

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 Témouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département de Génie Mécanique



Pour l'obtention du diplôme de Master en : Génie Mécanique
Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Construction Mécanique

Thème

Simulation du comportement d'une structure soumise à différent type de défaut (fissure/entaille)

Présenté Par :

- 1) M. BENSIYAKOUB Azeddine.
- 2) M. SOUIDI Kheïreddine.

Devant le jury composé de :

Pr. DJEBBAR Nouredine	Pr UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Pr. BOUAFIA Farida	Pr UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Dr. BOUZITOUNA Wahiba Nesrine	M C B UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Pr. OUDAD Wahid	Pr UAT.B.B (Ain Temouchent)	Co-Encadrant

Année Universitaire 2025/2026

Remerciements

Avant tout, nous tenons à remercier Dieu le Tout-Puissant de nous avoir donné la force, la patience et la santé pour réussir ce travail, après tant d'années d'études.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadreur **Dr Bouzitouna.W** pour sa disponibilité, ses conseils précieux et sa patience tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce modeste travail et d'enrichir notre recherche par leurs remarques. Nous tenons aussi à saluer tous nos enseignants qui nous ont formés durant tout notre parcours universitaire.

Nous voulons aussi remercier nos familles, qui nous ont encouragés et ont cru en nous jusqu'au bout.

Enfin, un grand merci à tous nos amis et camarades de promotion, en particulier ceux qui ont partagé nos journées à la bibliothèque, nos discussions interminables et nos fous rires. Votre soutien moral a rendu ces années de master beaucoup plus légères et inoubliables.

À tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce projet : merci.

Dédicace

Je dédie ce travail, fruit de plusieurs années d'efforts, avant tout à mes parents. À mon père, pour ses sacrifices, sa rigueur et sa confiance aveugle en mes capacités. Tu as toujours été mon modèle de persévérance.

À ma chère mère, pour sa tendresse, ses prières qui m'ont accompagné à chaque examen, et ses mots d'encouragement les jours où la fatigue prenait le dessus. Aucune dédicace ne pourra exprimer ma gratitude envers vous.

À mes frères et sœurs, pour leur présence constante, leur patience face à mon stress et tous les moments de complicité qui m'ont permis de décompresser durant cette année de Master.

Enfin, à mes amis d'enfance et mes camarades d'étude, avec qui j'ai partagé les bancs de la faculté, les révisions de dernière minute et les discussions passionnées. Ce travail est aussi le vôtre.



Azeddine

Dédicace

C'est avec un grand soulagement et une immense fierté que je dédie ce mémoire à ma famille. En premier lieu, à mes merveilleux parents. Merci pour votre patience infinie, votre soutien moral et matériel, et pour avoir toujours cru en moi, même quand je doutais de mes propres choix. Vous avez tout fait pour me faciliter ce parcours universitaire, et ce diplôme est la concrétisation de vos espoirs.

Ce chemin n'a pas toujours été facile. Entre le stress de la recherche, les doutes sur le terrain et la fatigue de la rédaction, votre présence à mes côtés a été ma plus grande force.

Je pense aussi à mes frères, mes sœurs et à mes proches, qui ont toujours su trouver les mots justes pour me redonner le sourire. Et bien sûr, une pensée spéciale pour mes compagnons de route, mes amis, pour l'entraide, les fous rires et la solidarité dont nous avons fait preuve tout au long de ce Master.



Kheïreddine

Résumé

La mécanique de la rupture constitue une discipline essentielle de l'ingénierie mécanique qui s'intéresse au comportement des matériaux contenant des défauts. Son objectif principal est de comprendre les mécanismes d'amorçage et de propagation des fissures afin de prévenir les défaillances soudaines des structures et d'améliorer leur fiabilité en service. Cette étude débute par la présentation des fondements théoriques de la mécanique de la rupture, notamment les différents modes de fissuration, le facteur d'intensité des contraintes (K) et le développement de la zone plastique au voisinage de la pointe de fissure. Les principales méthodes analytiques d'évaluation des entailles sont également exposées, parmi lesquelles l'approche volumétrique de Pluinage, le concept de fissure équivalente et la relation de Creager-Paris. L'analyse se poursuit par l'examen de la nature et de la typologie des défauts rencontrés dans les structures mécaniques, tels que les fissures, les entailles et les phénomènes de corrosion. Les différentes stratégies de maintenance et de réparation utilisées dans l'industrie sont présentées, avec un intérêt particulier porté à la technique de réparation par collage de patches composites, largement adoptée dans le secteur aéronautique pour renforcer les structures endommagées. L'étude est ensuite complétée par une investigation numérique tridimensionnelle réalisée sous le logiciel Abaqus. Cette analyse permet d'évaluer l'efficacité d'un patch composite Boron/Époxy appliqué au renforcement d'une plaque en aluminium comportant une fissure ou une entaille. Une attention particulière est accordée à la simulation de la propagation du chemin de rupture à l'aide de la méthode des éléments finis étendus (XFEM), offrant ainsi une meilleure compréhension du comportement des structures réparées et de leur tolérance aux dommages.

Mots-clés : Mécanique de la rupture, Entailles, Réparation par patch composite, Boron/Époxy, Alliage d'aluminium, Abaqus, XFEM.

Abstract

Fracture mechanics is a fundamental discipline in mechanical engineering that focuses on the behavior of materials containing defects or discontinuities. Its primary objective is to understand the mechanisms of crack initiation and propagation in order to prevent sudden structural failures and enhance the reliability of engineering components during service. This work first presents the theoretical foundations of fracture mechanics, including the different fracture modes, the Stress Intensity Factor (K), and the development of the plastic zone near the crack tip. It also reviews the main analytical approaches used

for notch assessment, such as Pluvillage's volumetric approach, the equivalent crack concept, and the Creager-Paris formulation. The study then examines the nature and classification of structural defects, including cracks, notches, and corrosion damage, while discussing the maintenance and repair techniques commonly employed in industry. Particular attention is given to bonded composite patch repair, a widely adopted solution in the aerospace sector for restoring structural integrity and extending service life. Finally, a three-dimensional numerical investigation is carried out using the Abaqus software package to evaluate the effectiveness of a Boron/Epoxy composite patch in reinforcing an aluminum plate containing either a crack or a notch. The study also addresses the simulation of crack growth and fracture path propagation using the eXtended Finite Element Method (XFEM), providing a deeper understanding of the behavior and damage tolerance of repaired structures.

Keywords: Fracture mechanics, Notches, Composite patch repair, Boron/Epoxy, Aluminum alloy, Abaqus, XFEM.

ملخص

تُعد ميكانيكا الكسر من التخصصات الأساسية في الهندسة الميكانيكية، حيث تهتم بدراسة سلوك المواد التي تحتوي على عيوب أو عيوب بنيوية. ويكمن هدفها الرئيسي في فهم آليات نشوء الشقوق وانتشارها من أجل الحد من حالات الانهيار المفاجئ للمنشآت وتحسين موثوقيتها أثناء الخدمة.

وتطور المنطقة، (K) تتناول هذه الدراسة الأسس النظرية لميكانيكا الكسر، بما في ذلك أنماط التصدع المختلفة، ومعامل شدة الإجهاد اللدنة عند مقدمة الشق. كما تستعرض أهم الطرق التحليلية المستخدمة لتقدير تأثير النتوءات والعيوب الهندسية، مثل المنهج الحجمي (Creager-Paris) ومفهوم الشق المكافئ، وعلاقة كريغر-باريس، (Pluvillage) لبلوفيناغ.

كما يتم التطرق إلى طبيعة وتصنيف العيوب الشائعة في المنشآت الميكانيكية، مثل الشقوق والنتوءات والتآكل، مع عرض مختلف تقنيات الصيانة والإصلاح المستخدمة في المجال الصناعي. ويؤلى اهتمام خاص لتقنية الإصلاح بواسطة الرقع المركبة الملصقة، والتي تُعد من أكثر الحلول فعالية في الصناعة الجوية لتعزيز الهياكل المتضررة وإطالة عمرها التشغيلي.

لتقييم فعالية رقعة مركبة من البورون/الإيبوكسي Abaqus وتُستكمل الدراسة بتحليل عددي ثلاثي الأبعاد باستخدام برنامج في تدعيم صفيحة من الألمنيوم تحتوي على شق أو نتوء. كما يتم دراسة سلوك انتشار مسار الكسر من خلال محاكاة (Boron/Epoxy) مما يسمح بفهم أفضل لأداء الهياكل المُصلحة وقدرتها على مقاومة (XFEM) عددية تعتمد على طريقة العناصر المحددة الممتدة الأضرار.

الكلمات المفتاحية: ميكانيكا الكسر، الحزوز، الإصلاح بالرقع المركبة، بورون/إيبوكسي، سبيكة ألومنيوم، أباقوس، XFEM.

TABLE DES MATIERES

Liste des abreviations	I
Liste des figures	II
Liste des tableaux	IV
Introduction generale	1
Introduction	3
1. Historique de la mécanique de la rupture :	3
2. Définition et l'importance de la mécanique de la rupture :	4
2.1. Rupture fragile – LEFM (Linear Elastic Fracture Mechanics)	4
2.2. Rupture ductile – EPFM (Elastic-Plastic Fracture Mechanics) :	5
3. Les modes fondamentaux de propagation des fissures :	7
3.1. Mode I : Mode d'ouverture (Opening Mode) :	8
3.2. Mode II : Mode de glissement (Sliding Mode) :	9
3.3. Mode III : Mode de déchirure (Tearing Mode) :	9
4. Paramètres fondamentaux :	10
4.1. Facteur d'intensité des contraintes (K)	10
4.2. Taux de restitution d'énergie (G)	10
4.3. Zone plastique en pointe de fissure	11
5. Méthodes d'estimation pour les entailles :	11
5.1. Approche volumétrique de Pluinage :	12
5.2. Approche de la "Fissure Équivalente".	13
5.3. Utilisation de la formule de Creager-Paris (relation entre ρ , K_t et K_{eq}).	13
Conclusion	14
Introduction	16
1. Nature et typologie des défauts (Fissures, entailles, corrosions)	16

1.1.	Les fissures.....	17
1.	Fissures fragiles :	18
2.	Fissures ductiles :	18
3.	Fissures thermiques :.....	18
4.	Fissures de corrosion sous contrainte :	18
5.	Les entailles.....	19
6.	La corrosion :	20
2.	Réparation des structures fissurées	21
2.1.	Les techniques de réparations	22
2.2.	Perçage d'arrêt de fissure (Stop drilling) :	23
2.3.	Réparation par soudage :	25
2.4.	Réparation par collage de patch (Composite patch repaire) :	26
2.5.	Renforcement par plaques métalliques (Bolted patch) :	27
2.6.	Remplacement de la pièce endommagée	28
2.7.	Importance de la réparation dans l'industrie.....	28
	Conclusion	29
	Introduction.....	30
1.	Présentation du logiciel Abaqus.....	30
2.	Capacités pour la simulation des fissures	30
2.	Modèles de comportement disponibles.....	31
3.	Modélisation élastique linéaire et critères de rupture	31
4.	Modélisation numérique sous Abaqus	32
5.	Géométrie de la plaque	32
6.	Conditions aux limites	34
7.	Maillage	34
8.	Implémentation des techniques de calcul de K.....	36
9.	Résultats de la simulation numérique	37
10.	Étude paramétrique de la fissure.....	37
11.	Analyse comparative (fissure-entaille)	38
12.	Étude de l'efficacité de la réparation par patch (Boron/Époxy)	40
13.	Simulation de la propagation (XFEM).....	44

Conclusion	48
------------------	----

Bibliographie.....	46
--------------------	----

LISTE DES ABREVIATIONS

LEFM : Linear Elastic Fracture Mechanics (Mécanique linéaire élastique de la rupture)

EPFM : Elastic-Plastic Fracture Mechanics (Mécanique élasto-plastique de la rupture)

FEM (MEF) : Méthode des éléments finis

FEA : Finite Element Analysis (Analyse par éléments finis)

K : Facteur d'intensité des contraintes

KI, KII, KIII : Modes I, II et III du facteur d'intensité des contraintes

KIC : Ténacité critique en mode I

ΔK : Variation du facteur d'intensité des contraintes

J : Intégrale J

JIC : Valeur critique de l'intégrale J

CTOD : Ouverture de la pointe de fissure

G : Taux de restitution d'énergie

Gc : Valeur critique de G

da/dN : Vitesse de propagation de fissure (fatigue)

XFEM : Méthode des éléments finis étendue

VCCT : Technique de fermeture virtuelle de fissure

Kt : Facteur de concentration des contraintes.

σ : Contrainte

$\sigma_{\max}$: Contrainte maximale

$\sigma_{\min}$: Contrainte minimale

a : Longueur de fissure

E : Module d'Young

ν : Coefficient de Poisson

MPa : Mégapascal

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Courbe contrainte – déformation (rupture fragile).	5
Figure 2: Courbe R (résistance à la propagation).	7
Figure 3: Modes de propagation des fissures.	8
Figure 4: Schéma de l'approche volumétrique de Pluvinage.	12
Figure 5: Application de l'approche de la fissure équivalente à l'évaluation des entailles.	13
Figure 6: Exemple d'initiation d'une fissure au niveau d'une soudure.	17
Figure 7: Différents Type de corrosion.	21
Figure 8: Application de la technique de perçage d'arrêt de fissure(stop-hole).	24
Figure 9: Différentes étapes du processus de perçage d'arrêt.	24
Figure 10: Procédés de réparation par trou d'arrêt associés au traitement ICR. (a) Principe d'application et état de la surface avant/après martelage, (b) Modélisation numérique de la structure et application réelle sur site.	25
Figure 11: Réparation d'une plaque fissurée par combinaison d'un trou d'arrêt et de patches en composite (CFRP).	26
Figure 12: Réparation par patch composite. (a) maillage de la plaque fissurée et détails de la pointe de fissure, (b) distribution des lignes de charge dans une structure fissurée et corrodée.	28
Figure 13: Géométrie de la plaque réparée (a) vue de face (b) vue de côté (c) vue en 3D.	33
Figure 14: Conditions aux limites de la plaque fissurée.	34
Figure 15: Maillage de la plaque.	35
Figure 16: Vérification de convergence du K_I en fonction de la taille d'élément de maillage.	36
Figure 17: Facteur d'intensité des contraintes K_I , (a) selon l'épaisseur de la plaque, (b) en fonction de la longueur de la fissure.	38
Figure 18: Évolution du facteur d'intensité des contraintes K_I en fonction du rayon de courbure ρ du fond de l'entaille.	39
Figure 19: Évolution de la contrainte locale maximale σ_{yy} au fond de l'entaille en fonction du rayon de courbure ρ	40
Figure 20: Comparaison du facteur d'intensité des contraintes K_I à travers l'épaisseur de la plaque entre une fissure non réparée et une fissure réparée par patch (Boron/Époxy).	41
Figure 21: Distribution du facteur d'intensité des contraintes K_I le long de l'épaisseur de la plaque pour différentes longueurs de fissure (a).	42

Figure 22: Évolution de la contrainte normale maximale σ_{yy} au fond du défaut en fonction du rayon de courbure ρ .	43
Figure 23: conditions aux limites et de chargement appliqué.	44
Figure 24: courbe Force-Déplacement pour un chargement croissant de 6 et 12 mm.	45
Figure 25: profils PHILSM pour un chargement croissant.	46
Figure 26 : courbes force-déplacement sans et avec patch composite Boron/Époxy.	47
Figure 27: Les profils PHILSM avec patch (6 mm vs 12 mm).	47

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Comparaison synthétique.....	7
Tableau 2 : Modes de propagation des fissures.	9
Tableau 3: Propriétés des matériaux (alliage d'aluminium 2024-T3 et de l'adhésive FM 73)	33
Tableau 4: Propriétés des matériaux du patch composite Boron/epoxy.....	33
Tableau 5: l'écart (en %) pour une convergence de maillage.	36

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Les structures mécaniques et industrielles utilisées dans les domaines de l'énergie, de l'aéronautique, du transport et de la pétrochimie sont soumises à des conditions de fonctionnement de plus en plus sévères. Sous l'effet des charges mécaniques, des variations thermiques, des vibrations et des environnements agressifs, les matériaux peuvent développer différents types de défauts tels que les fissures, les entailles et les phénomènes de corrosion. Ces défauts représentent une menace importante pour la sécurité et la fiabilité des équipements, car ils peuvent conduire à des ruptures brutales et à des défaillances catastrophiques.

Face à ces problématiques, la mécanique de la rupture s'est imposée comme une discipline fondamentale de l'ingénierie mécanique. Elle permet d'étudier le comportement des matériaux contenant des défauts, d'analyser les mécanismes d'amorçage et de propagation des fissures et d'évaluer la résistance résiduelle des structures. Grâce à cette discipline, il devient possible de prévoir la durée de vie des composants, de réduire les risques de rupture et d'optimiser les opérations de maintenance et de réparation.

Les travaux de Griffith, Irwin et Paris ont constitué une base essentielle dans le développement de la mécanique de la rupture moderne. Les concepts tels que le facteur d'intensité des contraintes, l'intégrale J et la loi de propagation des fissures sont aujourd'hui largement utilisés dans l'analyse de la rupture fragile, ductile et de fatigue. En parallèle, l'évolution des méthodes numériques, notamment la méthode XFEM et la méthode VCCT, a permis d'améliorer considérablement la simulation du comportement des fissures dans les structures complexes.

Par ailleurs, l'identification et l'analyse des défauts nécessitent l'utilisation de techniques de contrôle non destructif capables de détecter les discontinuités sans endommager les pièces inspectées. Des méthodes telles que la radiographie industrielle, la magnétoscopie et le ressuage jouent un rôle essentiel dans l'évaluation de l'état des structures et dans la prévention des défaillances.

Dans ce contexte, ce travail a pour objectif d'étudier les fondements théoriques de la mécanique de la rupture, d'analyser les principaux types de défauts rencontrés dans les matériaux métalliques et de présenter les différentes méthodes utilisées pour leur détection, leur estimation et leur réparation.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres principaux :

- **Le premier chapitre** est consacré aux fondements théoriques de la mécanique de la rupture, incluant les notions de fissuration, les facteurs d'intensité des contraintes, les zones plastiques en pointe de fissure ainsi que les approches analytiques d'estimation des entailles.
- **Le deuxième chapitre** traite de l'analyse des défauts et des techniques de réparation. Il présente les différents types de défauts (fissures, entailles, corrosion) ainsi que les principales méthodes de réparation utilisées dans l'industrie, en mettant un accent particulier sur la technique de réparation par collage de patch composite.
- **Le troisième chapitre** est dédié à l'étude numérique tridimensionnelle et à la présentation des résultats obtenus sous le logiciel Abaqus. Il évalue l'efficacité d'une réparation par patch composite (Boron/Époxy) sur une plaque en aluminium fissurée ou entaillée issue du domaine aéronautique. De plus, ce chapitre aborde la simulation de la propagation du chemin de fissure par la méthode des éléments finis étendus (XFEM) sous un chargement monotone croissant.

Cette étude contribue ainsi à une meilleure compréhension des phénomènes de rupture et met en évidence l'importance des méthodes d'analyse numérique et de maintenance par patch composite dans l'amélioration de la sécurité, de la tolérance aux dommages et de la fiabilité des structures aéronautiques et industrielles.

***Chapitre I Fondements
théoriques de la mécanique de la
rupture.***

Introduction

La mécanique de la rupture est une branche de la mécanique des matériaux qui étudie le comportement des structures contenant des fissures ou des défauts [1]. Contrairement aux approches classiques de la résistance des matériaux, qui supposent un matériau homogène et sans imperfections, la mécanique de la rupture prend en compte la présence de discontinuités pouvant provoquer la rupture prématurée d'une pièce.

Dans de nombreuses applications industrielles — comme l'aéronautique, le génie civil ou l'industrie pétrolière — les matériaux sont soumis à des chargements mécaniques importants et peuvent contenir des microfissures dues à la fabrication, à la fatigue ou à la corrosion [2]. Même si ces défauts sont très petits, ils peuvent se propager sous l'effet des contraintes et conduire à une rupture brutale. Il devient donc essentiel de comprendre les mécanismes d'initiation et de propagation des fissures [1].

La mécanique de la rupture repose sur l'analyse du comportement du matériau au voisinage de la pointe de fissure, où les contraintes et les déformations sont très élevées. Elle introduit des paramètres spécifiques tels que le facteur d'intensité des contraintes et le taux de restitution d'énergie, qui permettent de prédire la stabilité ou la propagation d'une fissure [3].

Aujourd'hui, cette discipline est largement utilisée dans les simulations numériques, notamment par la méthode des éléments finis, afin de modéliser l'évolution des fissures et d'évaluer la sécurité et la durée de vie des structures [3]. Elle constitue ainsi un outil fondamental pour la conception, l'inspection et la maintenance des composants industriels.

1. Historique de la mécanique de la rupture :

La naissance de la mécanique de la rupture moderne remonte aux travaux d'Alan Arnold Griffith, qui introduisit en 1921 un critère énergétique expliquant la rupture fragile du verre [4]. Griffith montra que la propagation d'une fissure dépend de l'équilibre entre l'énergie élastique libérée et l'énergie nécessaire pour créer de nouvelles surfaces de rupture.

Plus tard, George Rankine Irwin adapta cette théorie aux matériaux métalliques en introduisant le **facteur d'intensité des contraintes (K)**, fondement de la mécanique linéaire élastique de la rupture (LEFM) [5].

Dans les années 1960–1970, les travaux de James R. Rice menèrent au développement du **J-intégral**, outil fondamental pour l'analyse des matériaux ductiles [6].

2. Définition et l'importance de la mécanique de la rupture :

La **mécanique de la rupture** est une discipline de la mécanique des matériaux qui étudie le comportement des matériaux **présentant des défauts ou des fissures**. Elle cherche à comprendre **comment et pourquoi une fissure se propage** dans un matériau soumis à des contraintes, jusqu'à provoquer sa rupture [1].

Elle s'intéresse notamment à :

- La **concentration des contraintes** au voisinage des fissures.
- Les conditions nécessaires pour que la fissure commence à se propager.
- Le **mode de propagation** de la fissure (fragile ou ductile).
- La **prévision de la durée de vie** d'une structure ou d'un composant fissuré.

Deux approches principales existent :

2.1. Rupture fragile – LEFM (Linear Elastic Fracture Mechanics)

La mécanique linéaire élastique de la rupture (LEFM) est utilisée lorsque le matériau reste entièrement élastique jusqu'à la rupture, c'est-à-dire que la zone plastique au voisinage de la fissure est très petite par rapport à la taille de la fissure et de la structure [5].

Dans ce cas, le comportement du matériau peut être décrit par la théorie de l'élasticité linéaire, et la propagation de la fissure dépend principalement du facteur d'intensité de contrainte.

La rupture se produit lorsque :

$$KI = KIC$$

Où :

- KI : facteur d'intensité de contrainte appliqué

- KIC : ténacité à la rupture du matériau (propriété critique)

Si K_I dépasse K_{IC} , la fissure se propage rapidement et brutalement [5].

Caractéristiques de la rupture fragile

- Très peu de déformation plastique
- Propagation rapide de la fissure
- Rupture soudaine
- Surface de rupture plane et brillante
- Faible énergie absorbée

Les matériaux typiquement fragiles sont : les céramiques, le verre, certains aciers trempés, la fonte

La rupture fragile se produit souvent à : basse température, grande vitesse de chargement, présence de défauts

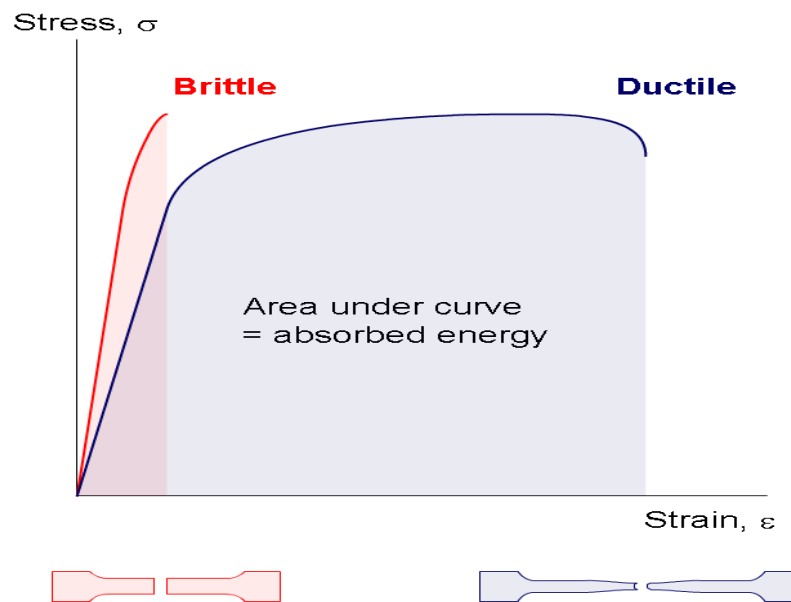


Figure 1: Courbe contrainte – déformation (rupture fragile).

2.2. Rupture ductile – EPFM (Elastic-Plastic Fracture Mechanics) :

Lorsque la zone plastique autour de la fissure est importante, la théorie LEFM n'est plus valable. On utilise alors la mécanique élasto-plastique de la rupture (EPFM) [1].

Cette approche prend en compte la plasticité locale au voisinage du front de fissure [1].

Les principaux paramètres utilisés sont : Intégrale J (J-integral), CTOD (Crack Tip Opening Displacement) [1], [6].

❖ **Intégrale J**

L'intégrale J représente le taux de libération d'énergie associé à la propagation de la fissure :

$$J = \int (W dy - T \frac{\partial x}{\partial u} ds)$$

$$J = JIC$$

Où JIC est la ténacité critique en régime élasto-plastique [6].

❖ **Mécanisme de rupture ductile.**

La rupture ductile se déroule en plusieurs étapes [1] :

1. Formation de micro-cavités.
2. Croissance des cavités.
3. Coalescence des cavités.
4. Propagation de la fissure.

La surface de rupture présente généralement une morphologie en cupule (simples) [1].

❖ **Caractéristiques de la rupture ductile**

- Forte déformation plastique.
- Propagation stable de la fissure.
- Grande capacité d'absorption d'énergie.
- Rupture progressive.

Les matériaux ductiles typiques : aciers doux, aluminium, alliages métalliques [1].

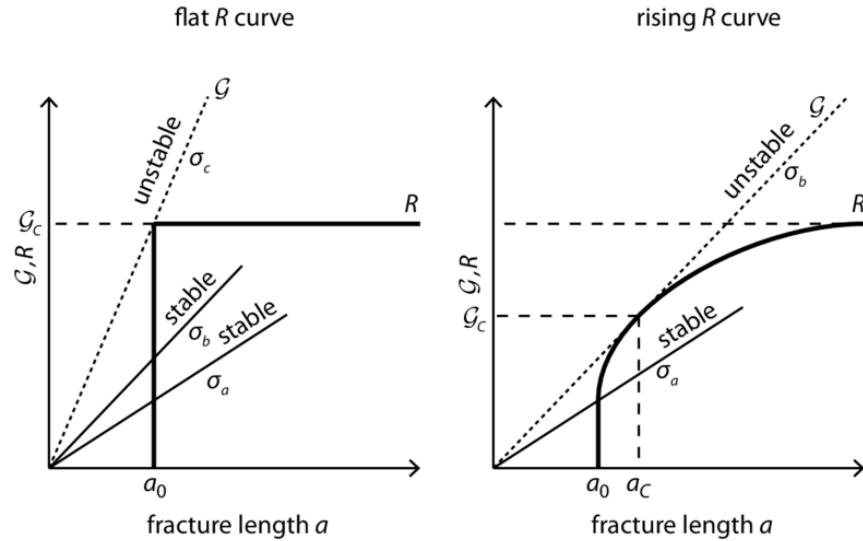


Figure 2: Courbe R (résistance à la propagation).

Dans la rupture ductile, la résistance du matériau augmente pendant la propagation de la fissure [1].

L'EPFM est particulièrement utilisée pour les structures métalliques épaisses, les réservoirs sous pression et les conduites industrielles, où la plasticité joue un rôle important [1].

Tableau 1: Comparaison synthétique.

Critère	LEFM	EPFM
Comportement	Élastique	Élasto-plastique
Zone plastique	Très petite	Importante
Paramètre clé	KIC	JIC
Type de rupture	Brutale	Progressive
Matériaux typiques	Verre, céramique	Aciers doux, aluminium

3. Les modes fondamentaux de propagation des fissures :

En mécanique de la rupture, la propagation d'une fissure peut se produire selon trois modes fondamentaux. Cette classification est basée sur la manière dont les contraintes sont appliquées par rapport au plan de la fissure. Ces modes ont été formalisés dans le cadre de la mécanique linéaire élastique développée notamment par George Rankine Irwin [5].

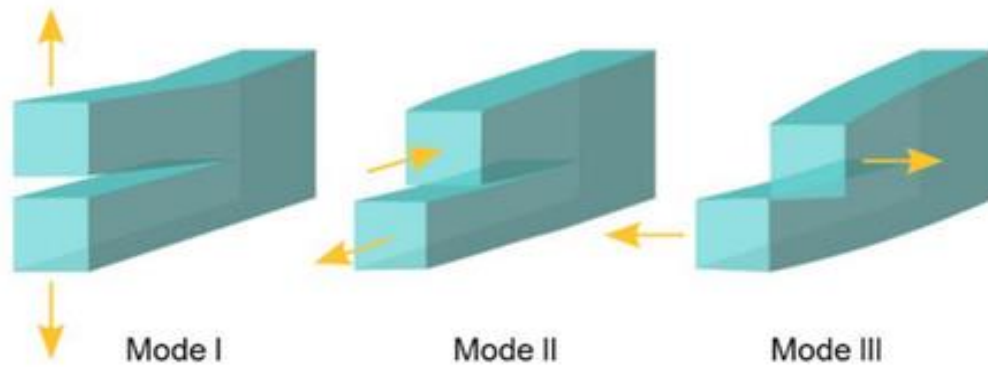


Figure 3: Modes de propagation des fissures.

3.1. Mode I : Mode d'ouverture (Opening Mode) :

La fissure s'ouvre perpendiculairement au plan de la fissure sous l'effet d'une contrainte normale de traction [5].

Caractéristiques :

- Les lèvres de la fissure s'écartent symétriquement.
- C'est le mode le plus courant et le plus dangereux.
- Il est gouverné par le facteur d'intensité des contraintes.

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

Applications typiques :

- Plaques sous traction.
- Réservoirs sous pression.
- Parois de pipelines soumis à pression interne.

C'est le mode le plus étudié car il conduit souvent à une rupture fragile brutale [1].

3.2. Mode II : Mode de glissement (Sliding Mode) :

La fissure se propage sous l'effet d'un cisaillement dans le plan de la fissure. Les lèvres glissent l'une par rapport à l'autre [1].

Caractéristiques :

- Déplacement parallèle au plan de la fissure.
- Moins fréquent seul ; souvent combiné avec le Mode I.

Applications typiques :

- Arbres en torsion partielle.
- Structures soumises à des charges complexes.
- Assemblages mécaniques.

3.3. Mode III : Mode de déchirure (Tearing Mode) :

La fissure est soumise à un cisaillement hors du plan, provoquant un déplacement relatif perpendiculaire au front de fissure [1].

Caractéristiques :

- Mouvement antisymétrique.
- Gouverné par K_{II} .
- Observé principalement dans les structures épaisses.

Applications typiques :

- Arbres soumis à torsion pure.
- Pièces mécaniques tridimensionnelles.

Tableau 2 : Modes de propagation des fissures.

Mode	Nom	Description
Mode I	Ouverture	La fissure s'ouvre perpendiculairement à la contrainte
Mode II	Glissement	Cisaillement dans le plan de la fissure
Mode III	Déchirure	Cisaillement hors du plan

4. Paramètres fondamentaux :

L'analyse de la stabilité d'une structure fissurée repose sur des paramètres physiques qui caractérisent l'état de contrainte et d'énergie au voisinage de la pointe de la fissure [1].

4.1. Facteur d'intensité des contraintes (K)

Il décrit l'amplification des contraintes près de la pointe de fissure [5].

$$K=Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

Avec :

- σ : contrainte appliquée
- a : demi-longueur de fissure
- Y : facteur géométrique
- K : intensité des contraintes

Chaque mode a son facteur : **KI, KII, KIII**

Condition de rupture :

$$KI \geq KIC$$

- KIC = ténacité à la rupture du matériau (propriété critique) [1].

4.2. Taux de restitution d'énergie (G)

Énergie libérée lorsque la fissure avance [3].

$$G = - \frac{dU}{dA}$$

- U : énergie élastique.
- A : surface de fissure.

Critère énergétique de Griffith

$$G \geq Gc$$

- Gc : énergie critique du matériau.

Lien important :

$$G = \frac{K^2}{E} [1]$$

4.3. Zone plastique en pointe de fissure

Même en rupture fragile, il existe une petite zone plastique [1] :

$$R_p = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{KI}{\sigma_y} \right)^2$$

r_p : taille de la zone plastique.

- σ_y : limite d'élasticité.

Si cette zone devient grande $\rightarrow$ on utilise la mécanique élasto-plastique [1].

Lois de propagation des fissures (fatigue)

Sous chargement cyclique (fatigue), la fissure grandit progressivement [7].

Loi de Paris :

$$\frac{da}{dN} = c (\Delta K)^m$$

- da/dN : vitesse de propagation de fissure
- ΔK : variation du facteur d'intensité
- C, m : constantes du matériau

Plus ΔK est grand, plus la fissure se propage vite [7].

5. Méthodes d'estimation pour les entailles :

Les entailles provoquent une concentration locale des contraintes pouvant conduire à l'amorçage des fissures et à la rupture des structures mécaniques. Afin d'évaluer leur sévérité et leur influence sur le comportement des matériaux, plusieurs méthodes d'estimation ont été développées en mécanique de la rupture [1]. Parmi les approches les plus utilisées figurent :

- L'approche volumétrique de Pluvinage.
- L'approche de la fissure équivalente.
- La méthode de Creager-Paris.

Ces méthodes permettent de relier la géométrie de l'entaille aux paramètres de la mécanique de la rupture afin d'estimer le risque d'amorçage et de propagation des fissures [1].

5.1. Approche volumétrique de Pluinage :

L'approche volumétrique proposée par Pluinage [8], [9] repose sur l'idée que l'endommagement ne dépend pas uniquement de la contrainte maximale au fond de l'entaille, mais également du volume de matériau fortement sollicité autour de cette zone.

Contrairement aux approches classiques basées uniquement sur le facteur de concentration des contraintes K_t , cette méthode considère :

- La distribution spatiale des contraintes.
- Le gradient de contrainte.
- Le volume effectif sollicité.

Cette approche est particulièrement adaptée :

- Aux matériaux ductiles.
- Aux structures soumises à la fatigue.
- Aux pièces entaillées complexes.

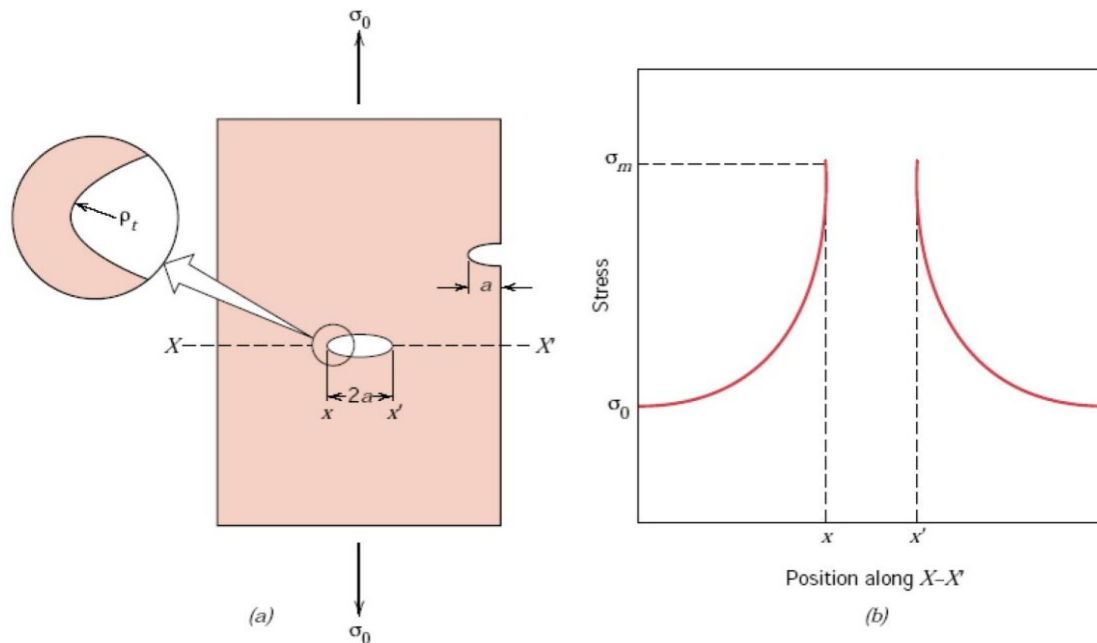


Figure 4: Schéma de l'approche volumétrique de Pluinage.

5.2. Approche de la "Fissure Équivalente".

L'approche de la fissure équivalente consiste à remplacer une entaille réelle par une fissure fictive équivalente produisant les mêmes effets mécaniques [1].

L'objectif est d'utiliser les outils classiques de la mécanique de la rupture pour analyser des entailles [1].

Cette méthode permet :

- D'évaluer la sévérité des entailles ;
- D'estimer l'amorçage des fissures ;
- D'utiliser les facteurs d'intensité des contraintes.

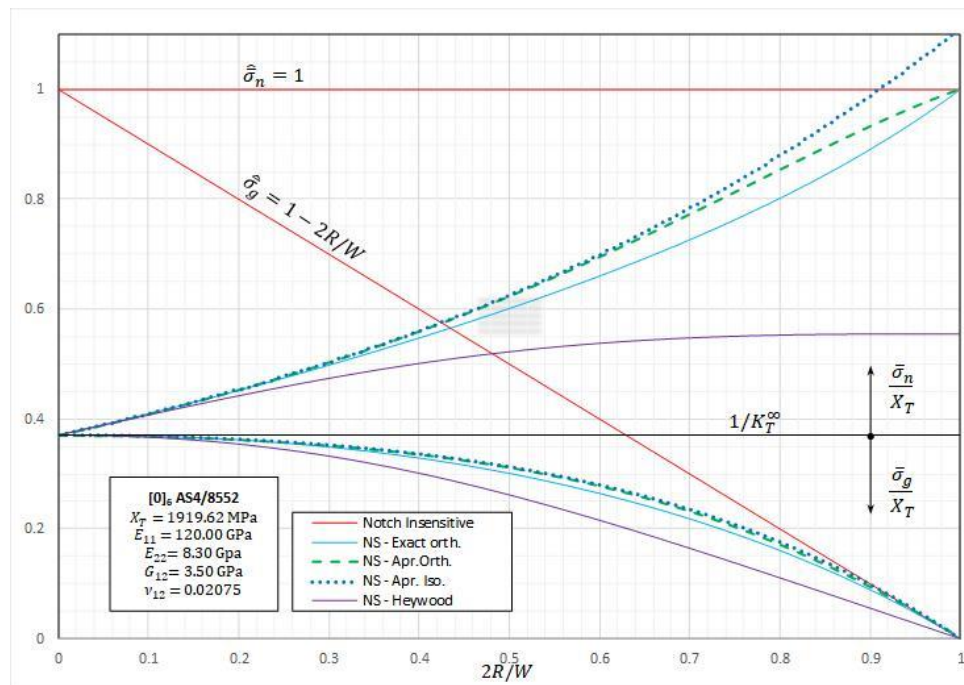


Figure 5: Application de l'approche de la fissure équivalente à l'évaluation des entailles.

5.3. Utilisation de la formule de Creager-Paris (relation entre ρ , K_t et K_{eq}).

La méthode de Creager-Paris établit une relation entre :

- Le rayon de l'entaille ρ .
- Le facteur de concentration des contraintes K_t .
- Le facteur d'intensité des contraintes équivalent K_{eq} [7].

Cette méthode permet de modéliser une entaille comme une fissure émoussée [7].

Formulation de Creager–Paris

Creager et Paris ont proposé une correction permettant de transformer une entaille en fissure équivalente [7].

La longueur équivalente associée à l'entaille est donnée par :

$$a_{eq} = a + \frac{\rho}{2}$$

Où :

- a : longueur réelle de la fissure ;
- ρ : rayon au fond de l'entaille.

Conclusion

Dans ce chapitre, les principaux fondements théoriques de la mécanique de la rupture ont été présentés afin de comprendre le comportement des matériaux contenant des défauts tels que les fissures et les entailles. Cette discipline joue un rôle essentiel dans l'évaluation de la résistance mécanique des structures et dans la prévention des ruptures brutales pouvant entraîner des conséquences techniques et économiques importantes.

L'étude a permis de mettre en évidence l'influence des concentrations de contraintes sur l'amorçage et la propagation des fissures. Les notions fondamentales, notamment le facteur d'intensité des contraintes, le critère de Griffith, l'intégrale J et la loi de Paris, constituent des outils indispensables pour analyser les phénomènes de rupture fragile, ductile et de fatigue.

Par ailleurs, les différents modes de propagation des fissures ont montré que le comportement des matériaux dépend fortement des conditions de chargement et de la géométrie des défauts. Les méthodes d'évaluation des entailles et des fissures permettent ainsi d'estimer la durée de vie des composants et d'améliorer la sécurité des structures industrielles [2].

Enfin, ce chapitre a également souligné l'importance des techniques de contrôle non destructif et des méthodes numériques modernes dans la détection et la simulation des défauts. Ces outils offrent une meilleure compréhension des mécanismes de rupture et contribuent au développement de stratégies efficaces de maintenance, de réparation et de conception des structures mécaniques.

Ainsi, les bases théoriques présentées dans ce chapitre constituent un support essentiel pour l'étude des défauts et des techniques d'analyse qui seront développées dans les chapitres suivants.

Chapitre II Analyse des défauts et techniques de réparation.

Introduction

Les structures mécaniques et industrielles sont souvent soumises à des conditions de fonctionnement sévères telles que les charges mécaniques répétées, les variations thermiques, les vibrations et les environnements corrosifs. Ces sollicitations favorisent l'apparition et le développement de différents types de défauts, notamment les fissures, les entailles et les phénomènes de corrosion, pouvant compromettre la fiabilité et la sécurité des équipements.

L'analyse des défauts constitue donc une étape essentielle dans le domaine de la mécanique de la rupture, car elle permet d'identifier l'origine des dégradations, d'évaluer leur niveau de gravité et de prévoir leur évolution au cours du temps. La compréhension des mécanismes d'amorçage et de propagation des défauts est indispensable afin de prévenir les ruptures brutales et d'optimiser la durée de vie des structures.

Dans ce chapitre, une étude des principaux types de défauts rencontrés dans les matériaux métalliques sera présentée, en mettant en évidence leurs caractéristiques, leurs causes et leurs effets sur le comportement mécanique des structures. Une attention particulière sera portée aux méthodes d'estimation des entailles et des fissures utilisées en mécanique de la rupture.

Par ailleurs, les principales techniques de contrôle non destructif employées pour la détection et l'évaluation des défauts seront abordées. Enfin, ce chapitre présentera différentes techniques de réparation et de maintenance permettant de limiter la propagation des défauts et d'assurer la continuité de service des équipements industriels.

L'ensemble de ces analyses contribue à améliorer la sécurité, la fiabilité et les performances des structures mécaniques dans les domaines industriels, énergétiques et aéronautiques.

1. Nature et typologie des défauts (Fissures, entailles, corrosions)

Types de défauts : fissures, entailles et corrosions

Les matériaux et les structures mécaniques utilisés dans l'industrie peuvent présenter différents types de défauts susceptibles d'altérer leurs propriétés mécaniques et de réduire leur durée de vie. Ces défauts peuvent apparaître dès la fabrication, lors des opérations de soudage et d'usinage, ou encore pendant l'exploitation sous l'effet des sollicitations mécaniques, thermiques et environnementales [10].

En mécanique de la rupture, les défauts sont considérés comme des discontinuités géométriques ou métallurgiques provoquant une concentration locale des contraintes pouvant conduire à l'amorçage et à la propagation des fissures [1]. Parmi les défauts les plus fréquents figurent les fissures, les entailles et les phénomènes de corrosion.

1.1. Les fissures

Les fissures représentent les défauts les plus critiques dans les structures mécaniques. Elles correspondent à une séparation locale du matériau sous l'effet des contraintes appliquées [1].

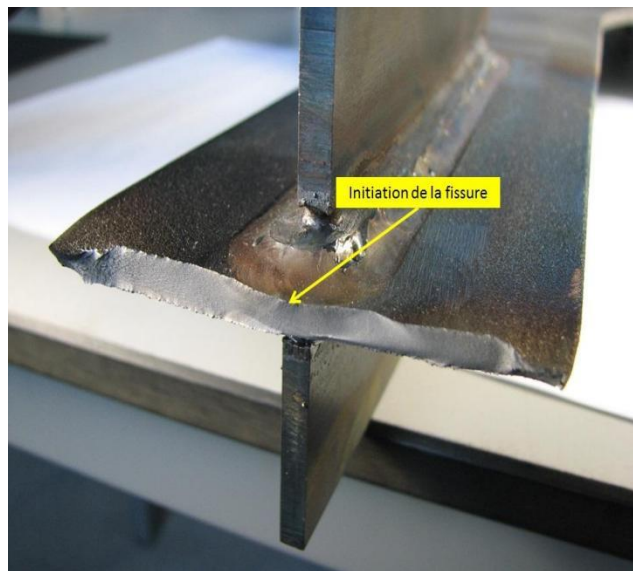


Figure 6: Exemple d'initiation d'une fissure au niveau d'une soudure.

a) Définition

Une fissure est une discontinuité fine et allongée apparaissant dans un matériau et pouvant se propager progressivement jusqu'à provoquer la rupture complète de la pièce [1].

b) Types de fissures

❖ Fissures de fatigue :

Elles apparaissent sous l'action de chargements cycliques répétés [7].

Caractéristiques :

- Propagation progressive.
- Présence de stries de fatigue.
- Rupture finale brutale.

Applications :

- Arbres tournants.
- Structures aéronautiques.
- Conduites sous pression.

1. Fissures fragiles :

Elles se développent rapidement avec très peu de déformation plastique [5].

Caractéristiques :

- Propagation instable.
- Faible absorption d'énergie.
- Rupture soudaine.

2. Fissures ductiles :

Elles apparaissent après une importante déformation plastique du matériau [1].

Caractéristiques :

- Propagation lente.
- Déformation importante avant rupture.
- Formation de cavités microscopiques.

3. Fissures thermiques :

Elles sont provoquées par :

- Les gradients thermiques.
- Les cycles de chauffage et refroidissement.
- Les contraintes thermiques résiduelles [3].

4. Fissures de corrosion sous contrainte :

Elles résultent de l'action simultanée :

- D'un environnement corrosif.
- Et de contraintes mécaniques [3], [11].

5. Les entailles

Les entailles sont des irrégularités géométriques provoquant une concentration locale des contraintes. Elles ne constituent pas toujours une fissure, mais elles favorisent fortement l'amorçage des fissures [1], [9],[4].

a) Définition

Une entaille correspond à une variation brusque de géométrie telle qu'un trou, une rainure, un angle vif ou un défaut de surface [1].

b) Types d'entailles

❖ Entaille en V

Très sévère à cause du faible rayon au fond de l'entaille [1].

❖ Entaille en U

Moins dangereuse grâce à un rayon plus important [1].

❖ Trous circulaires

Créent une perturbation locale des contraintes [1].

❖ Rayures et défauts de surface

Favorisent l'initiation des fissures de fatigue [7].

c) Effet des entailles

Les entailles provoquent :

- Une augmentation locale des contraintes.
- Une diminution de la résistance mécanique.
- Une réduction de la durée de vie en fatigue [1].

Le facteur de concentration des contraintes est défini par :

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}}$$

- $\sigma_{\max}$: contrainte maximale ;
- $\sigma_{\min}$: contrainte nominale.

6. La corrosion :

La corrosion est une dégradation progressive des matériaux due aux réactions chimiques ou électrochimiques avec le milieu environnant [10].

a) Définition

La corrosion correspond à la destruction lente du matériau sous l'effet d'un environnement agressif.

b) Types de corrosion

Les principaux types de corrosion sont présentés ci-dessous [10] :

1) Corrosion uniforme

Attaque homogène sur toute la surface du matériau.

2) Corrosion localisée

Attaque concentrée sur certaines zones spécifiques.

3) Corrosion par piqûres

Formation de petits trous profonds appelés piqûres.

4) Corrosion galvanique

Apparaît lorsque deux métaux différents sont en contact dans un milieu conducteur.

5) Corrosion sous contrainte

Résulte de l'action combinée :

- Des contraintes mécaniques.
- Et d'un milieu corrosif.

6) Corrosion-érosion

Due à l'action simultanée :

- De la corrosion.
- Et de l'écoulement rapide d'un fluide.

d) Conséquences de la corrosion

La corrosion peut entraîner [10] :

- Diminution de l'épaisseur.
- Perte de résistance mécanique.
- Initiation des fissures.
- Rupture prématurée des structures.

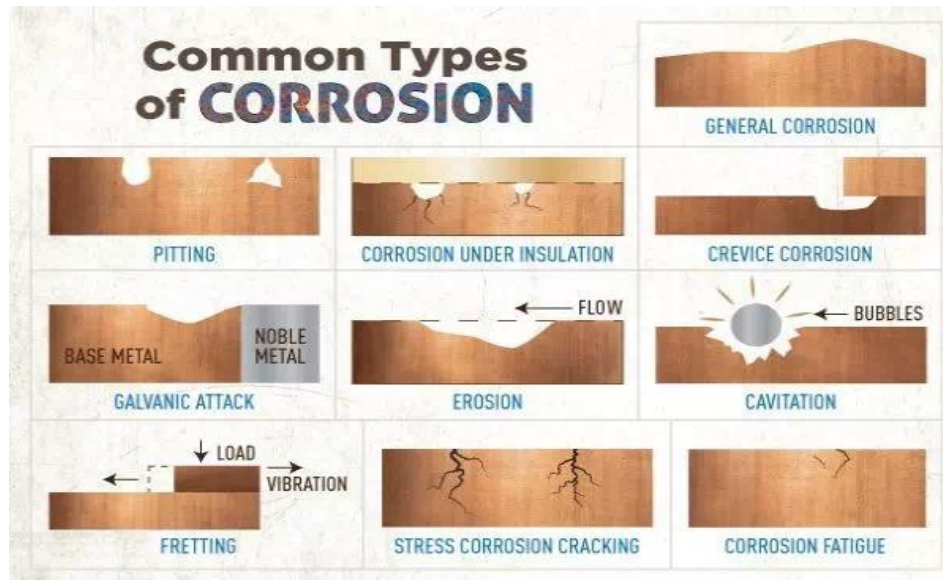


Figure 7: Différents Type de corrosion.

2. Réparation des structures fissurées

La réparation des structures fissurées est une étape essentielle dans la maintenance et la prolongation de la durée de vie des structures mécaniques. Les fissures peuvent apparaître à cause de la fatigue, de la corrosion, des surcharges ou des défauts de fabrication [1]. Si elles ne sont pas traitées, elles peuvent se propager et conduire à une rupture catastrophique de la structure.

L'objectif de la réparation est de :

- Arrêter ou ralentir la propagation de la fissure.
- Restaurer la capacité de charge de la structure.
- Prolonger la durée de vie de la structure.
- Réduire les coûts de remplacement [1].

Les méthodes de réparation dépendent de plusieurs facteurs :

- La taille et la position de la fissure.
- Le type de matériau.
- Les conditions de chargement.
- L'environnement de fonctionnement [1].

2.1. Les techniques de réparations

Le choix d'une stratégie de réparation est une étape décisive pour restaurer l'intégrité structurelle d'une pièce. Cette décision dépend de quatre facteurs fondamentaux : la taille et la position de la fissure, qui dictent la sévérité du défaut ; le type de matériau, conditionnant la compatibilité des adhésifs ou des méthodes de soudage ; les conditions de chargement, telles que les sollicitations statiques ou cycliques ; et enfin l'environnement de fonctionnement, incluant les contraintes thermiques et corrosives [1]. Une analyse rigoureuse de ces paramètres garantit le choix d'une solution optimale, assurant la durabilité de la structure et une résistance efficace face à la propagation future des défauts.

Pour l'alliage d'aluminium **2024-T3**, la ténacité à la rupture en déformation plane **KIC** est généralement comprise entre :

$$KIC \approx 25 \text{ à } 36 \text{ MPa } \sqrt{m}$$

Les valeurs les plus souvent utilisées dans les études de mécanique de la rupture et les simulations numériques sont :

$$KIC \approx 34 \text{ MPa } \sqrt{m}$$

Ou, selon certaines bases de données matériaux :

$$KIC \approx 25 \text{ MPa } \sqrt{m}$$

La variation provient de plusieurs facteurs : l'orientation du laminage (L-T, T-L, etc.)

L'épaisseur de l'éprouvette ; les conditions d'essai ASTM E399 ; l'état métallurgique exact du matériau.

Valeur recommandée pour un mémoire ou une simulation Abaqus

Pour une plaque aéronautique en Aluminium 2024-T3, il est courant d'utiliser :

$$KIC \approx 34 \text{ MPa} \sqrt{m}$$

Si par $\sigma_{\max}$ vous désignez la **contrainte maximale en traction (Ultimate Tensile Strength, UTS)** de l'alliage **Aluminium 2024-T3**, la valeur couramment admise est :

$$\sigma_{\max} \approx 483 \text{ MPa}$$

Avec une plage typique comprise entre **470 et 483 MPa** selon les normes, l'épaisseur et le fournisseur.

2.2. Perçage d'arrêt de fissure (Stop drilling) :

Le **perçage d'arrêt de fissure** est une technique simple et largement utilisée pour ralentir ou arrêter la propagation d'une fissure [1].

Le principe consiste à **percer un trou circulaire à l'extrémité de la fissure** afin de réduire la concentration de contraintes au niveau du front de fissure.

Lorsque la fissure se termine par une pointe très fine, la contrainte devient très élevée. En perçant un trou, on remplace cette pointe par une **géométrie arrondie**, ce qui réduit la concentration des contraintes.

Avantages

- Méthode simple et rapide.
- Coût faible.
- Facile à appliquer sur le terrain.

Inconvénients

- Solution souvent **temporaire**.
- Ne restaure pas complètement la résistance de la structure.

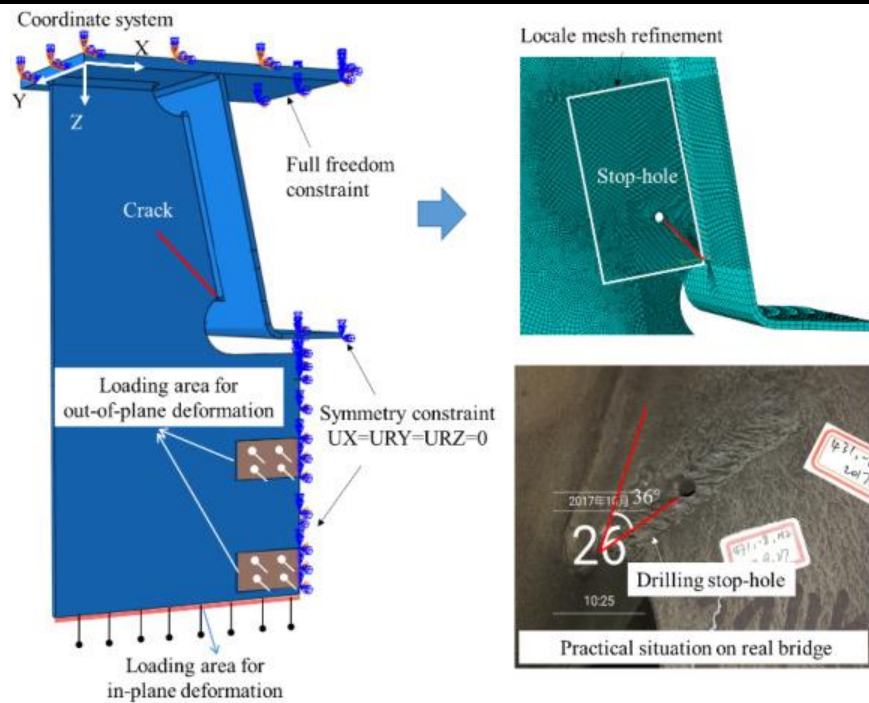


Figure 8: Application de la technique de perçage d'arrêt de fissure(stop-hole).

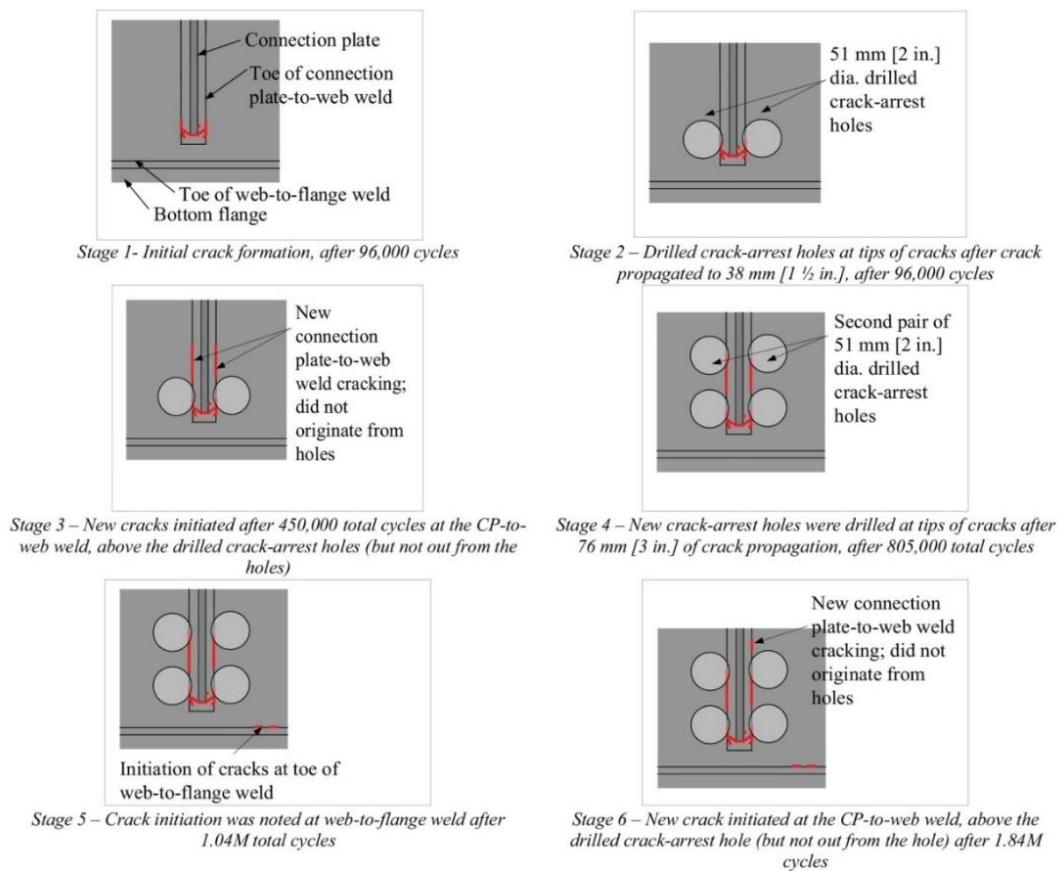


Figure 9: Différentes étapes du processus de perçage d'arrêt.

2.3. Réparation par soudage :

La réparation par soudage consiste à éliminer la fissure puis remplir la zone par un matériau de soudure[1].

Étapes principales

3. Localisation et inspection de la fissure.
4. Élimination de la fissure par meulage ou usinage.
5. Soudage de la zone endommagée.
6. Traitement thermique si nécessaire.

Avantages

- Restauration de la résistance de la structure.
- Solution permanente.

Inconvénients

- Risque de **contraintes résiduelles**.
- Possibilité de **nouvelles fissures** dues au soudage [10].

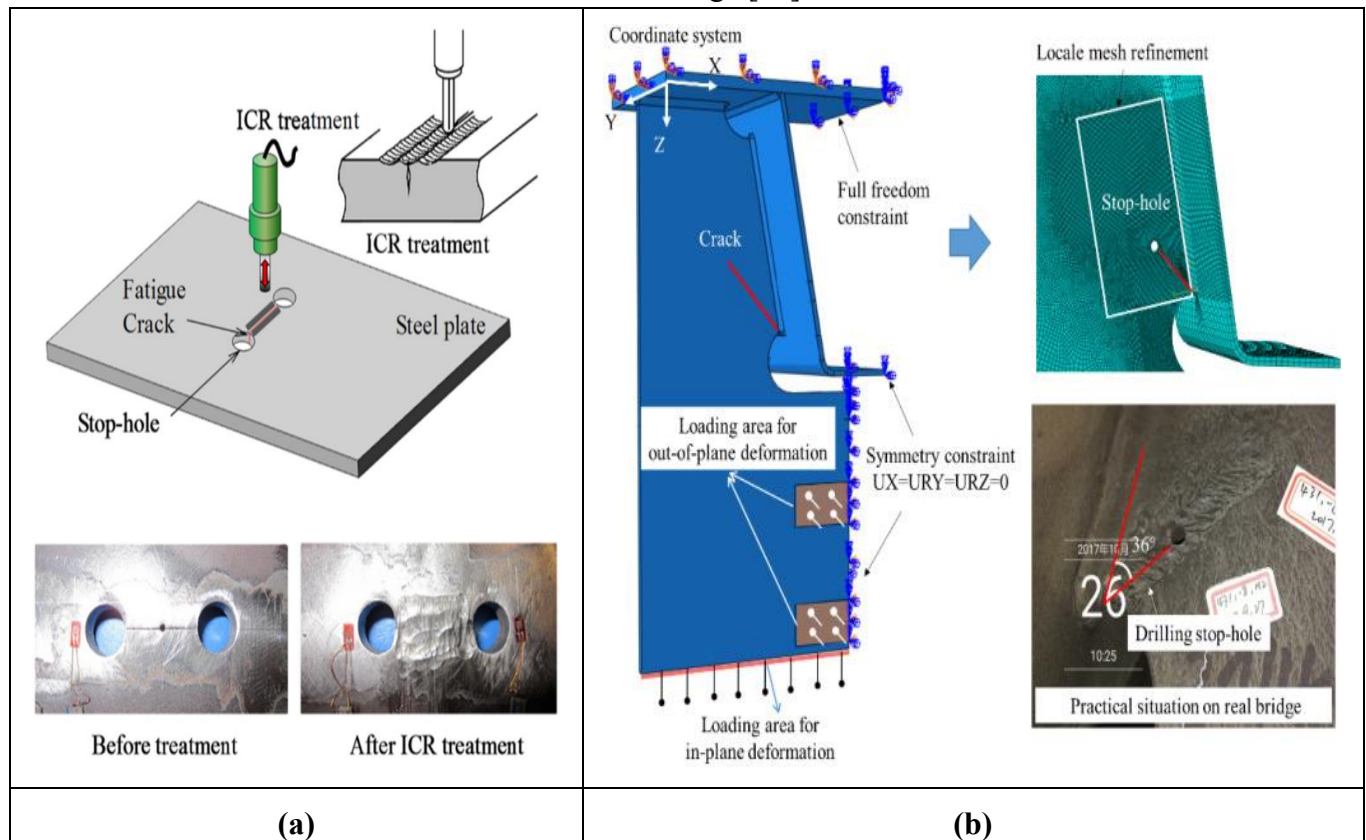


Figure 10: Procédés de réparation par trou d'arrêt associés au traitement ICR. (a) Principe d'application et état de la surface avant/après martelage, (b) Modélisation numérique de la structure et application réelle sur site.

2.4. Réparation par collage de patch (Composite patch repaire) :

Cette technique consiste à **coller un renfort en matériau composite** sur la zone fissurée afin de réduire les contraintes dans la région endommagée [1].

Les matériaux utilisés sont souvent :

- Fibres de carbone.
- Fibres de verre.
- Résines époxy.

Le patch composite absorbe une partie des charges appliquées, ce qui diminue le facteur d'intensité des contraintes au front de fissure [1].

Applications

Cette méthode est largement utilisée dans :

- L'aéronautique.
- Les pipelines.
- Les structures métalliques.

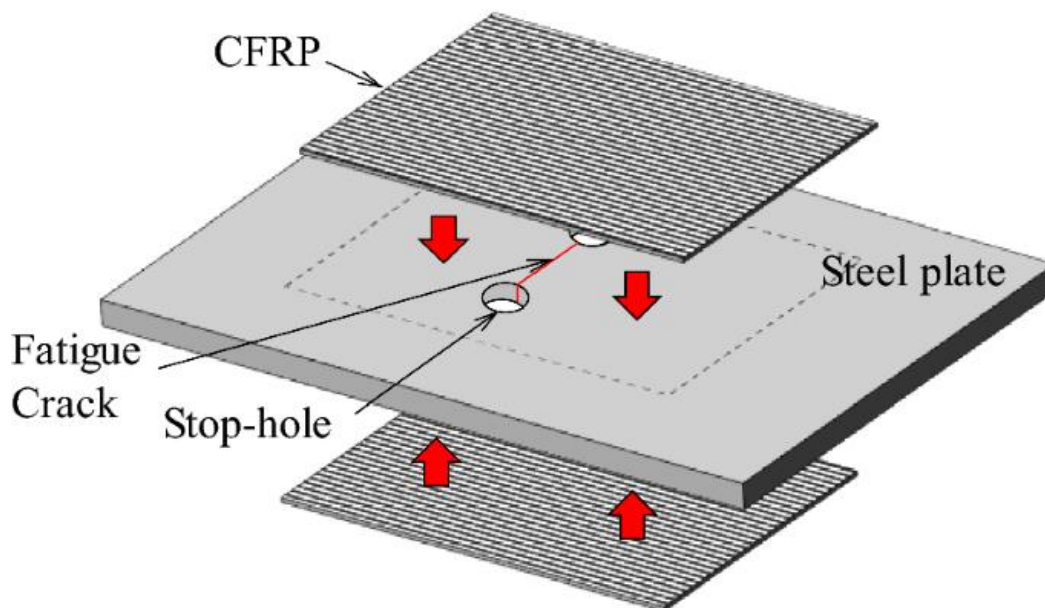


Figure 11: Réparation d'une plaque fissurée par combinaison d'un trou d'arrêt et de patches en composite (CFRP).

2.5. Renforcement par plaques métalliques (Bolted patch) :

Une autre méthode consiste à fixer une plaque métallique renforcée autour de la fissure à l'aide de boulons ou de rivets [1].

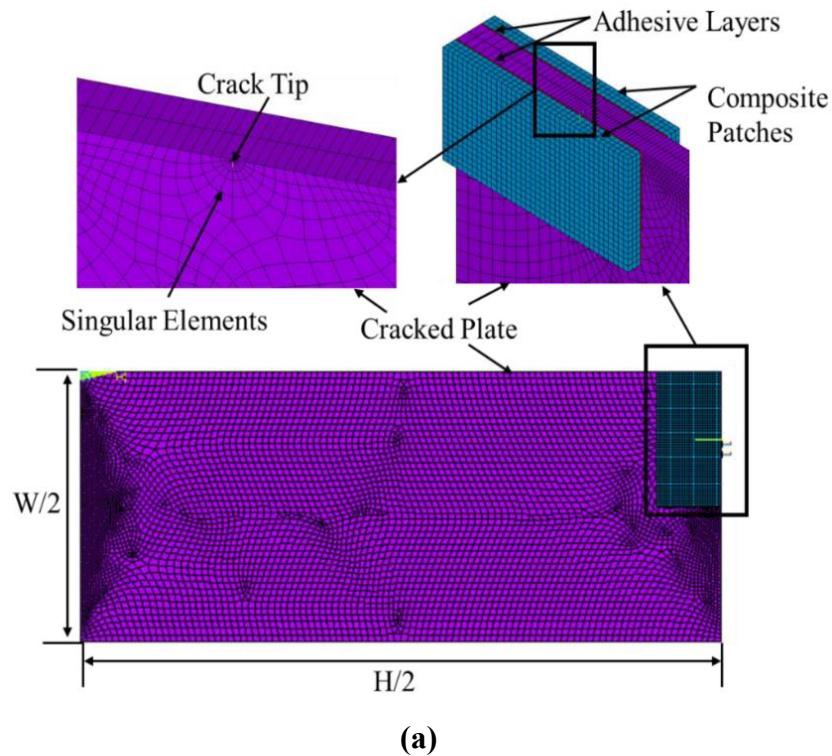
Cette plaque agit comme un élément de renforcement qui redistribue les contraintes dans la structure [2].

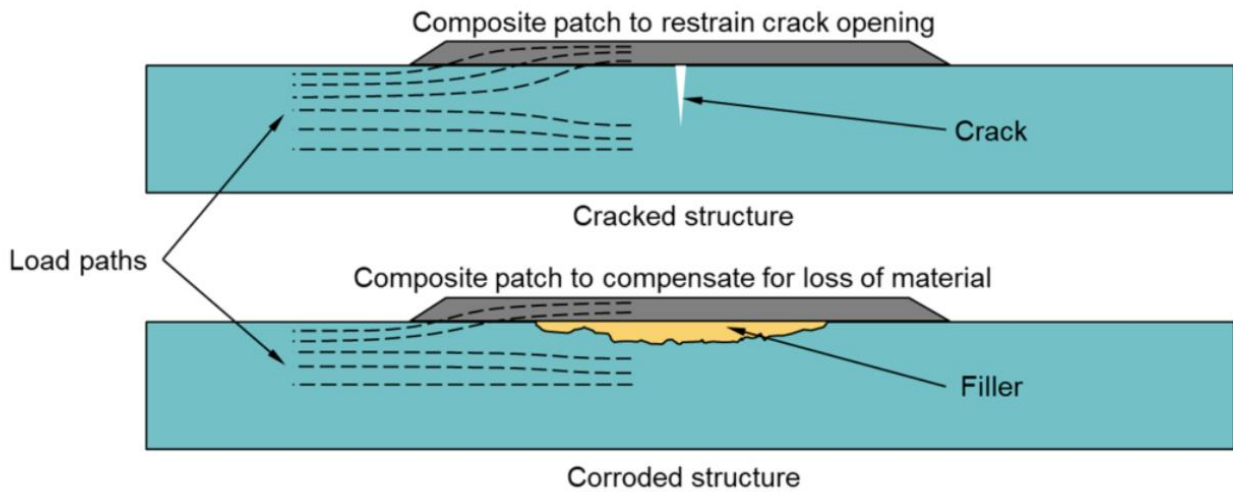
Avantages

- Amélioration significative de la résistance.
- Méthode fiable pour les structures lourdes.

Inconvénients

- Augmentation du poids de la structure.
- Nécessité de percer des trous supplémentaires [1].





(b)

Figure 12: Réparation par patch composite. (a) maillage de la plaque fissurée et détails de la pointe de fissure, (b) distribution des lignes de charge dans une structure fissurée et corrodée.

2.6. Remplacement de la pièce endommagée

Lorsque la fissure est trop importante ou que la structure est fortement endommagée, la meilleure solution consiste à **remplacer complètement la pièce défectueuse** [1].

Cette méthode est souvent utilisée lorsque :

- La fissure est très longue.
- La propagation est rapide.
- La sécurité de la structure est critique.

2.7. Importance de la réparation dans l'industrie

La réparation des fissures est essentielle dans plusieurs secteurs industriels [2] :

- Industrie pétrolière et gazière (pipelines).
- Structures aéronautiques.
- Ponts et structures civiles.
- Structures offshore.

Une réparation efficace permet d'augmenter la durée de vie des structures tout en garantissant la sécurité et la fiabilité des installations industrielles [1].

Conclusion

La réparation des fissures constitue une étape essentielle pour assurer la sécurité, la fiabilité et la durabilité des structures mécaniques et industrielles. Les fissures peuvent apparaître sous l'effet de différents phénomènes tels que la fatigue, la corrosion, les surcharges ou encore les défauts de fabrication [1]. Si elles ne sont pas traitées à temps, elles peuvent se propager progressivement et entraîner la défaillance de la structure.

Plusieurs méthodes de réparation ont été développées afin de limiter ou d'arrêter la propagation des fissures. Parmi les techniques les plus utilisées figurent le perçage d'arrêt de fissure, la réparation par soudage, l'utilisation de patchs composites ainsi que le renforcement par plaques métalliques [1]. Le choix de la méthode dépend de plusieurs facteurs, notamment la taille de la fissure, la nature du matériau, les conditions de chargement et les exigences de sécurité.

Ces techniques de réparation permettent non seulement de restaurer la résistance mécanique de la structure, mais aussi de prolonger sa durée de service tout en réduisant les coûts liés au remplacement des équipements. Ainsi, l'application correcte des méthodes de réparation, combinée à une inspection et une surveillance régulière, contribue de manière significative à la maintenance et à la fiabilité des structures dans de nombreux secteurs industriels.

Chapitre III Étude numérique et résultats.

Introduction

L'analyse des fissures dans les structures mécaniques constitue une étape essentielle pour évaluer leur sécurité et leur durée de vie. La mécanique de la rupture fournit les outils théoriques permettant de prédire l'initiation et la propagation des fissures, mais l'étude de ces phénomènes nécessite une approche complémentaire via les méthodes numériques.

Avec le développement des outils informatiques, la méthode des éléments finis est devenue indispensable pour modéliser le comportement des matériaux fissurés. Ces approches permettent d'obtenir une estimation précise des paramètres de la mécanique de la rupture, tels que le facteur d'intensité des contraintes (K). Ce chapitre présente la méthodologie de simulation mise en œuvre sous le logiciel Abaqus. Nous détaillerons l'étude paramétrique des fissures, l'analyse comparative entre fissures et entailles via l'approche de Creager-Paris, ainsi que l'efficacité des réparations par patchs composites, avant d'aborder la simulation de propagation par la méthode XFEM.

1. Présentation du logiciel Abaqus

Abaqus est un logiciel de simulation par éléments finis reconnu pour sa robustesse et sa polyvalence dans la modélisation de phénomènes complexes en ingénierie. Il est particulièrement apprécié pour sa capacité à traiter des modèles volumineux et des problèmes non linéaires, ce qui le rend adapté aux simulations réalistes de structures soumises à des conditions extrêmes. Abaqus offre une large bibliothèque de modèles de matériaux, permettant de simuler des comportements variés tels que l'élasticité, la plastification, l'hyperélasticité des élastomères, ainsi que la rupture des métaux, ce qui est essentiel pour étudier la propagation des fissures dans les matériaux. Le travail a validé l'usage d'Abaqus dans des cas tests complexes, mettant en avant sa fiabilité dans le traitement de la fissuration et des non-linéarités géométriques.

2. Capacités pour la simulation des fissures

Le logiciel Abaqus offre des outils puissants pour la simulation des fissures, permettant de modéliser leur initiation, leur propagation et d'évaluer les paramètres critiques liés à la rupture. Parmi les techniques intégrées, la méthode XFEM (Extended Finite Element Method) permet de représenter la propagation de fissures sans nécessiter de remaillage, grâce à l'utilisation de fonctions de niveau set. Abaqus propose également des modèles cohésifs, qui reproduisent les mécanismes de fissuration à travers des lois d'endommagement progressif au sein d'interfaces prédéfinies. Enfin, pour une évaluation

précise de l'intensité des contraintes autour du front de fissure, le logiciel intègre des méthodes éprouvées telles que les intégrales J et M, essentielles dans le calcul des Facteurs d'Intensité de Contrainte (FIC).

- **XFEM (Extended FEM)** : Modélise la propagation de fissure sans remaillage grâce aux fonctions de niveau set.
- **Modèles cohésifs** : Simule l'initiation et la croissance des fissures via des lois d'endommagement
- **Calcul du FIC** : Intègre des méthodes J-integral et M-integral pour une évaluation précise des facteurs d'intensité de contraintes

2. Modèles de comportement disponibles

Dans le cadre de la simulation numérique du comportement des matériaux, le choix du modèle de comportement est une étape essentielle pour assurer la fidélité des résultats. Le logiciel Abaqus met à disposition une large gamme de lois de comportement permettant de modéliser des réponses mécaniques variées selon la nature du matériau et le type de sollicitation.

Pour les matériaux ductiles comme les alliages métalliques, des modèles élasto-plastiques sont disponibles, notamment le critère de Von Mises pour la plasticité isotrope, ainsi que le modèle de Drucker-Prager, particulièrement adapté aux matériaux présentant une sensibilité à la pression (comme les sols ou certains composites).

Concernant la rupture, plusieurs critères peuvent être intégrés pour anticiper la défaillance des structures. Parmi eux, on distingue le critère de Rankine basé sur la contrainte maximale, le critère de Mohr-Coulomb adapté aux milieux granulaires, et le critère de Hoek-Brown, généralement utilisé pour les matériaux rocheux.

Dans les cas de sollicitation cyclique, la modélisation de la fatigue est également possible grâce à des lois de propagation des fissures, telles que la loi de Paris-Erdogan, qui relie la vitesse de croissance des fissures à l'intensité du chargement.

3. Modélisation élastique linéaire et critères de rupture

Dans cette étude, le matériau étudié est supposé purement élastique, conformément à l'hypothèse de la mécanique de la rupture linéaire élastique (MRLE). Le comportement de l'alliage d'aluminium 2024-T3 est ainsi modélisé à l'aide d'un modèle élastique isotrope linéaire, défini par son module d'Young et son coefficient de Poisson. Ce choix permet de simplifier l'analyse tout en conservant une bonne capacité de prédiction des singularités de contrainte au voisinage des fissures.

Pour évaluer le risque de rupture, on utilise des critères de rupture linéaire élastique, tels que le facteur d'intensité de contrainte (FIC) pour les modes I, II et III, ainsi que le T-stress qui renseigne sur le champ de contrainte non singulier au voisinage du front de fissure.

Ces grandeurs, extraites à partir des outils proposés par Abaqus, permettent une analyse fine du comportement de la structure fissurée, que ce soit dans l'état non réparé ou réparé, sous un chargement biaxial.

4. Modélisation numérique sous Abaqus

La modélisation numérique de la plaque fissurée et entaillée a été réalisée à l'aide du logiciel Abaqus, reconnu pour sa capacité à traiter des phénomènes complexes en mécanique de la rupture. La géométrie modélisée correspond à une plaque rectangulaire comportant un défaut latérale de type fissure ou entaille. Cette configuration permet de simuler la concentration des contraintes au voisinage de la pointe de fissure, essentielle pour l'étude de la propagation de fissures sous chargement. La plaque est modélisée en deux dimensions sous l'hypothèse d'état de contraintes planes, ce qui simplifie le modèle tout en conservant la précision nécessaire à l'analyse.

5. Géométrie de la plaque

Le modèle géométrique considéré dans cette étude est une plaque rectangulaire en alliage d'aluminium 2024-T3, présentant une fissure débouchante située latéralement. Cette fissure est caractérisée par sa longueur longitudinale, notée (a). Les dimensions de la plaque ainsi que celles de la fissure sont illustrées à la Figure 14, avec des unités exprimées en millimètres.

Dans un premier temps, l'analyse porte sur le comportement élastique de la plaque soumise à différents types de défauts sous un chargement uniaxiale. Cette étape comprend une étude paramétrique sur la longueur de la fissure, ainsi qu'une comparaison détaillée entre fissure et entaille, où le facteur d'intensité des contraintes (K) est extrait selon l'approche de Creager-Paris. Dans un second temps, une solution de réparation est introduite à l'aide d'un patch en composite Boron/époxy, afin d'évaluer son efficacité en termes de réduction des concentrations de contraintes. Enfin, la simulation de la propagation de la fissure est réalisée par la méthode XFEM, permettant de comparer le comportement des plaques réparées et non réparées à travers leurs courbes force-déplacement.

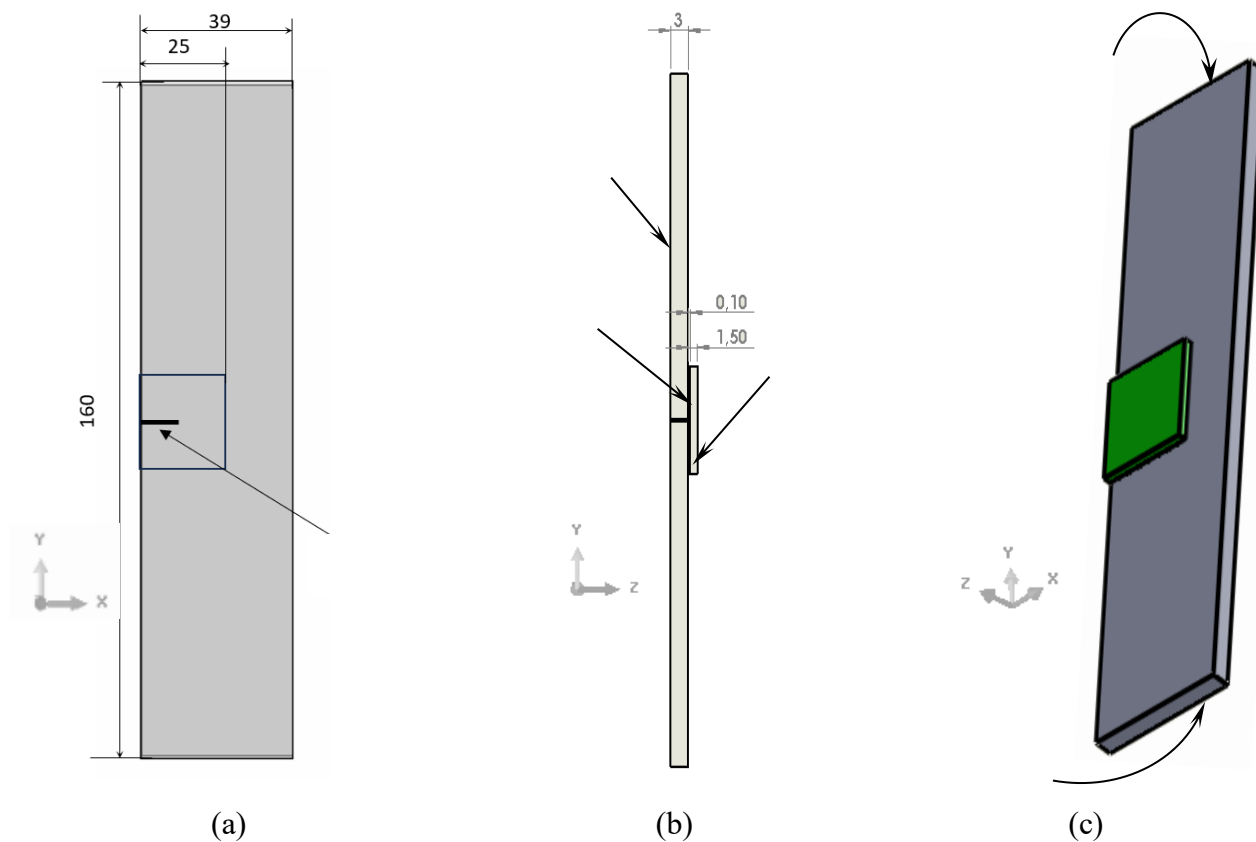


Figure 13: Géométrie de la plaque réparée (a) vue de face (b) vue de côté (c) vue en 3D.

Tableau 3: Propriétés des matériaux (alliage d'aluminium 2024-T3 et de l'adhésive FM 73)

Paramètres	Alliage aluminium 2024-T3	Adhésive FM 73
E(MPa)	72000	2210
ν	0.3	0.43

Tableau 4: Propriétés des matériaux du patch composite Boron/epoxy.

Module d'élasticité (MPa)		Module de cisaillement (MPa)		Coefficient de Poisson	
E_{11}	200000	G_{12}	7200	ν_{12}	0.21
E_{22}	25000	G_{13}	5500	ν_{13}	0.21
E_{33}	25000	G_{23}	5500	ν_{23}	0.21

6. Conditions aux limites

Dans cette modélisation, la plaque est soumise à un chargement uniaxiale. Le chargement uniaxiale appliqué comprend une contrainte constante dans la direction verticale, notée σ_{yy} , fixée à 80 MPa. Pour garantir la stabilité du modèle, la face inférieure de la plaque est complètement bloquée selon les trois directions de l'espace (x, y et z) pour un chargement uniaxiale (Figure 15).

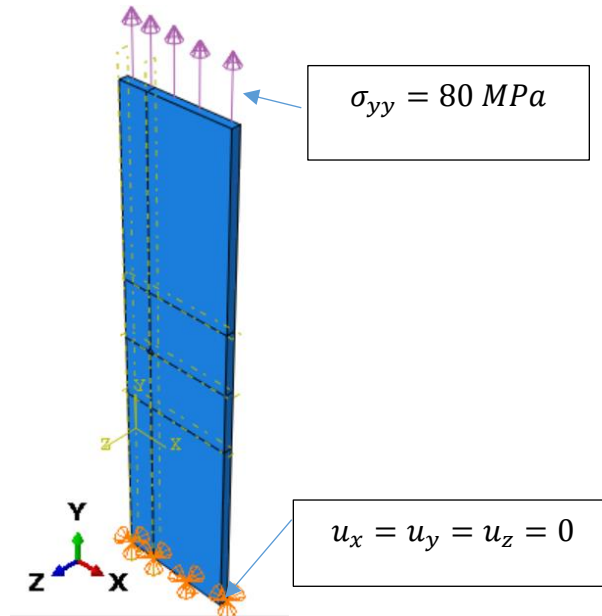


Figure 14: Conditions aux limites de la plaque fissurée.

7. Maillage

Le modèle a été discrétisé à l'aide de la méthode des éléments finis en 3D, en utilisant des éléments volumiques de type brique quadratique à 20 nœuds (C3D20R), adaptés pour les analyses de type statique non linéaire avec réduction de l'intégration. Le pas de calcul sélectionné pour cette modélisation est de type Static, General. Afin d'assurer la précision des résultats tout en optimisant les temps de calcul, une étude de convergence du maillage a été réalisée (Figure 16). Celle-ci a permis de déterminer une taille optimale d'éléments dans les zones critiques.

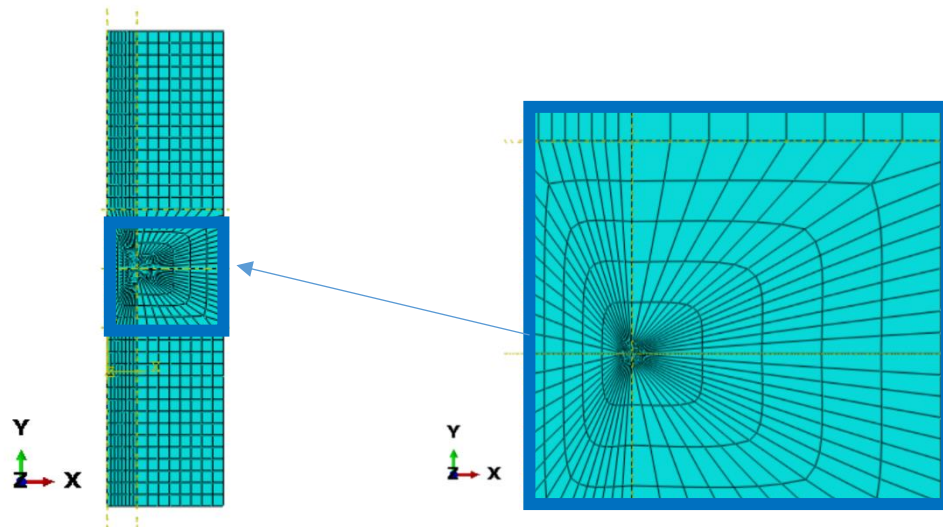


Figure 15:Maillage de la plaque.

Un raffinement local du maillage a été appliqué autour de la fissure, où les gradients de contrainte sont les plus élevés, avec une taille d'élément réduite à 0,1 mm (Figure 16). Cette stratégie est motivée par le fait que la précision des résultats dépend fortement de la finesse du maillage dans les zones à forte variation de contraintes, comme la pointe de fissure. En revanche, un maillage plus grossier peut être toléré dans les zones éloignées de l'entaille, où les champs mécaniques varient de manière plus uniforme. Ainsi, le compromis entre précision numérique et coût de calcul a guidé la distribution du maillage sur l'ensemble du modèle.

Vérification de convergence

Il est essentiel de valider la convergence du maillage afin de garantir la fiabilité des valeurs extraites, notamment du facteur d'intensité de contrainte K_I . Pour ce faire, une étude de sensibilité a été réalisée en faisant varier la taille des éléments autour de la fissure. Quatre tailles de maillage ont été testées : 0,5 mm, 0,3 mm, 0,1 mm et 0,09 mm (Figure 17).

La figure ci-dessous montre l'évolution du facteur K_I en fonction de la taille du maillage. On observe que la valeur de K_I tend à se stabiliser à partir d'une taille d'élément de 0,1 mm. Cette stabilité est confirmée par le tableau présentant les écarts relatifs en pourcentage, qui deviennent négligeables ($< 0,2\%$) entre les maillages de 0,1 mm et 0,09 mm.

Ces résultats indiquent que le maillage avec une taille d'élément de 0,1 mm constitue un bon compromis entre précision et coût de calcul, et sera donc retenu pour les simulations présentées dans la suite de cette étude.

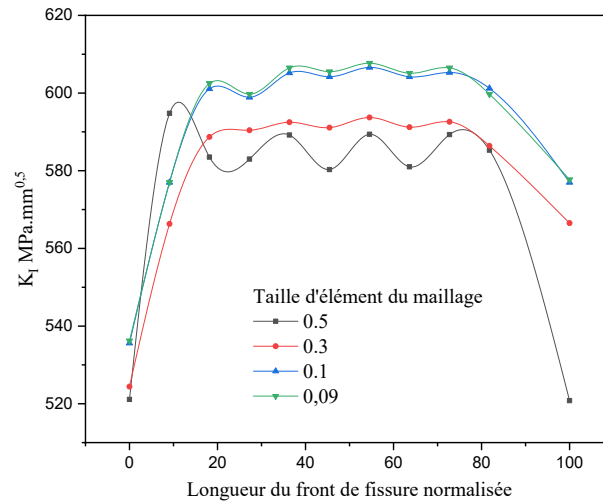


Figure 16: Vérification de convergence de K_I en fonction de la taille d'élément de maillage.

Tableau 5: l'écart (en %) pour une convergence de maillage.

Taille maillage (mm)	K_I (MPa $\sqrt{\text{mm}}$)	Écart (%)
0.5	521,1	2.81
0.3	524,4	2.20
0.1	535,6	0.11
0.09	536,2	0

8. Implémentation des techniques de calcul de K

L'implémentation du calcul du facteur d'intensité des contraintes (K) dans Abaqus repose sur l'utilisation de contours d'intégrale (J-integral), une méthode robuste permettant d'extraire les paramètres de rupture au voisinage de la pointe de la fissure. Il est nécessaire de définir un maillage spécifique, caractérisé par des éléments singuliers (nœuds déplacés au quart de la longueur de l'élément) pour capturer les singularités de contraintes. Cette approche permet de transformer le champ de contraintes calculé en une valeur scalaire de K , garantissant ainsi la précision nécessaire pour comparer les résultats numériques aux solutions analytiques théoriques.

L'approche Creager-Paris est une méthode statique (ou quasi-statique) pour estimer un comportement équivalent à une fissure à partir d'une géométrie d'entaille fixe.

La méthode XFEM (eXtended Finite Element Method) est une approche dynamique (ou évolutive) qui permet de modéliser la propagation réelle de la fissure à travers le maillage sans avoir à le redéfinir.

En plus du facteur d'intensité des contraintes (K) qui domine les contraintes singulières au voisinage de la pointe, le terme T représente la contrainte normale agissant parallèlement au plan de la fissure. Bien que K contrôle la vitesse de propagation (le "moteur" de la rupture), le T-stress influence la forme de la zone plastique et, surtout, la stabilité directionnelle de la fissure. Un T-stress positif favorise la bifurcation de la fissure, tandis qu'un T-stress négatif tend à stabiliser la propagation en ligne droite. Cette notion est cruciale lors de vos simulations XFEM pour prédire le chemin de propagation réel sous chargement.

9. Résultats de la simulation numérique

Cette section présente et analyse les résultats obtenus à partir des différentes simulations numériques réalisées sous Abaqus. L'objectif principal est d'évaluer l'évolution des paramètres de rupture, notamment le facteur d'intensité des contraintes (FIC) et l'influence de la contrainte T-stress, en fonction des paramètres géométriques et des conditions de chargement. Les résultats sont comparés selon plusieurs scénarios : l'étude paramétrique de la longueur de fissure, la comparaison directe entre fissure et entaille via l'approche de Creager-Paris, ainsi que l'efficacité de la réparation par patch en composite Boron/époxy. L'interprétation de ces données, complétée par l'analyse des chemins de propagation obtenus par la méthode XFEM, permet d'apprécier la performance des solutions de réparation envisagées.

10. Étude paramétrique de la fissure

L'analyse de l'évolution du facteur d'intensité des contraintes (KI) montre une dépendance directe entre la taille du défaut et la sévérité de la contrainte en pointe de fissure. Pour une épaisseur de plaque de 3 mm, la figure 18 montre une variation du KI sur le front de la fissure. La valeur centrale est significativement plus élevée que celles observées aux bords (figure 18a). Ce phénomène s'explique par l'effet de confinement au centre de la plaque, où l'état de déformation plane favorise une plus forte élévation des contraintes, contrairement aux bords en état de contrainte plane.

Conformément à la loi analytique $I = Y\sigma\sqrt{\pi \cdot a}$, le facteur d'intensité des contraintes devrait théoriquement croître proportionnellement à la racine carrée de la longueur de fissure ($\sqrt{a}$).

Toutefois, nous observons ici une accélération marquée du K_I (figure 18b), particulièrement entre $a=15$ mm et $a=20$ mm, où la valeur bondit de plus de **320 %**. Ce dépassement des $7700 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{0.5}$ pour $a=20$ mm indique que nous ne sommes plus dans une simple configuration de fissure isolée. À cette longueur, la réduction de la section résistante effective de la plaque devient critique : la contrainte nominale σ augmente fortement car elle s'exerce sur une surface portante réduite, ce qui amplifie exponentiellement le terme K_I .

L'objectif est d'identifier la sensibilité des paramètres de rupture à l'allongement de la fissure, afin de mieux comprendre les mécanismes de propagation et d'évaluer la criticité de certaines configurations géométriques. Ces résultats serviront également de référence pour mesurer l'efficacité de la technique de réparation introduite ultérieurement.

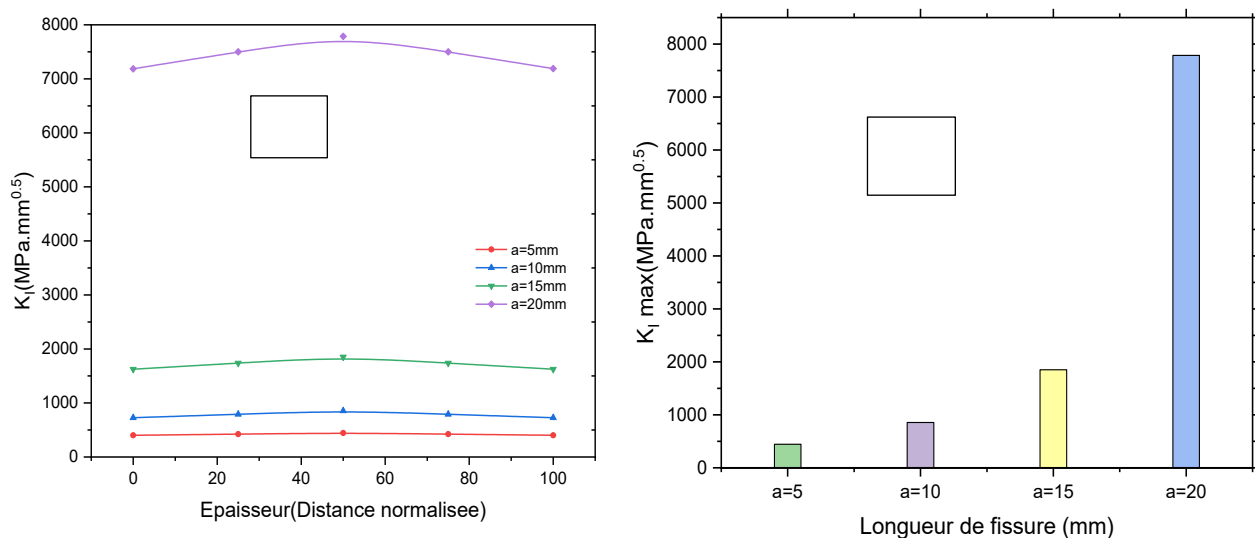


Figure 17:Facteur d'intensité des contraintes K_I , (a) selon l'épaisseur de la plaque, (b) en fonction de la longueur de la fissure.

11. Analyse comparative (fissure-entaille)

Afin d'évaluer la sensibilité de la structure à la géométrie du défaut, nous avons confronté le comportement d'une fissure idéale ($a=10$ mm) à celui d'une entaille semi-circulaire de même longueur en faisant varier son rayon de courbure (ρ).

On observe dans la figure 19 que K_I augmente avec ρ : pour le cas d'une fissure ($\rho=0$) : $K_I = 855,6$ (Sévérité maximale) et pour le cas d'une Entaille ($\rho=0,05$) : $K_I = 207,4 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{0.5}$

Entre $\rho = 0,05$ et $\rho = 0,5$, le K_I passe de 207,4 à 377,6 MPa.mm^{0.5}. Plus l'entaille devient large, plus le K_I équivalent (approche Creager-Paris) se rapproche de la valeur de la fissure, bien qu'il reste nettement inférieur à celle d'une fissure parfaite.

Les résultats de la figure 19 montrent que le facteur d'intensité des contraintes K_I diminue lors du passage d'une fissure idéale ($\rho=0$) à une entaille, même très fine ($\rho = 0,05$ mm). Cette réduction du K_I est due à l'Élargissement du fond d'entaille de la pointe du défaut, qui diminue l'effet de concentration de contraintes (Atténuation de la singularité). Cependant, on note que pour une longueur de défaut fixe ($a=10$ mm), le K_I équivalent croît avec l'augmentation du rayon de courbure ρ . Cette tendance confirme que l'entaille agit comme un défaut moins sévère qu'une fissure, mais que sa sévérité augmente avec l'élargissement de son rayon de fond.

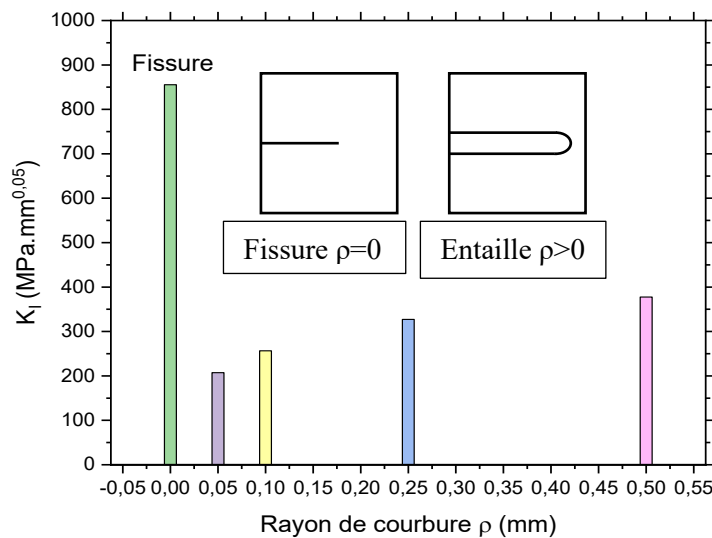


Figure 18:Évolution du facteur d'intensité des contraintes K_I en fonction du rayon de courbure ρ du fond de l'entaille.

La figure 20 illustre l'évolution de la contrainte locale σ_{yy} au fond de l'entaille pour une longueur de défaut constante ($a=10$ mm). On observe une décroissance significative de la contrainte à mesure que le rayon de courbure ρ augmente.

On observe la valeur de contrainte maximale ($\sigma_{yy} = 1336$ MPa). Ce point représente la singularité mathématique où la contrainte théorique est à son paroxysme, caractéristique d'une fissure infiniment aiguë.

L'introduction d'un rayon de courbure, même infime ($\rho = 0,05$ mm), provoque une chute immédiate de la contrainte maximale ($\sigma_{yy} = 1047$ MPa), soit une réduction de **21,6 %** par rapport au cas idéal.

À mesure que le rayon de courbure augmente (de 0,05 mm à 0,5 mm), la contrainte σ_{yy} diminue progressivement pour atteindre 602,7 MPa.

Ce phénomène confirme l'atténuation de la singularité de contrainte (l'effet de la géométrie du fond d'entaille sur la concentration de contraintes.). Plus l'entaille est "arrondie", plus elle favorise une redistribution des lignes de flux de contraintes sur une surface plus large au fond de l'entaille, évitant ainsi la concentration locale extrême propre aux fissures. Cette analyse démontre que l'entaille, contrairement à la fissure, présente une sévérité qui dépend intrinsèquement de sa géométrie locale. Ces résultats valident également la pertinence de l'approche de Creager-Paris, qui permet de traiter cette géométrie finie comme une fissure équivalente pour des besoins de dimensionnement industriel.

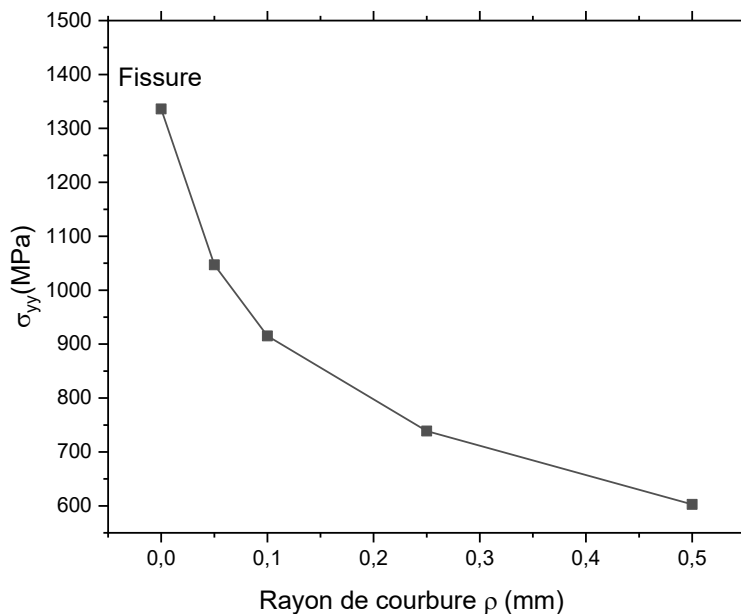


Figure 19:Évolution de la contrainte locale maximale σ_{yy} au fond de l'entaille en fonction du rayon de courbure ρ .

12.Étude de l'efficacité de la réparation par patch (Boron/Époxy)

Bien que la réparation par patch composite soit couramment utilisée pour les pipelines, son application aux structures en aluminium dans le domaine aéronautique représente une solution d'avenir pour traiter les dommages rapidement et à moindre coût. Comparativement au remplacement complet ou au soudage, le collage de matériaux composites permet de ralentir la progression des fissures tout en

maintenant l'aéronef en service. Cette partie introduit l'étude de l'efficacité de cette réparation (Boron/Époxy) sur le comportement mécanique d'une plaque en aluminium, en se focalisant sur la réduction du facteur d'intensité de contrainte (K_I) en présence d'une fissure ou d'une entaille.

L'analyse de la figure 21 de la variation du facteur d'intensité de contrainte (K_I) à travers l'épaisseur normalisée de la plaque met en évidence l'asymétrie induite par la réparation monoface (un seul côté). Pour la plaque non réparée (courbe noire), le profil de K_I présente une forme parabolique symétrique, avec des valeurs maximales au cœur de la plaque ($\sim 850 \text{ MPa.mm}^{0.5}$) et des valeurs légèrement plus basses sur les surfaces externes ($\sim 730 \text{ MPa.mm}^{0.5}$), ce qui est caractéristique d'un état de contrainte tridimensionnel en fond de fissure.

En revanche, l'application du patch en composite Boron/Époxy sur une seule face (côté réparé à la distance 0) modifie radicalement cette distribution :

- **Côté réparé (0) :** On observe une chute spectaculaire de K_I , qui passe de 730 à environ $140 \text{ MPa.mm}^{0.5}$, traduisant le transfert efficace des efforts de la plaque vers le patch à haute rigidité.
- **Côté non réparé (100) :** Bien que le patch atténue globalement les contraintes, sa présence sur une seule face génère un effet de flexion secondaire (désalignement du plan neutre). Par conséquent, le K_I du côté non réparé reste élevé ($\sim 600 \text{ MPa.mm}^{0.5}$), ce qui démontre que l'efficacité du blindage diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la zone directement collée au patch.

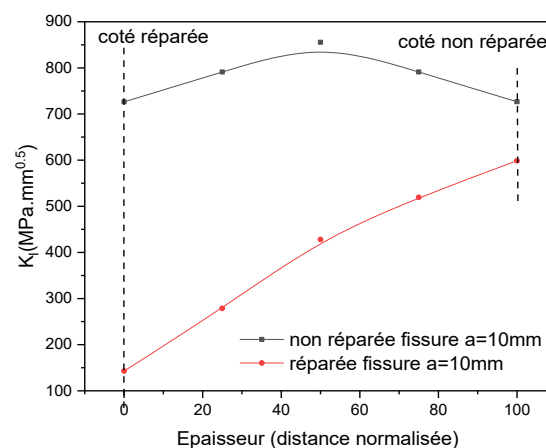


Figure 20: Comparaison du facteur d'intensité des contraintes K_I à travers l'épaisseur de la plaque entre une fissure non réparée et une fissure réparée par patch (Boron/Époxy).

La figure 22 permet de comparer l'efficacité de la réparation entre une fissure idéale (rayon de courbure à la pointe $\rho = 0$ mm) et des entailles ayant différents rayons de courbure (ρ allant de 0.1 à 0.5 mm).

- **Cas de la fissure ($\rho = 0$) :** Pour la plaque non réparée, la fissure présente le niveau de dangerosité le plus élevé avec un K_I sommital supérieur à 800 MPa.mm^{0.5}. L'introduction du patch Boron/Époxy fait chuter drastiquement cette valeur à moins de 200 MPa.mm^{0.5} au point de mesure, confirmant la haute performance du composite sur les singularités aiguës.
- **Cas de l'entaille ($\rho > 0$) :** L'analyse des plaques réparées comportant une entaille montre que le facteur K_I (calculé via l'approche de Creager-Paris) augmente de manière quasi-linéaire avec l'augmentation du rayon de courbure ρ . Pour $\rho = 0.1$ mm le K_I est d'environ 250 MPa.mm^{0.5}, tandis qu'il atteint près de 400 MPa.mm^{0.5} pour $\rho = 0.5$ mm.

Ce comportement indique que plus l'entaille est large (rayon ρ grand), moins le patch Boron/Époxy parvient à brider l'ouverture du défaut. Une entaille plus émoussée modifie la distribution locale des contraintes en fond de défaut, ce qui limite le transfert de charge optimal vers le patch par rapport à une fissure nette. Le patch est donc intrinsèquement plus performant pour réparer une fissure stricte ($\rho = 0$) qu'une entaille ouverte.

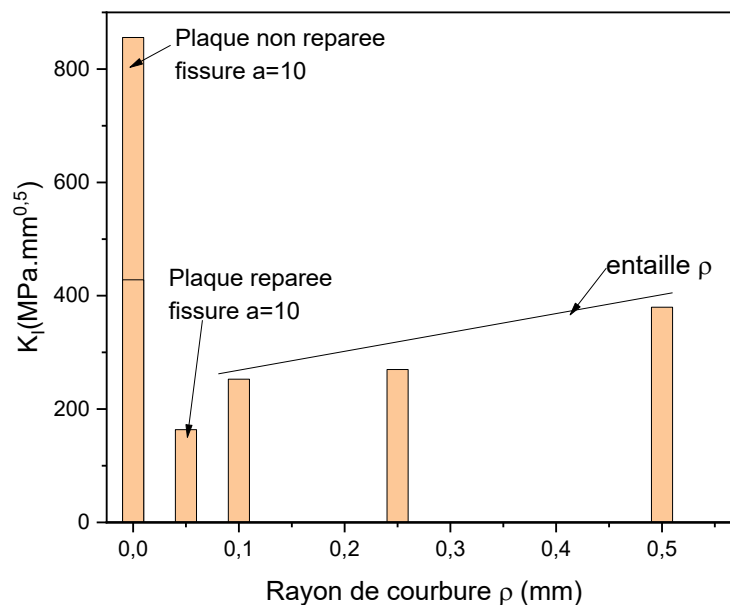


Figure 21: Distribution du facteur d'intensité des contraintes K_I le long de l'épaisseur de la plaque pour différentes longueurs de fissure (a).

L'analyse de la contrainte normale maximale en fond de défaut ($\sigma_{yy}max$) confirme l'impact direct de la géométrie de la pointe et de la réparation sur la concentration de contraintes (figure 23). Pour une fissure stricte ($\rho = 0$ mm), la plaque non réparée présente un pic de contrainte extrêmement critique atteignant environ 1340 MPa. L'application du patch composite permet de brider l'ouverture des lèvres de la fissure, abaissant cette contrainte à près de 1067 MPa.

Cependant, l'introduction d'un rayon de courbure ρ (cas des entailles réparées) modifie radicalement le profil d'atténuation : on observe une décroissance exponentielle de la contrainte maximale à mesure que la pointe s'émousse. Dès que l'on passe à un rayon de $\rho = 0.1$ mm, la contrainte chute sous la barre des 700 MPa, pour se stabiliser aux alentours de 600 MPa pour un rayon de 0.5 mm. Ces résultats mettent en évidence deux mécanismes complémentaires : si le patch composite est indispensable pour réduire l'intensité des contraintes sur les singularités aiguës (fissures), l'émoussement géométrique du défaut (augmentation de ρ) reste le facteur prédominant pour dissiper la concentration de contraintes purement locale en fond d'entaille.

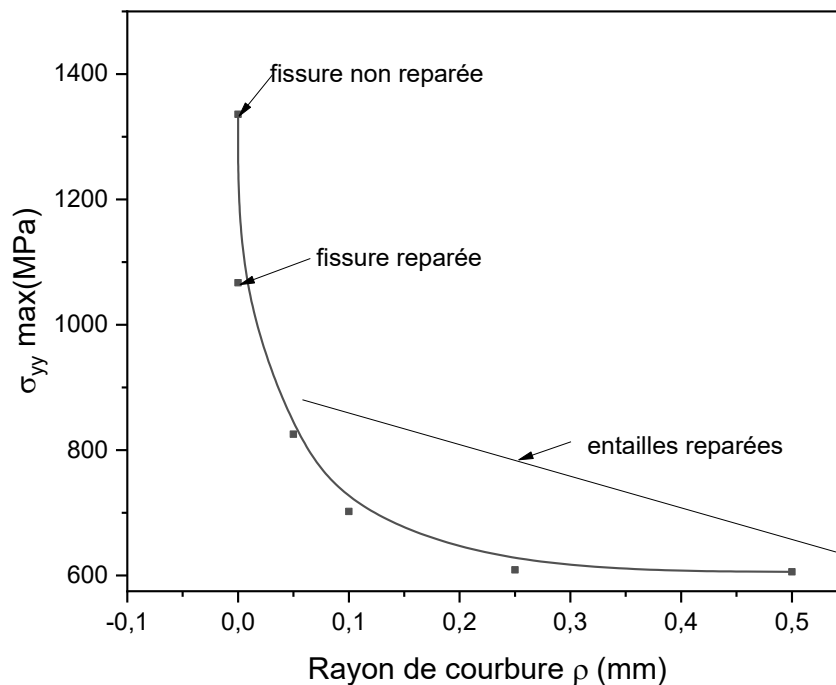


Figure 22: Évolution de la contrainte normale maximale σ_{yy} au fond du défaut en fonction du rayon de courbure ρ .

13.Simulation de la propagation (XFEM)

Afin de simuler numériquement la propagation de la fissure sous un chargement croissant, la méthode des éléments finis étendus (XFEM) a été implémentée sur la plaque en aluminium. Le modèle géométrique conserve les mêmes dimensions globales que l'étude statique précédente, mais intègre ici des lois de comportement avancées pour régir l'initiation et l'évolution de la rupture au sein de la matrice métallique. Les critères d'endommagement ont été calibrés en introduisant une valeur d'évolution de l'endommagement basée sur le déplacement à la rupture (Damage Evolution - Displacement at Failure) fixée à 0.1mm. De plus, pour surmonter les problèmes de convergence numérique inhérents aux fortes non-linéarités de la propagation, un paramètre de stabilisation visqueuse (Damage Stabilization Cohesive) a été défini à 10^{-5} .

Concernant les conditions aux limites et de chargement appliqué au modèle. Nous avons appliqué un encastrement complet positionné à la base inférieure de la plaque pour bloquer tous les degrés de liberté en translation et en rotation Figure 24. et sur le bord supérieur, tous les déplacements ont été restreints à l'exception de la direction verticale U2, permettant un mouvement unidirectionnel strict suivant l'axe Y.

Un déplacement contrôlé et variable a été appliqué en tête, d'abord fixé à 6mm puis étendu à 12 mm.

Cette configuration cinématique permet de simuler un essai de traction monotone et d'extraire la courbe force-déplacement caractéristique, essentielle pour la visualisation et l'analyse continue de l'évolution du chemin de fissuration sous un chargement progressif.

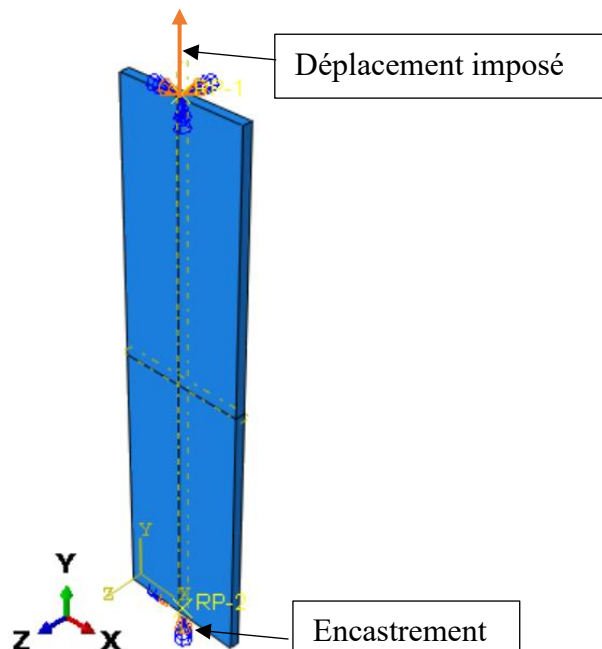


Figure 23:conditions aux limites et de chargement appliqué.

1. Analyse de la courbe Force-Déplacement

L'analyse de la courbe force-déplacement de la figure 25 met en évidence le comportement mécanique global de la structure sous chargement monotone croissant. Dans un premier temps, la réponse est purement élastique linéaire, caractérisée par une pente raide identique pour les deux simulations jusqu'à un déplacement d'environ 0,6 mm. Au-delà, la courbe s'inflechit, marquant l'initiation de la plastification et de l'endommagement progressif en fond de défaut. La force maximale (capacité portante) culmine à près de 36000 N pour un déplacement d'environ 3,1mm (courbe noire) et 3,3mm (courbe violette), seuil à partir duquel la chute brutale et verticale de l'effort est enregistrée. Cette rupture instantanée traduit l'instabilité numérique et physique liée à la propagation macroscopique de la fissure via la méthode XFEM. La superposition quasi-parfaite des deux courbes confirme la robustesse et la répétabilité du modèle numérique, montrant que l'extension du déplacement imposé de 6 à 12mm permet simplement de capter l'intégralité du processus de rupture jusqu'à la séparation complète de la plaque.

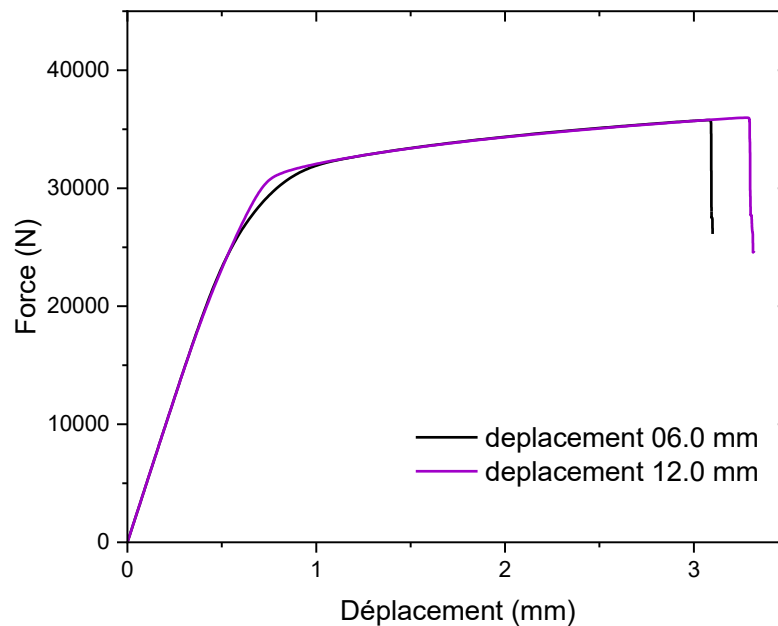


Figure 24: courbe Force-Déplacement pour un chargement croissant de 6 et 12 mm.

2. Analyse des profils PHILSM (Level Set Function for Crack):

La variable PHILSM (fonction de distance signée) dans Abaqus XFEM décrit la géométrie de la fissure et son évolution au cours du chargement : à 6 mm de déplacement imposé (figure 26a), la fissure n'est qu'à un stade d'initiation et de propagation locale, avec une échelle PHILSM resserrée (-2,0 à +1,03 mm)

et des bandes colorées concentrées autour de la zone médiane de la plaque, tandis qu'à 12 mm (figure 26b), la fissure s'est propagée plus largement, comme le montre l'élargissement de l'échelle (-1,03 à +2,00 mm) et l'augmentation des valeurs positives, traduisant une ouverture géométrique plus importante des lèvres de la fissure et une avancée du front de fissure vers les bords de la plaque d'aluminium.

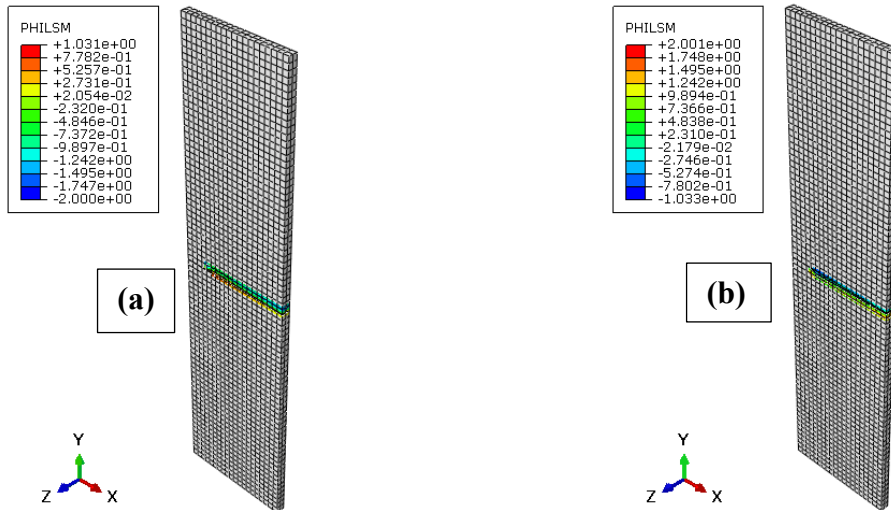


Figure 25: profils PHILSM pour un chargement croissant.

3. Comparaison des courbes Force-Déplacement : Plaque non réparée et Réparée

L'analyse comparative des courbes force-déplacement (figure 27) démontre de manière quantitative l'apport structural du patch composite Boron/Époxy.

L'introduction du patch élève le pic de force maximale (RF) de 36000N (plaques non réparées, courbes noire et violette) à près de 40000N (plaques réparées, courbes rouge et bleue), soit un gain de résistance d'environ **11%**.

Pour les configurations réparées, la chute brutale de l'effort se produit à un déplacement nettement plus précoce ($\sim 2,5$ mm) que pour le cas non réparé ($\sim 3,3$ mm). Ce phénomène s'explique par le fait que le patch absorbe et transfère une grande partie de l'énergie de traction. Lorsque la plaque d'aluminium sous le patch atteint sa limite de rupture, l'instabilité numérique XFEM se déclenche plus tôt en raison de la rigidité élevée de l'assemblage hybride, limitant l'allongement global de la structure avant sa rupture macroscopique.

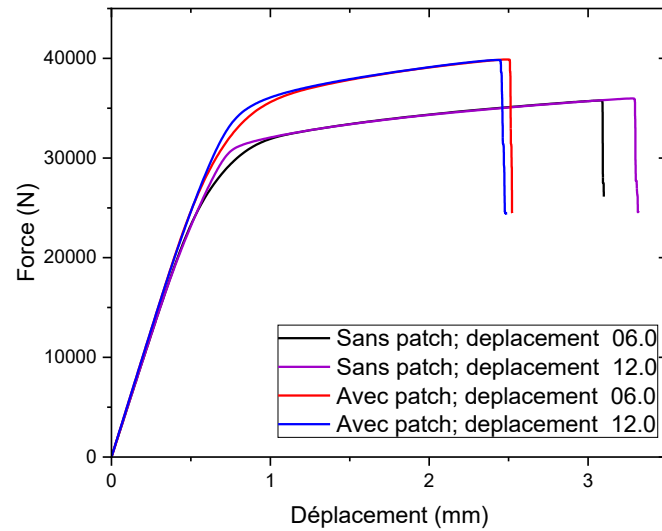


Figure 26 : courbes force-déplacement sans et avec patch composite Boron/Époxy.

4. Analyse des profils PHILSM avec patch (6 mm vs 12 mm)

Les visualisations de PHILSM confirment le rôle de barrière physique du patch composite sur la propagation de la fissure : à 6 mm (figure 28a), le gradient (-2,42 à +1,65 mm) montre une initiation confinée sous la zone recouverte, avec des bandes colorées alignées horizontalement à l'interface, signe que le composite bride l'ouverture des lèvres de la fissure ; à 12 mm (figure 28b), malgré le doublement du déplacement imposé, l'échelle et la topographie restent quasi identiques (maximum à +1,64 mm), ce qui montre que le front de fissure progresse sous le patch mais que son avancée vers le bord non protégé est nettement ralentie.

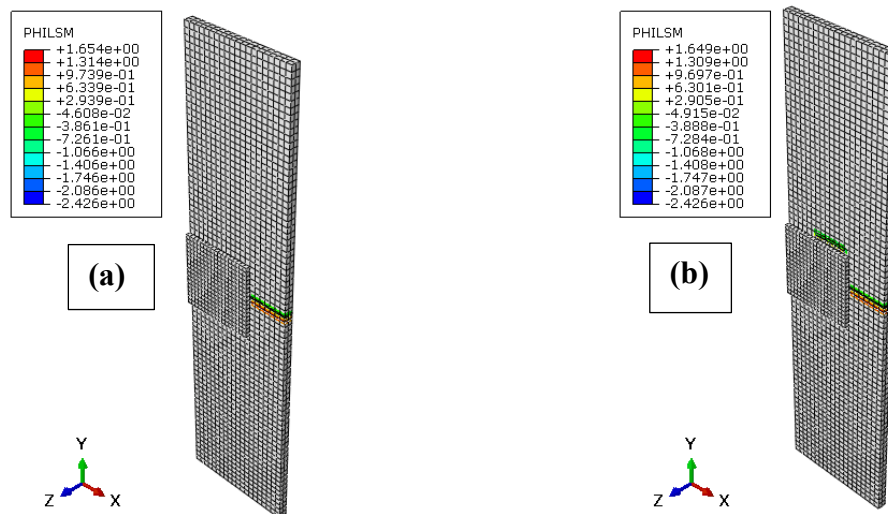


Figure 27: Les profils PHILSM avec patch (6 mm vs 12 mm).

La quasi-stabilité du profil PHILSM entre 6 et 12mm prouve graphiquement l'efficacité de la réparation: le patch Boron/Époxy réussit à stabiliser le champ de distance signée de la fissure, confirmant son rôle de pontage des contraintes et de ralentisseur cinétique du processus de fissuration de la plaque d'aluminium.

Conclusion

Ce troisième chapitre a été consacré à la mise en œuvre numérique et à l'analyse des résultats issus des simulations par éléments finis sous le code de calcul Abaqus. Les investigations menées ont permis, dans un premier temps, de quantifier l'état de contrainte en fond de défaut en évaluant l'évolution du facteur d'intensité de contrainte (K_I) et de la contrainte normale (σ_{yy}) à travers l'épaisseur de la plaque. L'étude comparative entre une fissure nette ($\rho = 0$ mm) et des entailles émoussées a mis en évidence l'effet prédominant du rayon de courbure (ρ) sur la dissipation locale des concentrations de contraintes, validant ainsi l'approche analytique de Creager-Paris.

Dans un second temps, l'évaluation de la technique de réparation par collage monoface d'un patch composite Boron/Époxy a démontré son efficacité remarquable, marquée par une diminution drastique du K_I du côté réparé et un gain de 11% sur la capacité portante de la plaque en aluminium. Enfin, l'implémentation de la méthode des éléments finis étendus (XFEM) a permis de simuler de manière dynamique et continue le processus d'initiation et de propagation macroscopique du chemin de rupture sous un chargement de traction monotone croissant. Les profils de la fonction Level Set (PHILSM) ont confirmé visuellement le rôle de barrière cinétique du patch, qui stabilise le front de fissure. L'ensemble de ces résultats numériques confirme que le couplage entre l'émoussement géométrique et le renforcement par patch composite constitue une solution hautement performante pour la tolérance aux dommages des structures aéronautiques.

Conclusion générale

Arrivé au terme de ce travail de recherche, qui s'inscrit dans le cadre de l'optimisation de la durabilité et de la tolérance aux dommages des structures en alliage d'aluminium dans le domaine aéronautique, nous sommes en mesure de formuler les conclusions principales suivantes.

Notre démarche a débuté par une immersion dans les fondements théoriques de la mécanique de la rupture (Chapitre I) et une classification des typologies de défauts ainsi que des méthodes de maintenance industrielle (Chapitre II). Ce socle théorique a mis en relief l'importance cruciale de maîtriser les singularités géométriques et le transfert de charge lors d'une réparation par patch composite. Le cœur de notre contribution (Chapitre III) a reposé sur la modélisation numérique tridimensionnelle sous Abaqus, combinant l'analyse statique des critères de rupture et la simulation dynamique de propagation par la méthode XFEM.

Les conclusions majeures qui découlent de cette étude sont :

- L'influence de la géométrie du défaut : L'augmentation du rayon de courbure ρ à la pointe d'une entaille réduit de manière exponentielle le pic de contrainte locale σ_{yy} , confirmant que l'émoussement des défauts est un levier efficace de relaxation des contraintes.
- L'efficacité du patch Boron/Époxy : Le collage du patch composite sur une plaque d'aluminium fissurée engendre une chute drastique du facteur d'intensité de contrainte (K_I) à l'interface réparée et accroît la force de réaction maximale de la structure de près de 11%, validant le succès du transfert de charge.
- L'asymétrie de la réparation monoface : Les analyses à travers l'épaisseur ont révélé la persistance de sollicitations élevées sur la face non réparée à cause d'un effet de flexion secondaire, ce qui limite l'action du patch à distance.
- L'apport de la méthode XFEM : Le suivi de la fonction Level Set (PHILSM) a prouvé que le patch composite ne se contente pas de réduire la contrainte statique, mais qu'il bride activement l'ouverture des lèvres de la fissure et ralentit sa progression cinétique sous chargement croissant.

En guise de perspectives pour prolonger et approfondir ce travail, il serait particulièrement intéressant de :

- Étudier l'influence d'une réparation symétrique double-face (double patch) pour éliminer l'effet de flexion secondaire observé sur le profil d'épaisseur.

- Intégrer l'endommagement de la couche d'adhésif (cohesive zone modeling - CZM) afin de simuler les risques de décollement (debonding) du patch sous forte charge.
- Étendre ce modèle numérique XFEM à des sollicitations de fatigue sous chargements cycliques variables, plus représentatives des cycles de pressurisation subis par les avions en service.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] T. L. Anderson, *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, 4th ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2017.
- [2] ASM International, *ASM Handbook, Volume 11: Failure Analysis and Prevention*, ASM International, 2002.
- [3] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, and J. Z. Zhu, *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, 7th ed. Oxford, U.K.: Elsevier, 2013.
- [4] A. A. Griffith, “The phenomena of rupture and flow in solids,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 221, pp. 163–198, 1921.
- [5] G. R. Irwin, “Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate,” *Journal of Applied Mechanics*, vol. 24, pp. 361–364, 1957.
- [6] J. R. Rice, “A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks,” *Journal of Applied Mechanics*, vol. 35, no. 2, pp. 379–386, 1968.
- [7] P. C. Paris and F. Erdogan, “A critical analysis of crack propagation laws,” *Journal of Basic Engineering*, vol. 85, no. 4, pp. 528–534, 1963.
- [8] J. W. Hutchinson, “Plastic stress and strain fields at a crack tip,” *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 16, no. 1, pp. 13–31, 1968.
- [9] Y. P. Pluinage, “Notch effects and fatigue strength of materials,” *International Journal of Fatigue*, vol. 23, no. 2, pp. 129–137, 2001.
- [10] Callister, W. D. *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 7th Edition, John Wiley & Sons, 2007.
- [11] R. H. Jones, “Stress-Corrosion Cracking,” in *ASM Handbook, Volume 13A: Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection*, ASM International, Materials Park, OH, USA, 2003.