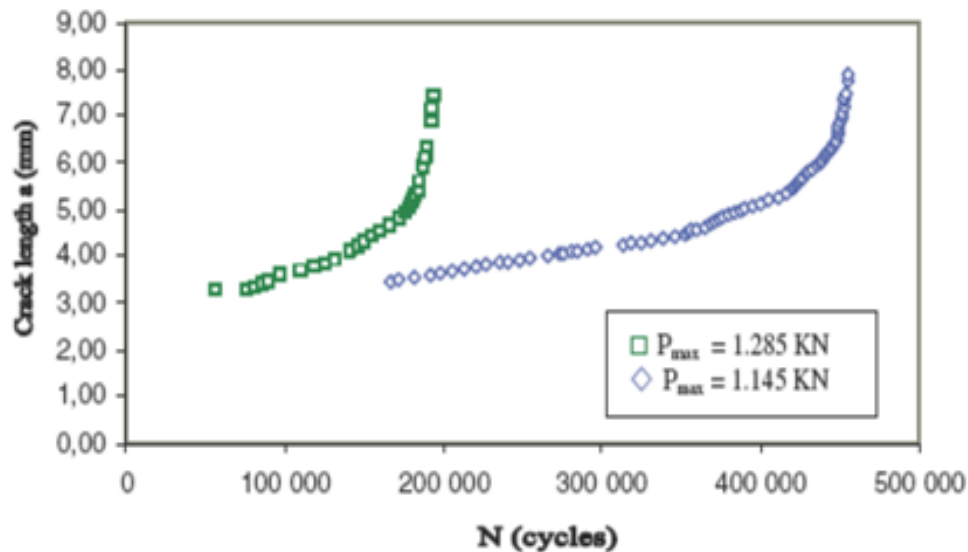


Figure 15 : Effet de l'amplitude de chargement sur la durée de vie à  $R=0,1$  [37]

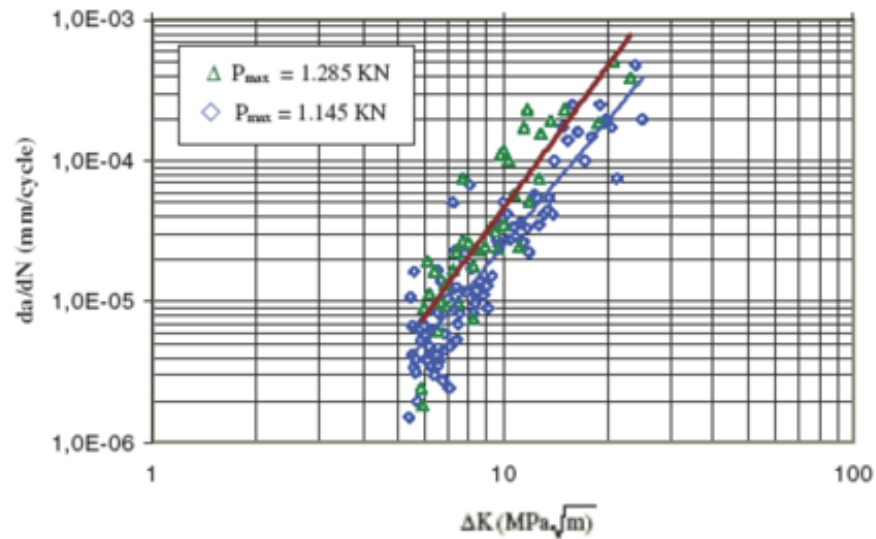


Figure 16 : Effet de l'amplitude de chargement sur la vitesse de fissuration à  $R=0,1$  [37]

### I.12 La fissuration sous chargement d'amplitude variable :

Il existe une différence fondamentale entre la prédiction de la propagation de fatigue sous un chargement à amplitude constante et celle sous un chargement à amplitude variable. Dans le cas des chargements à amplitude constante, l'accroissement de la fissure dépend de la longueur de la fissure et de la charge appliquée. En revanche, dans le cas des chargements à amplitude variable, l'accroissement de la fissure dépend également de l'historique du chargement subi par la fissure.

La première étape de l'analyse des chargements à amplitude variable a consisté à étudier l'effet de la surcharge ou de la sous-charge. En effet, la complexité des chargements à amplitude variable réside dans l'existence de phénomènes d'interaction entre les différents niveaux de chargement, qui sont mis en évidence lors des études sur la surcharge. Ces effets d'interaction, qui se traduisent par un ralentissement ou une accélération de la propagation des fissures [2, 3], sont décrits dans les paragraphes suivants.

---

### I.12.1 Modèles décrivant la propagation à amplitude variable :

La modélisation du retard après surcharge en fatigue est une approche utilisée pour prédire le temps nécessaire à la récupération complète d'un matériau ou d'une structure après qu'il a été soumis à une surcharge en fatigue. Ce retard est dû aux effets cumulatifs de la fatigue et peut avoir un impact significatif sur la durée de vie résiduelle du matériau ou de la structure.

Il existe plusieurs modèles qui tentent de décrire le retard après surcharge en fatigue. L'un des modèles les plus couramment utilisés est le modèle de Manson-Coffin, également connu sous le nom de modèle de double liner ou modèle de Walker. Ce modèle est basé sur l'hypothèse que le comportement en fatigue est régi par deux régimes de fissuration : le régime de propagation de fissure dominé par la contrainte et le régime de propagation de fissure dominé par la déformation.

Dans le modèle de Manson-Coffin, la durée de vie résiduelle après surcharge est déterminée en combinant les contributions des deux régimes de fissuration. Le modèle prend en compte les caractéristiques de la surcharge, telles que l'amplitude de la surcharge et le nombre de cycles de surcharge, ainsi que les propriétés du matériau, telles que la limite d'endurance et les coefficients de Wöhler. En utilisant ces paramètres, le modèle de Manson-Coffin est capable d'estimer le retard après surcharge en fatigue [38].

Il convient de noter que la modélisation du retard après surcharge en fatigue reste un domaine de recherche actif, et il existe d'autres modèles et approches qui tentent de décrire ce phénomène de manière plus précise. Les chercheurs et les ingénieurs poursuivent leurs efforts pour améliorer les modèles existants dans le but de mieux prédire le comportement en fatigue des matériaux et des structures soumis à des surcharges. Dans notre étude, nous avons choisi de travailler avec le modèle de Wilembourg, qui présente des caractéristiques spécifiques et des avantages pour notre recherche.

1.12.2 Le modèle de Willenborg :

Le modèle de Willenborg est une approche légèrement différente car il propose de déterminer un facteur de ralentissement [39], mais une valeur réelle du rapport de charge au point de fissure  $R_{eff}$ . La formulation du modèle de Willenborg généralisé implémenté dans le code AFGROW est présentée ci-dessous :

$$R_{eff} = \frac{K_{min\,eff}}{K_{max\,eff}} \quad (19)$$

Avec

$$K_{min\,eff} = K_{min} - K_R \quad (20)$$

$$K_{max\,eff} = K_{max} - K_R \quad (21)$$

La valeur du facteur d'intensité de contrainte résiduelle  $K_R$  est définie pour une longueur de fissure  $a_i$ , nécessaire pour créer une zone plastifiée de taille  $R_{eq}$ , tangent à la zone plastifiée créée par la surcharge  $R_{pic}$ .

$$\begin{cases} \text{si } K_{min\,eff} > 0 \text{ et } K_{max\,eff} > 0, \Delta K_{eff} = \Delta K \\ \text{si } K_{min\,eff} < 0 \text{ et } K_{max\,eff} < 0, \Delta K_{eff} = \Delta K_{eff} = \Delta K_{max\,eff} \\ \text{si } K_{max\,eff} < 0, \Delta K_{eff} = 0 \end{cases} \quad (22)$$

Le facteur d'intensité de contrainte résiduelle est donné par l'équation suivante :

$$K_R = \Phi \left( K_{pic} \sqrt{1 - \frac{a_i - a_0}{R_{pic}}} - K_{max} \right) \quad (23)$$

Où

$R_{eq}$  est exprimé par l'équation suivante :

$$R_{eq} = \left( \frac{K_{max} + K_R}{\sigma_y} \right)^2 \left( \frac{1}{\alpha\pi} \right) \quad (24)$$

Où

$\alpha$  représente l'état de contrainte dans la direction de propagation de la fissure (contrainte plane ou déformation plane).



$\phi$  définit le niveau de contrainte résiduelle induit par l'application d'une surcharge, il est donné par l'équation suivante :

$$\phi = \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{TH0}}{\Delta K}\right)}{SOR-1} \quad (25)$$

Où

$\Delta K_{TH0}$  représente le facteur d'intensité de contrainte seuil pour un rapport de charge  $R = 0$ .

SOR : Taux d'arrêt - Ratio de la contrainte maximale de surcharge à la contrainte maximale ultérieure requise pour arrêter la croissance de la fissure.

La valeur de  $K_{pic}$  est mise à jour chaque fois que la charge maximale dépasse la valeur maximale précédente, ou lorsque la zone plastifiée actuelle dépasse la zone créée par la surcharge.

La valeur exacte du SOR est modifiée pour ajuster la prédiction de durée de vie aux résultats des tests. Idéalement, le SOR devrait être un paramètre matériel insensible au spectre ou au niveau de contrainte. Cependant, cela ne fonctionne pas toujours.

Voici une liste de valeurs courantes de SOR pour certains matériaux : À titre indicatif,

- SOR = 2 pour les aciers
- SOR = 2,7 pour les alliages de titane
- SOR = 3 pour les alliages d'aluminium.

Il est donc supposé que le retard disparaît dès que la zone plastifiée actuelle pénètre dans une zone de matériau non affectée par la surcharge.

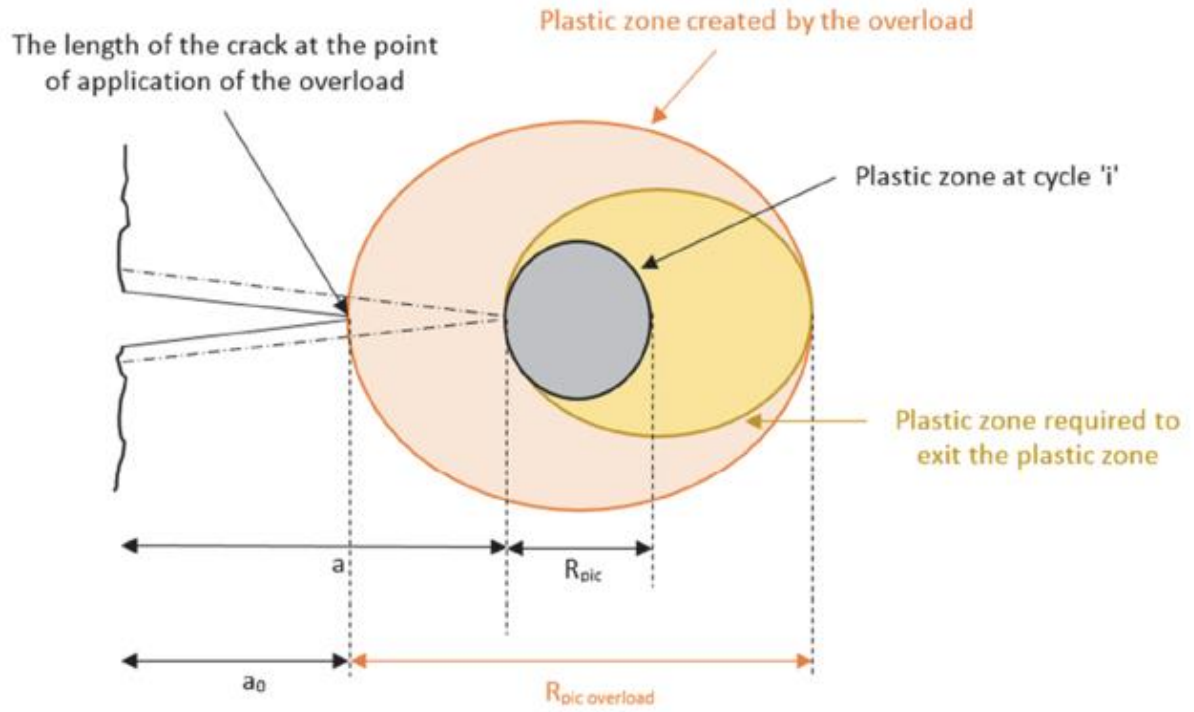


Figure 17 : Willenborg retardation model [39]

## **Chapitre II**

### **Généralités sur le chargement en fatigue**

## II.1 Les différents types de surcharge :

Lorsqu'un cycle de charge d'amplitude plus élevée est appliqué dans le cadre d'un chargement à amplitude constante, cela entraîne une zone de transition de propagation où le taux d'accroissement de la fissure diminue initialement pour atteindre un minimum, puis augmente jusqu'à retrouver la vitesse initiale de propagation. De plus, la surcharge, en raison de son effet bénéfique sur la durée de vie en fatigue, peut être considérée comme un mécanisme de réparation lorsqu'une fissure est présente dans un élément structurel métallique [38]

Divers types d'effets de surcharge peuvent être observés lors de l'application de charges variables sur une fissure :

- **Pas d'influence** : Dans certains cas, de petites surcharges n'ont aucun effet sur la fissure. Pour la plupart des alliages, aucune altération n'est observée lorsque le taux de surcharge est inférieur ou égal à 1,5 [4, 5, 6]. Cela signifie que la fissure continue de se propager selon les mêmes conditions que celles déterminées par le chargement initial, sans subir d'influence significative.
- **Blocage momentané** : Après l'application d'une surcharge, la fissure peut subir un blocage temporaire. Cela se traduit par un arrêt de la propagation de la fissure pendant un certain temps, suivi d'un redémarrage de la fissure à une vitesse correspondant aux conditions initiales de chargement. Ce phénomène de blocage momentané est généralement observé lorsque les valeurs de  $\Delta K_i$ , qui représentent le facteur d'intensité de contrainte, se situent à proximité du seuil de non-fissuration [7].
- **Retard immédiat** : Une surcharge peut entraîner un retard immédiat dans la propagation de la fissure. Après l'application de la surcharge, la fissure met plus de temps que prévu pour continuer à se propager. Cependant, une fois ce retard initial surmonté, la vitesse de fissuration reprend progressivement son rythme normal.

- 
- **Retard différé** : Dans certains cas, les effets de la surcharge peuvent ne pas se manifester immédiatement, mais plutôt après un certain nombre de cycles. On observe une accélération de la vitesse de fissuration, suivie d'une décélération jusqu'à ce que la vitesse atteigne un minimum. Par la suite, la vitesse de propagation de la fissure augmente progressivement jusqu'à retrouver sa vitesse initiale avant l'application de la surcharge. Ce phénomène de retard différé est généralement observé lorsque les propriétés matérielles et la géométrie de la fissure sont influencées par l'historique du chargement.
  - **Retard avec accélération différée** : Après une phase initiale de ralentissement, la fissure peut soudainement accélérer sa propagation, dépassant ainsi sa vitesse de fissuration initiale avant la surcharge. Après cette accélération, la fissure atteint un régime stabilisé de propagation.
  - **Blocage définitif** : Pour des taux de surcharge élevés, la fissure peut être complètement bloquée. Cela signifie que la surcharge appliquée empêche la fissure de se propager davantage.

Il convient de noter que ces effets d'interaction entre la surcharge et la propagation de la fissure sont schématisés dans la figure 18, et ils dépendent de plusieurs facteurs tels que les propriétés du matériau, la géométrie de la fissure, l'amplitude et l'historique du chargement. Comprendre ces différents phénomènes est essentiel pour prédire et contrôler la propagation de la fissure dans des applications réelles, en particulier dans le domaine de la durée de vie en fatigue des structures métalliques.

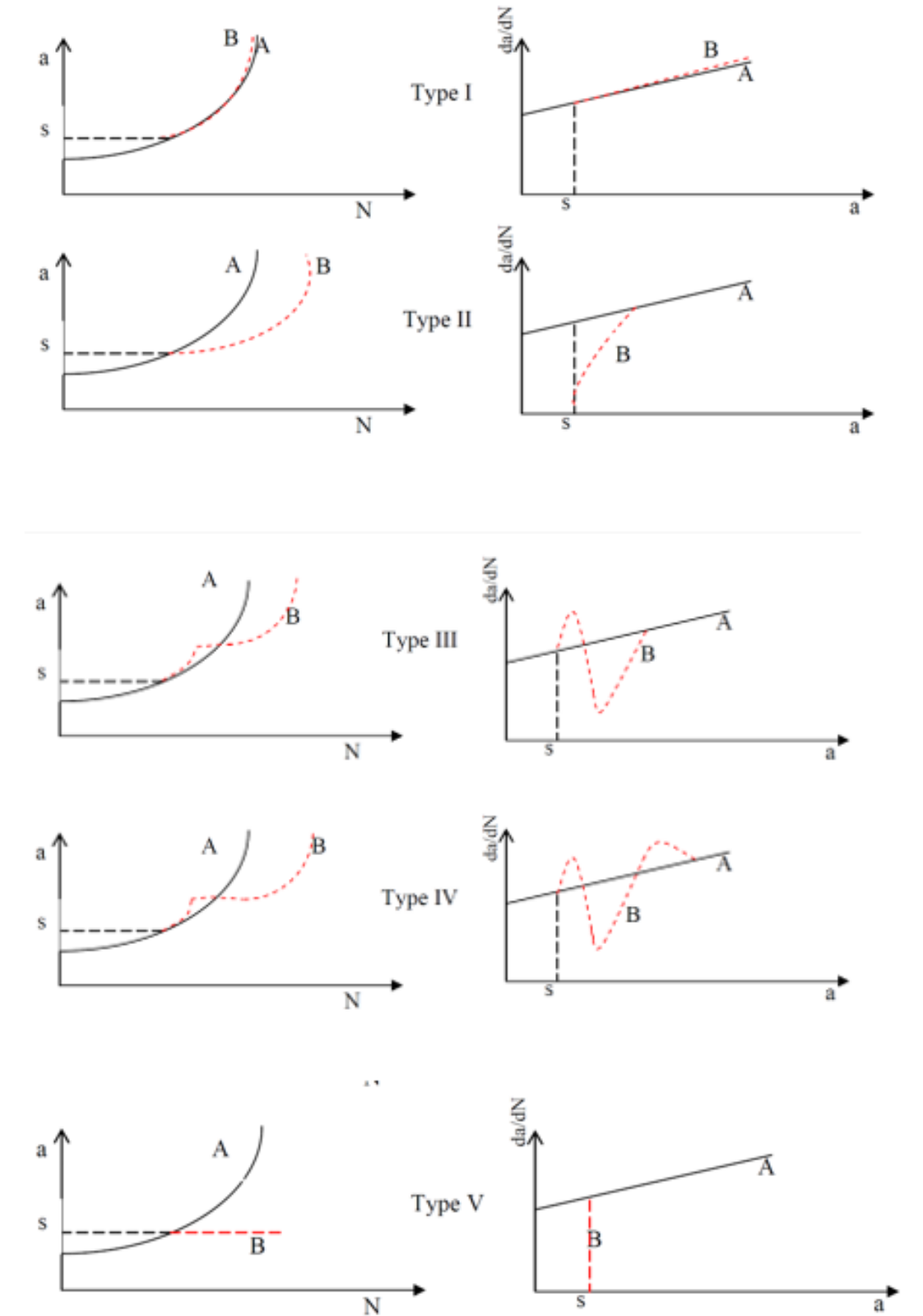


Figure 18 : schématisation des retards après application des surcharges [38]

## II.2 Cas d'une sous charge :

La question des effets de la sous charge sur la propagation de fissure sous chargement constant est encore peu explorée et suscite un intérêt croissant dans le domaine de la mécanique de la rupture. Les résultats des études existantes sont mitigés et donnent lieu à des interprétations divergentes.

Certaines recherches ont indiqué qu'une sous charge dans un chargement constant peut provoquer une accélération temporaire de la propagation de la fissure. Cela signifie que, pendant une certaine période après l'application de la sous charge, la fissure se propage à une vitesse plus élevée que celle attendue en l'absence de sous charge. Cependant, ces effets d'accélération sont généralement de courte durée et la fissure retrouve ensuite sa vitesse de propagation initiale [40].

D'autres travaux de recherche ont suggéré que la sous charge n'a pratiquement aucun effet sur la propagation de la fissure sous chargement constant. Selon ces études, la présence d'une sous charge n'entraîne pas de modification significative de la vitesse de propagation de la fissure par rapport aux conditions de chargement constant sans sous charge [40].

Il est important de souligner que les résultats divergents peuvent être dus à plusieurs facteurs, tels que les propriétés du matériau, la géométrie de la fissure, l'amplitude de la sous charge et la méthodologie expérimentale utilisée. De plus, les mécanismes sous-jacents des effets de la sous charge restent encore mal compris.

En raison de l'importance pratique de comprendre l'effet de la sous charge sur la propagation de la fissure, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour clarifier ces effets contradictoires et pour mieux appréhender les mécanismes physiques sous-jacents. Ces études pourraient permettre de déterminer les conditions spécifiques dans lesquelles la sous charge peut influencer de manière significative la propagation de la fissure et fournir des indications précieuses pour la conception et la durée de vie des structures soumises à des chargements variables.

### II.3 Surcharges multiples :

L'effet de retard causé par l'application de surcharges multiples ou consécutives est un phénomène d'intérêt majeur dans le domaine de la mécanique de la rupture. Les recherches antérieures ont montré de manière cohérente que l'effet de retard s'accumule progressivement avec chaque surcharge, ce qui peut avoir des conséquences significatives sur la propagation de la fissure.

Lorsqu'une surcharge est appliquée sur une fissure, elle perturbe l'évolution normale de la propagation de la fissure, entraînant un retard dans son avancement. Lorsque des surcharges multiples sont appliquées successivement, leur effet se combine, ce qui prolonge davantage le retard dans la propagation de la fissure.

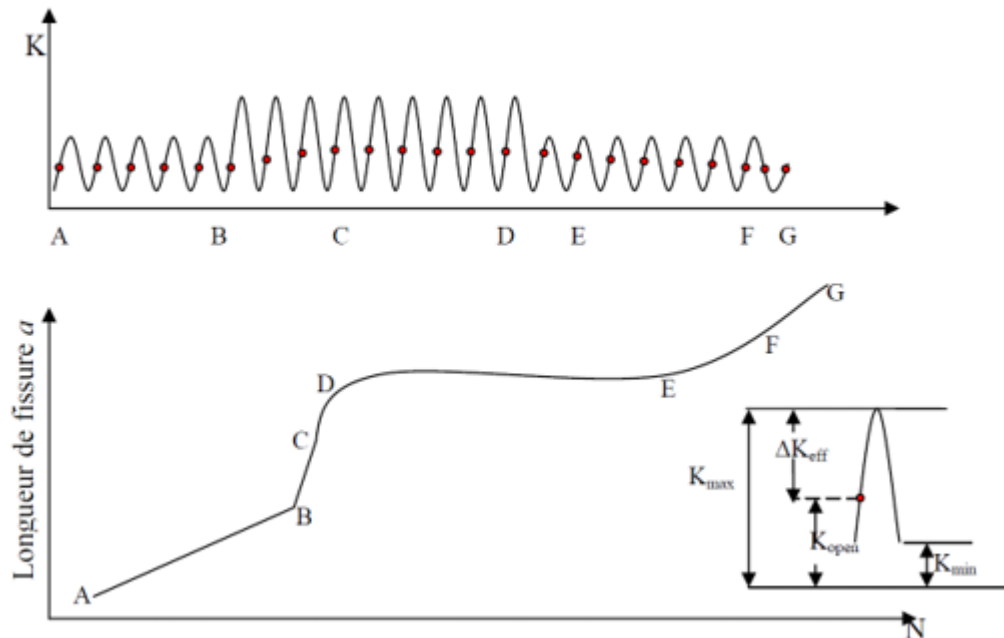
Au fur et à mesure que les surcharges se répètent, l'effet de retard s'intensifie. Cela signifie que la fissure met plus de temps à se propager après chaque surcharge, et ce retard peut s'accumuler au fil du temps. Dans certains cas, cette accumulation peut conduire au blocage complet de la fissure, où la propagation cesse complètement.

Les résultats des études antérieures ont confirmé l'existence de cet effet de retard cumulatif et du blocage potentiel de la fissure causée par les surcharges multiples. Ces résultats sont étayés par une série de références [40], qui ont contribué à mieux comprendre les mécanismes physiques sous-jacents à ce phénomène.

Il convient de noter que la manifestation de cet effet de retard et du blocage de la fissure peut varier en fonction de plusieurs facteurs, tels que les caractéristiques du matériau, la géométrie de la fissure, l'amplitude et le nombre de surcharges appliquées. Par conséquent, une analyse approfondie de ces facteurs est nécessaire pour mieux appréhender l'effet de retard et ses implications sur la durée de vie en fatigue des structures.



Comprendre l'effet de retard cumulatif causé par les surcharges multiples est essentiel pour évaluer la résistance et la fiabilité des composants soumis à des chargements variables. Ces connaissances peuvent être utilisées pour améliorer les procédures de conception, d'inspection et de maintenance des structures, afin d'assurer leur intégrité et leur sécurité à long terme



**Figure 19 : Évolution du niveau d'ouverture et de la longueur de la fissure pendant un chargement par blocs [40]**

#### II.4 Effets combinés :

Selon les résultats de différentes études [41], l'application d'une sous charge immédiatement après une surcharge peut réduire l'effet de retard résultant de la surcharge. En revanche, des travaux antérieurs [42-44] ont suggéré que l'application d'une sous charge avant une surcharge a peu d'effet sur le retard éventuel causé par la surcharge.

---

## II.5 Analyse phénoménologique de l'influence d'une surcharge sur le comportement d'une fissure de fatigue :

Schijve [45] est l'un des premiers chercheurs à avoir démontré l'effet d'un changement de charge sur le comportement d'une fissure de fatigue préalablement générée à une amplitude de charge  $\Delta P$  constante. Depuis lors, plusieurs études menées par Von Euw et Col [21], Corbley et Packman [22], Wet et Col [23], et Bathias [24] ont contribué à la compréhension et à la quantification de ce phénomène.

La figure 20 (b) illustre le comportement d'une fissure soumise à une surcharge. La courbe en pointillés décrit la croissance de la fissure en l'absence de surcharge, tandis que la courbe en trait plein représente le ralentissement global provoqué par la surcharge. La figure 20 (b) présente également l'évolution correspondante de la vitesse de fissuration  $da/dN$ , mesurée à la surface de l'éprouvette, en fonction de la longueur de fissure  $a$ .

En examinant les figures 20 (a) et 20 (b), on peut identifier cinq stades successifs de la fissuration.

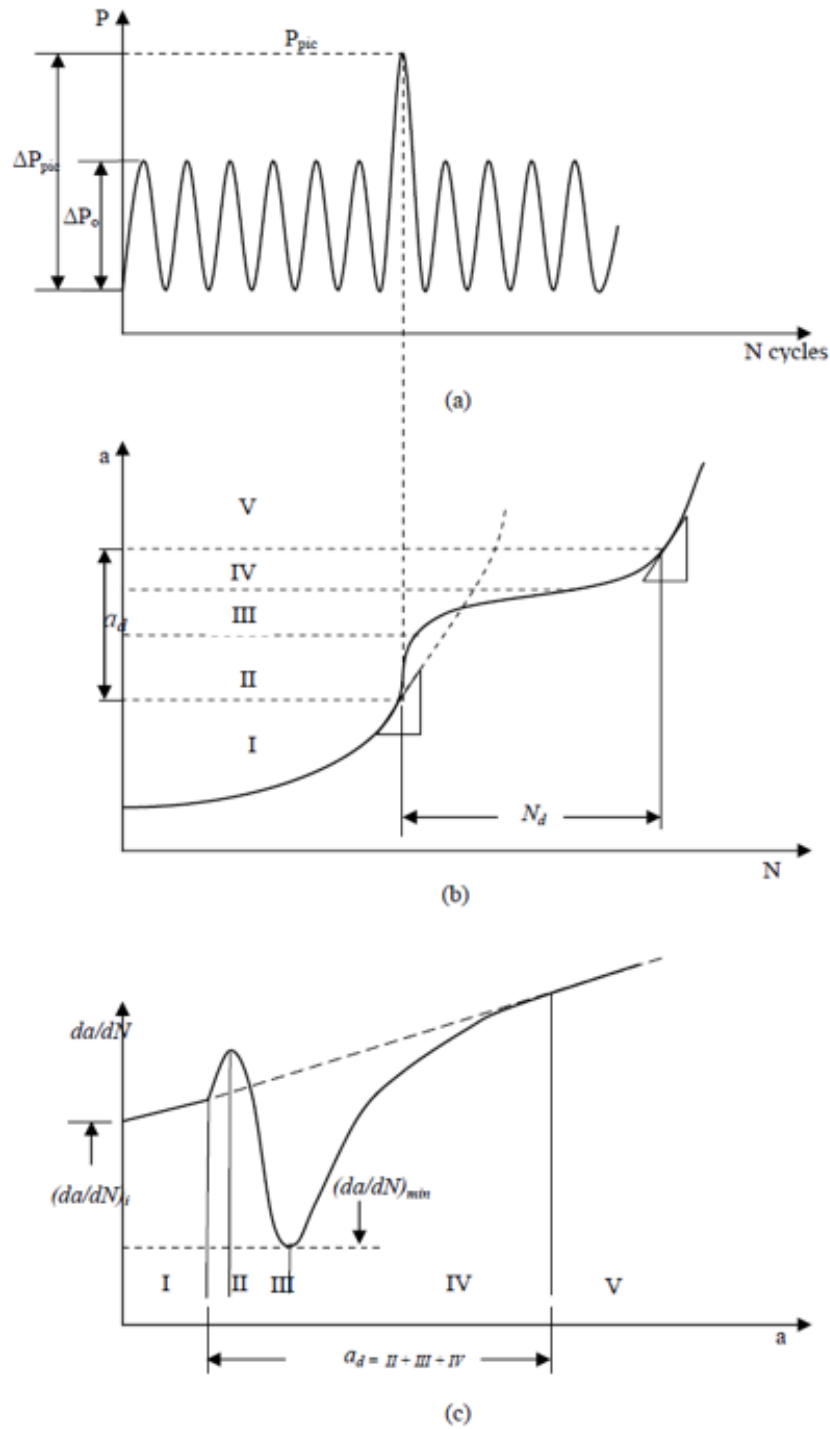


Figure 20: Description phénoménologique de l'effet d'une surcharge

- I) Propagation à une vitesse croissante avec une amplitude de charge  $\Delta P_0$  (augmentation de  $\Delta K_0$ ).
- II) II) Augmentation rapide de la vitesse de fissuration au moment de l'application de la surcharge pendant quelques cycles.
- III) III) Fissuration à une vitesse décroissante : la vitesse de fissuration atteint un minimum.  $\left(\frac{da}{dN}\right)_{min}$
- IV) Rétablissement progressif de la vitesse initiale.
- V) Fin de l'effet de ralentissement, la courbe (a-N) reprend sa forme initiale antérieure à la surcharge.

L'effet de ralentissement causé par la surcharge peut être caractérisé par les éléments suivants :

- *N<sub>d</sub>, le nombre de cycles de retard*, défini comme le nombre de cycles nécessaires pour que la fissure retrouve sa vitesse initiale. *N<sub>d</sub>* est déterminé en traçant une tangente à la courbe (a-N) dans le stade IV, parallèle à la tangente de cette même courbe à la fin du stade I (figure 20 (a)).
- *La longueur de fissure perturbée* ad par la surcharge, correspond à la distance parcourue par la fissure pendant *N<sub>d</sub>* (figure 20 (a)).
- *La vitesse de fissuration*  $\left(\frac{da}{dN}\right)_{min}$  atteint sa valeur minimale à la fin du stade III (voir figure 20 (b)).
- *la longueur de fissure* *a<sub>r</sub>* représente depuis l'application de la surcharge jusqu'au point de vitesse minimale (voir figure 25 (b)).

D'autres paramètres mineurs sont parfois utilisés, tels que :

- les distances parcourues dans les stades II, III et IV.
- Le rapport des vitesses  $\left(\frac{da}{dN}\right)_i / \left(\frac{da}{dN}\right)_{min}$

### II.6 Le nombre de cycles de retard $N_d$ :

Le retard en nombre de cycles, noté  $N_d$ , représente le nombre de cycles affectés par la surcharge. Il est compté à partir du premier cycle suivant la surcharge et se termine lorsque la vitesse de propagation atteint à nouveau sa vitesse initiale  $(da/dN)_{base}$ .  $N_d$  peut être déterminé à partir des courbes représentant la longueur de fissure  $a$  ou la vitesse de propagation  $(da/dN)$  en fonction du nombre de cycles appliqués  $N$ . Certains chercheurs décomposent ce retard en deux termes distincts, à savoir  $N_b$  et  $N_{base}$ .

$$N_d = N_b + N_{base} \quad (26)$$

$N_d$  représente l'amélioration de la durée de vie induite par la surcharge, tandis que  $N_{base}$  correspond au nombre de cycles nécessaires pour propager la fissure sur la longueur affectée par la surcharge  $a_d$  si le chargement était à amplitude constante.

Pour quantifier le retard, plusieurs chercheurs ont proposé de définir un taux de retard, noté  $D_r$ , qui est le rapport entre  $N_d$  et  $N_{base}$  :

$$D_r = \frac{N_d}{N_{base}} \quad (27)$$

Le taux de retard  $D_r$  représente le facteur de durée de vie bénéfique.

### II.7 La longueur de fissure affectée par le retard $a_d$ :

La longueur de fissure perturbée par le retard,  $a_d$ , est définie comme la distance parcourue par la fissure depuis le point d'application de la surcharge jusqu'au moment où la vitesse de propagation revient à sa valeur initiale. Cette longueur peut varier en fonction du taux de surcharge appliqué, de la limite d'élasticité du matériau et de l'épaisseur de l'éprouvette. Tous ces facteurs convergent vers une relation entre ce paramètre et la taille de la zone plastifiée de surcharge.

---

## II.8 La vitesse minimale $(da/dN)_{\min}$ atteinte après surcharge et sa longueur de fissure associée $a_{\min}$ :

La figure 20 illustre que la vitesse de propagation de la fissure atteint un minimum après l'application de la surcharge, ce qui permet de caractériser l'ampleur du retard. Lorsque la fissure se bloque après la surcharge, cela ne se produit pas immédiatement. En réalité, la fissure continue de se propager pendant quelques cycles, et sa vitesse converge vers le seuil de fissuration. Dans de nombreux cas, cette longueur de fissure est considérée comme proportionnelle à la taille de la zone plastifiée cyclique de surcharge.

## II.9 Les mécanismes qui peuvent expliquer le retard :

Dans cette section de l'étude, nous examinerons cinq phénomènes physiques ou mécaniques qui ont été proposés dans la littérature pour expliquer le retard de propagation d'une fissure suite à l'application d'une surcharge :

- **L'émoussement de la fissure** [26, 27] : Ce mécanisme se base sur le fait que le front de fissure s'arrondit après l'application du cycle de surcharge, devenant ainsi assimilable à un rayon d'entaille mécanique. Le nombre de cycles de retard correspondrait donc au nombre de cycles nécessaires pour réinitialiser la fissure à partir de ce rayon d'entaille.
- **Le durcissement cyclique** provoqué par la surcharge [28] : L'application de la surcharge provoque une importante plastification au fond de la fissure, entraînant un durcissement cyclique. Cette situation peut être assimilée à la présence d'un matériau écroui entouré d'une matrice élastique. Le retard correspondrait alors à la propagation de la fissure dans cette zone.
- **La déviation de la fissure** et/ou le branchement de fissure [29, 30] : Le facteur d'intensité de contrainte dépend de la géométrie de la fissure. La déviation de la fissure peut réduire ce facteur en raison des microstructures en avant du front de fissure ou d'une augmentation de la rugosité de la surface de rupture. Le chemin de la fissure devient alors sinueux.

- 
- **La fermeture de fissure** induite par la plasticité [31] : La surcharge crée une zone devant le front de fissure où la matière a été étirée puis comprimée lors de la décharge. Lorsque la fissure progresse à l'intérieur de cette région, les surfaces de la fissure relâchent cette matière comprimée, ce qui peut entraîner un contact même sous contrainte positive. Cela réduit le facteur d'intensité de contrainte initial. Ce phénomène se produit également sous chargement à amplitude constante.
  - **Les contraintes résiduelles** de compression à l'intérieur de la zone plastifiée de surcharge : Ces contraintes résiduelles de compression réduisent localement le facteur d'intensité de contrainte, ce qui entraîne une diminution de la vitesse de propagation de la fissure.

Parmi ces différents mécanismes et micro-mécanismes proposés dans la littérature pour expliquer le retard, certains ont montré leurs limites. Par exemple, N.A. Fleck [32], dans une étude bibliographique critique, a démontré que l'émoussement du front de fissure et le durcissement cyclique ne peuvent expliquer le retard provoqué par une surcharge.

## **Chapitre III**

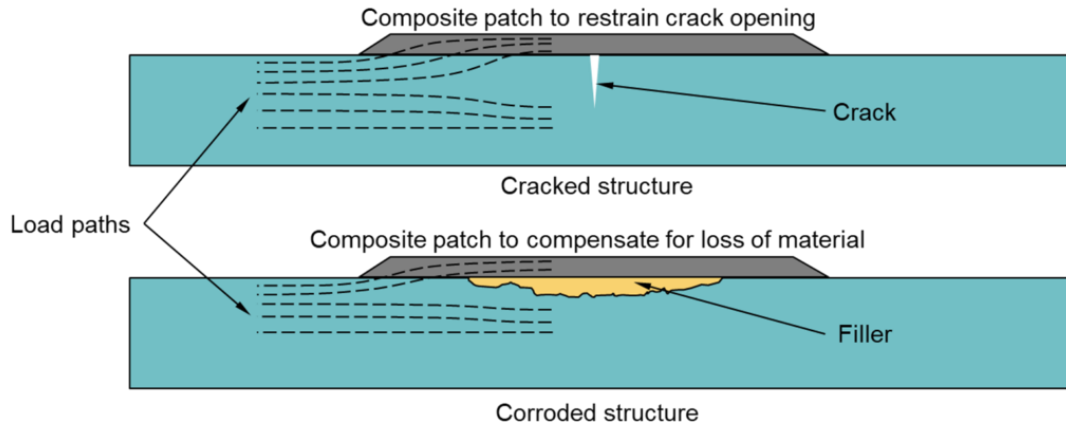
### **Généralité sur les patches composites**



### III.1 Définition du patch composite :

Les patches composites sont des matériaux composites renforcés par des fibres, utilisés pour réparer les dommages structuraux sur les avions, tels que les fissures et les trous. Ils sont fabriqués en combinant des couches de fibres de carbone, de verre ou d'aramide avec une matrice de résine époxy ou de polyimide.

Les couches de fibres sont disposées selon des orientations spécifiques pour fournir des propriétés mécaniques optimales, telles que la résistance à la traction, la résistance à la compression et la rigidité.



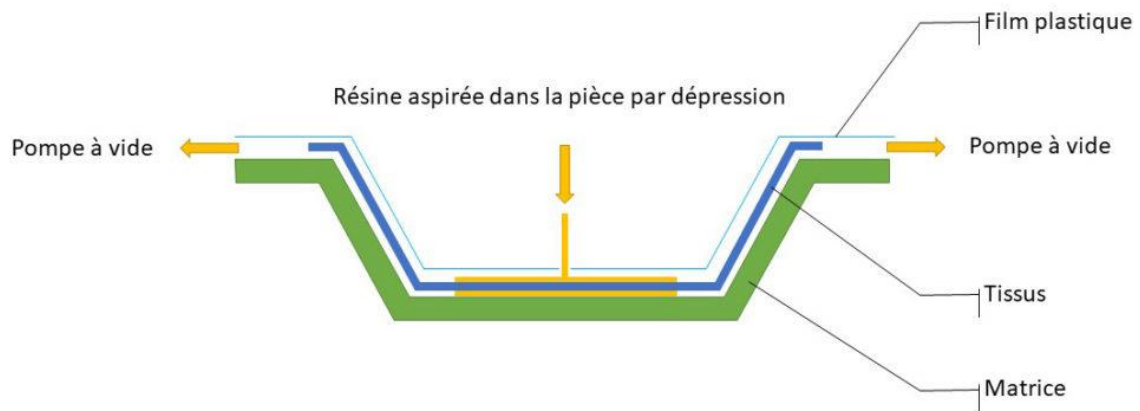
**Figure 21 : Principes d'une réparation par patch composite.**

### III.2 La fabrication des patches composites :

En général, la fabrication de patches composites implique la sélection de matériaux composites appropriés, la conception du patch, la préparation de la surface et le processus de fabrication en lui-même. Voici plus de détails sur chaque étape [46] :

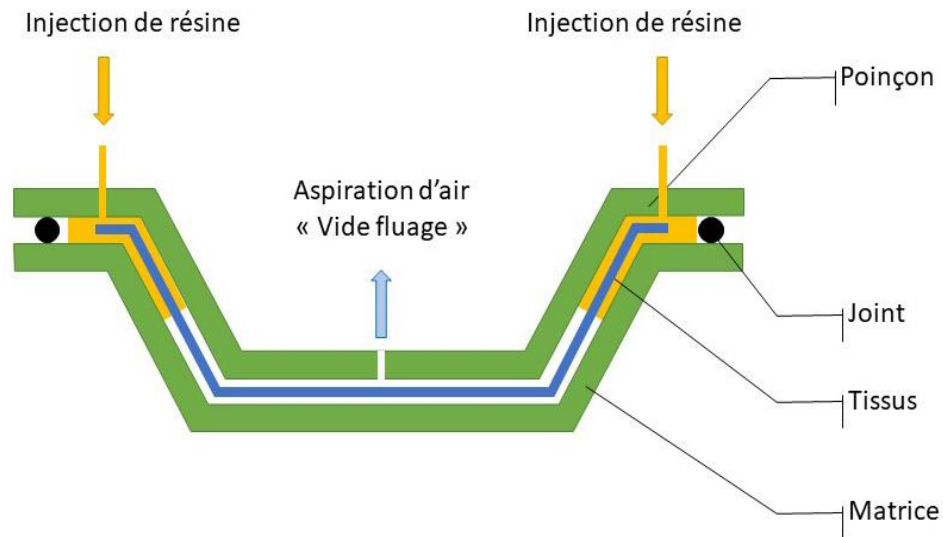
- **Sélection des matériaux composites** : La sélection des matériaux composites appropriés dépend des exigences de performance de la structure à réparer. Les matériaux composites peuvent être fabriqués à partir de différents types de fibres,

- 
- y compris la fibre de verre, la fibre de carbone et la fibre d'aramide. La matrice de polymère peut également être choisie en fonction des propriétés requises, telles que la résistance à la chaleur et la résistance chimique.
- **Conception du patch** : La conception du patch dépend de la forme, de la taille et de la localisation de la zone endommagée. Le patch doit être conçu pour fournir une résistance suffisante tout en minimisant l'augmentation de poids. Des logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO) peuvent être utilisés pour optimiser la conception du patch.
  - **Préparation de la surface** : La préparation de la surface est essentielle pour garantir une adhérence maximale entre le patch et la structure à réparer. La surface doit être nettoyée en profondeur pour éliminer les contaminants tels que l'huile, la graisse et la saleté. Les zones endommagées doivent être poncées et meulées pour éliminer les bords de fissures et créer une surface rugueuse pour améliorer l'adhérence.
  - **Le processus de fabrication du patch composite** dépend de la technique de fabrication choisie, qui peut varier en fonction des spécifications de la structure à réparer et des exigences de performance. Voici plus de détails sur les techniques de fabrication courantes :
    - a. **Moulage par transfert de résine (RTM)** : Le moulage par transfert de résine est une technique de fabrication automatisée dans laquelle la résine est injectée dans un moule préformé, qui contient des fibres de renforcement pré-positionnées. Le moule est fermé et la résine est distribuée à travers les fibres de renforcement par une pression appliquée sur le moule. Le processus RTM permet une production de masse précise et répétable, mais nécessite des moules coûteux et une expertise en matière de traitement des matériaux[47].



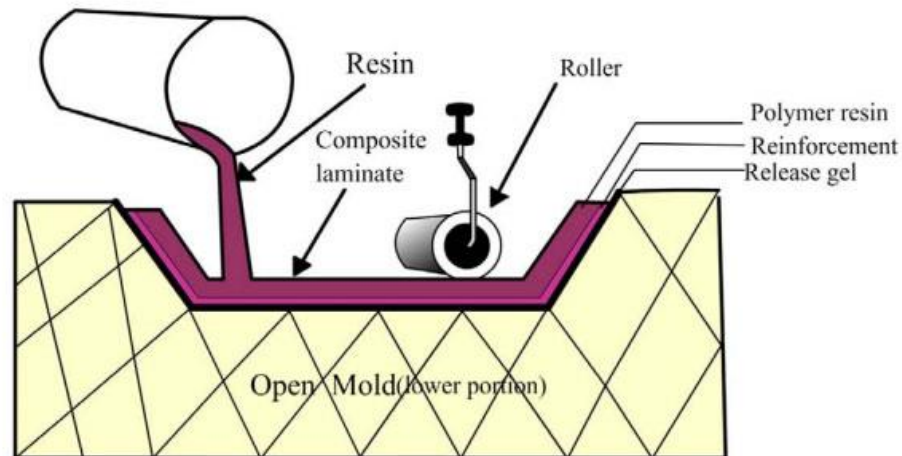
**Figure 22 : Moulage par transfert de résine (RTM) [47]**

- b. Moulage par injection : Le moulage par injection est une autre technique de fabrication automatisée dans laquelle la résine et les fibres de renforcement sont injectées dans un moule sous haute pression. La résine est préchauffée pour une meilleure fluidité et l'injection sous haute pression permet une distribution uniforme de la résine à travers les fibres de renforcement. Comme pour le RTM, le moulage par injection permet une production de masse précise et répétable, mais nécessite également des moules coûteux et une expertise en matière de traitement des matériaux [48].



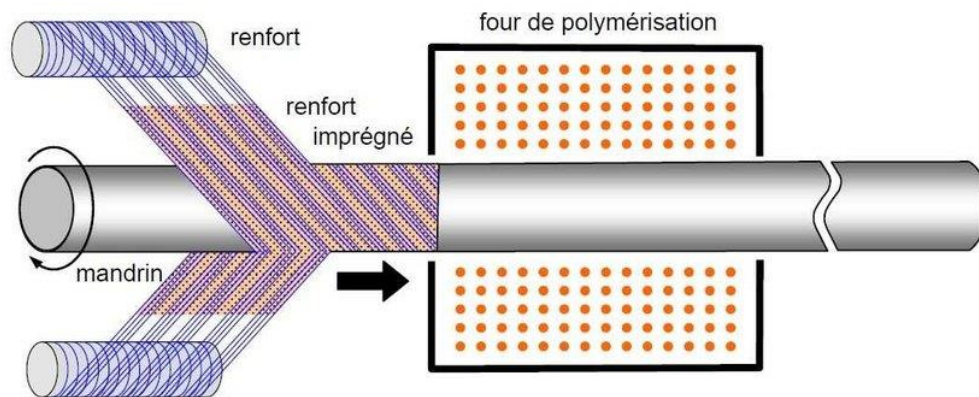
**Figure 23 : Le moulage par injection de résine liquide RTM (Resin Transfert Molding) [48]**

- c. Laminage à plat : Le laminage à plat est une technique de fabrication manuelle dans laquelle les fibres de renforcement sont positionnées manuellement sur une surface plane, puis imprégnées de résine à l'aide d'un rouleau ou d'une brosse. Une fois la résine appliquée, une pression est exercée pour éliminer les bulles d'air et laisser sécher le patch composite. Cette technique est moins coûteuse que les méthodes automatisées, mais nécessite une expertise en fabrication composite et peut prendre plus de temps pour produire des patchs en grandes quantités.



**Figure 24 : : Le laminage à plat fabrication manuelle [48]**

- d. Enroulement filamentaire : L'enroulement filamentaire est une autre technique de fabrication manuelle dans laquelle les fibres de renforcement sont enroulées sur un mandrin préformé pour former une structure tubulaire. Une fois le mandrin rempli de fibres de renforcement, la résine est appliquée pour imprégner les fibres et former le patch composite. Cette technique est également moins coûteuse que les méthodes automatisées, mais nécessite une expertise en fabrication composite et peut prendre plus de temps pour produire des patches en grandes quantités [48].



**Figure 25 : Procédé d'enroulement filamentaire**

Une fois le patch composite fabriqué, il peut être découpé et appliqué sur la structure à réparer, comme décrit précédemment. Des tests de qualité peuvent être effectués pour s'assurer que le patch est conforme aux spécifications de performance requises avant de le mettre en service.

### III.3 Le principe de fonctionnement des patchs :

Un patch composite est généralement composé de plusieurs couches de matériaux différents qui sont combinées pour offrir des propriétés spécifiques. Les patchs composites sont largement utilisés dans l'industrie pour renforcer ou réparer les structures endommagées.

Le principe de fonctionnement d'un patch composite repose sur les propriétés mécaniques des différents matériaux qui le composent. Les matériaux composites sont conçus pour avoir des propriétés mécaniques supérieures à celles de leurs composants individuels. Par exemple, les fibres de carbone sont très résistantes et rigides, tandis que la résine époxy est flexible et résistante aux chocs. Lorsqu'ils sont combinés, ils forment un matériau composite qui est à la fois résistant et flexible [48].

Pour fabriquer un patch composite, les différentes couches de matériaux sont généralement collées ensemble avec un adhésif. Le patch composite est ensuite appliqué sur la surface de la structure à renforcer ou à réparer. L'adhésif permet de transférer la charge de la structure vers le patch composite, ce qui renforce la structure en distribuant la charge sur une plus grande surface.

En fonction de l'application, le patch composite peut être conçu pour être très mince et léger, ou épais et résistant. Les propriétés mécaniques du patch composite peuvent également être modifiées en modifiant la quantité et le type de matériaux utilisés, ainsi que la façon dont ils sont assemblés.

### III.4 Caractéristiques et propriétés des patches :

Les patches composites offrent de nombreux avantages par rapport aux matériaux traditionnels, notamment leur résistance mécanique élevée, leur résistance à la corrosion, leur légèreté, leur durabilité et leur adaptabilité. Voici plus de détails sur chaque propriété [49] :

- **Résistance mécanique** : Les patches composites sont réputés pour leur résistance mécanique élevée, qui est due à leur construction en couches de fibres et de résine. Les fibres de carbone, par exemple, sont environ cinq fois plus résistantes que l'acier et ont une résistance à la traction élevée, ce qui les rend idéales pour les applications qui nécessitent une grande résistance, telles que les pièces d'avion et les pales d'éolienne.
- **Résistance à la corrosion** : Les patches composites sont également résistants à la corrosion, ce qui en fait un choix idéal pour les environnements corrosifs tels que les applications marines, les produits chimiques et les gaz corrosifs. Contrairement à l'acier et à l'aluminium, les patches composites ne rouillent pas, ne se corrodent pas et ne se fissurent pas.
- **Légèreté** : Les patches composites sont beaucoup plus légers que les matériaux traditionnels tels que l'acier, l'aluminium et le béton. Par exemple, les patches composites à base de fibres de carbone sont environ quatre fois plus légers que l'acier, ce qui les rend faciles à manipuler et à installer. Cette légèreté réduit également les coûts de transport et d'installation.
- **Durabilité** : Les patches composites ont une durée de vie plus longue que de nombreux autres matériaux en raison de leur résistance à l'usure, aux chocs et à la fatigue. Les patches composites ont également une grande résistance à la fissuration, ce qui signifie qu'ils peuvent supporter des charges élevées sans se casser.
- **Adaptabilité** : Les patches composites peuvent être conçus pour répondre à des exigences spécifiques, telles que la résistance à la chaleur, la résistance à l'humidité et la résistance aux produits chimiques. Les patches composites peuvent

également être fabriqués dans une variété de formes et de tailles, ce qui les rend adaptés à une large gamme d'applications.

- **Esthétique** : Les patchs composites peuvent être fabriqués avec une large gamme de couleurs et de finitions, ce qui les rend attrayants et adaptés à une variété d'applications, y compris les éléments esthétiques tels que les revêtements de façade.

### III.5 Applications des patchs dans l'industrie :

Les patchs composites peuvent être utilisés dans de nombreuses applications industrielles, notamment [49]:

- **Réparation de structures composites** : Les patchs composites sont souvent utilisés pour réparer les dommages causés aux structures composites, telles que les ailes d'avions, les hélices de bateaux et les pales de turbines éoliennes. Les patchs composites sont capables de fournir une résistance structurelle similaire à celle du matériau d'origine, ce qui permet de prolonger la durée de vie de la structure.
- **Renforcement de structures en béton** : Les patchs composites peuvent être utilisés pour renforcer les structures en béton, telles que les ponts et les bâtiments. Les patchs composites peuvent être appliqués sur des zones de faiblesse, telles que des fissures ou des zones endommagées, pour augmenter la résistance et la durabilité de la structure.
- **Applications aérospatiales** : Les patchs composites peuvent être utilisés dans les applications aérospatiales, notamment pour les pièces de fuselage et les ailes d'avions. Les patchs composites peuvent fournir une résistance structurelle suffisante tout en étant légers, ce qui peut aider à améliorer les performances de l'avion.
- **Applications automobiles** : Les patchs composites peuvent être utilisés dans l'industrie automobile pour renforcer les châssis, les carrosseries et les pare-chocs. Les patchs composites peuvent fournir une résistance structurelle similaire à celle



- de l'acier tout en étant plus légers, ce qui peut aider à améliorer l'efficacité énergétique des véhicules.
- *Applications marines* : Les patchs composites peuvent être utilisés pour renforcer les coques de bateaux et les sous-marins. Les patchs composites peuvent fournir une résistance structurelle élevée tout en étant résistants à la corrosion, ce qui peut aider à prolonger la durée de vie des navires.
  - *Applications sportives* : Les patchs composites peuvent être utilisés dans l'industrie des sports, notamment pour renforcer les équipements de protection tels que les casques et les genouillères. Les patchs composites peuvent fournir une protection supplémentaire tout en étant légers et confortables à porter.

### III.6 La réparation des patchs composites :

La réparation par patchs composites est une technique couramment utilisée pour restaurer la fonctionnalité et la résistance des structures endommagées. Elle consiste à appliquer des matériaux composites sur une zone endommagée d'une structure pour renforcer la résistance mécanique de celle-ci. Cette méthode est utilisée pour réparer des dommages tels que des fissures, des bosses ou des éraflures sur des matériaux tels que le métal, le béton ou la fibre de verre.

Les matériaux composites utilisés pour la réparation par patchs sont généralement fabriqués à partir de fibres renforcées, telles que la fibre de carbone, la fibre de verre ou la fibre de kevlar, combinées avec une matrice de résine. Ces matériaux offrent une résistance et une durabilité supérieures à celles des matériaux traditionnels tels que l'acier et le béton [49].

La réparation par patchs composites présente de nombreux avantages par rapport aux méthodes de réparation traditionnelles. Elle est plus rapide et moins coûteuse que le remplacement complet de la structure, ce qui peut entraîner une interruption de la production et des coûts supplémentaires. De plus, la réparation par patchs peut être réalisée sur place, ce qui réduit les temps d'arrêt et les coûts de transport.

Cependant, la réparation par patchs composites nécessite une expertise en matière de fabrication et d'application des matériaux composites, ainsi qu'une connaissance approfondie de la structure à réparer. Une mauvaise application des patchs peut entraîner une faiblesse structurelle ou des fissures supplémentaires, ce qui peut entraîner des coûts de réparation supplémentaires à long terme.

### **III.7 La réparation par patchs composites :**

Les patchs composites peuvent être réparés de plusieurs manières en fonction de la taille et de la localisation de la zone endommagée

- Réparation par chevauchement : Cette méthode est souvent utilisée pour les petites zones de réparation de surface. Pour cette méthode, un patch de matériau composite est coupé en forme de cercle ou de carré pour s'adapter à la zone endommagée. Ensuite, l'adhésif pour composites est appliqué sur le patch et la zone endommagée. Le patch est ensuite placé sur la zone endommagée en le chevauchant sur les bords sains du matériau d'origine. Le patch est ensuite pressé en place et laissé durcir.
- Réparation par enroulement : Cette méthode convient mieux aux zones cylindriques ou courbées telles que les tuyaux, les mâts, etc. Pour cette méthode, un ruban de tissu composite est enroulé autour de la zone endommagée. Le ruban est imbibé d'un adhésif pour composites et placé sur la zone endommagée. Le ruban est ensuite enroulé autour de la zone endommagée en plusieurs couches, en s'assurant que chaque couche est bien imbibée d'adhésif pour composites. Le ruban est ensuite laissé durcir.
- Réparation par collage : Cette méthode est utilisée pour les zones de réparation plus importantes. Pour cette méthode, un adhésif pour composites est appliqué sur la zone endommagée. Ensuite, un patch de matériau composite est placé sur la zone endommagée en veillant à ce qu'il chevauche les bords sains du matériau d'origine. Le patch est ensuite pressé en place et laissé durcir. Cette méthode peut également utiliser un tissu composite pour renforcer la zone de réparation.

- **Réparation par remplacement** : Cette méthode est utilisée pour les zones de réparation plus importantes ou lorsque la zone endommagée ne peut pas être réparée. Pour cette méthode, la zone endommagée est découpée et retirée du matériau composite. Ensuite, un nouveau morceau de matériau composite est fabriqué pour remplacer la zone endommagée. Le nouveau morceau est ensuite fixé en place avec de l'adhésif pour composites et pressé en place. La zone de réparation est ensuite laissée durcir.

### III.8 Procédures et techniques de réparation :

Les patchs composites sont couramment utilisés dans l'industrie aéronautique pour réparer les dommages causés à la structure en composite d'un avion. Les procédures et techniques de réparation pour les patchs composites peuvent varier en fonction de la nature et de l'emplacement de la zone endommagée. Cependant, voici quelques étapes générales pour préparer et coller un patch composite [48]:

- **Préparation de la surface** : La première étape de toute réparation de patch composite est la préparation de la surface. Cela implique de retirer toutes les parties endommagées, telles que les fissures, les trous ou les éclats de matériau, à l'aide d'outils appropriés tels que des scies, des fraises ou des meuleuses. Une fois que la zone endommagée a été nettoyée, la surface doit être poncée légèrement pour créer une surface rugueuse. Le ponçage permettra à la colle de mieux adhérer à la surface. Ensuite, la zone doit être nettoyée avec un solvant approprié pour éliminer toutes les impuretés et laisser une surface propre et sèche.
- **Découpe du patch** : Le patch composite doit être découpé à la bonne taille pour couvrir la zone endommagée. Il est important de mesurer soigneusement la zone endommagée avant de découper le patch composite. Le patch doit être suffisamment grand pour couvrir la zone endommagée et permettre un chevauchement de quelques centimètres sur les bords sains. Les bords du patch doivent être arrondis pour éviter les points de stress. Les patchs composites peuvent être coupés à l'aide de ciseaux, d'un couteau ou d'un outil de découpe approprié.

- 
- **Préparation du mélange de colle** : La colle utilisée pour coller le patch composite doit être mélangée selon les instructions du fabricant. Différentes colles peuvent nécessiter des proportions ou des temps de mélange différents. Assurez-vous de mélanger la colle correctement pour obtenir une consistance uniforme.
  - **Application de la colle** : La colle est appliquée sur la zone endommagée à l'aide d'un pinceau ou d'une spatule. Assurez-vous de couvrir complètement la zone endommagée et d'étaler la colle uniformément. Il est important de ne pas appliquer trop de colle, car cela peut entraîner une surépaisseur ou des bulles d'air sous le patch composite.
  - **Application du patch** : Le patch composite est soigneusement placé sur la zone endommagée et pressé fermement en place. Assurez-vous que le patch adhère bien à la surface en le lisant avec une spatule ou un rouleau. Si le patch est grand, il peut être utile d'utiliser une méthode de stratification pour l'appliquer en couches. Cela peut aider à éliminer les bulles d'air et à garantir une adhérence uniforme.
  - **Séchage** : Le temps de séchage dépend du type de colle utilisé et des conditions environnementales, telles que la température et l'humidité. Assurez-vous de suivre les instructions du fabricant pour le temps de séchage recommandé. Pendant le séchage, le patch composite doit être maintenu en place à l'aide d'une presse ou d'un poids pour éviter qu'il ne se décolle.
  - **Finition** : Une fois le patch composite séché, la zone peut être poncée pour égaliser les bords du patch avec la surface environnante. La zone peut ensuite être peinte.

### III.9 Limitations et défis de la réparation par patch composite :

La réparation peut être une solution durable et économique pour prolonger la durée de vie des produits, mais elle présente également des limitations et des défis importants. Voici quelques-uns des principaux [48]:

- **Difficulté de détection des défauts** : Les patchs composites peuvent contenir des défauts tels que des fissures, des bulles d'air, des vides ou des porosités. Ces

- défauts sont difficiles à détecter car ils peuvent être invisibles à l'œil nu. Par conséquent, une inspection minutieuse doit être effectuée pour détecter tous les défauts et déterminer l'étendue de la réparation nécessaire.
- **Nécessité de suivre des procédures strictes** : La réparation des patchs composites nécessite de suivre des procédures strictes pour garantir la qualité de la réparation. Les procédures comprennent des étapes telles que la préparation de la surface, l'application de la résine et du tissu de renforcement, le séchage et le ponçage. Si ces procédures ne sont pas suivies correctement, la réparation peut être de mauvaise qualité.
  - **Compatibilité des matériaux** : Les matériaux utilisés pour la réparation doivent être compatibles avec les matériaux du patch composite d'origine. Si les matériaux ne sont pas compatibles, la réparation peut se détériorer rapidement ou ne pas adhérer correctement.
  - **Évaluation de la performance après la réparation** : Une évaluation minutieuse de la performance du patch composite doit être effectuée après la réparation pour s'assurer qu'il répond aux exigences de conception et de performance. Cette évaluation peut être difficile car elle nécessite souvent des tests destructifs ou non destructifs pour vérifier la résistance, la rigidité et la durabilité du patch composite réparé.

### III.10 Le comportement des patchs composites en fatigue :

Le comportement des patchs composites en fatigue est un sujet crucial dans de nombreux domaines, tels que l'aéronautique, l'automobile, l'industrie navale, etc. La fatigue des matériaux est un phénomène courant qui se produit lorsqu'un matériau est soumis à des contraintes répétitives, ce qui peut entraîner une défaillance progressive et même soudaine du matériau [50].

Les patchs composites, qui sont utilisés pour la réparation des structures endommagées, sont également soumis à des contraintes répétitives en service, ce qui peut affecter leur performance et leur durabilité à long terme. Le comportement en fatigue des patchs

composites dépend de nombreux facteurs tels que la composition des matériaux, la géométrie et la méthode d'application du patch.

L'étude du comportement des patchs composites en fatigue est donc essentielle pour garantir la fiabilité et la sécurité des structures réparées. Les ingénieurs et les scientifiques travaillent actuellement à développer des techniques et des modèles de simulation pour prédire le comportement en fatigue des patchs composites. Ces efforts visent à améliorer la qualité des réparations et à prolonger la durée de vie des structures réparées [50].

### III.11 Effets de la fatigue sur les patchs composites :

La fatigue des matériaux est un phénomène complexe qui peut être décrit comme la dégradation progressive des propriétés mécaniques des matériaux lorsqu'ils sont soumis à des charges répétitives. Les cycles de charge répétitifs peuvent provoquer l'initiation et la propagation de microfissures dans les matériaux, qui peuvent conduire à une défaillance prématurée de la structure.

Dans le cas des patchs composites, la fatigue peut affecter les performances de deux manières principales. Tout d'abord, la fatigue peut entraîner l'initiation et la propagation de fissures de fatigue à l'intérieur du patch composite. Ces fissures peuvent se propager rapidement dans la structure, même sous des charges relativement faibles, et peuvent causer des défaillances catastrophiques. Les fissures de fatigue sont souvent difficiles à détecter visuellement, car elles se produisent à l'intérieur du matériau. Cependant, des techniques d'inspection non destructives, telles que la radiographie ou la tomographie par rayons X, peuvent être utilisées pour détecter les fissures de fatigue et évaluer leur progression [50].

Deuxièmement, la fatigue peut également affecter les propriétés mécaniques des patchs composites, telles que la résistance à la traction, la flexion et la compression. Les fibres de renforcement dans les patchs composites peuvent subir des déformations permanentes et perdre leur résistance à la traction en raison des cycles de charge répétitifs. Les résines

qui maintiennent les fibres ensemble peuvent également se dégrader avec le temps en raison de la fatigue, ce qui peut réduire la résistance globale du patch composite.

Pour atténuer les effets de la fatigue sur les patchs composites, les concepteurs peuvent prendre en compte les contraintes de fatigue dès la conception du patch composite. Ils peuvent utiliser des techniques de modélisation avancées pour simuler les effets de la fatigue et optimiser la géométrie et les matériaux du patch composite en conséquence. De plus, des méthodes d'inspection régulières, telles que la radiographie, peuvent être utilisées pour détecter les fissures de fatigue à un stade précoce et prévenir les défaillances catastrophiques [50].

**Chapitre VI**  
**Simulation numérique**



## IV.1 Présentation du logiciel :

AFGROW Fatigue est un logiciel spécialisé dans l'analyse et la prédiction de la fatigue des structures métalliques. Il est utilisé principalement dans les industries aérospatiales, de l'énergie et de la défense pour évaluer la durée de vie en fatigue des composants soumis à des charges répétées.

Le logiciel AFGROW Fatigue offre une large gamme de fonctionnalités pour analyser la propagation de fissures et prédire la durée de vie résiduelle des structures. Il utilise des techniques avancées de mécanique de la rupture et de la fatigue pour fournir des évaluations précises et fiables.

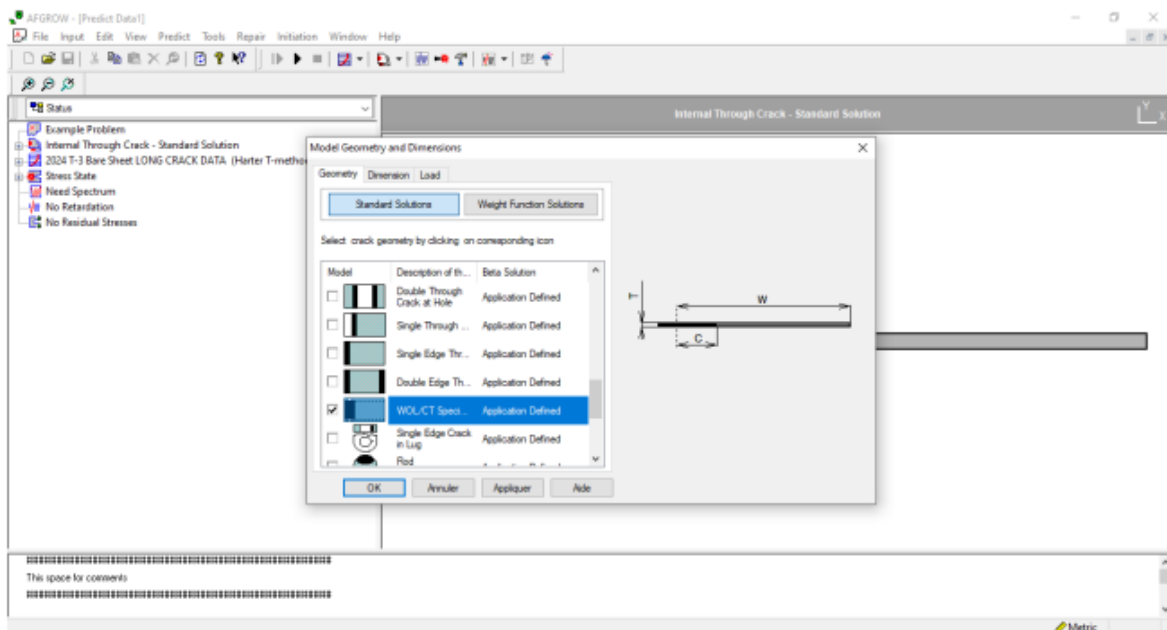


Figure 26 : Interface du logiciel AFGROW

Voici quelques caractéristiques clés d'AFGROW Fatigue :

- 
- **Modélisation avancée** : Le logiciel permet de modéliser des structures complexes en utilisant des éléments finis et des méthodes d'analyse avancées pour prendre en compte les contraintes et les contraintes résiduelles.
  - Analyse de la propagation des fissures : AFGROW Fatigue est capable de prédire la propagation des fissures dans les structures soumises à des cycles de chargement répétés. Il utilise des modèles de mécanique de la rupture pour estimer la vitesse de propagation des fissures et prédire leur taille critique.
  - **Prédiction de la durée de vie résiduelle** : En se basant sur les données d'entrée fournies, AFGROW Fatigue calcule la durée de vie résiduelle des structures en tenant compte de la propagation des fissures et des cycles de chargement appliqués.
  - **Gestion des données** : Le logiciel permet de gérer efficacement les données relatives aux matériaux, aux chargements et aux résultats d'analyse. Il facilite également la génération de rapports détaillés pour documenter les analyses effectuées.
  - **Interface conviviale** : AFGROW Fatigue dispose d'une interface conviviale qui permet aux utilisateurs de définir facilement les paramètres d'analyse, d'importer des modèles de CAO et de visualiser les résultats de manière claire et précise.

## IV.2 Présentation du matériau étudié :

Le matériau 4024 T est un alliage d'aluminium utilisé dans de nombreuses applications industrielles. Il fait partie de la famille des alliages d'aluminium 4000, qui sont principalement composés d'aluminium, de silicium et de magnésium. Le chiffre "4024" fait référence à la composition spécifique de cet alliage.

**Tableau 1 : Présentation du matériau à étudier (aluminium, 2024-T861)**

<b>E (Mpa)</b>	<b>Re (Mpa)</b>	<b><math>\nu</math></b>	<b>p</b>	<b>q</b>
73083,4	386,106	0.33	0.5	1

- **Propriété adhésive :**

L'adhésif utilisé dans notre étude c'est L'ADEKIT A-140, un adhésif époxyde bi-composants de haute résistance utilisé pour des applications structurales en aéronautique dont les propriétés élastiques sont les suivantes :

**Tableau 2 : propriétés mécaniques de l'adhésive**

<b>E (MPa)</b>	<b>Ga (MPa)</b>	<b>e (mm)</b>
2690	1000	0,28

- **Propriété du patch :**

Le patch utilisé c'est le Bore/époxyde avec les propriétés élastiques suivantes :

**Tableau 3 : propriétés mécaniques du patch**

<b>EL (MPa)</b>	<b>ET (MPa)</b>	<b>GL (MPa)</b>	<b>GT (MPa)</b>	<b><math>\nu_L</math></b>	<b><math>\nu_T</math></b>
200000	19600	7200	5500	0,30	0,28

### IV.3 Présentation du modèle géométrique :

Dans cette étude, nous avons sélectionné des éprouvettes de type CT75 comme échantillons pour nos simulations. Ces éprouvettes sont spécifiées selon la norme ASTM et sont largement utilisées dans les essais de caractérisation des matériaux.

La figure 27, présentée ci-dessous, illustre en détail les dimensions de l'éprouvette CT75 selon les spécifications de la norme ASTM. Ces dimensions comprennent la longueur, la

largeur et l'épaisseur de l'éprouvette, ainsi que la taille et la position de la fissure préexistante.

Il est important de souligner que l'éprouvette est pré-fissurée, ce qui signifie qu'une fissure a été intentionnellement créée à un emplacement spécifique et avec des dimensions contrôlées. Cette fissure permet de reproduire les conditions réelles de sollicitation en mode 1, où la propagation de la fissure se fait principalement dans le plan perpendiculaire à la direction de l'effort appliqué.

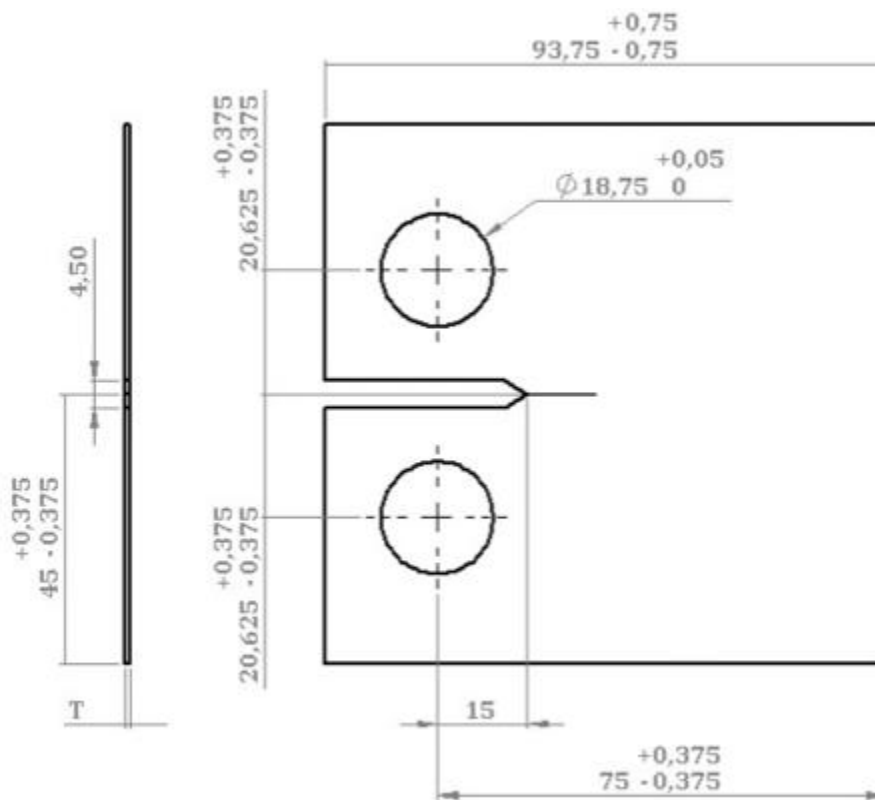


Figure 27 : Model géométrique

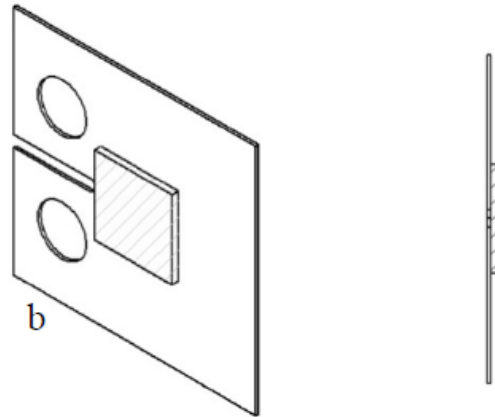


Figure 28 : Présentation de la réparation

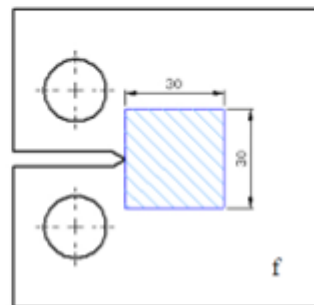
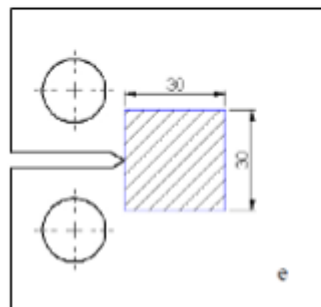
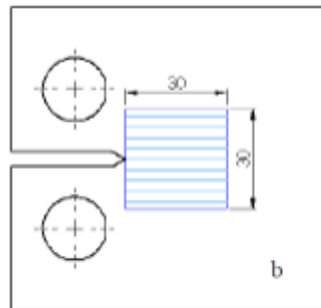


Figure 29: Présentation des orientations des fibres

---

#### IV.4 Influence du rapport de charge :

La figure ci-dessous illustre l'influence du rapport de charge sur la propagation des fissures. Pour observer cette influence, nous avons effectué trois essais avec des rapports de charge de 0.1, 0.3 et 0.5.

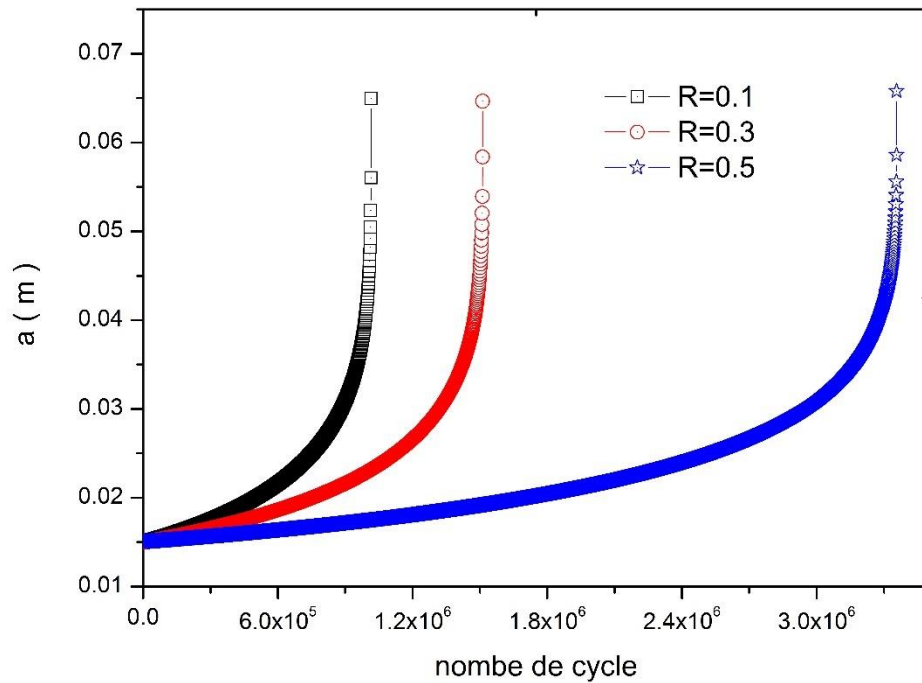
**Tableau 4 : Les rapports de charge**

<b>R</b>	<b>P<sub>max</sub> (N)</b>	<b>P<sub>min</sub> (N)</b>
0.1	9000	900
0.3	9000	2700
0.5	9000	4500

Il est clairement constaté que le rapport de charge a un effet direct sur la durée de vie du matériau. Plus le rapport de charge est élevé, plus la durée de vie augmente. Cette relation s'explique par le fait que les contraintes appliquées sont inversement proportionnelles au rapport de charge, qui est défini comme la contrainte minimale sur la contrainte maximale.

Pour un rapport de charge de  $R=0.1$ , la durée de vie est d'environ 1,012,878.79 cycles.  
Pour un rapport de charge de  $R=0.3$ , la durée de vie est d'environ 1,527,272.73 cycles.  
Pour un rapport de charge de  $R=0.5$ , la durée de vie est d'environ 3,363,636.36 cycles.

Ces résultats soulignent l'importance du rapport de charge dans l'estimation de la durée de vie du matériau. Il est essentiel de prendre en considération cette influence lors de la conception et de l'évaluation de structures soumises à des chargements cycliques.



**Figure 30 : Avancée de fissure en fonction de nombre de cycle**

La figure ci-dessous présente l'effet du rapport de charge sur la vitesse de propagation des fissures pour différentes valeurs. Les simulations montrent clairement que la vitesse de fissuration est influencée par le rapport de charge au-delà du seuil du facteur d'intensité de contrainte. Avant ce seuil, la vitesse de fissuration reste relativement stable et faible. De plus, à mesure que le rapport de charge diminue, le seuil du facteur d'intensité de contrainte est décalé vers la droite, tandis que pour des rapports de charge plus élevés, le seuil du facteur d'intensité de contrainte est plus élevé.

Pour un rapport de charge de  $R=0.1$ , le seuil du facteur d'intensité de contrainte ( $K_{\text{seuil}}$ ) est de 17. Pour un rapport de charge de  $R=0.3$ , le seuil de  $K_{\text{seuil}}$  est de 26. Pour un rapport de charge de  $R=0.5$ , le seuil de  $K_{\text{seuil}}$  est de 32. L'ensemble des facteurs d'intensité de contrainte pour les différents rapports de charge varie entre 17 et 62.

Ces résultats soulignent l'importance du rapport de charge dans la vitesse de propagation des fissures, en particulier au-delà du seuil du facteur d'intensité de contrainte. Il est essentiel de prendre en compte cette influence lors de l'évaluation de la durabilité et de la résistance des matériaux soumis à des contraintes cycliques.

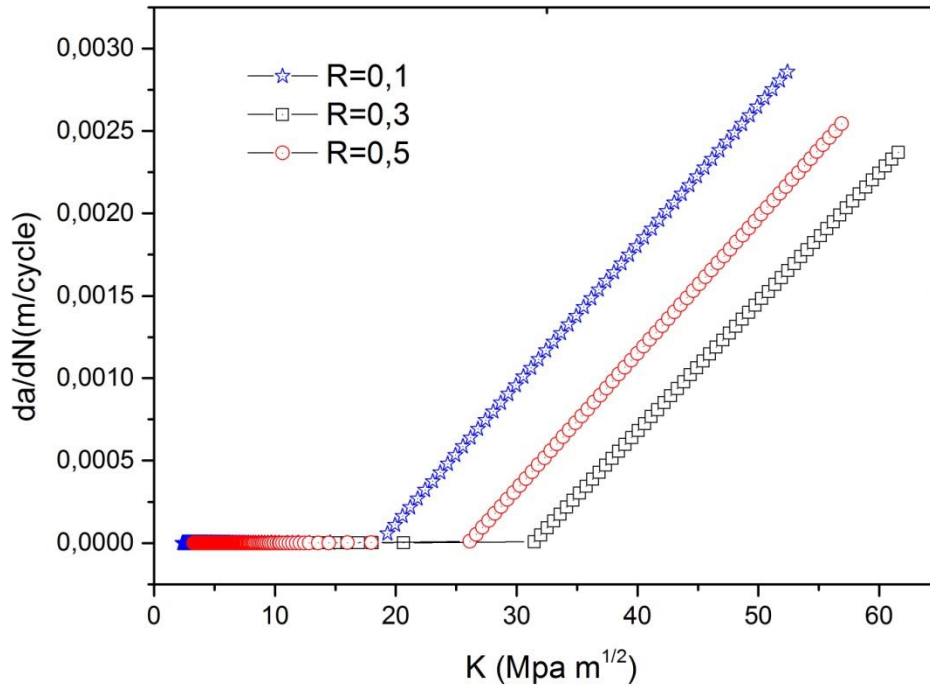


Figure 31 : l'effet du rapport de charge sur la vitesse de propagation des fissures

#### IV.5 Influence de la réparation :

##### IV.5.1 Sur la propagation des fissures :

Dans la suite de notre étude, nous avons approfondi notre analyse en nous concentrant sur un seul rapport de charge, à savoir  $R=0,3$ , tout en maintenant une charge à amplitude constante. La figure ci-dessous présente les résultats obtenus, qui mettent en évidence l'impact positif de la réparation sur la propagation des fissures. En comparant la durée de vie pour un même rapport de charge, nous avons observé une nette amélioration, passant de  $1,51219 \cdot 10^6$  à  $8,7835110^6$ .



Cette amélioration significative de la durée de vie est directement attribuable à l'introduction du patch de réparation. Lorsque la fissure atteint cette zone réparée, elle est confrontée à une résistance accrue en raison de la présence du matériau de réparation. Cette interaction conduit à une redistribution des contraintes et à une réduction de la propagation de la fissure. Il convient de souligner que la réparation par patch ne permet pas une élimination complète des fissures, mais elle réussit à ralentir leur progression et à prolonger la durée de vie opérationnelle de la structure.

Ces résultats soulignent l'efficacité de la réparation par patch dans la gestion des fissures, offrant une solution prometteuse pour améliorer la durabilité et la fiabilité des structures.

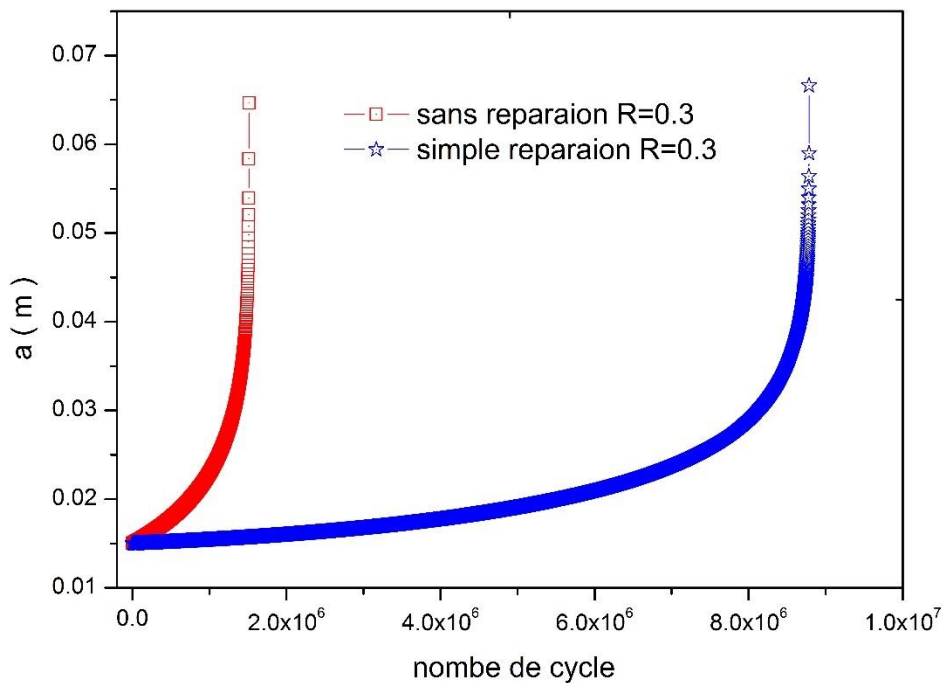


Figure 32 :influence de la réparation sur la durée de vie

#### IV.5.2 Sur la vitesse de propagation des fissures :

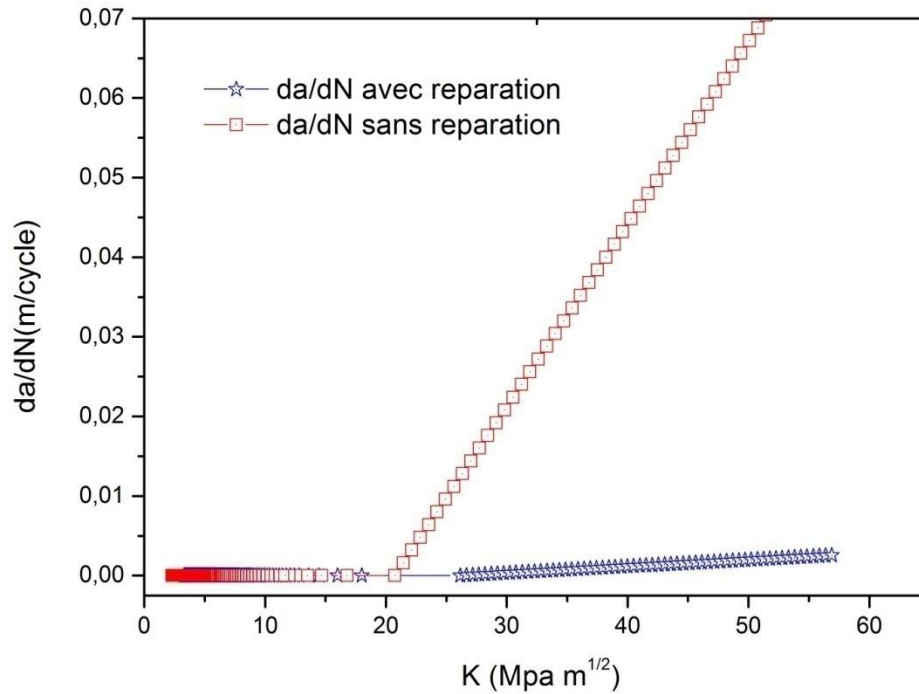
La figure présente une comparaison entre l'influence de la réparation par patch composite et des éprouvettes non réparées sur la vitesse de propagation des fissures. L'objectif est d'analyser comment la réparation par patch composite peut affecter la progression des fissures par rapport aux éprouvettes non réparées.

Les résultats de la figure démontrent que, pour les deux rapports de charge étudiés, la vitesse de propagation des fissures reste relativement faible et constante en dessous du facteur d'intensité de contrainte seuil. Ce seuil est défini à 17 pour l'éprouvette non réparée et à 25 pour l'éprouvette réparée.

Cependant, une fois que le facteur d'intensité de contrainte seuil est dépassé, une différence significative apparaît entre les deux cas. Cette différence est clairement visible à travers la pente des courbes de vitesse de propagation des fissures.

Il est important de souligner que la réparation par patch composite introduit une zone de contrainte supplémentaire dans la structure, ce qui peut conduire à une résistance accrue lorsque la fissure atteint cette zone. Cela peut expliquer la différence observée dans les vitesses de propagation des fissures entre les éprouvettes réparées et non réparées une fois le seuil dépassé.

Ces résultats mettent en évidence l'efficacité de la réparation par patch composite pour retarder et réduire la progression des fissures. Ils soulignent également l'importance de dépasser le facteur d'intensité de contrainte seuil pour observer pleinement les avantages de la réparation par patch composite.



**Figure 33 : influence de la réparation la vitesse de propagation des fissures**

## IV.6 Influence de l'application de la surcharge sur la propagation des fissures :

### IV.6.1 Éprouvette non réparée :

Afin d'étudier l'influence du chargement sur la propagation des fissures, des expériences ont été menées sur des éprouvettes réparées et non réparées. La figure présentée met en évidence l'effet d'une surcharge appliquée sur la propagation des fissures au cours du temps.

Après l'application d'une surcharge à 500 000 cycles, il a été observé que la fissure cesse de se propager pendant environ 9000 cycles. Ce phénomène de ralentissement de la fissure peut être attribué à la redistribution des contraintes induite par la surcharge. L'ajout de contraintes supplémentaires dans la zone de la fissure peut temporairement limiter son extension.

Cependant, après cette période de ralentissement, la fissure recommence à se propager. Cela peut être dû à la détérioration de la zone de réparation ou à une relaxation des contraintes induites par la surcharge. La reprise de la propagation indique que la surcharge n'a pas un effet permanent sur l'arrêt complet de la fissure.

Bien que la surcharge puisse temporairement ralentir la propagation des fissures, elle ne constitue pas une solution définitive pour arrêter complètement leur progression.

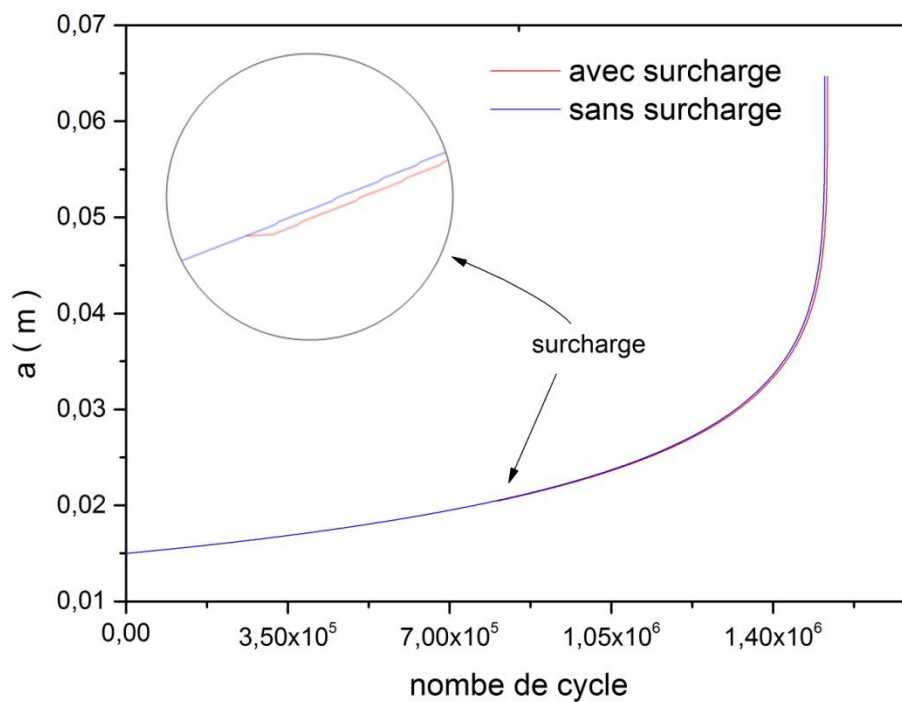
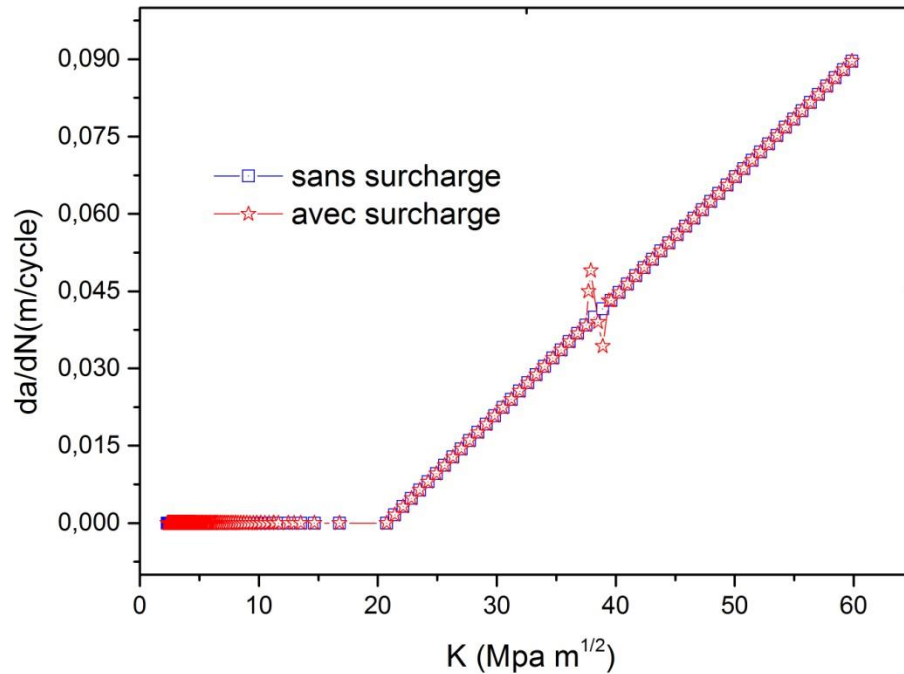


Figure 34 : influence d'une simple surcharge sur la durée de vie



**Figure 35 : influence d'une simple surcharge sur la vitesse de fissuration**

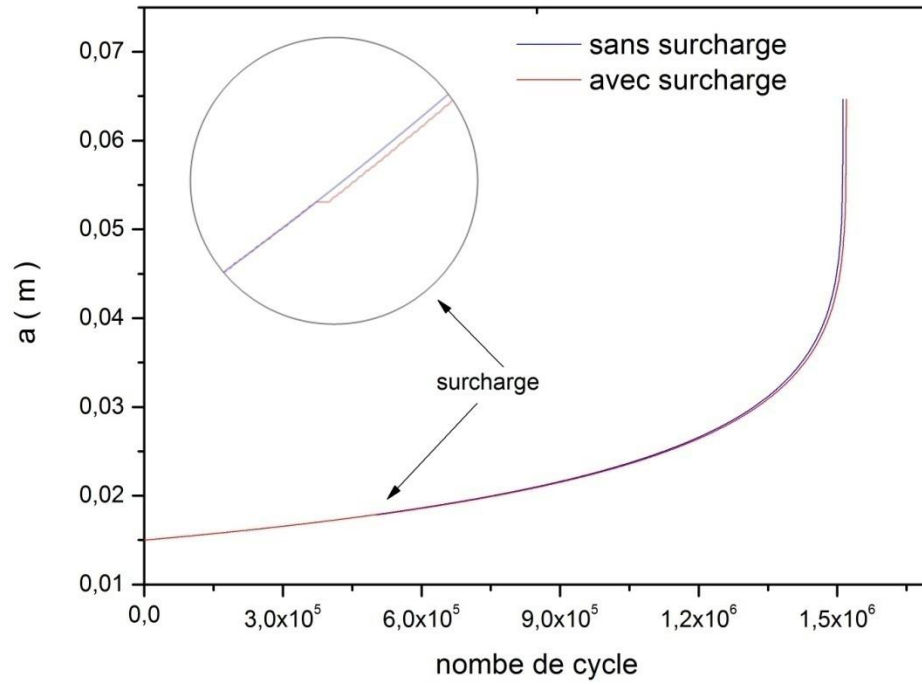
Afin de visualiser aussi influence de la surcharge sur la vitesse de propagation des fissures, après application de surcharge à 500 000 cycles, au-dessous du facteur d'intensité de contrainte la vitesse de propagation passe par trois phases.

La première phase une accélération de la vitesse de fissuration jusqu'à atteindre une valeur maximale de 1

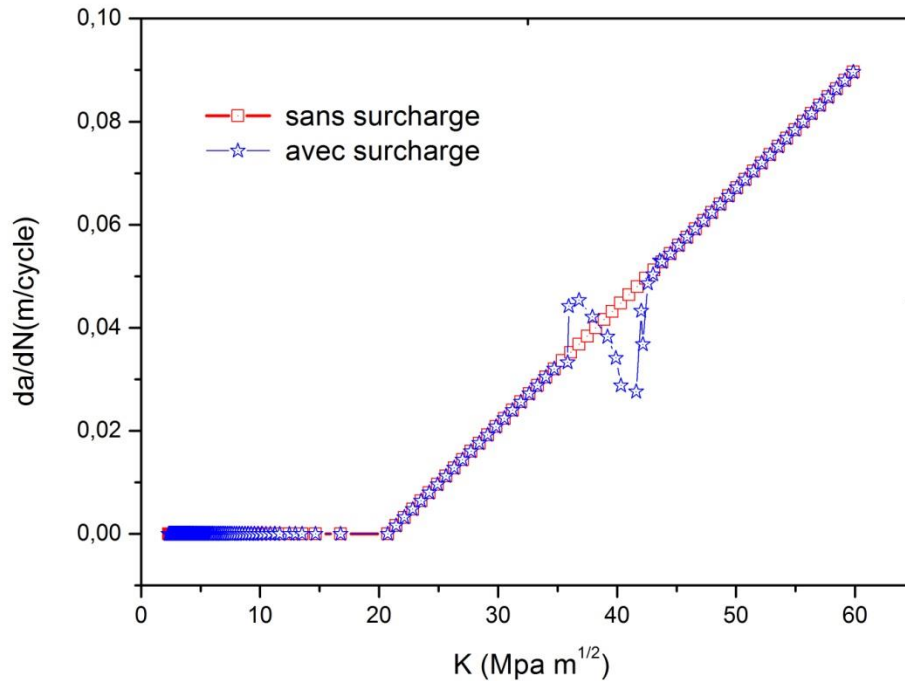
Une deuxième phase de diminution de la vitesse de fissuration jusqu'à atteindre une vitesse minimale de 2

Une troisième phase d'accélération de la vitesse de fissuration pour rejoindre sa vitesse de fissuration initiale

IV.6.2 Éprouvette réparée :



**Figure 36 : Figure après application de surcharge (éprouvette réparée)**



**Figure 37: Variation de la vitesse de fissuration en fonction du facteur d'intensité de contrainte après application de surcharge (éprouvette réparée)**

Dans le but d'étudier l'influence du taux de surcharge sur la propagation des fissures, nous avons mené des expériences sur deux types d'éprouvettes : celles qui étaient réparées et celles qui ne l'étaient pas. Nous avons appliqué une surcharge unique de 800 000 cycles avec un rapport de charge constant de  $R=0.5$ , tout en variant le taux de surcharge à 2, 2.5 et 3.5.

Les résultats, présentés dans les figures 1 et 2 qui montrent l'évolution de la fissuration en fonction du nombre de cycles, révèlent des observations intéressantes. Tout d'abord, nous avons constaté que le phénomène de retard se produisait dans les deux types d'éprouvettes, indépendamment de leur état de réparation. Cependant, le nombre de cycles de retard était fortement influencé par le taux de surcharge dans les deux configurations.

De manière plus précise, à mesure que le taux de surcharge augmentait, nous avons remarqué une augmentation significative du nombre de cycles de retard. Ceci souligne l'importance de l'intensité de la surcharge dans le mécanisme de propagation des fissures. En d'autres termes, plus le taux de surcharge est élevé, plus le processus de fissuration est retardé. Ce phénomène se poursuit jusqu'à ce que la fissure quitte la zone plastique créée par la surcharge.

Par ailleurs, nos expériences ont également révélé l'efficacité de la réparation par patch. En comparant les éprouvettes réparées avec celles qui ne l'étaient pas, nous avons constaté que, pour un même taux de surcharge, le nombre de cycles de retard était nettement supérieur dans les éprouvettes réparées. Cela indique que la réparation par patch a un effet bénéfique sur la résistance à la propagation des fissures.

#### IV.7 Influence du taux de surcharge :

Afin d'étudier l'effet du taux de surcharge sur la vitesse de propagation des fissures, nous avons mené des simulations en utilisant deux types d'éprouvettes : celles qui ont été réparées et celles qui n'ont pas été réparées. Lors de nos expériences, une surcharge constante de 800 000 cycles a été appliquée, avec un rapport de charge fixe de  $R=0.5$ . Ensuite, nous avons varié le taux de surcharge pour chaque groupe, en utilisant les valeurs prédéfinies de 2, 2.5 et 3.5.



IV.7.1 Sur la propagation des fissures :

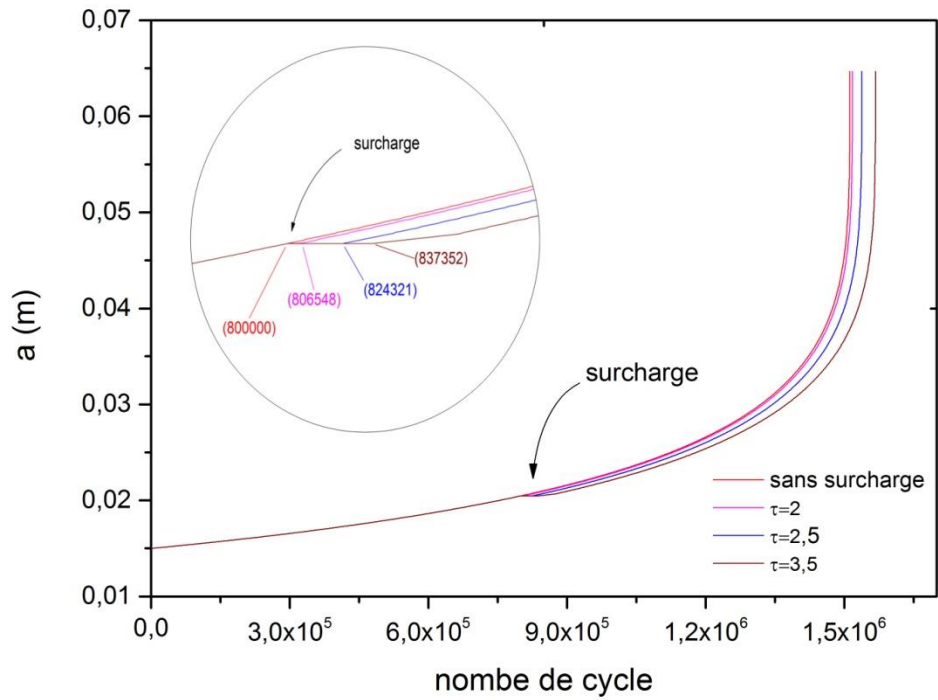
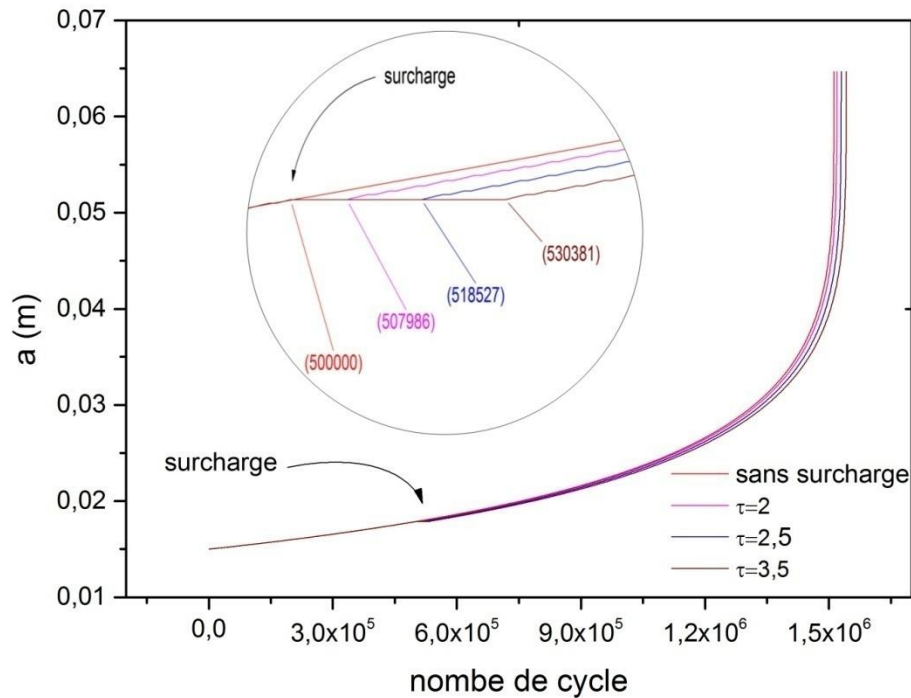


Figure 38 : non réparée



**Figure 39: Fissure réparée**

En analysant les figures 38 et 39, nous pouvons tirer plusieurs conclusions significatives. Tout d'abord, quel que soit le taux de surcharge et que l'éprouvette soit réparée ou non, nous avons constaté que la vitesse de propagation des fissures était affectée par la surcharge. Cependant, la tendance générale de l'évolution de la fissuration était similaire dans les deux cas.

Dans la première partie des courbes, nous avons observé une croissance rapide de la vitesse de fissuration, atteignant une valeur maximale. Cette augmentation significative est due à l'application de la surcharge initiale.

La deuxième partie des courbes était caractérisée par une diminution de la vitesse de propagation des fissures jusqu'à ce qu'elle atteigne une valeur minimale. Cela est principalement attribué à la formation d'une zone plastique près de la fissure, ce qui

augmente le facteur d'intensité de contrainte de seuil et ralentit ainsi le processus de propagation.

Dans la troisième partie des courbes, nous avons observé une augmentation de la vitesse de fissuration à mesure que la fissure sortait de la zone plastique créée par la surcharge. Elle retrouvait ensuite sa vitesse de propagation initiale. Cette tendance suggère que la fissure tend à quitter la zone plastique et à reprendre sa trajectoire de propagation normale.

Nos observations ont également mis en évidence l'impact de la réparation sur les vitesses maximale et minimale de propagation des fissures. En comparant les valeurs de vitesse de propagation entre les deux types d'éprouvettes, nous avons constaté que les valeurs les plus basses étaient enregistrées pour l'éprouvette réparée. En effet, la présence d'un patch de réparation a permis d'absorber une partie de l'énergie de la surcharge, réduisant ainsi les contraintes exercées sur les bords de la fissure. Par conséquent, la fissure a quitté plus tôt la zone plastique par rapport aux éprouvettes non réparées, ce qui a contribué à des vitesses de propagation des fissures plus faibles. Cette observation souligne l'efficacité de la réparation par patch dans la réduction des vitesses de propagation des fissures.

IV.7.2 Sur la vitesse de propagation des fissures :

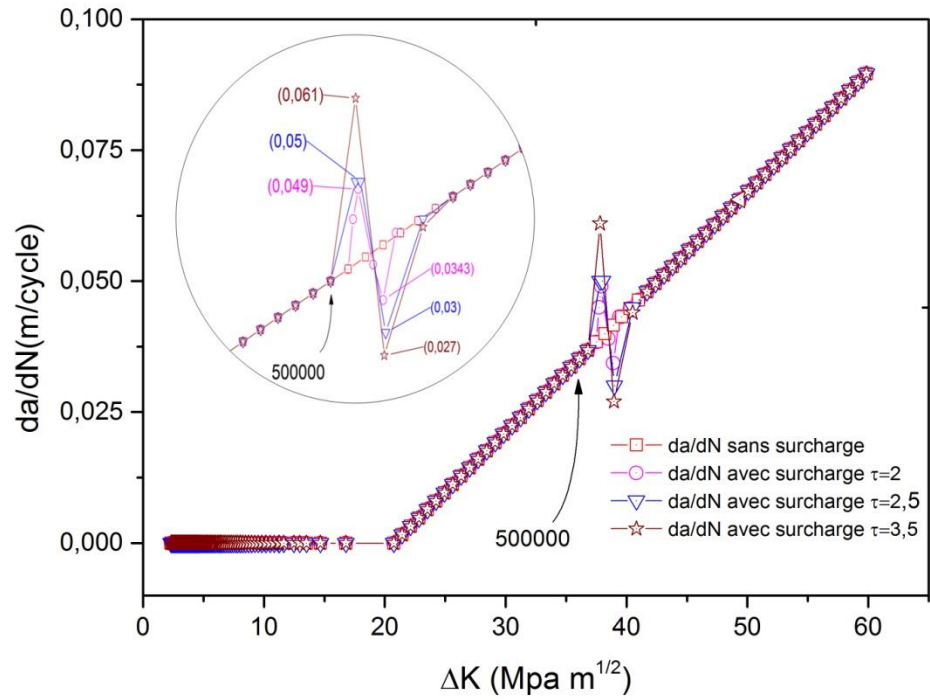


Figure 40 : Sur éprouvette réparer

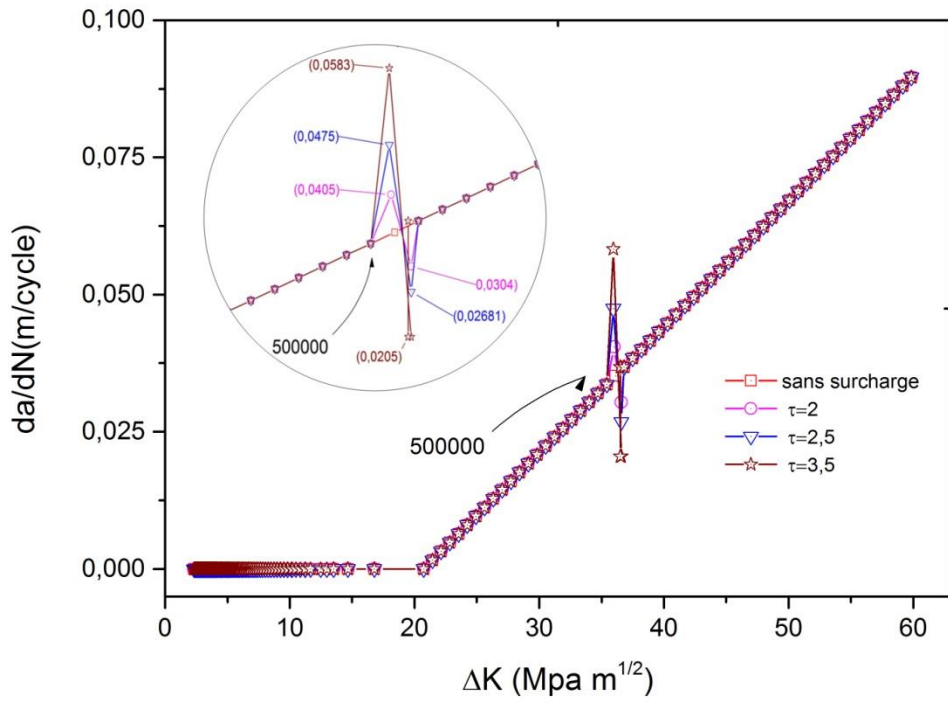


Figure 41 : Fissure réparée

## **Conclusion général**

**Conclusion générale**

En conclusion, les résultats obtenus soulignent l'importance du rapport de charge dans l'estimation de la durée de vie du matériau et la vitesse de propagation des fissures. Un rapport de charge élevé est associé à une durée de vie plus longue et à des vitesses de propagation des fissures plus faibles. Il est essentiel de prendre en compte cette influence lors de la conception et de l'évaluation de structures soumises à des chargements cycliques.

De plus, l'effet de la réparation par patch composite a été étudié, montrant des améliorations significatives de la durée de vie du matériau et une réduction de la propagation des fissures. L'introduction d'un patch de réparation augmente la résistance et conduit à une redistribution des contraintes, ce qui ralentit la progression des fissures. La réparation par patch composite offre ainsi une solution prometteuse pour améliorer la durabilité et la fiabilité des structures.

En ce qui concerne l'influence de la surcharge sur la propagation des fissures, les simulations ont montré un ralentissement temporaire de la fissure après l'application de la surcharge. Cependant, la fissure reprend son processus de propagation, indiquant que la surcharge n'a pas d'effet permanent sur l'arrêt complet de la fissure. Par ailleurs, l'analyse de la vitesse de propagation des fissures après l'application de la surcharge a révélé des phases d'accélération et de décélération, ainsi que l'effet de la réparation par patch composite sur la réduction des vitesses de propagation des fissures.

En termes de perspectives, des études plus approfondies pourraient être entreprises pour explorer d'autres facteurs influençant la durée de vie du matériau et la propagation des fissures, tels que la géométrie des structures, les matériaux de réparation alternatifs et les méthodes de réparation innovantes. De plus, des recherches supplémentaires pourraient être menées pour comprendre les mécanismes sous-jacents responsables de l'effet de la surcharge et de la réparation sur les fissures, afin d'améliorer les stratégies de conception et de maintenance des structures soumises à des contraintes cycliques.

References bibliographies

1. Parghi, A. and M.S. Alam, *A review on the application of sprayed-FRP composites for strengthening of concrete and masonry structures in the construction sector*. Composite Structures, 2018. **187**: p. 518-534.
2. Cheng, P., *Etude et optimisation de la réparation des composites stratifiés par collage des patches externes*, 2010, Dijon.
3. KADDOURI, N., *Influence des défauts géométriques dans la colle et modification géométrique des substrats sur la durabilité des assemblages collés*, 2020.
4. DEMMOUCHE, N., *Etude des effets de l'endommagement d'adhésif et de la plasticité sur la réparation des structures fissurées*, 2020.
5. SOUATI, A. and C.E. LAHRECHE, *Analyse Numérique de Réparation des Organes de Production Pétrolière par Patch Composite*.
6. Eddine, B.D., *Renforcement et réparation par matériaux composites des canalisations de transport de gaz endommagés*. 2020.
7. Moreira, R., et al., *High-cycle fatigue analysis of adhesively bonded composite scarf repairs*. Composites Part B: Engineering, 2020. **190**: p. 107900.
8. Yousefi, A., et al., *Fatigue life improvement of cracked aluminum 6061-T6 plates repaired by composite patches*. Materials, 2021. **14**(6): p. 1421.
9. Hamit, A., Z. Sağlam, and M.Ş. Adin, *Numerical investigation of fatigue behavior of non-patched and patched aluminum/composite plates*. European Mechanical Science, 2021. **5**(4): p. 168-176.
10. BOUHENNI, M. and A.E. AMOURI, *Etude du Comportement Mécanique par Fatigue d'une Plaque en Alliage d'Aluminium Fissurée et Réparée par Patch en Composite*, 2020, Université Ibn Khaldoun-Tiaret-.
11. Bouzitouna, W.N., et al., *Elastoplastic analysis of cracked Aluminum plates with a hybrid repair technique using the bonded composite patch and drilling hole in opening mode I*. Frattura ed Integrità Strutturale, 2020. **14**(52): p. 256-268.
12. Aabid, A., M. Hrairi, and J.S.M. Ali, *Optimization of composite patch repair for center-cracked rectangular plate using design of experiments method*. Materials Today: Proceedings, 2020. **27**: p. 1713-1719.
13. Mohammadi, S., *Parametric investigation of one-sided composite patch efficiency for repairing crack in mixed mode considering different thicknesses of the main plate*. Journal of Composite Materials, 2020. **54**(22): p. 3067-3079.
14. Hart, D.C. and H.A. Bruck. *Simplified method for predicting ultimate failure of one-sided composite patched aluminum center crack tension specimens*. in *AIP Conference Proceedings*. 2020. AIP Publishing LLC.
15. Laverne, J. and J.-J. Marigo, *Approche globale, minima relatifs et Critère d'Amorçage en Mécanique de la Rupture*. Comptes Rendus Mécanique, 2004. **332**(4): p. 313-318.



## Références bibliographiques

---

16. AZZOUZ, A., *Etude de la réparation des pipes endommagés par patch en composites*, 2012.
17. BELMOKHTAR, A., *Contribution au développement d'un modèle de propagation pour la prédiction de la durée de vie en fatigue*.
18. SERIARI, F.Z., *Etude du comportement en rupture par fatigue des structures réparées par patch sous chargement variable*.
19. ZEGGAI, B., *Contribution sur les études des effets de chargement sur la propagation des fissures de fatigue*.
20. Baptista, C.A.R.P., et al., *Describing fatigue crack growth and load ratio effects in Al 2524 T3 alloy with an enhanced exponential model*. Mechanics of Materials, 2012. **51**: p. 66-73.
21. Adib, A. and C. Baptista, *An exponential equation of fatigue crack growth in titanium*. Materials Science and Engineering: A, 2007. **452**: p. 321-325.
22. Wolf, E., *Fatigue crack closure under cyclic tension*. Engineering fracture mechanics, 1970. **2**(1): p. 37-45.
23. Dinda, S. and D. Kujawski, *Correlation and prediction of fatigue crack growth for different R-ratios using  $K_{max}$  and  $\Delta K_{+}$  parameters*. Engineering Fracture Mechanics, 2004. **71**(12): p. 1779-1790.
24. Elber, W., *The significance of fatigue crack closure*. 1971.
25. Forman, R.G. and S.R. Mettu, *Behavior of surface and corner cracks subjected to tensile and bending loads in Ti-6Al-4V alloy*, 1990.
26. Newman Jr, J., et al., *Small-crack effects in high-strength aluminum alloys*, 1994.
27. Walker, K., *The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 aluminum*. 1970.
28. Kujawski, D., *Enhanced model of partial crack closure for correlation of R-ratio effects in aluminum alloys*. International Journal of Fatigue, 2001. **23**(2): p. 95-102.
29. Benachour, M., et al., *Stress ratio effect on fatigue behavior of aircraft aluminum alloy 2024 T351*. MRS Online Proceedings Library (OPL), 2010. **1276**: p. 7.
30. Srivastava, Y. and S. Garg, *Influence of R on effective stress range ratio and crack growth*. Engineering Fracture Mechanics, 1985. **22**(6): p. 915-926.
31. Donald, K. and P.C. Paris, *An evaluation of  $\Delta K_{eff}$  estimation procedures on 6061-T6 and 2024-T3 aluminum alloys*. International Journal of fatigue, 1999. **21**: p. S47-S57.
32. Hudson, C.M. and J.T. Scardina, *Effect of stress ratio on fatigue-crack growth in 7075-T6 aluminum-alloy sheet*. Engineering fracture mechanics, 1969. **1**(3): p. 429-446.
33. Singh, N., R. Khelawan, and G. Mathur, *Effect of stress ratio and frequency on fatigue crack growth rate of 2618 aluminium alloy silicon carbide metal matrix composite*. Bulletin of Materials Science, 2001. **24**: p. 169-171.
34. Schijve, J., *Fatigue crack propagation and the stress intensity factor* 1973: TH Delft, Delft.
35. Newman Jr, J. and J. Ruschau, *The stress-level effect on fatigue-crack growth under constant-amplitude loading*. International Journal of Fatigue, 2007. **29**(9-11): p. 1608-1615.

## Références bibliographiques

---

36. Maymon, G., *A 'unified' and a  $(\Delta K + \cdot K_{max})$  1/2 crack growth models for aluminum 2024-T351*. International Journal of Fatigue, 2005. **27**(6): p. 629-638.
37. Benachour, M., et al., *Effect of the amplitude loading on fatigue crack growth*. Procedia Engineering, 2010. **2**(1): p. 121-127.
38. Abdelkader, M., et al., *Crack propagation under variable amplitude loading*. Materials Research, 2013. **16**: p. 1161-1168.
39. Bahram, K., et al., *Simulation of the delay effect after applying a simple overload on alloys of aluminum 2024T351 using the Willemborg model*. Frattura ed Integrità Strutturale, 2020. **14**(51): p. 467-476.
40. MAACHOU, S., *CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA PROPAGATION DES FISSURES SOUS CHARGEMENT VARIABLE BASEE SUR UNE APPROCHE ENERGETIQUE*, 2016.
41. Miloudi, A., et al., *Influence des effets de surcharges et souscharges sur la propagation d'une fissure de fatigue*.
42. Hsu, T.M., A.N. Suarez, and S.E. Kanoski, *Ghrelin: A link between memory and ingestive behavior*. Physiology & behavior, 2016. **162**: p. 10-17.
43. Vogelesang, L. and J. Schijve, *Environmental effects on fatigue fracture mode transitions observed in aluminium alloys*. Delft University of Technology, Department of Aerospace Engineering, Report LR-289, 1979.
44. Schijve, J., *Discussion: "Fatigue Failure Under Complex Stress Histories" (Scharton, TD, and Crandall, SH, 1966, ASME J. Basic Eng., 88, pp. 247-250)*. 1966.
45. Schijve, J., *Prediction methods for fatigue crack growth in aircraft material* 1980: ASTM International.
46. Hautier, M., *Analyse des réparations des matériaux composites: mise en œuvre d'un procédé par infiltration et étude du comportement mécanique*, 2010, Université Paul Sabatier-Toulouse III.
47. Van den Broek d'Obrenan, G., *Adaptation du procédé RTM (moulage par transfert de résine) à la mise en œuvre de matériaux composites à matrice thermoplastique*, 2011, INSA de Lyon.
48. Sahli, M., T. Barriere, and J.-C. Gelin. *Réalisation de composants micro-structurés par moulage par injection de microsphères de verre*. in *CFM 2011-20ème Congrès Français de Mécanique*. 2011. AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie.
49. KHAIRI, F., *NOUVELLES TECHNOLOGIES EN CHIRURGIE REPARATRICE: ETAT DES LIEUX ET PERSPECTIVES*. 2022.
50. Mathias, J.-D., *Etude du comportement mécanique de patches composites utilisés pour le renforcement de structures métalliques aéronautiques*, 2005, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II.