

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 Technologie  
Département de Génie Mécanique



Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du diplôme de Master en : Génie Mécanique  
Domaine : Sciences et Technologie  
Filière : Génie Mécanique  
Spécialité : Construction Mécanique  
Thème

## Analyse numérique de la réparation des plaques fissurées par collage de composite

**Présenté Par :**

- 1) Mohamed Elkowry Elbardi
- 2) Berkane Youcef nedjem eddine

**Devant le jury composé de :**

Djebbar Noureddine	Pr	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Bouafia Farida	Pr	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examinatrice
Belhamiani Mohamed	M C A	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Oudad Wahid	Pr	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Co-Encadrant

*Année Universitaire 2023/2024*

### Remerciements

Au début, nous tenons à remercions notre encadreur, Monsieur **Belhamiani Mohamed**, pour ses efforts, son temps et son bon traitement.

Nous remercions également notre co-encadreur Monsieur, **Oudad Wahid**, pour son bon traitement, sa disponibilité en cas de besoin, sa patience, ses conseils précieux, sa motivation constante et sa capacité à transmettre les idées de manière simplifiée.

Nous remercions également Monsieur **Djebbar Noureddine** pour l'honneur qu'il nous fait d'être le président de notre jury de mémoire.

Nous remercions également Madame **BOUAFIA Farida** pour avoir accepté de participer à notre jury de mémoire.

Enfin, nous exprimons notre gratitude à Mademoiselle **Bouzitouna Wahiba Nesrine** pour ses conseils, sa motivation, son aide permanente et ses précieux conseils.

## Dédicace

---

### Dédicace

Je dédie à mon père qui m'a accompagné tout au long de la carrière scolaire et m'a fourni toutes les conditions appropriées j'atteins sauf cette étape, je dédie sauf ma chère mère, ma chère mère et tante Khadou, je dédie sauf mon frère Ibrahim, qui a parié sur mon succès dans mes pires jours d'école, je dédie sauf mon ami LKhalil LKenti, sauf mes sœurs, Edebeya et Hendou, je dédie à toute ma famille et mes amis.

Mohamed Elkowry Elbardi

Je dédie à mon père, ma mère, ma famille et mes amis.

Youcef Berkane

## Résumé

---

### Résumé

Ce mémoire présente une étude numérique de la réparation de fissures dans les plaques en aluminium. La méthode des éléments finis (FEM) est utilisée pour analyser l'efficacité de la réparation par collage de composite et pour optimiser la conception des réparations.

L'étude explore l'effet de divers paramètres sur l'efficacité de la réparation, tels que la longueur de la fissure, l'épaisseur de la colle, l'épaisseur du composite, l'orientation des fibres et la longueur du composite. Les résultats montrent que la FEM est un outil puissant pour prédire le comportement des structures fissurées et réparées.

Les conclusions de cette étude fournissent des informations précieuses pour la conception et l'optimisation des réparations de fissures dans les plaques en aluminium.

**Mots clés:** Fissure, Plaques en aluminium, Réparation par composite, Méthode des éléments finis (FEM)

### Abstract

This work presents a numerical study of crack repair in aluminum plates. The finite element method (FEM) is used to analyze the effectiveness of composite bonding repair and to optimize the design of repairs.

The study explores the effect of various parameters on the repair effectiveness, such as crack length, adhesive thickness, composite thickness, fiber orientation, and composite length. The results show that FEM is a powerful tool for predicting the behavior of cracked and repaired structures.

The conclusions of this study provide valuable insights for the design and optimization of crack repairs in aluminum plates.

**Keywords:** Crack, Aluminum plates, Composite repair, Finite element method (FEM)

يقدم هذا البحث دراسة رقمية لإصلاح الشقوق في صفائح الألومنيوم. باستخدام طريقة العناصر المحددة (FEM) لتحليل فعالية إصلاح بالرقع اللاصقة المركبة وتحسين تصميم الإصلاحات.

تستكشف الدراسة تأثير مختلف المعايير على فعالية الإصلاح، مثل طول الشق، وسمك المادة اللاصقة، وسمك المركب، واتجاه الألياف، وطول المركب. تُظهر النتائج أن طريقة العناصر المحددة (FEM) أداة قوية للتنبؤ بسلوك الهياكل المتشققة والمُصلحة.

توفر نتائج هذه الدراسة معلومات قيمة لتصميم وتحسين إصلاحات الشقوق في صفائح الألومنيوم، مما يساهم في تحسين سلامة وموثوقية هذه الهياكل.

الكلمات المفتاحية: الشقوق، صفائح الألومنيوم، إصلاح المركب، طريقة العناصر المحددة (FEM)

## Sommaire

Remerciements.....	i
Dédicace.....	ii
Résumé.....	iii
Sommaire.....	v
Liste des figures.....	viii
Liste des tableaux.....	x
Introduction générale.....	1
Chapitre I: Généralité Sur la Mécanique de la Rupture.....	3
Introduction.....	3
1. Définition.....	3
2.1. Fonte grise.....	4
2.3. Acier faiblement allié :.....	4
2.4. Matériaux composites :.....	4
2.5. Verre :.....	5
2.6. Céramiques techniques :.....	5
3. Les causes de la rupture.....	5
3.1. Surcharge :.....	5
3.2. Fatigue :.....	5
3.3. Fragilité :.....	5
3.4. Corrosion :.....	5
3.5. Défaillance par fluage :.....	5
3.6. Défauts de fabrication :.....	6
3.7. Conditions environnementales extrêmes :.....	6
4. Les différents types de rupture.....	7

## Sommaire

---

5. Mécanique de la rupture.....	7
5.1. Modes de rupture .....	7
5.2. La rupture fragile : .....	8
5.3. Type de rupture : .....	9
□ Rupture Fragile.....	9
□ Rupture Ductile .....	10
5.4. Energie ou ténacité .....	10
5.5. Faciès de rupture : .....	11
6. Caractérisation de la rupture fragile.....	14
6.1. Résilience : .....	14
6.2. Essai Charpy : .....	14
7. Facteur d'intensité de contraintes .....	16
Conclusion.....	18
Chapitre II: Techniques de réparation des plaques en aluminium fissurées .....	19
Introduction .....	19
1. Définition de la réparation.....	19
□ Préparation avant réparation.....	20
2. Différent technique de réparation.....	21
2.1. Réparation par soudage : .....	22
2.2. Réparation d'assemblage par rivetage/boulonnage .....	24
2.3. Rivetage : .....	25
2.4. Boulonnage : .....	26
2.5. Réparation par collage : .....	27
Conclusion.....	30
Chapitre III : Modélisation numérique de la réparation de fissure par la méthode des éléments finis (FEM).....	31

## Sommaire

---

Introduction.....	31
1. Géométrie étudiée et propriétés des matériaux.....	31
2. Chargement et conditions aux limites.....	33
3. Modèle d'élément finis.....	34
3.1. Effet de la longueur de la fissure sur $K_I$ pour une plaque non réparée.....	34
3.2. Plaque avec fissure réparé.....	36
3.3. Comparaison entre une plaque réparée et une plaque non réparée.....	37
3.4. Effet d'épaisseur de la colle.....	39
3.5. Effet d'épaisseur du composite.....	39
3.6. Orientation des Fibres.....	40
3.7. Effet de la longueur du composite :.....	42
Conclusion.....	42
Conclusion générale.....	44
Bibliographie.....	45



### Liste des figures

Figure 1: Image d'un essai de traction biaxiale. ....	4
Figure 2: Principaux types de rupture.....	7
Figure 3 : Mode I ouverture .....	8
Figure 4 : Mode II glissement dans le plan.....	8
Figure 5: Mode III glissement antiplan.....	8
Figure 6: Comportements fragile et ductile d'un matériau.....	9
Figure 7: Mesure de la Ténacité des Matériaux : Aire sous la Courbe de Traction.....	11
Figure 8: Faciès de rupture fragile .....	12
Figure 9: Faciès de rupture ductile.....	12
Figure 10: Rupture par fatigue d'un alliage .....	13
Figure 11: Rupture par fatigue d'un arbre. ....	13
Figure 12: fragilisation par l'hydrogène .....	14
Figure 13: Pendule mouton et barreaux prismatiques entaillés .....	14
Figure 14: Évolution des Caractéristiques Mécaniques en Fonction de la Température.....	15
Figure 15: Rythmes Urbains .....	15
Figure 16: Zones au voisinage d'une pointe de fissure.....	16
Figure 17 : Technique de perçage avancée : Aligement parfait des points d'insertion .....	21
Figure 18: Différent technique de réparation. ....	22
Figure 19: Réparation par soudage. ....	23
Figure 20: Soudage de aluminium .....	24
Figure 21: Réparation par patch riveté sur fuselage de Boeing .....	25
Figure 22: Figure 22 : Illustration du principe de précontrainte avec des boulons HR.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 23: Comparaison géométrique : Échantillons avec et sans réparation par colle .....	28
Figure 24: Utilisation la technique de réparation par patch composite .....	30
Figure 1: Utilisation la technique de réparation par patch composite.....	28
Figure 2: Géométrie de la plaque fissurée.....	31
Figure 3: Chargement et conditions aux limites.....	32

## Liste des figures

---

Figure 4: Maillage de la plaque fissurée.....	33
Figure 5: Effet de la Longueur de la Fissure sur le Facteur d'Intensité de Contrainte $K_I$ .....	33
Figure 6: Réparation par collage de composite.....	34
Figure 7: Réduction du Facteur d'Intensité de Contrainte $K_I$ par Réparation par Collage de Composite.....	35
Figure 8: fissure non réparée.....	36
Figure 9: fissure réparée.....	36
Figure 10: : Comparaison du Facteur d'Intensité de Contrainte $K_I$ pour une Fissure Réparée Et non Réparée .....	36
Figure 11: Impact de l'épaisseur de la colle sur $K_I$ pour la réparation des fissures.....	37
Figure 12: Analyse de l'épaisseur du composite.....	38
Figure 13: Effet de l'Orientaion des Fibres sur le Facteur d'Intensité de Contrainte $k_I$ .....	39
Figure 38 :L'orientation des fibres .....	39
Figure 39 : Relation entre la longueur du composite et le facteur d'intensité de contrainte $k_I$ ....	40

## Liste des tableaux

---

### Liste des tableaux

<b>Tableau 1 : propriétés des matériaux : alliage d'aluminium 2024-T3 et de l'adhésive FM 73..</b>	<b>31</b>
<b>Tableau 2 : propriétés des matériaux du patch composite Boron/epoxy.....</b>	<b>31</b>

### **Introduction générale**

Les structures en aluminium sont largement utilisées dans divers domaines en raison de leur combinaison favorable de propriétés, telles que la légèreté, la résistance à la corrosion et la ductilité. Cependant, ces structures peuvent être susceptibles à des fissures dues à des contraintes excessives, à la fatigue, à des défauts de fabrication ou à des environnements agressifs. La présence de fissures peut compromettre l'intégrité structurelle et conduire à des défaillances critiques.

La réparation des fissures est une étape essentielle pour maintenir la sécurité et la fiabilité des structures en aluminium. Divers techniques de réparation peuvent être employées, chacune présentant ses propres avantages et limitations. Le choix de la technique de réparation appropriée dépend de plusieurs facteurs, tels que la nature et la gravité de la fissure, les propriétés du matériau, les contraintes de service attendues et les exigences économiques.

Ce mémoire présente une étude approfondie de la réparation des fissures dans les plaques en aluminium. L'étude numérique a pour but d'analyser l'efficacité de différentes techniques de réparation et pour développer des recommandations pour la conception et la mise en œuvre de réparations optimales.

Le premier chapitre présente une analyse détaillée des matériaux en rupture. Il explore les différents types de rupture, les causes de la rupture et les mécanismes sous-jacents. Une attention particulière est portée à la rupture fragile, qui est un mode de rupture particulièrement dangereux pour les structures en aluminium.

Le deuxième chapitre se concentre sur les techniques de réparation des plaques en aluminium fissurées. Il décrit les différentes méthodes de réparation disponibles, telles que le soudage, le rivetage, le boulonnage et le collage de composite. Chaque technique est évaluée en termes d'avantages, d'inconvénients et d'applicabilité.

Le troisième chapitre présente une étude numérique de la réparation de fissures par la méthode des éléments finis (FEM). La FEM est un outil puissant pour simuler le comportement des structures fissurées et réparées. L'étude utilise la FEM pour analyser l'effet de différents paramètres sur l'efficacité de la réparation, tels que la longueur de la fissure, l'épaisseur de la colle, l'épaisseur du composite, l'orientation des fibres et la longueur du composite.

## **Introduction générale**

---

Les résultats de ce mémoire peuvent être utilisés pour améliorer la conception et l'optimisation des réparations de fissures, contribuant ainsi à la sécurité et à la fiabilité des structures en aluminium.

En conclusion, ce mémoire offre une contribution significative à la compréhension de la réparation des fissures dans les plaques en aluminium [1].

# Chapitre I: Généralité Sur la Mécanique de la Rupture

## Introduction

La mécanique de la rupture, introduite vers 1920, vise à caractériser le comportement à la fissuration des matériaux en utilisant des paramètres tels que le champ de contraintes, la taille des fissures et la résistance à la fissuration des matériaux. Les premières analyses détaillées des fissures, y compris les déplacements, déformations et contraintes, ont été réalisées dans les années 1940, marquant le début de l'expansion de cette discipline cruciale.

Les matériaux, qu'ils soient métalliques, composites ou céramiques, contiennent souvent des défauts inhérents introduits lors de leur développement ou de la fabrication des pièces. Ces imperfections, telles que des défauts d'usinage ou de soudage, jouent un rôle déterminant dans la fiabilité et la longévité des structures. [2]

Les matériaux composites stratifiés sont largement utilisés dans divers domaines comme les loisirs, le sport et les transports. La conception de ces structures doit intégrer les phénomènes d'endommagement potentiels sous contraintes statiques et dynamiques pour satisfaire aux normes de sécurité. Un des principaux défis est le délaminage, où des fissures apparaissent à l'interface entre les couches, affectant l'intégrité mécanique des stratifiés. Ce type de dégradation, souvent provoqué par des impacts à faible vitesse, peut être difficile à détecter mais a des conséquences significatives sur les propriétés mécaniques des matériaux. [3]

Ce chapitre explore en détail les matériaux susceptibles de rupture, les causes principales de rupture, les différents types de rupture, ainsi que les méthodes de caractérisation et d'analyse de ces phénomènes.

### 1. Définition

La rupture est la séparation d'un matériau en deux ou plusieurs parties sous l'action d'une contrainte. Cette séparation se produit à des vitesses différentes grâce à la propagation des fissures présentes dans le matériau.

- La rupture est donc fortement influencée par les défauts internes (par exemple microfissures, pores, inclusions de particules fragiles) ainsi que par les entailles (macrofissures) provoquées par des défauts de fabrication ou de conception.
- Tous les matériaux contiennent un certain nombre de microfissures qui peuvent devenir instables et provoquer une rupture lorsque la force appliquée dépasse une valeur critique. Afin de comprendre ce comportement, il est nécessaire d'analyser en détail les phénomènes se produisant en fond de fissure.

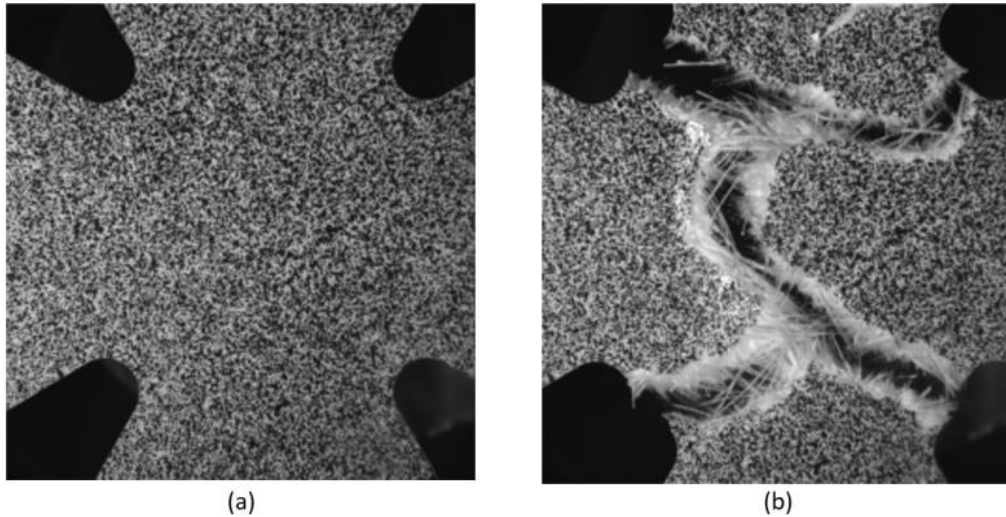


Figure 14: Image d'un essai de traction biaxiale [4].

## 2. Propriétés mécaniques et fragilité des matériaux : une perspective comparative.

Ils ont être considérés comme présentant une fragilité ou une propension à la rupture dans certains contextes [5].

### 2.1. Fonte grise

Bien que la fonte grise soit fréquemment utilisée dans les applications de génie mécanique en raison de sa bonne coulabilité et de sa capacité à absorber les vibrations, elle peut être fragile et sujette à une défaillance sous contrainte.

### 2.2. Fonte ductile :

Bien que la fonte ductile soit plus résistante que la fonte grise, des problèmes de fragilité peuvent survenir dans certaines conditions, notamment lorsqu'elle est soumise à des charges d'impact ou de traction.

### 2.3. Acier faiblement allié :

Certains aciers faiblement alliés peuvent être sujets à la rupture dans des applications nécessitant une résistance élevée, particulièrement lorsqu'ils sont soumis à des contraintes élevées ou à des températures extrêmes.

### 2.4. Matériaux composites :

Bien que les composites aient un poids élevé et une bonne résistance spécifique, ils sont sujets à la rupture si les couches ne sont pas correctement liées ou s'il existe des défauts dans la structure.

### 2.5. Verre :

Bien que transparent et dur, le verre est très fragile et peut facilement se briser sous la pression, notamment lorsqu'il est exposé à des chocs ou à des changements de température.

### 2.6. Céramiques techniques :

Les céramiques techniques peuvent être très dures et résistantes à la chaleur, mais elles peuvent aussi être très cassantes et sujettes à des fissures sous charge, surtout si elles sont défectueuses ou fissurées.

Il est important de noter que la résistance et la durabilité d'un matériau dépendent non seulement de sa composition, mais également de sa conception, de son traitement thermique et de l'environnement dans lequel il est utilisé [6].

## 3. Les causes de la rupture

Peuvent être multiples et dépendent souvent de divers facteurs, y compris la nature du matériau, les conditions de chargement, les contraintes environnementales, et la qualité de la fabrication. Voici quelques-unes des causes courantes de rupture des matériaux mécaniques [7].

### 3.1. Surcharge :

L'application d'une charge excessive peut dépasser la capacité de charge du matériau et entraîner sa rupture.

### 3.2. Fatigue :

Les cycles répétés de chargement et de déchargement peuvent entraîner des fissures et finalement une rupture, même à des charges bien en dessous de la limite de rupture statique.

### 3.3. Fragilité :

Certains matériaux, comme les céramiques, peuvent présenter une rupture soudaine et fragile sans déformation significative préalable en raison de défauts microscopiques ou de conditions de chargement particulières.

### 3.4. Corrosion :

L'action de substances corrosives peut affaiblir le matériau et conduire à sa rupture prématurée.

### 3.5. Défaillance par fluage :

Certains matériaux, comme les métaux à haute température, peuvent subir une déformation progressive et irréversible sous charge constante à haute température, conduisant éventuellement à une rupture.



### 3.6. Défauts de fabrication :

Les défauts dans la fabrication du matériau, tels que des inclusions, des pores ou des fissures, peuvent servir de points de départ pour la rupture.

### 3.7. Conditions environnementales extrêmes :

Des températures extrêmes, une exposition à des produits chimiques agressifs ou d'autres conditions environnementales sévères peuvent accélérer la dégradation des matériaux et provoquer leur rupture.

Ces facteurs ne sont que quelques exemples parmi de nombreux autres qui peuvent contribuer à la rupture des matériaux mécaniques. La compréhension de ces facteurs est essentielle pour concevoir des matériaux et des structures capables de résister aux contraintes auxquelles elles sont soumises.

Pour approfondir davantage sur la question des matériaux sujets à la rupture dans la construction mécanique, voici quelques informations supplémentaires :

- 3.7.1. **Facteurs de rupture :** La rupture d'un matériau peut être due à différents facteurs, notamment les contraintes mécaniques, les défauts de fabrication, les conditions environnementales, les variations de température et les cycles de charge.
- 3.7.2. **Propriétés mécaniques :** Les matériaux utilisés dans la construction mécanique sont caractérisés par leurs propriétés mécaniques telles que la résistance à la traction, la résilience, la dureté et la ténacité. Ces propriétés peuvent varier considérablement en fonction de la composition chimique et de la microstructure du matériau.
- 3.7.3. **Essais de matériaux :** Avant d'être utilisés dans des applications critiques, les matériaux sont soumis à des essais de caractérisation pour évaluer leur comportement sous différentes conditions de charge. Ces essais comprennent souvent des tests de traction, de flexion, de dureté et de ténacité pour déterminer la résistance et la ductilité du matériau.
- 3.7.4. **Améliorations des matériaux :** Pour minimiser les risques de rupture, les ingénieurs peuvent recourir à des techniques telles que l'alliage de matériaux pour améliorer leurs propriétés, la modification de la microstructure par traitement thermique, ou l'ajout de renforts pour augmenter la résistance.
- 3.7.5. **Conception et analyse des structures :** Une conception appropriée des composants mécaniques, ainsi qu'une analyse rigoureuse des contraintes et des déformations, sont essentielles pour éviter les défaillances par rupture. Des logiciels de modélisation par éléments finis sont souvent utilisés pour simuler le comportement des structures sous différentes charges.
- 3.7.6. **Surveillance et maintenance :** Une surveillance régulière des composants mécaniques, notamment par des techniques de contrôle non destructif, peut aider à détecter les défauts potentiels avant qu'ils ne conduisent à une rupture. De plus, une maintenance préventive peut prolonger la durée de vie des équipements en identifiant et en corrigeant les problèmes potentiels à un stade précoce.

## 4. Les différents types de rupture

On observe deux types de rupture principaux suivant les mécanismes mis en jeu : une rupture fragile contrôlée par une contrainte normale, et une rupture ductile, précédée de déformations plastique, contrôlée par les contraintes de cisaillement et une rupture semi fragile ou semi ductile contrôlée par les deux contraintes [8].

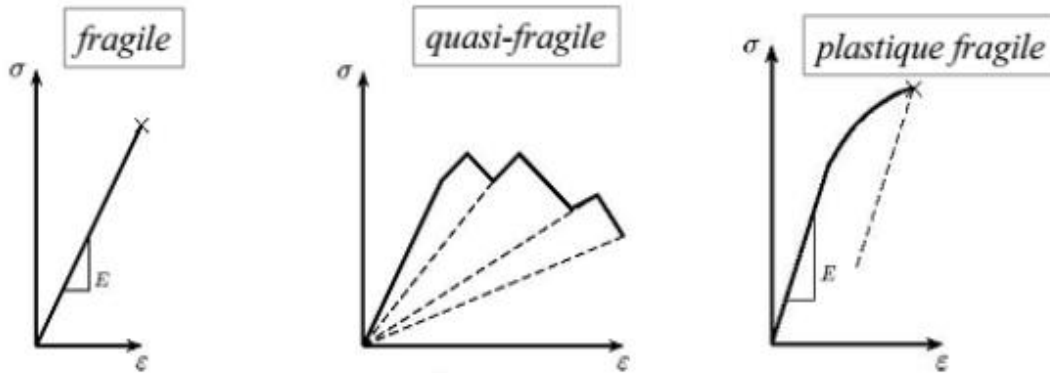


Figure 15: Principaux types de rupture.

## 5. Mécanique de la rupture

La mécanique de la rupture a pour objet essentiel l'étude des fissures macroscopiques : elle s'applique lorsqu'il existe dans le matériau des discontinuités telles dans la matière qu'elles viennent modifier l'état de contrainte, déformation et déplacement, si bien que l'homogénéisation du milieu n'a plus de sens [9].

La séparation en deux parties disjointes d'un corps se produit à la suite de la phase d'amorçage, qui a vu le développement de microcavités, microfissures sous l'action de sollicitations mécaniques, thermiques, chimiques. La propagation de la ou des fissures macroscopiques peut conduire à la séparation complète de plusieurs morceaux ou bien au contraire les fissures peuvent s'arrêter. Le mode de rupture peut être fragile, la rupture se produisant alors souvent sans déformation plastique, ou ductile, en présence d'une déformation plastique importante [10].

### 5.1. Modes de rupture

En mécanique des matériaux et en ingénierie structurelle, les modes de rupture décrivent les différentes façons dont un matériau ou une structure peut céder sous une charge. Voici les trois principaux modes de rupture : [11].

#### Mode I

Un déplacement uniquement suivant  $oy$  correspond à un problème plan particulier désigné par le mode I. Ce mode est, le plus souvent, le plus dangereux.

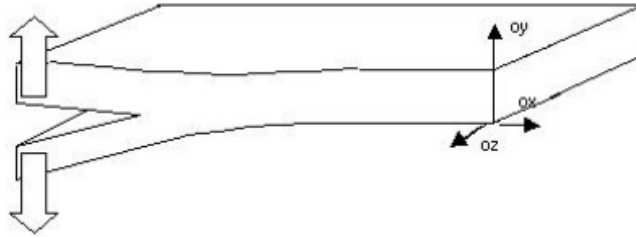


Figure 16 : Mode I ouverture

### Mode II

Il est engendré par un cisaillement dans le plan de la fissure et parallèle à l'axe  $ox$ .

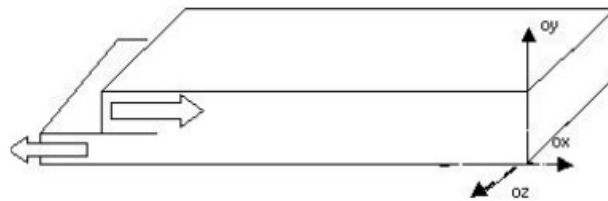


Figure 17 : Mode II glissement dans le plan.

### Mode III

Il est produit par un cisaillement antiplan situé dans le plan de la fissure  $oxz$  et parallèle à l'axe  $oz$ .

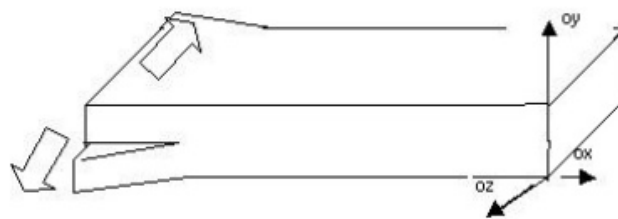


Figure 18: Mode III glissement antiplan.

Ces trois modes de rupture sont souvent utilisés pour analyser et prévoir le comportement des fissures dans les matériaux et les structures, et sont fondamentaux dans l'étude de la mécanique de la rupture.

### 5.2. La rupture fragile :

La rupture fragile se produit par clivage sans prévenir, le plus souvent sans déformation plastique, et les morceaux peuvent se réassembler parfaitement. Elle est soit inter cristalline, soit intra cristalline.

Le clivage est le mécanisme de déformation qui met en jeu la rupture des liaisons atomiques dans le plan dense dans lequel doit se produire la déformation.

Le clivage intervient aussi bien dans les matériaux cristallisés que dans les matériaux partiellement cristallisés ou amorphes comme le verre.

La rupture fragile est contrôlée par la contrainte normale ou contrainte de clivage elle se produit sans déformation plastique : les ruptures sont transgranulaires (rupture dans un grain cohérent suivant des plans cristallin bien définis).

La déformation, l'énergie et les faciès de rupture ceux sont trois paramètres caractérisant la rupture fragile et ductile.

### 5.3. Type de rupture :

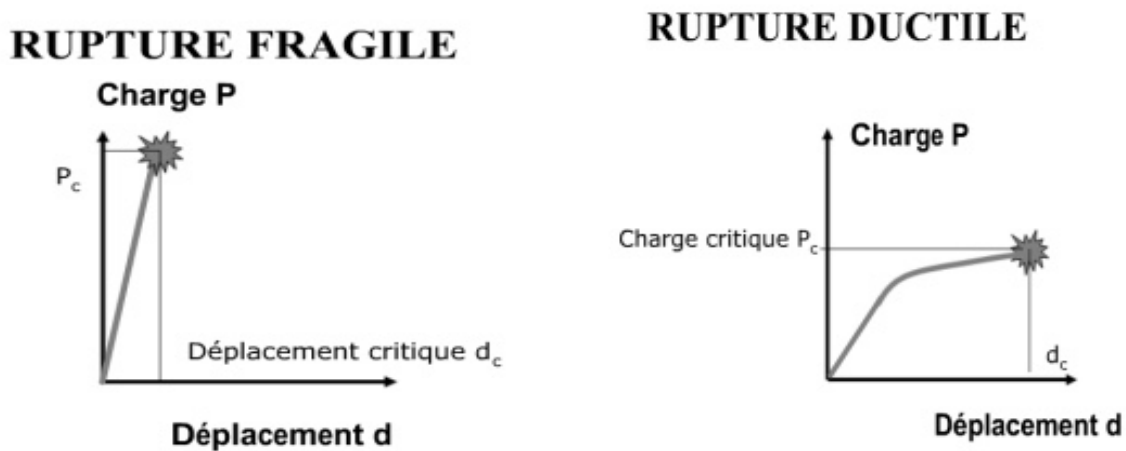


Figure 19: Comportements fragile et ductile d'un matériau.

Les ruptures fragiles et ductiles sont deux types de modes de défaillance des matériaux, caractérisés par différents comportements et mécanismes [12].

#### ➤ Rupture Fragile

Caractéristiques :

- Absence de déformation plastique préalable : Avant la rupture, il y a très peu ou pas de déformation plastique.
- Apparence de la surface de rupture : La surface de rupture est généralement lisse et brillante. Elle peut présenter des motifs caractéristiques comme les facettes ou les motifs radiaux.
- Vitesse de la rupture : La rupture se produit généralement de manière rapide et catastrophique.
- Température et matériaux : La rupture fragile est souvent observée à basse température et dans les matériaux ayant une faible ténacité, comme certains aciers à haute teneur en carbone, les céramiques et les verres.
- Exemple typique : Une barre d'acier trempé se cassant nettement en deux parties sous un impact soudain.

Mécanisme :

- La rupture fragile est souvent due à la propagation rapide de fissures. Les fissures se propagent avec peu de consommation d'énergie, ce qui entraîne une rupture soudaine.
- Rupture Ductile

Caractéristiques :

- Déformation plastique préalable : Avant la rupture, le matériau subit une déformation plastique significative.
- Apparence de la surface de rupture : La surface de rupture est rugueuse et mate, souvent avec des signes évidents de déformation plastique, comme des stries de glissement et des cavités.
- Vitesse de la rupture : La rupture se produit de manière plus lente et plus progressive.
- Température et matériaux : La rupture ductile est souvent observée à des températures plus élevées et dans des matériaux à haute ténacité, comme les aciers doux, les alliages d'aluminium et les polymères.
- Exemple typique : Un morceau de cuivre qui s'étire et s'amincit avant de finalement se briser.

Mécanisme :

- La rupture ductile implique la nucléation, la croissance et la coalescence de cavités dans le matériau. Ces cavités s'étendent sous l'effet de la déformation plastique jusqu'à ce que le matériau ne puisse plus supporter la charge, entraînant la rupture.

### 5.4. Energie ou ténacité

Dans le contexte de la rupture, l'énergie et la ténacité sont deux concepts importants [13].

#### 5.4.1. Énergie de rupture (ou énergie de fracture) :

L'énergie de rupture d'un matériau est la quantité d'énergie nécessaire pour provoquer sa rupture. Cette mesure est souvent exprimée en joules par unité de surface (par exemple, en joules par mètre carré). Une énergie de rupture élevée indique que le matériau est capable d'absorber plus d'énergie avant de se rompre, ce qui est généralement souhaitable pour les applications où une résistance à la rupture est cruciale.

#### 5.4.2. Ténacité :

La ténacité d'un matériau est sa capacité à résister à la propagation de fissures ou de défauts. Elle est souvent mesurée en termes d'énergie spécifique de rupture (énergie de rupture par unité de volume) ou de résistance à la rupture. Un matériau avec une haute ténacité est capable de retarder la propagation des fissures et de résister à la rupture même en présence de défauts ou de fissures initiales. La ténacité est un

aspect important pour les matériaux soumis à des charges cycliques ou à des conditions de fonctionnement difficiles, car elle peut prévenir les défaillances prématurées.

Capacité d'un matériau à emmagasiner de l'énergie avant sa rupture. Elle caractérise la résistance du matériau à la propagation brutale de fissures

L'aire sous la courbe de traction  $F(\Delta L)$  [14].



Figure 20: Mesure de la Ténacité des Matériaux : Aire sous la Courbe de Traction

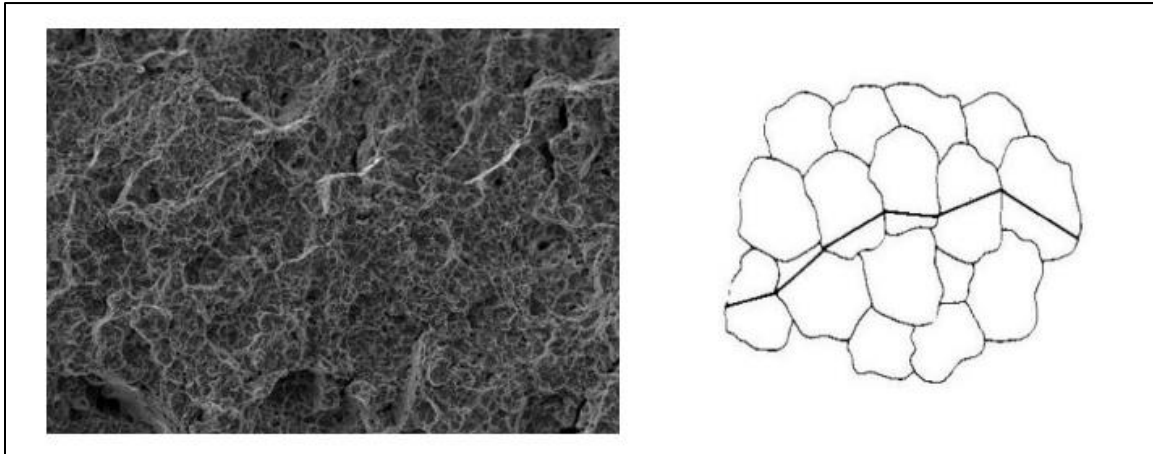
$$w = \int f dl = \int \sigma_o S_o |_{o} d\varepsilon_o = V_o \int \sigma_o d\varepsilon_o.$$

### 5.5. Faciès de rupture :

Le faciès de rupture désigne la surface créée par la séparation d'un matériau sous l'effet de contraintes, révélant des caractéristiques distinctes qui permettent d'identifier le mode et les conditions de rupture. L'analyse de ces faciès est essentielle pour comprendre les mécanismes de défaillance et améliorer la conception et la fiabilité des matériaux.

#### 5.5.1. Faciès de rupture fragile

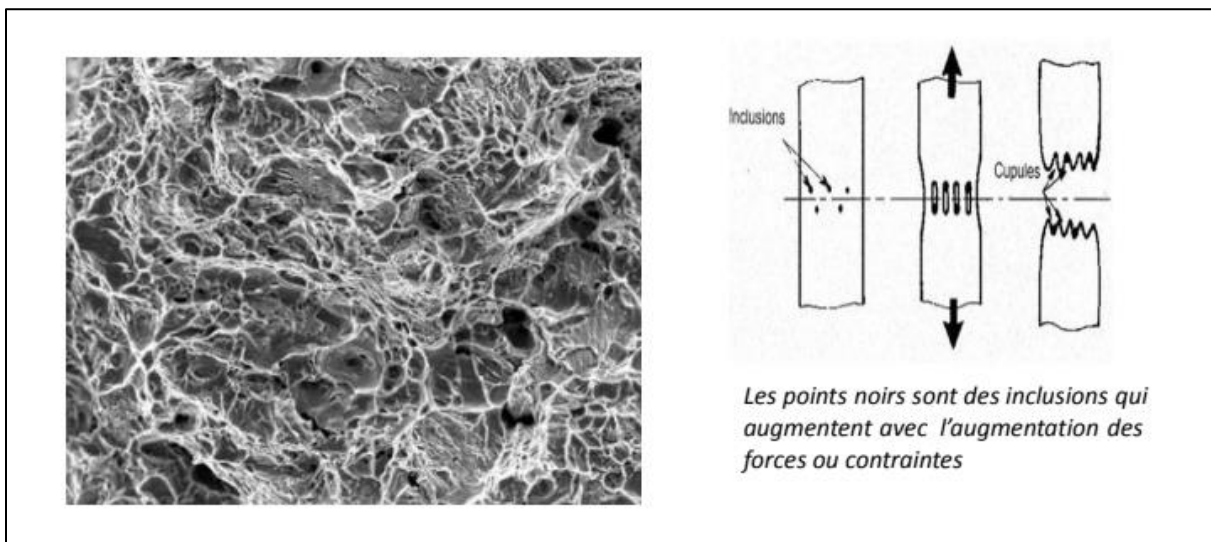
Les faciès caractéristiques de rupture, déterminés généralement à l'aide de microscopie optique de grande agrandissement ou électronique à balayage [15].



**Figure 21: Faciès de rupture fragile**

### 5.5.2. Faciès de rupture ductile

La rupture ductile est précédée d'une déformation plastique importante : l'aspect est granuleux, on observe souvent des cupules liés à une décohésion autour des inclusions, Les deux photos sont obtenues par MEB



**Figure 22: Faciès de rupture ductile**

### 5.5.3. Faciès de rupture par fatigue

Un faciès de rupture par fatigue généralement plusieurs aspects, et le dépouillement de la surface de rupture demande un connaisseur du domaine. En fait, le faciès d'une pièce endommagée par fatigue présente zones suivantes [16].

- **une zone d'amorçage**
- **une zone de propagation de la fissure**
- **une zone à grains cristallins apparents**

la surface produite par ce type de rupture présente des microreliefs caractéristiques appelés stries. Quand un faciès de rupture présente des stries, il est certain que l'on a affaire à une fissuration par fatigue.

Microfractographie électronique Rupture par fatigue d'un alliage d'aluminium 152000 cycles sous 100 Mpa ( d'après G, Henry)



**Figure 23: Rupture par fatigue d'un alliage**

Rupture par fatigue d'un arbre fissuré a été amorcé en surface à la partie droite de la photo.



**Figure 24: Rupture par fatigue d'un arbre.**

### 5.5.4. Faciès rupture par corrosion

Une rupture fragile intergranulaire dont la séparation de la structure se fait suivant les joints de grains, ce phénomène est observable principalement en présence de corrosion : par exemple.



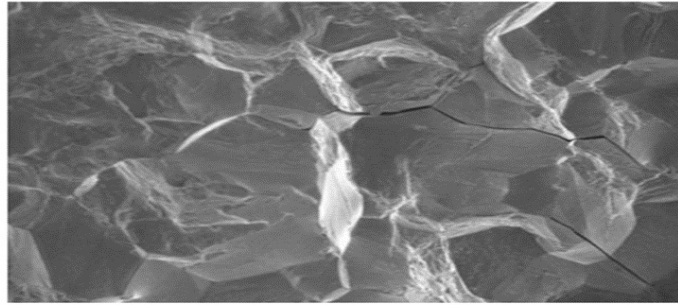


Figure 25: fragilisation par l'hydrogène

### 6. Caractérisation de la rupture fragile

#### 6.1. Résilience :

Le mode de rupture est très sensible à la vitesse de déformation causée par une charge appliquée. Un autre paramètre est la température, mis en évidence par la rupture de ponts ou bateaux. Quand la température baisse nombres de matériaux deviennent fragile. La température de changement de comportement à la rupture est appelée température de transition [17].

#### 6.2. Essai Charpy :

L'essai Charpy permet de caractériser très rapidement le type de rupture fragile ou ductile en déterminant l'énergie nécessaire pour la rupture. C'est un essai de choc à vitesse de déformation élevée [18].

L'essai est réalisé sur un mouton pendule(figure). L'énergie consommée par l'impact est évaluée à partir de l'angle initial de lâcher du pendule et de l'angle maximal de remontée. Les éprouvettes entaillées (figure) sont des barreaux prismatiques entaillés de un centimètre carré de section droite.

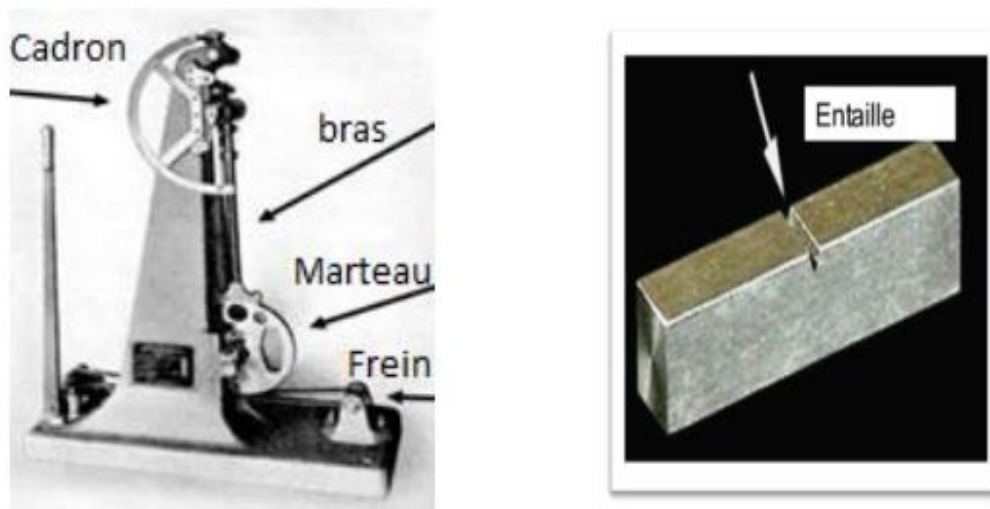


Figure 26: Pendule mouton et barreaux prismatiques entaillés

# Chapitre I: Généralité Sur la Mécanique de la Rupture

Evolution des caractéristiques mécaniques avec la température [19].

- Résilience
- Ténacité

La résilience est le quotient de l'énergie de rupture  $U_r$  divisée par la section a rompre A.

Elle s'exprime en DaJ/cm<sup>2</sup> selon :

$$K_{CV} \frac{U_r}{A}$$

A haute temperature, la rupture est ductile. A basse temperature, elle est fragile.

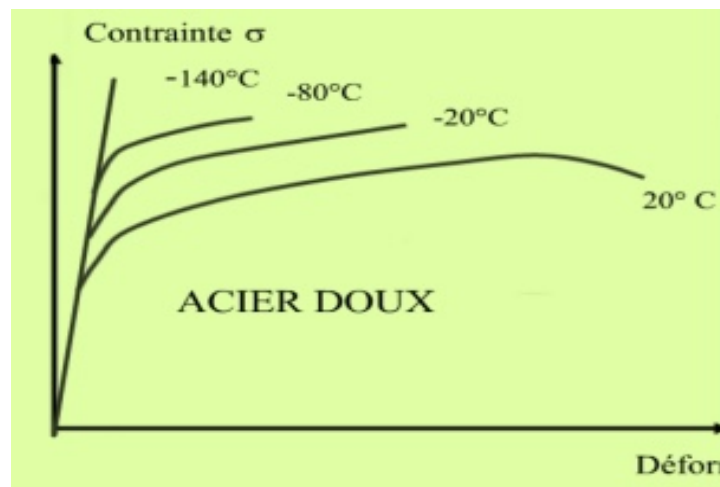


Figure 27: Évolution des Caractéristiques Mécaniques en Fonction de la Température

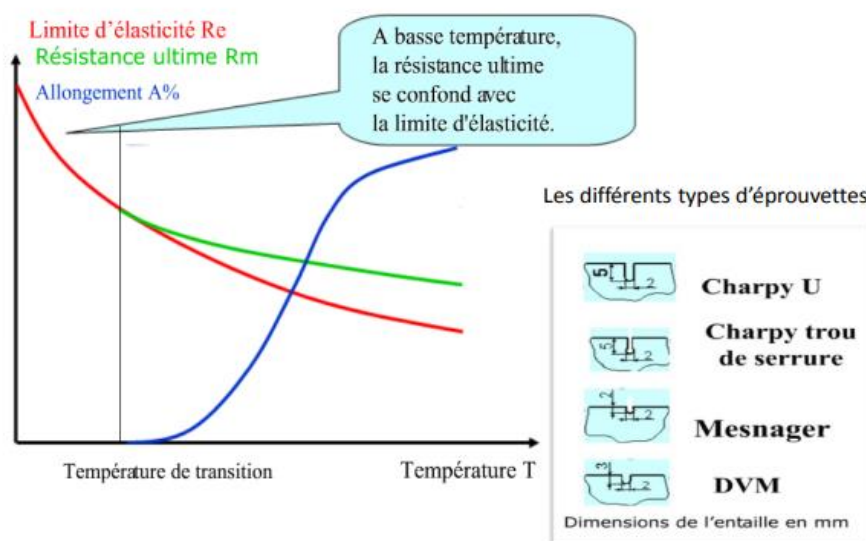


Figure 28 : Rythmes Urbains

### 7. Facteur d'intensité de contraintes

Le paramètre essentiel à la mécanique de la rupture le facteur d'intensité de contrainte. La mécanique de la rupture étudie l'interaction entre la fissure et la zone avoisinante. Généralement et point de vue mécanique, trois zones peuvent être distingué et qui sont [20].

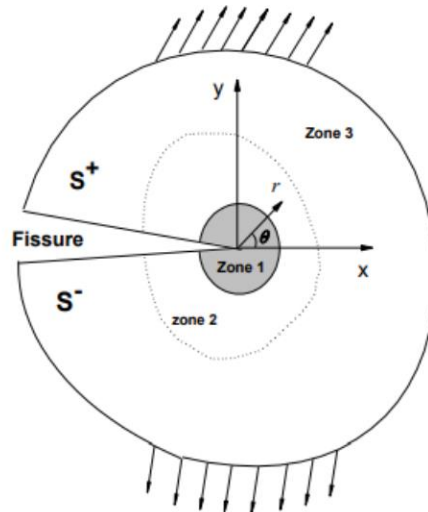


Figure 29: Zones au voisinage d'une pointe de fissure.

- **La zone d'élaboration 1 :**

qui se trouve à la pointe de la fissure et dans le sillage laissé par la fissure au cours de sa propagation. L'étude de cette zone est très compliquée à cause des contraintes importantes qui ont fortement endommagé le matériau.

- **La zone singulière 2:**

dans laquelle les déformations et les contraintes sont continus et sera indépendante de la géométrie du matériau. Les composantes  $\varepsilon$  et  $\sigma$  sont infinies au voisinage du front de fissure qui a une courbure nulle  $c$  à  $d$  ( $r=0$ ). Dans le cas où la pointe de fissure déterminant la forme de la zone plastifiée présente autour d'elle un rayon  $r_c$  le matériau ayant une limite d'élasticité.

La valeur de  $r_c$  détermine le mode type de rupture. On peut dire que la rupture est fragile pour  $r_c$  petit et qu'elle est ductile pour  $r_c$  grand.

- **La zone extérieure :**

est liée d'un côté à la zone singulière et d'autre côté à la charge appliquée conditionnant aux limites des champs de déplacements. Les déformations et contraintes appliqués n'ont pas vraiment un effet sur cette zone car elles se focalisent dans la seconde zone et se transposent vers la zone d'élaboration.

### Le facteur d'intensité de contrainte $k$

Le facteur d'intensité de contrainte  $k$  est un concept fondamental en mécanique de la rupture, qui décrit l'état de contrainte autour de la pointe d'une fissure dans un matériau. Il est utilisé pour prédire la propagation des fissures sous des charges appliquées et est essentiel pour évaluer la résistance à la rupture des matériaux.

### Définition et formule générale

Le facteur d'intensité de contrainte  $k$  est défini par la formule :

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

Où :

- $\sigma$  est la contrainte appliquée sur le matériau (en pascals, Pa).
- $a$  est la demi-longueur de la fissure (en mètres, m).

### Calcul du facteur d'intensité

Pour des géométries et des chargements simples, le calcul de  $k$  peut être relativement direct. Cependant, pour des géométries plus complexes, des facteurs correctifs géométriques sont souvent nécessaires. Par exemple des différents cas :

1. Fissure dans une plaque infinie sous tension uniforme :

$$KI = \sigma \sqrt{\pi a}$$

2. Fissure en bordure d'une plaque sous tension uniforme

$$KI = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot \sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{2W}\right)}$$

Où  $W$  est largeur de la plaque.

3. Fissure en forme de cercle ou de trou sous tension biaxiale :

$$KI = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f(a/W)$$

Où  $(a/W)$  est une fonction de la géométrie relative de la fissure et de la plaque.

### Utilisation du facteur d'intensité de contrainte

Le facteur d'intensité de contrainte est utilisé pour prédire la croissance de la fissure à l'aide de la loi de la mécanique de la rupture élastique linéaire (LEFM). La fissure commencera à se propager de manière instable lorsque  $K$  atteint une valeur critique, appelée ténacité de la rupture ( $K_{IC}$ ). La condition de rupture est donc :

$$K \geq K_{IC}$$

Où  $K_{IC}$  est une propriété du matériau qui mesure sa résistance à la propagation des fissures.

En résumé, le facteur d'intensité de contrainte  $K$  est une mesure cruciale en mécanique de la rupture pour évaluer l'état de contrainte autour d'une fissure et prédire la propagation de celle-ci sous diverses conditions de chargement [21].

### **Conclusion**

Ce chapitre a offert un aperçu des matériaux susceptibles de rupture, tels que la fonte grise, les aciers faiblement alliés, et les composites. Nous avons exploré les causes de la rupture, incluant la surcharge, la fatigue, et la corrosion, ainsi que les types de rupture et les mécanismes associés. La mécanique de la rupture, englobant les modes de rupture, la déformation, et la ténacité, a été examinée en détail. Enfin, nous avons abordé la caractérisation de la rupture fragile à travers des techniques comme l'essai Charpy et le facteur d'intensité de contraintes. Cette base théorique est essentielle pour comprendre et prévenir les défaillances des matériaux.

# **Chapitre II: Techniques de réparation des plaques en aluminium fissurées**

## **Introduction**

La réparation des structures endommagées peut être considérée comme étant un problème d'assemblage. Les méthodes classiques utilisées pour l'assemblage des structures mécaniques sont classées en deux catégories : mécanique (boulonnage, rivetage...) et physico-chimique (soudage, collage...).

L'assemblage est une opération consistant à rendre deux matériaux solidaires. différentes technologies sont disponibles à cet effet qui peuvent être distinguées en fonction de leur possibilité d'être démontable ou non, un assemblage temporaire étant également considéré comme un assemblage démontable tandis qu'un assemblage non démontable étant composé d'au moins deux éléments ne pouvant être séparés sans détérioration de l'un de ses deux éléments.[1]

La technologie de réparation des structures endommagées a progressé considérablement et est actuellement largement. Actuellement, de nouvelles techniques sont développées dans le but de réduire la vitesse de propagation de la fissure en augmentant ainsi la durée de vie des structures, la majorité des études suppose que le comportement est élastique alors que ceux traitent le comportement élastoplastique des substrats et de l'adhésive.

## **1. Définition de la réparation**

La réparation est une intervention définitive : cela signifie qu'on répond à un besoin après une panne ou une défaillance technique. L'équipement doit fonctionner dans les conditions identiques pour lesquelles il a été conçu [2].

La réparation des structures par le collage d'un patch est utilisée pour prolonger la vie des composants défectueux ou mal conçus à un coût raisonnable.

Ces réparations ont généralement un des trois objectifs :

- L'amélioration de la résistance à la fatigue, augmenter la résistance au vieillissement et en minimiser les inspections répétées.
- La réparation d'une structure fissurée peut être effectuée, par le collage à la structure d'un patch externe, dans le but d'arrêter ou de ralentir la propagation de la fissure.

## **Chapitre II: Techniques de réparation des plaques en aluminium fissurées**

- Des dommages de corrosion sont éliminés par meulage des matériaux dans la partie endommagée et peuvent être renforcés avec le matériau de remblai et d'un patch collé afin de rétablir la capacité initiale de charge.
- Il existe plusieurs méthodes de réparations de ces défauts géométriques, soit par soudage, rivetage trou d'expansion etc.

### **➤ Préparation avant réparation**

Un des avantages de la réparation proposée réside dans la phase de préparation réduite par rapport à celle du patch. En effet, très peu d'usinage est nécessaire, et par conséquent un certain nombre de précautions sont à prendre.

Des trous d'infiltration et d'évacuation doivent notamment être forés pour faciliter l'infiltration de la résine. Un compromis sur la taille des trous d'infiltration entre la faisabilité en atelier de maintenance et la tenue mécanique résiduelle a dû être trouvé. Un nombre limité de trous de 1 mm de diamètre ne présente pas une réduction significative des performances mécaniques des composites testés. De plus, la faisabilité de ces perçages semble être transposable à l'industrie et aux ateliers de maintenance [3].

Aircelle réalise d'ailleurs ce type d'usinage à grande échelle sur les carters moteur pour fabriquer des absorbeurs acoustiques sur les entrées d'air. De plus, la dimension des trous étant très grande par rapport aux ouvertures des fissures, le débit de résine d'infiltration ne devrait pas dépendre de ces perçages.

Cependant, un des gros risques du perçage de ces trous est l'accumulation, pendant l'usinage, de copeaux de composite dans les délaminages que l'on veut réparer. Ceux-ci viennent alors boucher les délaminages et empêchent la résine de s'infiltrer correctement. Expérimentalement ce phénomène a pu être observé, et le bridage des pièces minces à percer, permettant de refermer les délaminages pendant l'usinage, a permis de résoudre ce problème.

La position et le nombre de ces trous d'infiltration et d'évacuation sont des paramètres sur lesquels il est possible de jouer pour favoriser la qualité de la réparation. Dans le cadre de la réparation d'un dommage d'impact faible énergie, l'organisation du dommage et notamment les délaminages nous poussent à utiliser une configuration particulière. En effet, l'objectif étant de faire fluer la résine de réparation dans les délaminages, les canaux d'infiltration sont percés en face avant pour atteindre le délaminage le plus profond suivant une répartition générique carrée [4].

La répartition des trous d'évacuation est plus complexe car elle dépend du dommage et a fortiori de l'empilement du stratifié. Nous avons établi que le nombre de trous d'évacuation devait être

## Chapitre II: Techniques de réparation des plaques en aluminium fissurées

lié au nombre d'orientations différentes et pour une réparation optimale, deux trous par orientation sont suffisants.

Leur position est ensuite déterminée en fonction de l'étendue des délaminages avec pour objectif d'avoir un trou d'infiltration et d'évacuation

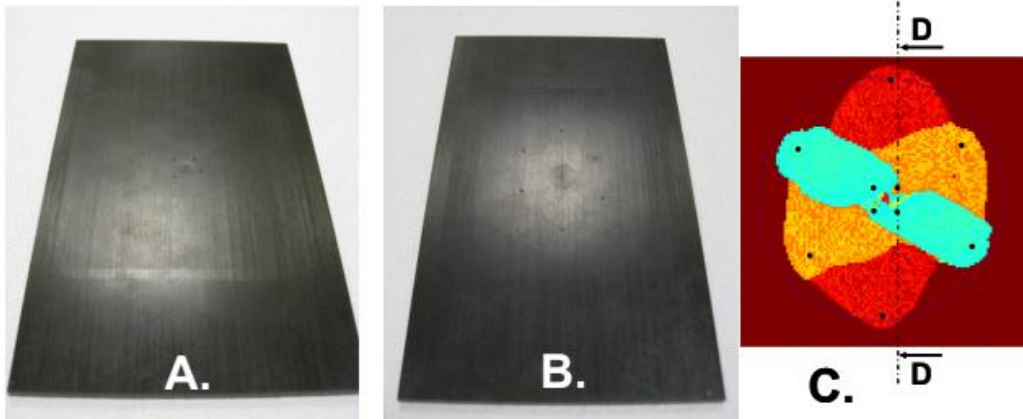


Figure 30 : Technique de perçage avancée : Alignement parfait des points d'insertion

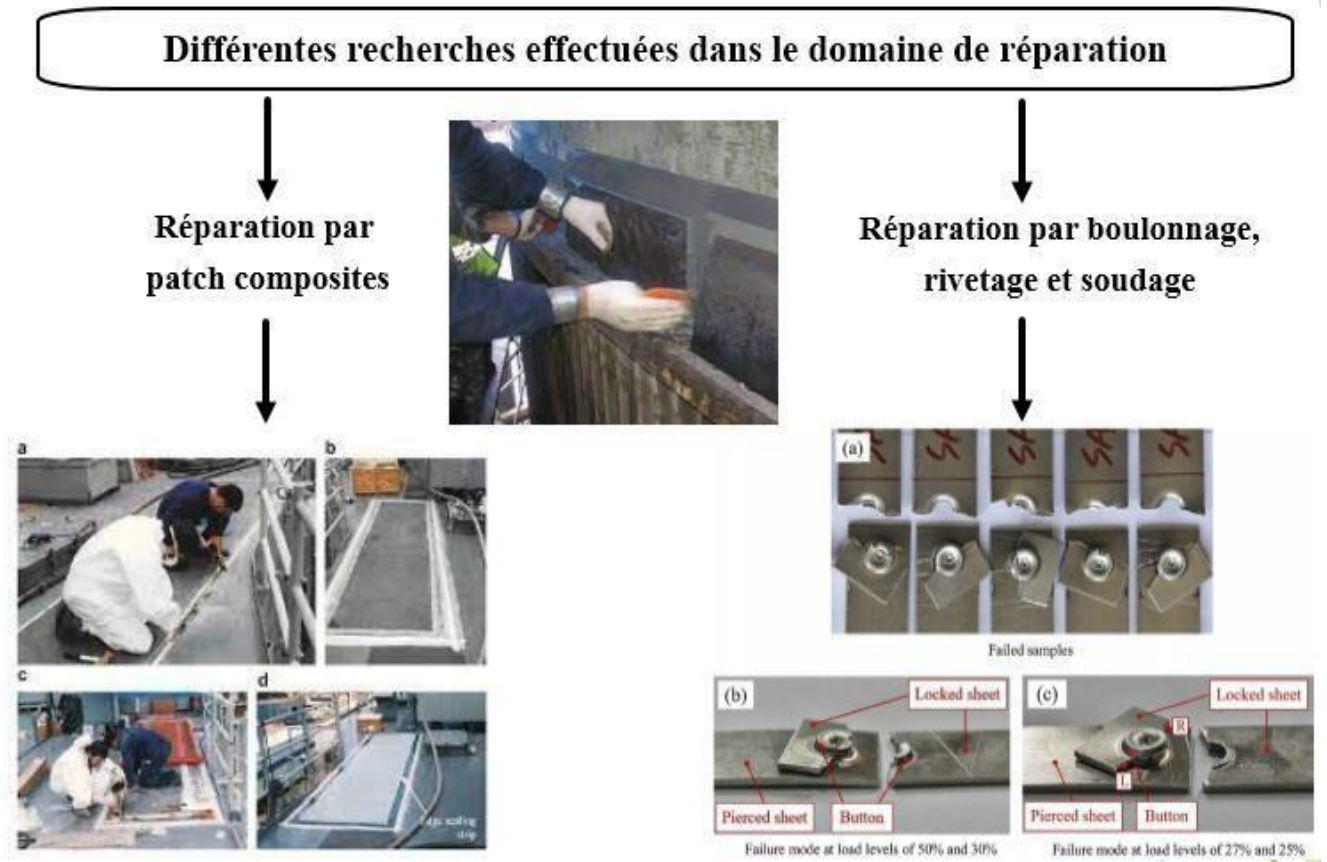
### 2. Différent technique de réparation

En somme, des différentes recherches effectuées dans le domaine de réparation comme réparation par patch ou par boulonnage, rivetage et soudage pour améliorer la durée de vie fonctionnement de la pièce.

Notre choix de la technique de la réparation est basé sur une nouvelle technologie de réparation afin d'éviter tout travail à chaud et les arrêts de la production, tout en améliorant la sécurité et en protégeant les équipements contre la corrosion à long terme [5].

La technique de réparation avec un patch est un domaine répandu pour prolonger la durée de vie des composants fissurés. Cette technique est structurellement plus efficace avec moins de dommages sur la structure que d'autres. Le patch collé offre de nombreux avantages par rapport à un doubleur fixé mécaniquement. Pour cette raison nous avons choisi les réparations en FGM. Les FGM présentent de nombreux avantages qui comprennent une résistance et une rigidité spécifiques élevées, une résistance à la corrosion.





**Figure 31: Différent technique de réparation.**

### 2.1. Réparation par soudage :

Le soudage est un procédé permettant la réalisation d'assemblages permanents en utilisant la chaleur ou la force mécanique ou les deux sources d'énergie. Dans la zone de liaison, le matériau est généralement fondu et/ou a subi une déformation plastique. Les différents procédés de soudage se sont souvent différenciés par l'activation d'énergie, les modes d'action ou les moyens de protection contre l'atmosphère. En réalité, les procédés de soudage peuvent également être classés soit par mode d'apport d'énergie nécessaire ou soit par mode de protection du métal chaud [6]. Les réparations et remises en état de soudures peuvent être primordiales pour prolonger la durée de vie des pièces d'usure dans diverses machines rotatives. La durée de vie des machines peut ainsi être prolongée, ce qui limite les pertes de production.



Figure 32: Réparation par soudage.

### a) Les avantages

- Forte productivité ;
- La durabilité maximale du soudage est son premier avantage, car ces deux parties n'en deviennent qu'une donc cette pièce pourra résister à un impact mécanique ;
- Taux de dépôt de métal important ;
- Le troisième avantage est la dimension et le poids des appareils qui deviennent de plus en plus petits et qui permet aux soudeurs de se déplacer plus facilement
- Le dernier avantage du soudage est que les objets fabriqués à partir de soudage sont plus légers, en effet le **soudage** réduit la consommation de matériaux [7].
- Efficaces et facilement adaptables aux circonstances du chantier
- Bonnes qualités de joint et bonnes

### b) Les inconvénients :

- Entretien fréquent et minutieux ;
- Difficile à utiliser dans les endroits exigus et peu pratique pour les applications qui exigent un grand déplacement de la torche entre deux soudures ;
- Résistance et fiabilité totalement :
- Dépendants de leur exécution ;
- Pour l'amorçage de l'arc avec les procédés manuels (particulièrement avec les électrodes à enrobage basique pour le SMAW), il faut que la tension à vide soit assez élevée.

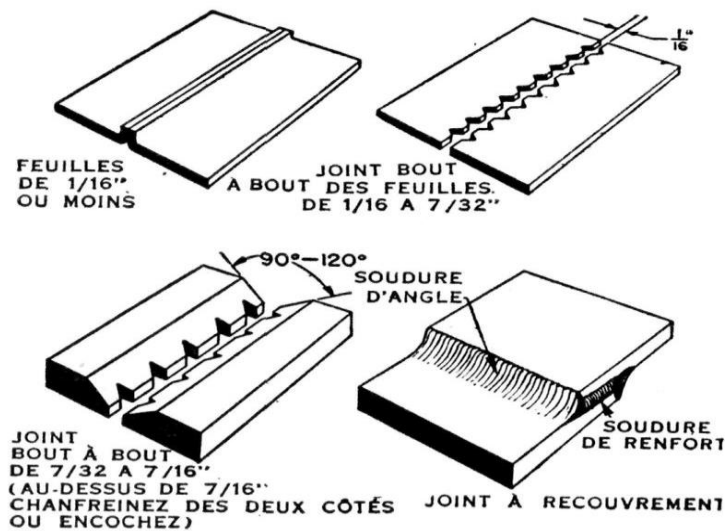


Figure 33: Soudage de aluminium

### 2.2.Réparation d'assemblage par rivetage/boulonnage

Aujourd'hui, la plupart des assemblages mécaniques aéronautiques sont constituées de boulons ou de rivets comportant une adhésive à l'interface pour assurer l'étanchéité et éviter les problèmes de corrosion [8]. Par ailleurs, les avionneurs cherchent à donner à l'adhésive un fonctionnement structural et ainsi réduire le nombre de fixations. Le dimensionnement de ce type d'assemblage mixte doit s'appuyer sur des modèles de comportement, qui permettent d'optimiser les paramètres de conception (dimensions, propriétés de l'adhésif, couple de serrage,...) optimaux en termes de résistance ou de raideur.

La difficulté réside alors dans la détermination du taux de transfert de charge entre le boulon ou le rivet et le joint de colle. Cette réparation est très rapide, mais elle nécessite le perçage de trous. Cette opération peut introduire des endommagements ou/ et de fortes concentrations des contraintes. En outre, une masse supplémentaire est ajoutée à cause du recouvrement et du boulon ou du rivet. Cette méthode est donc utilisée comme une réparation temporaire.

La déconsolidation des assemblages boulonnés, rivés se matérialisent par des mouvements entre pièces (jeu d'assemblage) souvent mis en évidence par la rupture du film de protection anticorrosion. Ces observations peuvent être localisées à un ou plusieurs boulons ou rivets, ou encore entre les pièces de l'assemblage. L'évolution du phénomène passe par les stades :

- ✓ La rupture du film de peinture autour du boulon ou rivet ou assemblage
- ✓ Un léger ressuyage d'oxyde sur la peinture
- ✓ Le mouvement de l'élément
- ✓ La rupture d'un ou plusieurs rivets ou boulons.

### **2.3. Rivetage :**

La réparation par rivetage est le plus ancien procédé de solidarisation de pièces entre elles utilisée en construction métallique. Le viaduc de Gabarit et la tour Eiffel en sont de célèbres exemples. Le rivetage permet d'obtenir économiquement une liaison encastrement indémontable d'un ensemble de pièces par refoulement ou par expansion de matière d'un élément malléable (Al et ses alliages, Cu et laitons, aciers doux, aciers inoxydables).



**Figure 34: Réparation par patch riveté sur fuselage de Boeing**

#### **a) Les avantages :**

- Le rivetage est une technique d'assemblage rapide et précise, du moins quand elle est bien maîtrisée ;
- Le rivetage permet un contrôle aisé et maîtrisé des matériaux, même différents ;
- Le rivetage permet d'assembler tout type de matériaux, même différents ;
- Le rivetage autorise un transfert de charge élevé, pour des substrats épais ;
- Le rivetage permet d'obtenir un assemblage de bonne conductivité électrique ;
- Les rivets permettent d'unir plusieurs types de matériaux ;
- D'épaisseur différente. [9].

#### **b) Les inconvénients :**

- Nécessité de percer le composite ;
- Le rivetage altère les substrats, du fait du perçage. Il y a concentration de contraintes au niveau du trou qui augmente les risques de fissures. Le repérage de ces fissures n'est possible qu'une fois que leur taille a dépassé la tête de vis ;
- Relaxation/fluage des composites : tenue dans le temps de l'assemblage ;
- Concentration de contrainte du composite aux bords des trous ;

## Chapitre II: Techniques de réparation des plaques en aluminium fissurées

Le rivetage permet d'obtenir des surfaces lisses, seulement dans le cas de l'utilisation de têtes fraisées ;

- La mise en œuvre du rivetage sur avion coûte cher du fait de la haute qualité d'ajustement et des traitements de surface à obtenir (contre les couples galvaniques) ;

### **2.4. Boulonnage :**

Les boulons HR sont des boulons à haute limite élastique comportant une rondelle incorporée. Lors du serrage ces boulons sont serrés fortement, et ainsi les efforts de glissement ne sont pas repris par cisaillement de la tige, mais adhérence entre la pièce à assembler [10].

Ces boulons ne travaillent donc qu'en traction (le cisaillement représente en fait une sécurité en cas de surcharge), les charges ne transitent pratiquement pas par les boulons. Les boulons sont ainsi soumis presque exclusivement à la contrainte initiale de précontrainte, et ne connaissent que de très faibles variations de contrainte au cours de la vie de l'ouvrage.



**Figure 22 : Illustration du principe de précontrainte avec des boulons HR**

#### **a) Les avantages :**

- Déformabilité très réduite par rapport aux autres types d'assemblages boulonnés (grandes déformations).
- Capacité à supporter des charges alternées.
- Meilleur comportement en fatigue.
- Le boulon HR peut travailler en pression diamétrale s'il perd sa précontrainte.
- Démontables et agissent immédiatement.

## **Chapitre II: Techniques de réparation des plaques en aluminium fissurées**

### **b) Les inconvénients :**

- On doit faire très attention aux surfaces de contact des pièces à assembler et aux traitements subis ;
- Grenailage projection à grande vitesse en atelier de petits gravillons ou grains de métal sur les produits sidérurgiques afin de les débarrasser de la rouille et de la calamine ;
- Sablage : décapage par projections sur chantier de grains abrasifs de dimensions déterminées
- Cout élevé ;
- risque de fatigue ;
- Glissement alternés (ponts roulants, poutres de pont roulant) [11].

### **2.5. Réparation par collage :**

Le procédé de réparation par collage est une technique prometteuse puisqu'elle a pris une grande partie dans diverses industries ou elle présente avec de nombreux avantages, par rapport aux procédés classiques ; comme la réduction du poids, une bonne résistance à la fatigue, l'atténuation du choc et la facilité pour rassembler les formes les plus complexes. Le concept d'utilisation des matériaux collés en tant que moyen à maintenir le vieillissement des structures aéronautiques a été institué en Australie il y a approximativement trente ans.

Depuis ce temps, il a été appliqué avec succès dans de nombreuses situations exigeant de réparation. Ces applications n'ont pas été limitées en Australie. Le Canada, le Royaume-Unis, et la France ont également bénéficié de l'utilisation de cette technologie [9].

Plusieurs études numériques ont été effectuées sur des structures réparées afin d'analyser l'influence du patch composite sur la propagation de la fissure. Ces patches viennent se coller sur la zone endommagée afin de ponter des fissures existantes.

Plusieurs recherches ont vu le jour ces dernières décennies traitant le problème d'endommagement des matériaux composites, et leurs modes de réparation.

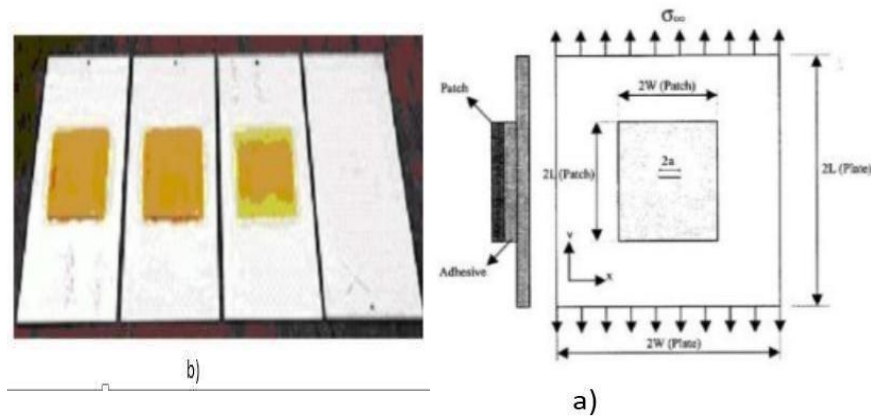


Figure 35: Comparaison géométrique : Échantillons avec et sans réparation par colle

### a) Avantages de collage :

- Le collage est une technique universelle puisqu'à priori il est possible de tout coller, si ;
- Nous conditionnons convenablement les surfaces à assembler ;
- Le collage altère peu les substrats puisque seul le traitement de surface des substrats ;
- Intervient (dans le sens où le décapage dégrade la surface mais moins que le perçage ;
- Le collage permet d'obtenir une meilleure réparation des contraintes, due au transfert de ;
- Charge continue, ceci implique une meilleure tenue aux chocs et aux vibrations.
- Le collage diminue le risque de corrosion galvanique entre deux métaux différents.
- Le collage permet de réduire le poids de la structure assemblée (comparée à une structure boulonnée) ;
- Le collage permet d'obtenir des structures lisses (avantage aérodynamique) ;

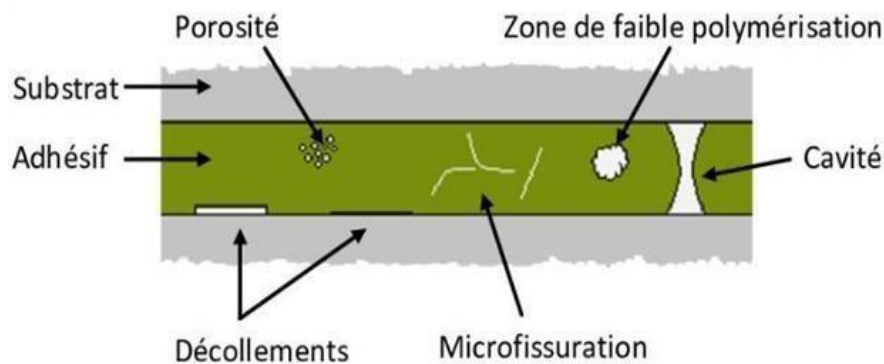
### b) Les défauts dans les assemblages collés :

L'adhérence des assemblages collés est généralement mesurée à l'aide d'essais Mécaniques de séparation de l'assemblage mais peut aussi être évaluée soit par des procédés de contrôle destructifs et non destructifs de l'assemblage qui permettent d'identifier des défauts dans le joint de colle tels que de la porosité, un déficit de polymérisation, de la microfissuration ou des décollements ponctuels. Les essais mis en œuvre permettent une étude de la réparation de l'état de contrainte en fonction des données géométriques de l'assemblage et de la loi de comportement de l'adhésif [12].

## Chapitre II: Techniques de réparation des plaques en aluminium fissurées

La nature des défauts que l'on peut rencontrer dans un assemblage collé varie selon le phénomène à l'origine de ce défaut. On peut ainsi trouver :

- Une porosité due à des gaz de polymérisation ou de contrainte résiduelle du l'air emprisonné pendant la fabrication de l'assemblage.
- Des micros fissures dues à un fluage de l'adhésif, des contraintes résiduelles ou à des phénomènes de fatigue
- Des zones de faible polymérisation causées par exemple par un mauvais mélange de l'adhésif, un mauvais dosage des composants ou un temps de polymérisation insuffisant.
- Des cavités dues à une mauvaise application de l'adhésif ou à des dégagements gazeux durant la polymérisation.
- Des zones de décollements pouvant être conséquentes et provenant généralement d'une déficience de la préparation de surface du substrat, de phénomènes de condensation l'interface, ou à la présence de contaminants lors du collage.



**Figure 36: Défauts typiques présents dans un joint de colle.**

### **c) Utilisation la technique de réparation**

est particulièrement utilisés dans devers domaine, tel que : aéronautique, aérospatiale, marine et en secteur de pipeline et trouvent également dans le demain construction.



## Chapitre II: Techniques de réparation des plaques en aluminium fissurées



**Figure 37: Utilisation la technique de réparation par patch composite**

### **Conclusion**

Ce chapitre a exploré diverses techniques de réparation des plaques en aluminium fissurées. Nous avons défini les concepts de base et les étapes de préparation avant réparation, puis examiné des méthodes telles que le soudage, l'assemblage par rivetage et boulonnage, ainsi que le collage.

Chaque technique a ses avantages et limitations : le soudage est robuste mais peut induire des contraintes thermiques, le rivetage et le boulonnage offrent une solution fiable mais ajoutent du poids, et le collage présente une bonne intégrité structurelle sans ajout de poids mais dépend de la qualité de l'adhésif et de la préparation de la surface.

Le chapitre suivant abordera la modélisation numérique de la réparation par collage en composite de fissures à l'aide de la méthode des éléments finis (FEM), permettant une analyse approfondie et l'optimisation des techniques de réparation.

## Chapitre III : Modélisation numérique de la réparation de fissure par la méthode des éléments finis (FEM)

### Introduction

Les fissures constituent des défauts fréquents dans les structures en aluminium, menaçant leur intégrité structurelle et pouvant conduire à des défaillances critiques. La réparation de ces fissures est essentielle pour garantir la sécurité et la fiabilité de ces structures.

Ce chapitre présente une étude numérique approfondie de la réparation de fissures dans des plaques en aluminium 2024-T3 à l'aide de la FEM. L'objectif principal est d'évaluer l'impact de différents paramètres sur l'efficacité de la réparation, tels que la longueur de la fissure, l'épaisseur de la colle, l'épaisseur du composite, l'orientation des fibres et la longueur du composite.

### 1. Géométrie étudiée et propriétés des matériaux

Le modèle géométrique repose sur une plaque rectangulaire présentant un défaut latéral sous la forme de fissure débouchant. Ce défaut est caractérisé sa profondeur mesurée longitudinalement, notée ( $a$ ). Les caractéristiques géométriques de la plaque ainsi que du défaut sont illustrées à la Figure 38, avec toutes les dimensions exprimées en millimètres. La plaque utilisée est en alliage d'aluminium 2024-T3. Dans cette étude, nous avons travaillé sur un comportement de plaque élastique. La réparation de la plaque est effectuée à l'aide d'un collage de composite en boron/époxy et d'une fine couche de colle FM73. Les caractéristiques des matériaux de la plaque, du composite et de l'adhésif sont présentées dans les tableaux 1 et 2.

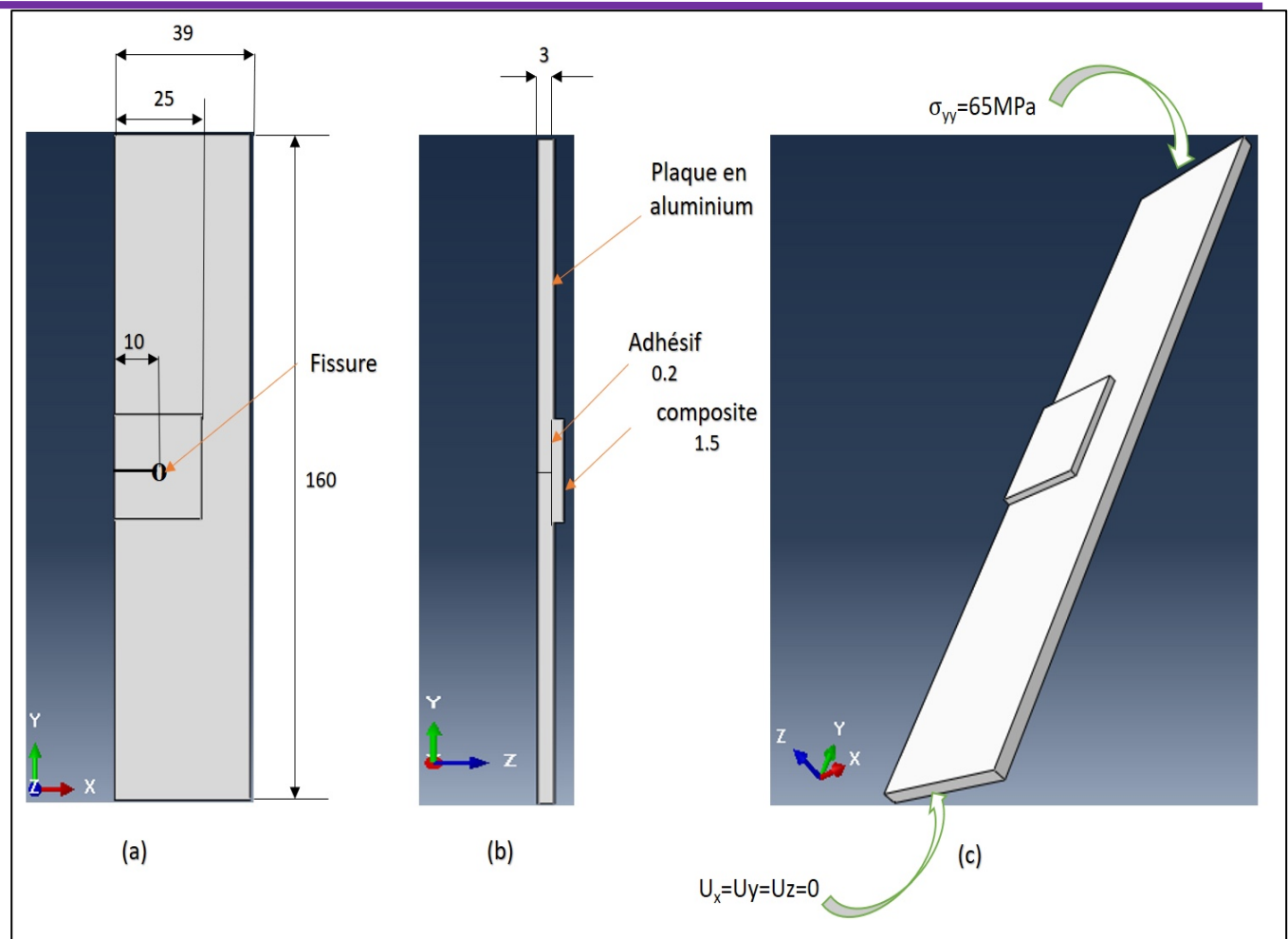


Figure 38: Géométrie de la plaque fissurée.

Tableau 1 : propriétés des matériaux : alliage d'aluminium 2024-T3 et de l'adhésive FM 73

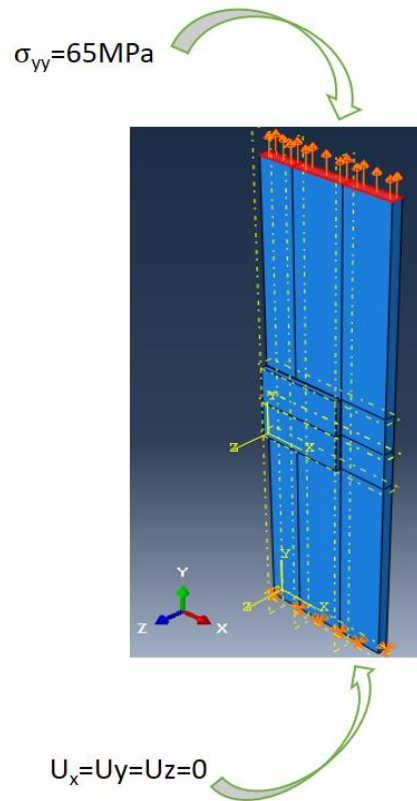
Paramètres	Alliage aluminium 2024-T3	Adhésive FM 73
E(MPa)	72000	2210
$\nu$	0.3	0.43

Tableau 2 : 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	$\nu_{12}$	0.21
$E_{22}$	25000	$G_{13}$	5500	$\nu_{13}$	0.21
$E_{33}$	25000	$G_{23}$	5500	$\nu_{23}$	0.21

## 2. Chargement et conditions aux limites

La plaque réparée par le patch est sollicitée en traction uniaxial par une contrainte égale à 65MPa sur la section de la plaque dans la direction Y. La plaque est encastré par la face en dessous. Ces conditions sont



représentées dans un modèle 3D comme le montre la

Figure 39.

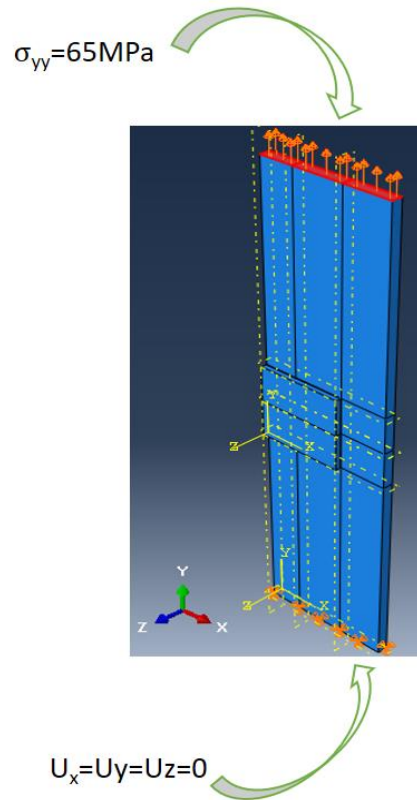


Figure 39: Chargement et conditions aux limites.

### 3. Modèle d'élément finis

Ce modèle est modélisé par la méthode des éléments finis 3D et qui était implémenté dans un code de calcul par élément finis ABAQUS, avec un élément géométrique brique quadratique à 20 nœuds de forme d'élément hexagonale (C3D20R), le « step » choisi dans cette modélisation et le « Static, général ». On va étudier 6 cas pour que le plaque être réparée et non réparée on va étudier leur graphe après pour voire les changements

#### 3.1.Effet de la longueur de la fissure sur $K_I$ pour une plaque non réparée

Nous modifierons les longueurs de la fissure en considérant cinq différentes profondeurs (10, 15, 20, 26 et 30)mm. La longueur de la plaque est fixée à 160mm, tandis que sa largeur est de 39mm.

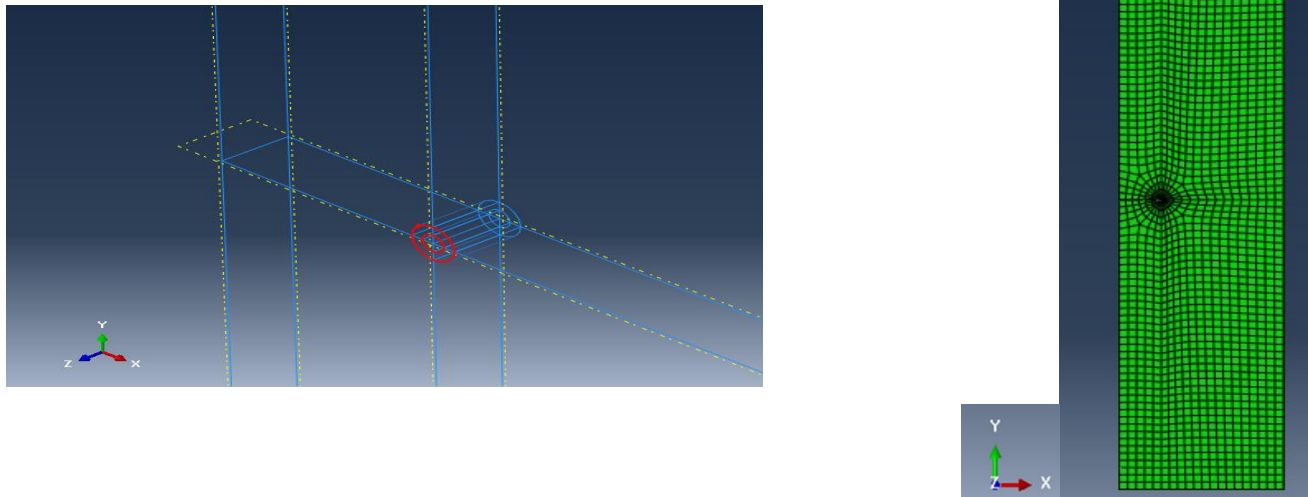


Figure 40: Maillage de la plaque fissurée.

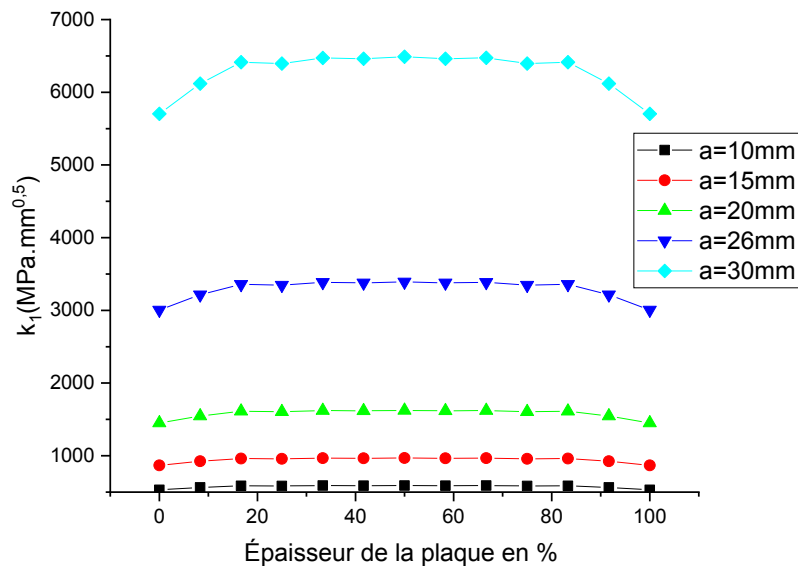


Figure 41: Effet de la Longueur de la Fissure sur le Facteur d'Intensité de Contrainte  $K_I$

Le graphique de Figure 41 montre la variation du facteur d'intensité de contrainte  $K_I$  en fonction de différentes longueurs de fissure ( $a$ ) dans une plaque en aluminium non réparée. L'axe des x représente la position des points de l'épaisseur de la plaque fissurée et chaque couleur représente une longueur de fissure. L'épaisseur de la plaque est de 3mm et est représentée par 100%. Les résultats indiquent que plus

### Chapitre III: Modélisation numérique de la réparation de fissure par la méthode des éléments finis (FEM)

la longueur de la fissure augmente, plus les valeurs de  $K_1$  sont élevées, avec des pics au milieu de la fissure. Les valeurs de  $K_1$  pour ( $a = 10\text{mm}$ ) sont les plus basses et presque constantes, tandis que pour ( $a = 30\text{mm}$ ), elles sont les plus élevées et montrent une forte concentration de contraintes au centre. Cela souligne que les fissures plus longues augmentent le risque de propagation et que la région centrale de la fissure est la plus critique en termes de concentration de contraintes.

#### 3.2. Plaque avec fissure réparé

Une réparation par collage de composite est étudié Figure 42 pour différentes longueurs de fissure (10, 15, 20, 26, 30 mm). Le composite et la colle utilisés pour la réparation ont des dimensions de 25 mm de longueur et de largeur, avec une épaisseur de 1,5 mm pour le composite et de 0,2 mm pour la colle.

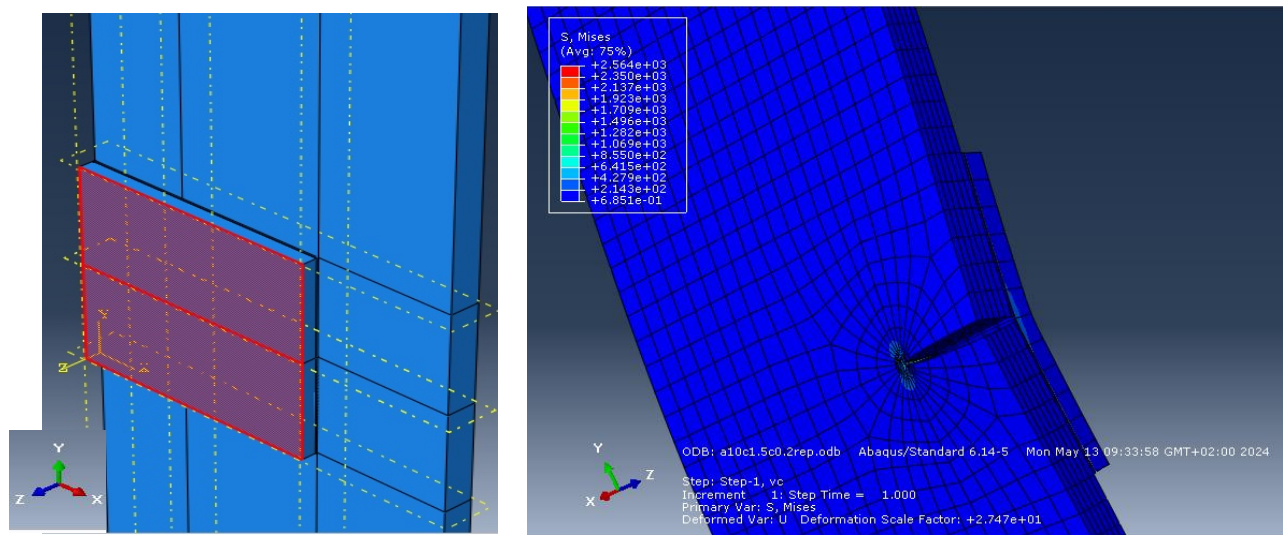


Figure 42: Réparation par collage de composite.

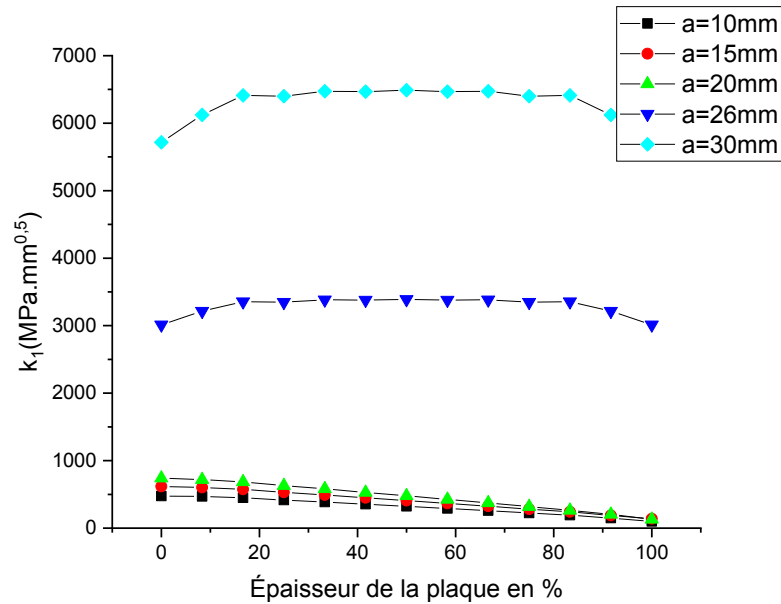


Figure 43: Réduction du Facteur d'Intensité de Contrainte  $K_I$  par Réparation par Collage de Composite

Le graphique dans la Figure 43 montre que la réparation par collage de composite réduit efficacement le facteur d'intensité de contrainte  $K_I$  pour des fissures de différentes longueurs (10, 15, 20, 26, et 30)mm dans la plaque, avec une seule face réparée (la face à la position 100, tandis que la face à la position 0 est non réparée). Après réparation, les valeurs de  $K_I$  sont globalement plus faibles, avec une réduction particulièrement notable pour les petites fissures (10 et 15 mm), où  $K_I$  reste bien en dessous de  $1000 MPa \cdot \sqrt{mm}$ . Pour les fissures plus longues, bien que les valeurs de  $K_I$  soient réduites par rapport aux valeurs non réparées, elles diminuent progressivement vers la fin de la fissure, démontrant l'efficacité de la réparation sur une seule face pour améliorer la durabilité et la résistance de la plaque réparée.

### 3.3. Comparaison entre une plaque réparée et une plaque non réparée

Figure 44 et Figure 45 représentent pour une fissure de 10mm dans une plaque non réparée et une plaque réparée.



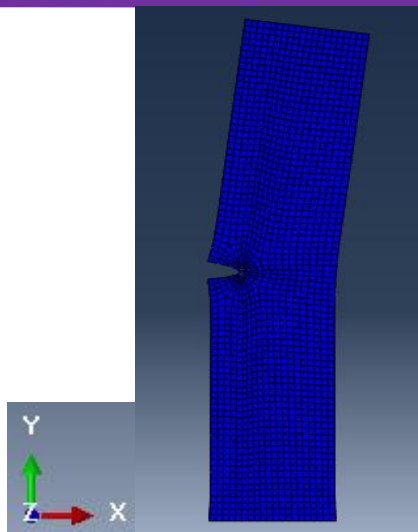


Figure 44: fissure non réparée

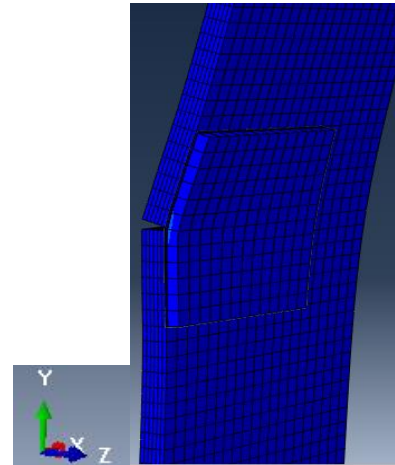


Figure 45: fissure réparée

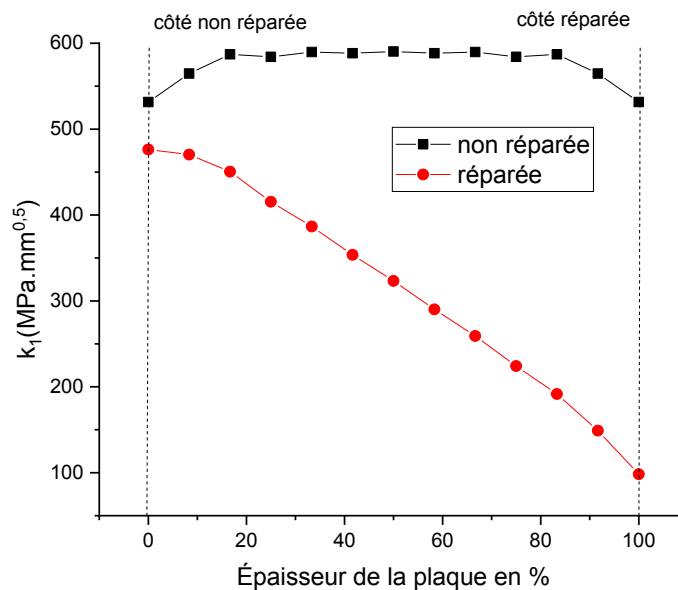


Figure 46: Comparaison du Facteur d'Intensité de Contrainte  $K_I$  pour une Fissure Non Réparée et Réparée

Le graphique de la Figure 46 compare le facteur d'intensité de contrainte  $K_I$  pour une fissure de 10 mm dans une plaque non réparée et une plaque réparée. Pour la plaque non réparée,  $K_I$  reste constant autour de  $600 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{mm}}$  le long de la fissure. Pour la plaque réparée,  $K_I$  commence à environ  $500 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{mm}}$  du côté non réparé et diminue progressivement jusqu'à presque  $0 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{mm}}$  du côté réparé. Cela montre que la réparation par collage de composite réduit efficacement le facteur d'intensité de contrainte, surtout vers la zone réparée, améliorant ainsi la résistance et la durabilité de la plaque.

### 3.4.Effet d'épaisseur de la colle

L'influence de l'épaisseur de la colle (0,1 mm, 0,15 mm, 0,2 mm, 0,22 mm et 0,25 mm) sur  $K_1$  a également été examinée.

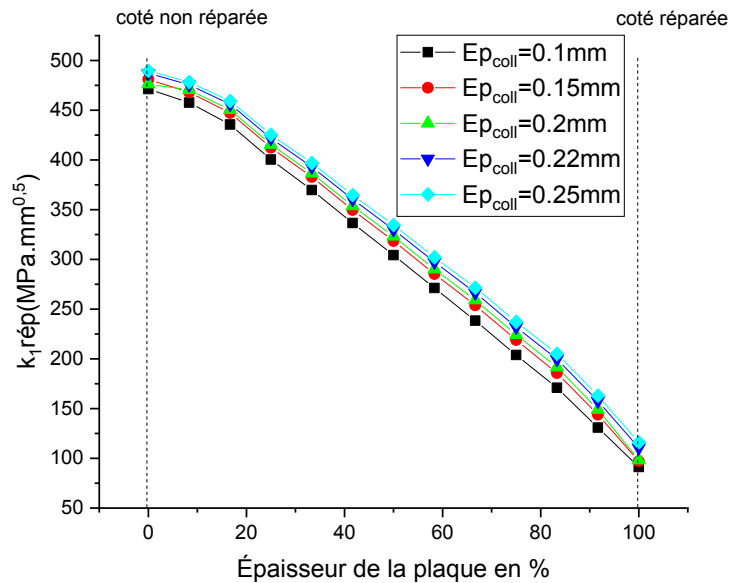


Figure 47 : Impact de l'épaisseur de la colle sur  $K_1$  pour la réparation des fissures

Les résultats de la Figure 47 suggèrent que l'épaisseur la colle n'a pas d'effet significatif sur  $K_1$  dans la plage étudiée, indiquant que le choix de l'épaisseur de la colle n'est pas critique pour la réparation des fissures dans ce type de structure.

### 3.5.Effet d'épaisseur du composite

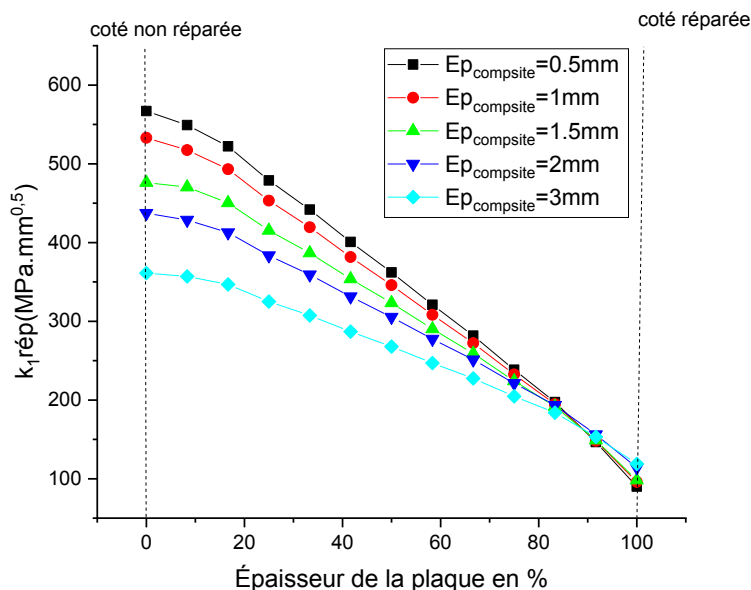


Figure 48: Analyse de l'épaisseur du composite

Comme le montre le graphique de la Figure 48 le facteur d'intensité de contrainte ( $K1$ ) diminue avec l'augmentation de l'épaisseur du composite. Cela suggère que le composite contribue à réduire la concentration de contraintes à l'extrémité de la fissure, ce qui est bénéfique pour la performance de la réparation.

L'effet de l'épaisseur du composite sur  $K1$  est plus important pour les faibles épaisseurs de composite. En effet, pour les épaisseurs de composite plus épaisses, la contribution du composite à la réduction de la concentration de contraintes devient moins significative.

### 3.6. Orientation des Fibres

Figure 49 montre l'effet de l'orientation des fibres composites (angle  $\theta$ ) sur le facteur d'intensité de contrainte ( $K1$ ) pour une plaque en aluminium réparée par un patch en composite.

Les résultats indiquent que  $K1$  est minimisé pour les angles de fibres proches de  $0^\circ$  et  $90^\circ$ , correspondant à une orientation longitudinale ou transversale par rapport à la fissure. L'effet de l'angle  $\theta$  sur  $K1$  est plus important pour les faibles valeurs de l'angle.

L'orientation des fibres est un facteur important pour optimiser la performance de la réparation de fissures dans les plaques en aluminium. Une orientation adéquate des fibres permet de réduire considérablement  $K1$  et d'améliorer la résistance de la structure réparée.

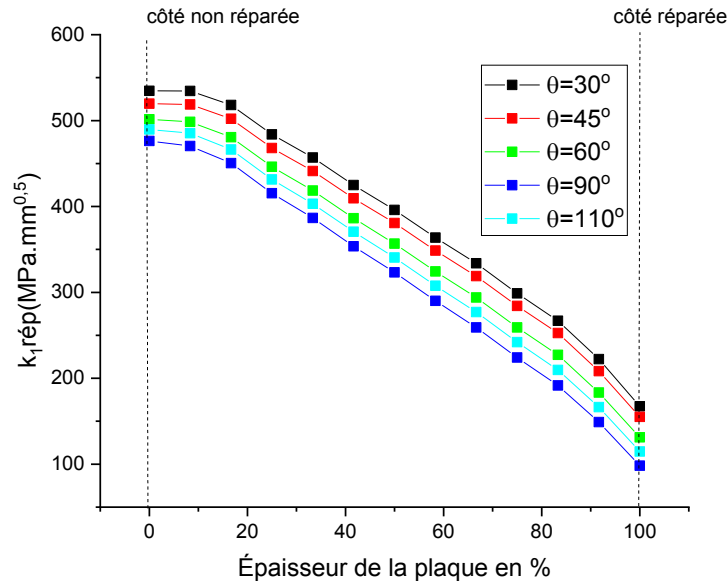


Figure 49: Effet de l'Orientations des Fibres sur le Facteur d'Intensité de Contrainte  $K_I$

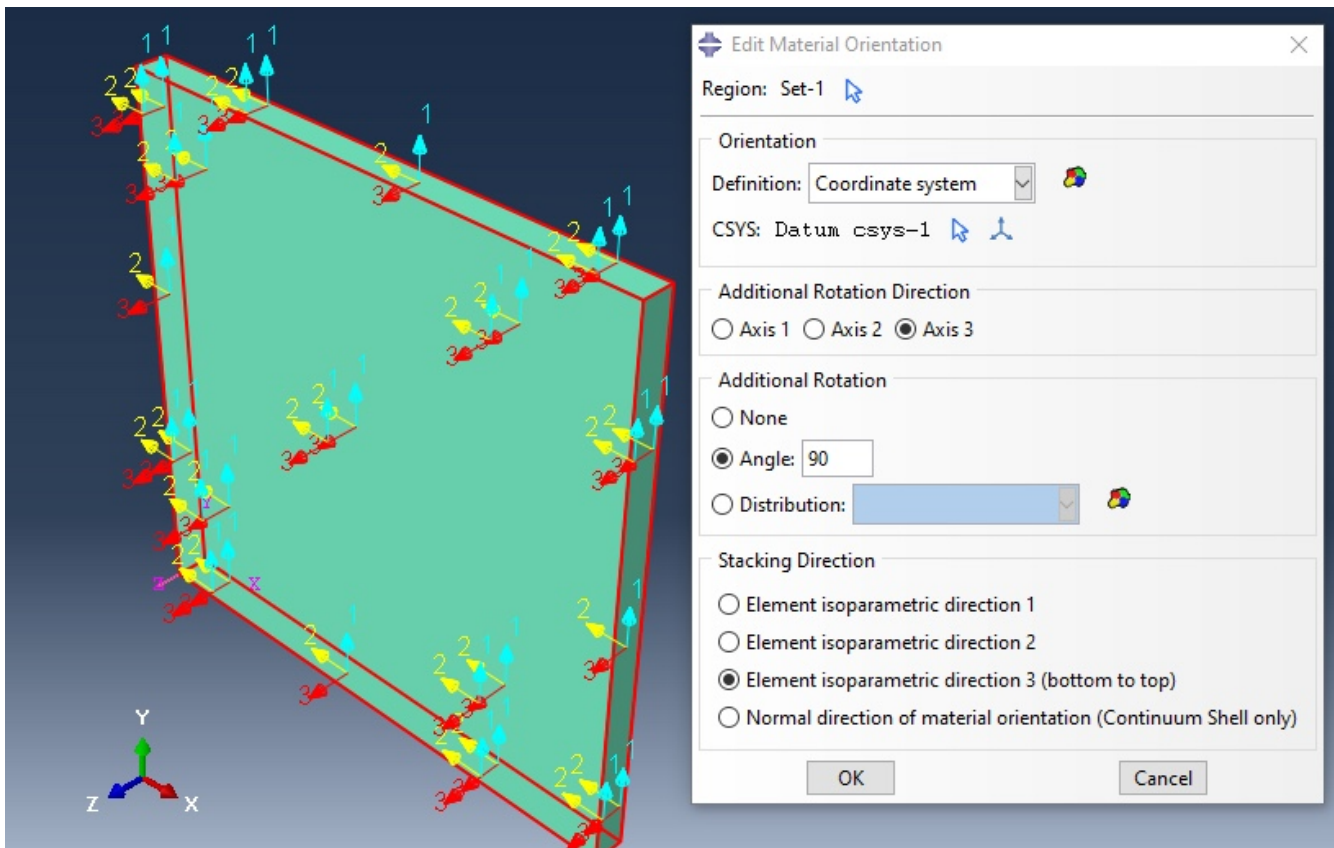


Figure 38 : L'orientation des Fibres

### 3.7.Effet de la longueur du composite :

Le graphique de la Figure montre une relation croissante entre la longueur du composite ( $L_c$ ) et le facteur d'intensité de contrainte ( $K_1$ ) pour une plaque en aluminium 2024-T3 réparée par un patch en composite boron/époxy et une couche d'adhésif. Cela signifie que lorsque la longueur du composite augmente, la concentration de contraintes à l'extrémité de la fissure diminue. Cette diminution de la concentration de contraintes est bénéfique pour la performance de la réparation, car elle réduit le risque de défaillance de la plaque.

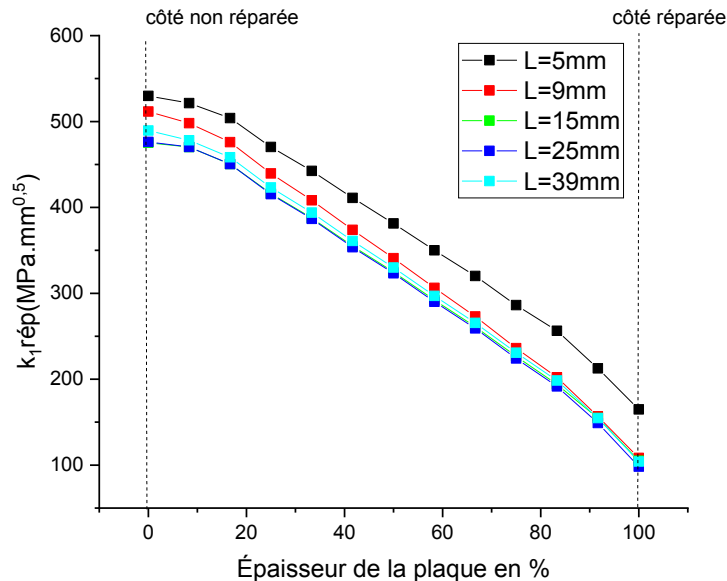


Figure 39 : Relation entre la longueur du composite et le facteur d'intensité de contrainte  $k_1$

## Conclusion

Ce chapitre a présenté une étude numérique approfondie de la réparation de fissures dans des plaques en aluminium 2024-T3 à l'aide de la méthode des éléments finis (FEM). L'objectif principal était d'évaluer l'effet de différents paramètres sur l'efficacité de la réparation, tels que la longueur de la fissure, l'épaisseur de la colle, l'épaisseur du composite, l'orientation des fibres et la longueur du composite.

Les résultats obtenus ont permis de tirer plusieurs conclusions importantes:

- La longueur de la fissure a un effet significatif sur le facteur d'intensité de contrainte ( $K_1$ ) à l'extrémité de la fissure. Pour une plaque non réparée,  $K_1$  augmente avec la longueur de la fissure, ce qui accroît le risque de défaillance. La réparation par collage de composite permet de réduire  $K_1$ , en particulier pour les fissures courtes.

### Chapitre III: Modélisation numérique de la réparation de fissure par la méthode des éléments finis (FEM)

---

- L'épaisseur de la colle n'a pas d'effet significatif sur  $K1$  dans la plage d'épaisseurs étudiée. Cela signifie que le choix de l'épaisseur d'adhésif n'est pas critique pour la performance de la réparation dans ce type de structure.
- L'épaisseur du composite est un facteur important pour optimiser la performance de la réparation. Une épaisseur de composite adéquate peut réduire considérablement  $K1$  et améliorer la résistance de la structure réparée.
- L'orientation des fibres est un autre facteur important pour optimiser la performance de la réparation. Une orientation adéquate des fibres permet de réduire  $K1$  et d'améliorer la résistance de la structure réparée. Le choix de l'orientation des fibres doit être fait en fonction de la longueur de la fissure, des contraintes de service attendues et des propriétés du composite.
- La longueur du composite est également un facteur important à considérer. Une longueur de composite adéquate peut contribuer à réduire  $K1$  et à améliorer la performance de la réparation. Cependant, il est important de tenir compte de l'impact de la longueur du composite sur le poids de la structure.

En conclusion, l'étude numérique présentée dans ce chapitre a fourni des informations précieuses pour la conception et l'optimisation des réparations de fissures dans les plaques en aluminium. Les résultats obtenus permettent de mieux comprendre l'effet de différents paramètres sur l'efficacité de la réparation et de guider le choix des paramètres de conception optimaux pour maximiser la performance et la durabilité des structures réparées.

## **Conclusion générale**

---

### **Conclusion générale**

Ce mémoire a présenté une étude complète de la réparation de fissures dans les plaques en aluminium. L'étude numérique a pour but d'analyser l'effet de différents paramètres sur l'efficacité de la réparation par collage de composite.

Les résultats obtenus ont permis de tirer des conclusions importantes:

- La réparation par collage de composite est une méthode efficace pour réduire le facteur d'intensité de contrainte ( $K_I$ ) à l'extrémité de la fissure dans les plaques en aluminium. Cette réduction de  $K_I$  permet d'améliorer la résistance de la structure réparée et de réduire le risque de défaillance.
- L'efficacité de la réparation par collage de composite dépend de plusieurs paramètres, tels que la longueur de la fissure, l'épaisseur de la colle, l'épaisseur du composite, l'orientation des fibres et la longueur du composite. Le choix des paramètres de conception optimaux doit être fait en fonction des caractéristiques spécifiques de la fissure et des contraintes de service attendues.
- La méthode des éléments finis (FEM) est un outil puissant pour simuler numériquement le comportement des structures fissurées et réparées. Les résultats des simulations FEM peuvent être utilisés pour optimiser la conception des réparations de fissures et pour prédire leur performance sous différentes conditions de chargement.

Les contributions de ce mémoire incluent:

- Une compréhension approfondie de l'effet de différents paramètres sur l'efficacité de la réparation par collage de composite dans les plaques en aluminium.
- Le développement d'une méthodologie pour la conception et l'optimisation des réparations de fissures basée sur la méthode des éléments finis (FEM).

Les conclusions de ce mémoire peuvent être étendues à d'autres types de structures et de matériaux, contribuant ainsi à l'avancement des connaissances dans le domaine de la réparation des structures.

### Bibliographie

#### Chapitre I

- [1] Rans, C. D., & Alderliesten, R. "Fatigue Crack Growth in Adhesively Bonded Aluminum Structures, (2008).
- [2] A. Zegloul, "Concepts fondamentaux de la mécanique de la rupture," *DEA Mécanique-Matér.-Struct.-Procédés*, vol. 2004, 2003.
- [3] Ramesh Talreja, Chandra Veer Singh. "Damage and Failure of Composite Materials". Cambridge University Press, 2012.
- [4] [https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-cachan/ressources\\_pedagogiques/application-de-la-correlation-dimages-identification-dun-champ](https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-cachan/ressources_pedagogiques/application-de-la-correlation-dimages-identification-dun-champ).
- [5] "A brief overview of fracture mechanics" par D. Broek, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 10, Issue 1, 1978, Pages 123-144. Cet article offre une introduction concise à la mécanique de la fracture et discute des principes fondamentaux de la propagation des fissures.
- [6] Verein Deutscher Eisenhüttenleute et Otto Peterson, *Gemeinfassliche Darstellung des Eisenhüttenwesens*, Düsseldorf, Verlag Stahleisen mbH, 1970/71, 17<sup>e</sup> éd., p. 78-79.
- [7] Jack A. Collins, Henry M. Lulofs, George E. Dieter. "Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention". 2013.
- [8] "Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications, and Design" par Michael F. Ashby et David R.H. Jones.
- [9] "Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications" de T.L. Anderson.
- [10] "Mechanical Behavior of Materials" par Thomas H. Courtney.
- [11] Irwin, G. R. (1957). "Analysis of Stresses and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate." *Journal of Applied Mechanics*, 24, 361-364. Cet article fondateur par George R. Irwin introduit les concepts fondamentaux des modes de rupture en mécanique des fractures.
- [12] Rice, J. R. (1968). "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks." *Journal of Applied Mechanics*, 35, 379-386. Cet article introduit l'intégrale J de Rice, un outil crucial pour l'analyse des fractures en mode I.



## **Bibliographie**

---

- [13] Courtney, T. H. (2005). *Mechanical Behavior of Materials* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.
- [14] Norman E. Dowling. "Fracture Mechanics", (2012) Ductile and Brittle Fracture" (pages 317-322.
- [15] "Toughness of Materials: Measurement and Application" Albert C. Argon, Springer 2007.
- [16] "Introduction to Materials Science for Engineers" James F. Shackelford , Pearson ( 2017).
- [17] Martin, Jean. (2019). Étude des faciès de rupture par fatigue dans les alliages d'aluminium. Thèse de doctorat, Université de Paris-Saclay.
- [18] Jean Dupont, "Étude expérimentale et numérique de la rupture fragile dans les matériaux métalliques à haute résistance", Université de Technologie de Compiègne, (2018).
- [19] George E. Dieter, "Métallurgie mécanique des matériaux", ISO 148-1:2016.
- [20] William D. Callister et David G. Rethwisch, "Materials Science and Engineering: An Introduction", 04/12/2013.
- [21] G.E. Dieter, "Mechanics of Fracture", (1997).

## **Chapitre II**

- [22] Martin, M. (2018). *Étude et optimisation des procédés d'assemblage pour les structures aéronautiques* (Thèse de doctorat, Université de Toulouse).
- [23] Kaddouri Nadia, Influence des défauts géométrique dans la colle et modification géométrique de substrats sur la durabilité des assemblages collés, université DjillaliLiabes de sidi bel Abbes, 2020.
- [24] Beasley, D., Bull, D., and Martin, R. An overview of genetic algorithms : Part 1, fundamentals. *University Computing* 15, 2 (1993), 58–59.
- [25] Goland, and Reissner. The stress in cemented joints. *Journal of Applied Mechanics* 11. (1944), A17–A27.
- [26] PRATT, J.L., introduction to the welding of structural steelwork, wtell construction institute .3rd rev, ed.1989.
- [27] R.J Callianan, I.R.F. Rose, C.H wang, three dimensional stress analysis of crack patching in :of international conference on fracture, ICF-9(1997)2151-2158.
- [28] Jean Dupont, "Étude sur les techniques de soudage et leur impact sur la durabilité des structures métalliques", 2020.

## Bibliographie

---

- [29] Pierre Dupont, "Étude expérimentale et numérique du comportement mécanique des assemblages boulonnés en acier à haute résistance et à haute performance", Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2018.
- [30] A. Baker, "Bonded composite repair of fatigue-cracked primary aircraft structure", *Compos. Struct.* 47 (1) (1999) 431-443.
- [31] Abdullah Maleki, Milad Saedifar, Mehdi Ahmadi Najafabadi, Dimitrios Zarouchas "The Fatigue Failure Study of Repaired Aluminum Plates by Composite Patches using Acoustic Emission", *Engineering Fracture Mechanics* (2017).
- [32] "Guide pratique du collage industriel", Dominique André, Éditions Techniques de l'Ingénieur ISBN, 1991.
- [33] H. Hosseini-Toudeshky et al. "Experimental fatigue crack growth and crack-front shape analysis of asymmetric repaired aluminium panels with glass/epoxy composite patches / *Composite Structures* 71 (2005) 401–406.
- [34] *Traité des matériaux, numéro 20 : Sélection des matériaux et des procédés de mise en oeuvre* juin 2001, Michael Ashby (Auteur), Yves Bréchet (Auteur), Luc Salvo
- [35] Baker A. A., "Repair of cracked or defective metallic aircraft components with advanced fibre.
- [36] "Composites-an overview of Australian work", *Composite Structures*, V.2, 1984 , pp.153-181.
- [37] M.F. Ashby. "Matériaux. 2. Microstructure et mise en œuvre", Dunod , P200.
- [38] *Métallurgie générale des matériaux*. J. Benard J. P. Baillon.
- [39] W.D. Callister, "Science et génie des matériaux".
- [40] Dupont, Jean, *Étude des matériaux composites et leurs applications dans l'industrie aéronautique*, Université de Paris, 2020. (Thèse de doctorat). Université de Technologie de Compiègne, France.
- [41] *Méthodes et outils pour la conception robuste des produits industriels*, Laurent Berrah, Université de Bordeaux, 2012.
- [42] "Materials Science and Engineering: An Introduction", William D. Callister Jr., David G. Rethwisch, (2017).
- [43] "Materials Science and Engineering: An Introduction" (Introduction à la science et à l'ingénierie des matériaux) Auteur: William D. Callister Jr.
- [44] "Introduction to Composite Materials Design" de Ever J. Barbero.
- [45] "Introduction to Composite Materials Design" de Efstathios K. Mechtcherine et Klaus Friedrich.
- [46] "Durability Enhancement of Repair Techniques for Corrosion-Damaged Structures Using Stainless Steel, Aluminum, and Composite Materials", John Smith, Université de Technologie de Sydney, (2019).

## **Bibliographie**

---

[47] "Analyse des coûts et des avantages des techniques de réparation spécialisées dans l'industrie manufacturière" John Doe, Université XYZ, (2018).