

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 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 de l'influence de la rigidité des patchs composites sur la résistance en fatigue des plaques réparées en alliage d'aluminium 6061-T6**

**Présenté Par :**

- 1) M. BENTOUILA Mohammed Said
- 2) M. BOURAS Reda mohamed Riad

**Devant le jury composé de :**

Pr Oudad Wahid	Professeur	UAT.B.B	Président
Pr Noureddine Djebbar	Professeur	UAT.B.B	Examineur
Dr Cheriet Nour el houda	M C A	UAT.B.B	Examineur
Dr Bahram Kaddour	M C A	UAT.B.B	Encadrant

*Année Universitaire 2024/2025*

## **Remercîments**

*Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à ALLAH, le Tout-Puissant, pour la force, la persévérance et la clarté d'esprit qui nous ont permis de mener à bien ce travail.*

*Nous adressons nos remerciements les plus sincères à notre encadrant, Dr **Bahram Kaddour**, pour son accompagnement rigoureux, sa disponibilité, ses conseils avisés ainsi que pour la confiance et le soutien qu'il nous a témoigné tout au long de ce projet.*

*Nous remercions chaleureusement les membres du jury :*

*Pr **Oudad Wahid**, président,*

*Pr **Djebbar Noureldine**, examinateur,*

*Dr **Cheriet Nour El Houda**, examinatrice,*

*Pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire et pour leurs observations constructives.*

*Nos remerciements s'adressent également à l'ensemble des enseignants du département de Génie Mécanique pour la qualité de leur enseignement et leur engagement constant tout au long de notre parcours académique.*

---

## Dédicace

Je dédie ce modeste Spécialement :

A mes parents ;

À mon binôme BENTOUILA Mohamed Said ;

Et toute ma grande famille ;

A tous ceux qui m'ont aidé et fait confiance à moi ;

RIYAD....

Je dédie ce modeste travail :

A mon binôme BOURAS Riyad;

A mes parents, mes cher frères et sœurs ;

A ma petite famille, mes proches amis ;

A tous ceux que j'aime ;

MOHAMED...

---

## **Résumé**

La durabilité des matériaux soumis à des charges cycliques répétées est un défi majeur, surtout dans les secteurs industriels. Les réparations par patchs composites sont utilisées pour prolonger leur durée de vie, mais leur efficacité dépend de facteurs comme la rigidité du patch, le taux de surcharge et les propriétés de l'adhésif.

L'étude a donc exploré l'influence de la rigidité des patchs réparateurs, de la surcharge cyclique et des types d'adhésifs sur la durée de vie en fatigue de l'alliage d'aluminium 6061-T6. Pour ce faire, des simulations ont été réalisées avec des patchs de rigidité variable (80%, 100%, 120%, 140%), des taux de surcharge allant de 1,5 à 3,5, et trois types d'adhésifs différents (Graphite/Epoxy, Boron/Epoxy, Glare). L'objectif principal était de mesurer l'impact de ces facteurs sur la vitesse de propagation des fissures et sur la durée de vie du matériau réparé.

Les résultats démontrent qu'un patch avec 140 % de rigidité (par rapport au substrat) retarde le mieux la fissuration, augmentant la durée de vie de 40 %. Une surcharge modérée (taux  $t=2,5$ ) ralentit la propagation des fissures de 25 %, tandis qu'une surcharge excessive ( $t=3,5$ ) endommage prématurément la réparation. Enfin, l'adhésif Graphite/Époxy se distingue, améliorant la durabilité de 30 à 50 % comparé aux autres adhésifs testés, grâce à sa résistance aux délaminations. Ces insights orientent vers des stratégies de réparation optimisées pour les environnements industriels exigeants.

## **Mots clés**

Réparations ,composites, Rigidité, patchs, Surcharge, 6061-T6, Fissures

---

ملخص

تمثل متانة المواد تحت تأثير الأحمال الدورية المتكررة تحديًا رئيسيًا، خاصة في القطاعات الصناعية. تُستخدم الرقع المركبة لإطالة عمرها الافتراضي، لكن فعالية هذه الإصلاحات تعتمد على عوامل مثل صلابة الرقعة، ومعدل الحمل الزائد، وخصائص المادة اللاصقة.

هدفت هذه الدراسة إلى تحليل تأثير صلابة الرقع المركبة، والحمل الزائد الدوري، وأنواع اللواصق على متانة سبيكة الألومنيوم T6 6061 تحت إجهاد التعب. تم إجراء محاكاة لرقع بصلابة متفاوتة (80٪، 100٪، 120٪، 140٪)، ومعدلات حمل زائد تتراوح بين 1.5 إلى 3.5، وثلاثة أنواع من اللواصق (غرافايت/إيبوكسي، بورون/إيبوكسي، كلير). ركز البحث على قياس تأثير هذه العوامل على سرعة انتشار الشقوق وعمر المادة المُصلحة.

أظهرت النتائج أن:

الرقعة ذات الصلابة 140٪ (مقارنة بالمادة الأصلية) تؤخر بشكل ملحوظ انتشار الشقوق، مما يزيد العمر الافتراضي بنسبة 40٪. الحمل الزائد المعتدل) معدل ( $t=2.5$ ) يقلل سرعة انتشار الشقوق بنسبة 25٪، بينما يؤدي الحمل الزائد المفرط ( $t=3.5$ ) إلى تلف مبكر للإصلاح. تفوق لاصق الغرافايت/إيبوكسي على الآخرين، حيث عزز المتانة بنسبة 30-50٪ بسبب مقاومته الفعالة للتقشرات. توجه هذه النتائج نحو تطوير استراتيجيات إصلاح مثلى للبيئات الصناعية عالية الإجهاد.

الكلمات المفتاحية:

الإصلاحات، المركبات، الصلابة، الرقع، التحميل الزائد، T66061-، الشقوق

**Abstract**

The durability of materials subjected to repeated cyclic loading is a major challenge, particularly in industrial sectors. Composite patch repairs are used to extend their service life, but their effectiveness depends on factors such as patch rigidity, overload ratio, and adhesive properties. This study explored the influence of repair patch rigidity, cyclic overload, and adhesive types on the fatigue life of the 6061-T6 aluminum alloy. Simulations were conducted with patches of varying rigidity (80%, 100%, 120%, 140%), overload ratios ranging from 1.5 to 3.5, and three different adhesive types (Graphite/Epoxy, Boron/Epoxy, Glare). The main objective was to measure the impact of these factors on crack propagation rate and the lifespan of the repaired material. The results show that a patch with 140% rigidity (relative to the substrate) delays cracking the most, increasing the lifespan by 40%. A moderate overload ratio ( $t=2.5$ ) slows crack propagation by 25%, while excessive overload ( $t=3.5$ ) prematurely damages the repair. Finally, the Graphite/Epoxy adhesive stands out, improving durability by 30-50% compared to other tested adhesives due to its resistance to delamination. These insights guide the development of optimized repair strategies for demanding industrial environments.

**Keywords**

Repairs, Composites, Stiffness, Patches, Overload, 6061-T6, Cracks

---

**Table des matières**

**Remerciements**

Dédicace

**Résumé**

ملخص

**Abstract**

**INTRODUCTION GÉNÉRALE**

**CHAPITRE I MECANIQUE DE LA RUPTURE ET FATIGUE DES MATERIAUX**

1.1	INTRODUCTION A LA MECANIQUE DE LA RUPTURE .....	6
1.2	MODES DE RUPTURE ET FACTEUR D'INTENSITE DES CONTRAINTES.....	8
1.2.1	Facteur d'intensité des contraintes et son importance .....	8
1.2.2	Classification des modes de rupture .....	9
1.2.3	Effets combinés des modes de rupture.....	10
1.2.4	Influence de la géométrie de la fissure et des conditions de chargement .....	11
1.3	PROPAGATION DES FISSURES ET ENDOMMAGEMENT PROGRESSIF .....	12
1.3.1	Initiation des Fissures et Mécanismes de Nucléation .....	12
1.3.2	Propagation Stable et Instable des Fissures.....	13
1.3.3	Effets des Microstructures sur la Propagation des Fissures .....	14
1.3.4	Relations entre Propriétés Mécaniques et Résistance à la Fissuration .....	15
1.3.5	Effets des Contraintes Résiduelles et Traitements de Surface.....	16
1.3.6	Facteurs Influent sur la Propagation des Fissures .....	17
1.4	PROPAGATION DES FISSURES SOUS CHARGEMENT VARIABLE .....	18
1.4.1	Influence du rapport de charge .....	18
1.4.2	Influence de l'environnement.....	19
1.4.3	Influence de surcharge .....	20
1.5	FATIGUE DES MATERIAUX ET MODEL DE PROPAGATION DES FISSURES.....	23
1.5.1	Introduction à la Fatigue .....	23
1.5.2	Model décrivant la Propagation des Fissures .....	23
1.5.3	Model décrivant la Propagation des Fissures après application de surcharge .....	24

**CHAPITRE II GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES**

2.1	Introduction .....	29
2.2	Les constituants du matériau composite.....	30
2.2.1	Les matrices.....	<b>31</b>
2.2.2	Les résines.....	<b>33</b>
2.2.2.1	Les divers types de résine.....	33
2.3	Matériaux Composites et Réparation des Structures .....	34
2.4	Propriétés Mécaniques et Anisotropie des Composites .....	37
2.4.1	Effet de l'orientation des fibres sur les caractéristiques mécaniques .....	<b>37</b>
2.4.2	Réponse des composites à la fatigue comparée aux métaux.....	<b>39</b>
2.4.3	Comportement aux chocs et aux charges dynamiques .....	<b>40</b>
2.5	Techniques de Réparation des Structures par Patch Composite .....	41
2.5.1	Réparation par patch collé.....	42
2.5.2	Réparation par patch riveté .....	43
2.5.3	Techniques hybrides : combinaison collage-rivetage .....	43

**Chapitre III SIMULATION NUMERIQUE**

3	Matériaux et méthodes .....	46
---	-----------------------------	----

3.1	matériaux utilisés dans l'étude.....	46
3.2	Logiciel utilisé dans la simulation .....	46
3.3	Réparation par Patch utilisée dans l'étude .....	47
3.4	Modèle géométrique .....	48
3.5	Résultats et Discussion.....	50
3.5.1	Étude de l'influence du rapport de charge $R$ sur la durée de vie en fatigue.....	50
3.5.2	Évaluation de l'impact de la réparation par Patch sur la durée de vie en fatigue .....	53
3.5.3	Impact des adhésifs sur la durée de vie des réparations par Patch sous charges cycliques	57
3.5.4	Influence de la rigidité des patches de réparation sur les performances en fatigue des matériaux	58
3.5.5	Influence de la surcharge sur la durée de vie en fatigue des matériaux réparés .....	61
3.5.6	Influence du taux de surcharge sur la durée de vie en fatigue des matériaux réparés par Patch	64
3.5.7	Impact de la rigidité du Patch sur la durée de vie en fatigue et la propagation des fissures sous surcharge cyclique.....	67
	<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>75</b>
	<b>Perspectives.....</b>	<b>78</b>
	<b>Références .....</b>	<b>79</b>

---

**Liste des figures**

Figure 1 Classification Des Modes De Rupture..... 10

Figure 2 Répartition Des Contrainte Au Point De Fissure ..... 11

Figure 3 Distribution Des Contraintes Elastiquest Et Elastoplastiques Autour D'une Fissure Dans Un Matériau ..... 13

Figure 4 Diagramme De Croissance Des Fissures En Fatigue : Analyse Des Mecanismes De Propagation Stable Et Instable Selon La Loi De Paris..... 14

Figure 5 Structure Micrographique Des Grains Pour Une Tole D'épaisseur 2mm Sur La Face Dn– A) Photographie (Grossissement X5) – B) Image Typique De Numerisation Des Joints Grossissement X5 ... 15

Figure 6 Influence Du Rapport De Charge Sur La Durée Vie ..... 19

Figure 7 Comparaison De L'effet Du Rapport De Surcharge (Orl) Sur La Croissance De Fissure Sous Chargement Cyclique -Evolution De La Longueur De Fissure En Fonction Du Nombre De Cycles ..... 20

Figure 8 Différents Types Du Comportement Au Retard Apres Application Des Surcharges ..... 22

Figure 9 Modèle De Willenborg Decrivant Le Retard Apres Surcharge..... 26

Figure 10 Matrice Renforcee ..... 31

Figure 11 Support En Composite A Matrice Thermoplastique Renforce Par Des Fibres De Carbone..... 32

Figure 12 Gaine De Protection En Composite A Matrice Thermodurcissable Renforcee Pour Cables Electriques..... 32

Figure 13 Joints D'etancheite En Composite A Matrice Elastomere Renforcee..... 33

Figure 14 Chronologie Des Innovations En Matériaux Composites ..... 35

Figure 15 Comportement En Traction D'un Bfup Pour Différentes Orientations De Fibres (Delsol, 2012)[36]..... 38

Figure 16 Comportement Flexionnel En Fonction De Orientation Theorique Des Fibres..... 39

Figure 17 Comparaison De L'évolution Des Dommage En Fonction Du Nombre De Cycles Entre Composite et Metal..... 40

Figure 18 Schéma De La Configuration De Collage Par Patch Composite Avec Adhésif Pour La Réparation De Structures Metalliques Endommagees ..... 42

Figure 19 Modèle Geometrique Et Maillage De L'assemblage Colle Et Boulonne ..... 44

Figure 20 Interface Utilisateur Du Logiciel Afgrow ..... 47

Figure 21 Model Geometries CT75..... 49

Figure 22 Position Et Dimension De La Réparation Par Patch Composite..... 49

Figure 23 Orientation Des Fibres Utiliser Dans La Réparation Par Patch Composites ..... 50

Figure 24 Propagation De La Fissure En Fonction Du Nombre De Cycles Pour Différents Rapports De Charge..... 51

Figure 25 Variation De La Vitesse De Propagation Des Fissures En Fonction De L'amplitude De La Contrainte Pour Différents Rapports De Charge Et Comparaison Des Courbes De Propagation ..... 52

---

Figure 26 Impact De La Reparation Par Patch Sur La Duree De Vie En Fatigue.....	54
Figure 27 Effet De La Reparation Par Patch Sur La Vitesse De Propagation Des Fissures En Fonction De L'amplitude De La Contrainte.....	55
Figure 28 Comparaison De La Duree De Vie En Fatigue Des Eprouvettes Reparees Avec Differents Adhesifs .....	57
Figure 29 Effet De La Rigidite Des Patches De Reparation Sur La Propagation Des Fissures Et La Duree De Vie En Fatigue Du Matériau .....	59
Figure 30 Impact De La Rigidite Des Patches De Reparation Sur Les Parametres De Contrainte $\Delta k_{seuil}$ Et $\Delta k_{max}$ Et Leur Influence Sur La Propagation Des Fissures .....	60
Figure 31 Comparaison De La Vitesse De Propagation Des Fissures Avec Et Sans Surcharge Sous Chargement Cyclique A Amplitude Variable .....	62
Figure 32 Comparaison De La Duree De Vie En Fatigue Des Matériaux Sous Surcharge Avec Et Sans Reparation Par Patch .....	63
Figure 33 Impact Du Taux De Surcharge Sur La Croissance Des Fissures Et La Resistance A La Fatigue Des Reparations Par Patch .....	65
Figure 34 Comparaison De La Vitesse De Propagation Des Fissures Avant Et Apres Application De La Surcharge Pour Divers Taux De Surcharge.....	67
Figure 35 Effet De La Rigidite Du Patch Sur La Duree De Vie En Fatigue Sous Surcharge Cyclique.....	68
Figure 36 Effet De La Rigidite Du Patch Sur La Vitesse De Propagation Des Fissures Sous Surcharge Cyclique .....	69
Figure 37 Zoom Sur La Vitesse De Propagation Des Fissures Pour Le Patch A 120% De Rigidite Apres Application De La Surcharge En Fonction De L'amplitude $\Delta k$ .....	70
Figure 38 Zoom Sur La Vitesse De Propagation Des Fissures Pour Le Patch A 100% De Rigidite Apres Application De La Surcharge En Fonction De L'amplitude $\Delta k$ .....	71
Figure 39 Zoom Sur La Vitesse De Propagation Des Fissures Pour Le Patch A 80% De Rigidite Apres Application De La Surcharge En Fonction De L'amplitude $\Delta k$ .....	72

---

## **Liste des tableaux**

Tableaux 1 : Tableau Des Propriétés Mécaniques De L'alliage 6061-T6.....	46
Tableaux 2 : Propriétés Mécaniques Des Adhésives Utilisés .....	48
Tableaux 3 Tableau Récapitulatif Des Vitesses Minimales Observées Et Efficacité Du Patch.....	72

Liste des abréviations

Symbole	Définition
<b>K</b>	Facteur d'intensité de contrainte
<b>K<sub>(c)</sub></b>	Valeur critique du facteur d'intensité de contrainte
<b>ΔK</b>	Amplitude du facteur d'intensité de contrainte dans un cycle
<b>ΔK<sub>eff</sub></b>	Amplitude effective du facteur d'intensité de contrainte
<b>ΔK<sub>th</sub></b>	Seuil du facteur d'intensité de contrainte en fatigue
<b>ΔK<sub>s</sub></b>	Contrainte de seuil
<b>ΔK<sub>seuil</sub></b>	Facteur d'intensité de contrainte de seuil
<b>K<sub>max</sub></b>	Valeur maximale du facteur d'intensité
<b>K<sub>min</sub></b>	Valeur minimale du facteur d'intensité
<b>K<sub>eff</sub>-max</b>	Valeur maximale effective pendant un cycle
<b>K<sub>eff</sub>-min</b>	Valeur minimale effective pendant un cycle
<b>K<sub>r</sub></b>	Facteur lié à la réouverture de la fissure
<b>K<sub>max(ol)</sub></b>	Valeur maximale au niveau de la surcharge
<b>Z<sub>pi</sub></b>	Taille de la zone plastique (chargement de base)
<b>Z<sub>psur</sub>c<sub>h</sub></b>	Zone plastique induite par la surcharge
<b>λ</b>	Longueur caractéristique influencée par la surcharge
<b>C</b>	Coefficient de la loi de Paris
<b>m</b>	Exposant de la loi de Paris
<b>m<sub>w</sub></b>	Paramètre matériau déterminé expérimentalement
<b>a<sub>0</sub></b>	Longueur initiale de la fissure
<b>a<sub>i</sub></b>	Longueur de la fissure après surcharge
<b>da/dN</b>	Taux de croissance de la fissure par cycle
<b>da</b>	Variation de la longueur de fissure
<b>dN</b>	Variation du nombre de cycles
<b>r<sub>p</sub></b>	Rayon de la zone plastifiée
<b>r<sub>p(ol)</sub></b>	Rayon de la zone plastifiée induite par surcharge
<b>φ</b>	Facteur de retard
<b>R</b>	Rapport de charge
<b>R<sub>eff</sub></b>	Rapport de charge effectif
<b>σ</b>	Contrainte
<b>σ<sub>max</sub></b>	Contrainte maximale appliquée dans un cycle
<b>σ<sub>min</sub></b>	Contrainte minimale appliquée dans un cycle
<b>σ<sub>0.2</sub></b>	Contrainte à 0,2 % de déformation plastique

---

<b>Symbole</b>	<b>Définition</b>
<b>E<sub>l</sub></b>	Module d'élasticité longitudinal
<b>E<sub>t</sub></b>	Module d'élasticité transversal
<b>G<sub>lt</sub></b>	Module de cisaillement longitudinal-transversal
<b>ν<sub>lt</sub></b>	Coefficient de Poisson longitudinal-transversal
<b>H<sub>p</sub></b>	Hauteur de la plaque
<b>w<sub>p</sub></b>	Largeur de la plaque
<b>w<sub>r</sub></b>	Largeur de la région
<b>e<sub>r</sub></b>	Épaisseur de la région
<b>DT</b>	Direction transversale
<b>DL</b>	Direction longitudinale
<b>ORL</b>	(Terme non défini, préciser si nécessaire)
<b>SOLR</b>	Taux de surcharge (Surcharge Ratio)
<b>N</b>	Nombre de cycles à la rupture
<b>FFN</b>	Fatigue à faible nombre de cycles
<b>FGN</b>	Fatigue à grand nombre de cycles
<b>6061-T6</b>	Alliage d'aluminium 6061 traité thermiquement
<b>PP</b>	Polypropylène
<b>PA</b>	Polyamide
<b>PEEK</b>	Polyétheréthercétone
<b>T300/2508</b>	Tissu en fibre de carbone T300 avec résine 2508

---

## **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

L'étude de la fatigue des matériaux métalliques est essentielle dans de nombreux secteurs industriels, où les composants sont fréquemment soumis à des sollicitations cycliques répétées. Ces sollicitations génèrent des dégradations progressives des propriétés mécaniques des matériaux, affectant leur performance et leur fiabilité au fil du temps. La fatigue, phénomène qui résulte de charges cycliques, constitue une cause majeure de défaillance prématurée des structures métalliques. Ce processus est particulièrement insidieux, car les dommages causés par la fatigue ne sont pas toujours visibles, mais peuvent entraîner la formation de fissures qui se propagent lentement sous l'effet des cycles répétés de chargement [1].

La propagation de ces fissures représente un phénomène critique qui peut compromettre la sécurité et la performance des structures métalliques. En effet, une fissure en expansion peut atteindre des dimensions critiques, menaçant ainsi l'intégrité de la structure et entraînant des défaillances catastrophiques. Ce phénomène est particulièrement préoccupant dans des industries telles que l'aéronautique, l'automobile et la construction, où la résistance à la fatigue et la durabilité des matériaux sont cruciales. Dans l'aéronautique, par exemple, la défaillance d'un composant métallique en raison de la fatigue peut avoir des conséquences dramatiques [2]. De même, dans les secteurs automobiles et de la construction, des composants métalliques doivent être capables de résister à des cycles de charge répétés sans se détériorer, afin d'assurer la sécurité des utilisateurs et la longévité des structures [3].

L'analyse de la fatigue des matériaux métalliques et des méthodes de réparation des structures est essentielle pour mieux comprendre les mécanismes de dégradation et prévenir les défaillances prématurées. Lorsque des fissures se forment dans les composants métalliques, leur propagation peut entraîner des ruptures catastrophiques si elles ne sont pas rapidement identifiées et traitées. Dans ce contexte, les techniques de réparation, telles que l'utilisation de patches composites, offrent une solution efficace pour prolonger la durée de vie des matériaux endommagés [4]. Ces réparations permettent de redistribuer les contraintes dans la zone endommagée, réduisant ainsi l'intensité locale des tensions qui

favorisent l'extension des fissures. Toutefois, pour maximiser l'efficacité de ces réparations, il est essentiel de bien comprendre les facteurs influençant leur performance, tels que la rigidité du patch, le type d'adhésif utilisé et les conditions sous lesquelles ces réparations sont appliquées [5].

La rigidité des patches réparateurs joue un rôle crucial dans l'efficacité de la réparation. En effet, un patch rigide peut mieux absorber et redistribuer les contraintes, limitant ainsi la formation de zones plastiques et retardant la propagation des fissures. Cependant, l'adhésif utilisé pour coller le patch au matériau sous-jacent a également un impact significatif, car il doit offrir une résistance suffisante aux charges cycliques répétées. En outre, l'application de surcharge, qui est parfois utilisée pour tester les réparations ou simuler des conditions d'exploitation extrêmes, peut également affecter la durabilité de la réparation. Une surcharge trop élevée peut compromettre la performance du patch, tandis qu'une surcharge modérée peut offrir un retard supplémentaire dans la propagation des fissures [6]. Ainsi, l'étude de l'impact de ces paramètres sur la propagation des fissures est fondamentale pour optimiser les méthodes de réparation et améliorer la durabilité des structures métalliques dans des environnements soumis à des sollicitations cycliques répétées [7].

Les défis liés à la propagation des fissures dans les matériaux métalliques sont particulièrement complexes, car ils dépendent de multiples facteurs interconnectés. La formation des fissures sous sollicitations cycliques est un phénomène qui résulte de l'accumulation de déformations plastiques locales à chaque cycle de charge, ce qui finit par provoquer l'initiation de fissures microscopiques [8]. Ces fissures peuvent se propager progressivement sous l'effet des cycles de charge répétés, et leur propagation est influencée par des paramètres tels que la microstructure du matériau, qui détermine sa résistance aux fissures, sa ductilité et sa ténacité. Par exemple, dans les alliages métalliques, la présence de phases fragiles ou de défauts dans la structure cristalline peut créer des points de départ idéaux pour l'initiation des fissures. De plus, les conditions de chargement, qu'elles soient constantes ou variables, jouent un rôle clé dans la manière dont les fissures se propagent. Un chargement cyclique à haute amplitude, par exemple, favorise une propagation plus rapide des fissures comparé à des chargements de faible amplitude [9].

En outre, la présence de réparations, notamment par l'application de patches composites, peut avoir un impact significatif sur le comportement de propagation des fissures. Les patches sont conçus pour redistribuer les contraintes et limiter la progression des fissures en augmentant la résistance locale du matériau réparé. Cependant, leur efficacité dépend de nombreux paramètres, comme leur rigidité, leur adhérence au substrat métallique et leur capacité à résister aux conditions de sollicitation à long terme [10]. L'adhésif utilisé pour fixer le patch joue également un rôle crucial : un adhésif performant peut non seulement garantir une bonne liaison entre le patch et le substrat, mais aussi absorber une partie des contraintes appliquées, réduisant ainsi l'intensité des forces concentrées au sommet des fissures. Par conséquent, l'amélioration des techniques de réparation, en particulier l'optimisation des matériaux utilisés pour les patches et les adhésifs, est un axe de recherche crucial pour renforcer la résistance à la propagation des fissures et améliorer la durabilité des composants métalliques, en particulier dans les applications où la résistance à la fatigue et la longévité des structures sont des critères essentiels [4, 11].

Les travaux antérieurs ont permis d'étudier divers aspects de la fatigue des matériaux, y compris les effets du taux de surcharge, la rigidité des patches réparateurs, et les propriétés des adhésifs utilisés. Ces recherches ont montré que l'optimisation de ces paramètres peut significativement améliorer la performance des réparations et ralentir la propagation des fissures.

Ce mémoire est structuré en plusieurs sections. La première partie est consacrée à une revue de la littérature, abordant la mécanique de la rupture, les mécanismes de fatigue, ainsi que les facteurs influençant la propagation des fissures. Le deuxième chapitre spécifique est également dédié aux matériaux composites et à l'impact des réparations par patches composites sur la tenue mécanique des structures endommagées. La troisième partie présente la méthodologie adoptée pour les simulations numériques, suivie des résultats obtenus et de leur analyse. Enfin, une conclusion synthétise les principales observations de l'étude et propose des perspectives pour des recherches futures dans ce domaine.

**Chapitre 1**  
**Mécanique de la Rupture**  
**et fatigue des matériaux**

## **1 Mécanique de la Rupture et Fatigue des Matériaux**

### **1.1 Introduction à la Mécanique de la Rupture**

La mécanique de la rupture joue également un rôle important dans l'étude des matériaux spécifiques comme l'aluminium, qui est largement utilisé dans de nombreuses industries en raison de ses propriétés exceptionnelles. L'aluminium est un matériau léger, avec une excellente résistance à la corrosion et de bonnes propriétés mécaniques, ce qui en fait un choix privilégié dans les secteurs aéronautique, automobile, et naval. Cependant, bien que l'aluminium offre de nombreux avantages, il présente également des défis uniques lorsqu'il s'agit de sa résistance à la rupture [12].

L'aluminium, étant un métal relativement mou et ductile, peut se fracturer sous certaines conditions de sollicitation, notamment lorsqu'il est soumis à des charges cycliques ou à des environnements extrêmes. La mécanique de la rupture appliquée à l'aluminium permet de mieux comprendre comment ses structures internes, telles que les grains cristallins et les joints de grains, influencent sa résistance à la fracture. Les défauts internes comme les inclusions, les microfissures ou la porosité peuvent jouer un rôle clé dans la propagation des fissures dans les matériaux en aluminium. Lorsqu'il est soumis à des contraintes externes, une fissure peut se former et se propager dans le métal, ce qui pourrait entraîner une rupture catastrophique si ces fissures ne sont pas détectées et traitées à temps [13].

Dans le domaine aéronautique, l'aluminium est particulièrement utilisé pour la fabrication des structures des avions, notamment les ailes et le fuselage. Étant donné la nécessité de maintenir un rapport résistance/poids optimal, les alliages d'aluminium sont souvent employés dans ces applications. Toutefois, ces alliages peuvent être sensibles à la propagation de fissures sous certaines conditions, telles que la fatigue mécanique, la corrosion par fissuration sous contrainte ou les effets combinés de charges thermiques et mécaniques. Par exemple, lors de l'utilisation prolongée d'un avion, de petites fissures peuvent se former dans les composants en aluminium en raison des variations de température et des cycles de charge. Ces fissures peuvent se propager lentement, ce qui augmente le risque de rupture sous une charge importante, d'où l'importance de

comprendre la mécanique de la rupture pour éviter ces défaillances. C'est pourquoi les tests de résistance à la rupture, tels que les essais de fatigue, sont cruciaux pour évaluer la durabilité des composants en aluminium utilisés dans l'aéronautique [14].

Dans l'industrie automobile, l'aluminium est de plus en plus utilisé dans la construction des carrosseries et des composants moteurs pour réduire le poids des véhicules et améliorer leur efficacité énergétique. Les pièces en aluminium sont souvent soumises à des forces d'impact lors des accidents, ce qui peut entraîner des ruptures ou des déformations permanentes. Par conséquent, une compréhension approfondie des mécanismes de rupture dans les alliages d'aluminium est nécessaire pour garantir que ces composants puissent supporter de telles forces sans compromettre la sécurité des occupants. De plus, l'aluminium peut être sujet à des phénomènes de fatigue, où des fissures microscopiques se forment à la suite de cycles de charge répétés. Ces fissures peuvent se propager lentement et, au fil du temps, conduire à une défaillance prématurée des pièces en aluminium. C'est pourquoi les ingénieurs doivent tenir compte des propriétés de fatigue de l'aluminium lors de la conception des véhicules [15].

En construction navale, l'aluminium est utilisé dans la fabrication de coques de navires et de sous-marins, notamment pour sa légèreté et sa résistance à la corrosion, surtout en milieux marins. Cependant, comme pour d'autres applications, l'aluminium peut souffrir de fissures sous des conditions extrêmes, notamment dans des environnements de haute pression ou en présence de contraintes thermiques. Les conditions de fatigue, combinées aux effets de l'environnement marin, peuvent entraîner la formation de fissures dans les structures en aluminium, ce qui peut compromettre l'intégrité des navires. Ainsi, la mécanique de la rupture appliquée à l'aluminium permet de mieux comprendre ces phénomènes de fissuration, afin d'améliorer les techniques de fabrication et de renforcer la sécurité des navires [16].

Les avancées récentes en matière de traitement de surface et de renforcement des alliages d'aluminium visent à améliorer leur résistance à la rupture, en réduisant la susceptibilité aux fissures et en augmentant leur ténacité. Des techniques telles que l'alliage de l'aluminium avec d'autres métaux, l'optimisation des processus de fabrication comme le

moulage et le formage, et l'application de traitements thermiques ou de revêtements de protection peuvent augmenter la résistance des composants en aluminium à la propagation des fissures. De plus, l'utilisation de méthodes modernes de détection des fissures, comme la radiographie ou les ultrasons, permet d'identifier les défauts internes avant qu'ils ne deviennent une menace pour l'intégrité des structures [17].

Bien que l'aluminium soit un matériau de choix pour de nombreuses industries grâce à sa légèreté, sa résistance à la corrosion et ses bonnes propriétés mécaniques, sa sensibilité à la rupture sous certaines conditions met en évidence l'importance de la mécanique de la rupture dans l'étude et l'amélioration de ses performances. La compréhension des mécanismes de rupture des alliages d'aluminium permet de concevoir des structures plus sûres et plus durables, tout en minimisant les risques de défaillance dans des applications critiques telles que l'aéronautique, l'automobile et la construction navale [18].

## **1.2 Modes de Rupture et Facteur d'Intensité des Contraintes**

### **1.2.1 Facteur d'intensité des contraintes et son importance**

Le facteur d'intensité des contraintes  $K$  est un concept fondamental pour évaluer la propagation des fissures dans un matériau sous contrainte. Lorsqu'un matériau présente une fissure, les forces externes appliquées induisent une concentration locale de contraintes à la pointe de cette fissure. Ce phénomène est d'autant plus critique dans les matériaux fragiles, où une propagation rapide de la fissure peut survenir, même sous des charges modérées. Le facteur  $K$  sert à quantifier cette concentration et à prédire si la fissure se propagera, permettant ainsi d'évaluer la stabilité et la sécurité de la structure [19].

L'importance du facteur  $K$  dépasse la simple analyse des fissures isolées. En effet, ce paramètre est également utilisé dans les études de fatigue, où les charges sont variables au cours du temps. Dans ce cas, la fissure se développe progressivement sous l'effet de cycles répétés de contrainte, ce qui peut rendre sa détection difficile. Le facteur  $K$  est aussi essentiel pour déterminer la ténacité du matériau, c'est-à-dire sa résistance à la propagation des fissures. Cette ténacité est souvent caractérisée par une valeur seuil  $K_c$ , au-delà de laquelle la fissure devient instable et se propage rapidement. Ainsi, l'analyse du facteur

d'intensité des contraintes permet de mieux prédire la défaillance des matériaux dans des contextes variés, qu'il s'agisse d'une sollicitation unique ou répétée.

### 1.2.2 Classification des modes de rupture

Les modes de rupture permettent de classer les différentes façons dont une fissure peut se propager sous l'effet de contraintes appliquées. Chaque mode de rupture est déterminé par la direction et la nature des forces agissant sur la fissure. Cette classification est essentielle, car elle influence le choix des matériaux et la conception des structures en fonction des types de sollicitation qu'elles subissent [20].

- **Le Mode I**, aussi appelé rupture d'ouverture, se produit lorsque la fissure est soumise à une contrainte de traction perpendiculaire à la surface de la fissure. Cela entraîne une ouverture de la fissure dans la direction normale. Ce mode est le plus souvent rencontré dans les matériaux fragiles, qui ont une faible capacité à se déformer plastiquement avant la rupture. La propagation de la fissure en Mode I est particulièrement critique, car elle peut se produire rapidement, compromettant ainsi la sécurité de la structure, notamment dans des secteurs comme l'aéronautique.
- **Le Mode II**, ou rupture de glissement en cisaillement, est caractérisé par des forces de cisaillement qui agissent parallèlement à la surface de la fissure. Dans ce cas, la fissure se propage horizontalement sous l'effet des contraintes de cisaillement. Ce mode est souvent observé dans les matériaux ductiles, comme les métaux, où les déformations plastiques sont plus significatives avant la rupture. Le Mode II peut se propager plus lentement que le Mode I, mais il est associé à des déformations plus complexes et à un risque de rupture progressive.
- **Le Mode III**, ou rupture de torsion, survient lorsqu'une fissure se propage sous l'effet de forces de torsion, provoquant un déchirement du matériau autour de la fissure. Ce mode est moins fréquent que les précédents, mais il peut se produire dans des situations où les composants subissent des moments de torsion ou des flexions importantes. Les déformations causées par le Mode III sont souvent plus complexes et difficiles à analyser, car elles impliquent une interaction entre les forces de torsion et les propriétés mécaniques du matériau.

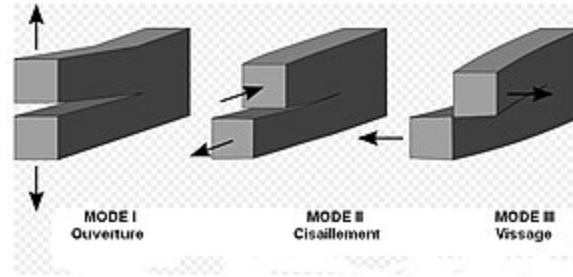


Figure 1 Classification des modes de rupture

Ces trois modes de rupture ne se produisent pas toujours indépendamment dans des structures réelles. Par exemple, une pièce métallique exposée à des charges combinées (traction et torsion) pourrait voir sa fissure se propager selon plusieurs modes, rendant l'analyse de la rupture plus complexe.

### 1.2.3 Effets combinés des modes de rupture

Dans la pratique, les matériaux sont souvent soumis à des charges multiples qui induisent des modes de rupture combinés. Cela signifie que plusieurs types de contraintes peuvent agir simultanément sur une fissure, ce qui complique la prédiction de sa propagation. Par exemple, une pièce métallique soumise à une traction importante (Mode I) peut également être affectée par des forces de torsion (Mode III), ce qui modifie la manière dont la fissure se propage. Les effets combinés rendent l'analyse de la rupture plus complexe, car la fissure peut se développer de manière non linéaire et dans différentes directions en fonction de l'intensité des contraintes appliquées [21].

Les matériaux composites, par exemple, présentent souvent des propriétés anisotropes, ce qui signifie que la fissure peut se propager différemment en fonction de la direction des forces appliquées. Cette interaction entre différents modes de rupture rend l'évaluation du comportement des matériaux plus difficile, mais elle est essentielle pour garantir que la structure résistera aux sollicitations auxquelles elle est exposée. Dans des secteurs comme l'aéronautique, où les pièces subissent de multiples types de charges (pression, torsion, vibration), l'étude des effets combinés des modes de rupture devient indispensable pour éviter des défaillances prématurées.

### 1.2.4 Influence de la géométrie de la fissure et des conditions de chargement

La géométrie de la fissure est un facteur clé qui influence la manière dont elle se propage sous des contraintes appliquées. Par exemple, une fissure en forme de V présente une concentration accrue des contraintes à sa pointe, ce qui favorise la propagation rapide de la fissure, surtout sous des charges de traction. En revanche, une fissure arrondie ou plus diffuse répartit mieux les contraintes, ce qui peut ralentir la propagation de la fissure et prolonger la durée de vie du matériau.

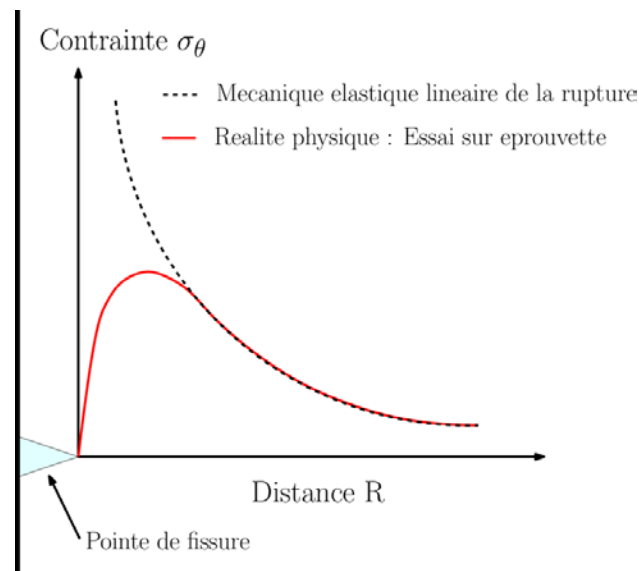


Figure 2 Répartition des contraintes au point de fissure [22]

Les conditions de chargement jouent également un rôle important dans le comportement des fissures. Les charges statiques appliquées à un matériau peuvent entraîner une rupture brutale lorsque la fissure atteint une taille critique. En revanche, les charges cycliques, comme celles rencontrées dans les pièces mécaniques soumises à des variations de charge, peuvent provoquer la fatigue du matériau. Dans ce cas, des fissures de fatigue se forment lentement et se propagent au fil du temps sous l'effet de cycles répétés de contrainte. Ce type de rupture est plus difficile à prédire, car il se développe souvent lentement et peut rester invisible jusqu'à ce qu'il atteigne une taille critique.

Les conditions environnementales, telles que l'humidité ou la température, peuvent également avoir un impact sur la propagation des fissures. Dans des environnements extrêmes, comme ceux rencontrés dans les avions ou les moteurs de haute performance, les matériaux doivent résister à des contraintes combinées de température et de pression, ce qui peut accélérer la propagation des fissures. La compréhension de l'impact de la géométrie des fissures et des conditions de chargement est donc cruciale pour la conception de structures sûres et durables, capables de résister aux contraintes qu'elles rencontrent au fil du temps.

### 1.3 Propagation des Fissures et Endommagement Progressif

#### 1.3.1 Initiation des Fissures et Mécanismes de Nucléation

La formation initiale des fissures est le résultat d'une sollicitation mécanique excessive ou d'un défaut dans la microstructure d'un matériau. L'initiation des fissures se produit généralement au niveau des sites de faiblesse, où les contraintes sont concentrées. Il existe plusieurs mécanismes qui favorisent la nucléation des fissures :

- **Fatigue cyclique** : Lorsque le matériau est soumis à un chargement récurrent, des fissures microscopiques se forment et se propagent progressivement à chaque cycle de déformation. Cela est particulièrement visible dans les métaux soumis à des cycles de traction et de compression répétés, comme dans les composants de moteurs ou de structures aéronautiques. Ce mécanisme de fissuration se produit même à des niveaux de contrainte inférieurs à la résistance ultime du matériau.
- **Déformation plastique et cisaillement** : Lorsqu'une contrainte de cisaillement dépasse la limite de déformation plastique du matériau, des dislocations se forment au niveau de la microstructure, créant ainsi des points de faiblesse qui peuvent évoluer en fissures. Ce phénomène est particulièrement important dans les matériaux ductiles qui subissent de grandes déformations avant de se rompre.
- **Concentrations de contraintes dues à des défauts ou inclusions** : La présence de défauts internes, comme des pores, des inclusions non métalliques ou des hétérogénéités dans la microstructure, peut concentrer localement les contraintes, créant des points où la fissuration est initiée. Les matériaux avec des concentrations

de contraintes telles que les soudures ou les jonctions peuvent être particulièrement vulnérables à ce type de fissuration.

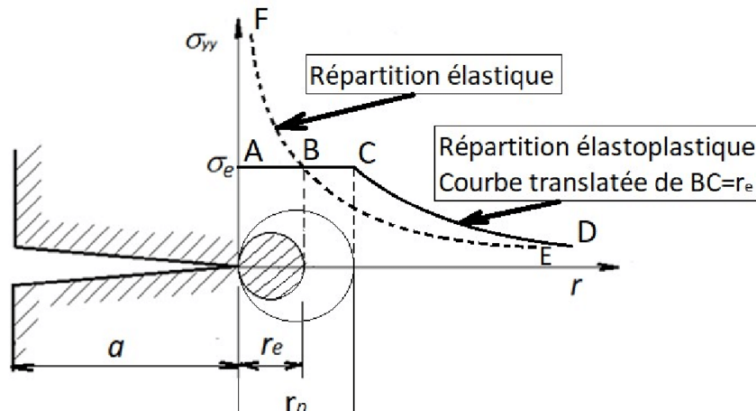


Figure 3 Distribution des contraintes élastiques et élastoplastiques autour d'une fissure dans un matériau[23]

### 1.3.2 Propagation Stable et Instable des Fissures

Une fois qu'une fissure est initiée, sa propagation dépend de plusieurs facteurs : la nature du matériau, les contraintes appliquées, et la géométrie de la fissure. La propagation des fissures peut être classée en deux catégories distinctes : stable et instable.

- **Propagation stable** : La fissure se propage de manière lente et régulière. Elle se développe de façon contrôlée, souvent sous l'effet de charges continues ou répétées, mais avec une déformation plastique qui absorbe l'énergie sans provoquer de rupture catastrophique. Ce type de propagation est caractéristique des matériaux ductiles tels que certains alliages métalliques. La fissure se développe de manière progressive, permettant au matériau de se déformer et de répartir l'énergie de manière plus uniforme.
- **Propagation instable** : La fissure atteint un point où son extension devient extrêmement rapide, souvent en raison d'une surcharge ou de la propagation d'une fissure existante au-delà de sa zone de contrôle. Cette rupture se produit généralement sans déformation plastique préalable et est caractéristique des matériaux fragiles comme la fonte ou certains composites. Une fois que la fissure

atteint une certaine taille, elle peut se propager de manière quasi instantanée, entraînant une rupture complète du matériau.

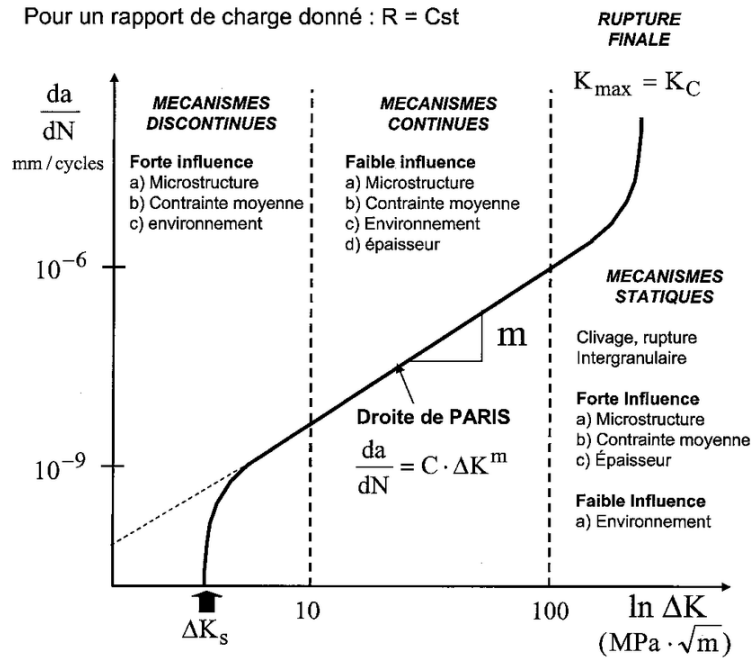


Figure 4 Diagramme de Croissance des Fissures en Fatigue : Analyse des Mécanismes de Propagation Stable et Instable Selon la Loi de Paris[24]

### 1.3.3 Effets des Microstructures sur la Propagation des Fissures

La résistance à la propagation des fissures est grandement influencée par la microstructure du matériau. Chaque aspect de la microstructure joue un rôle dans la manière dont les fissures se propagent :

- **Taille des grains et frontières de grains** : Un matériau avec des grains fins présente une plus grande résistance à la fissuration en raison de l'effet "barrière" des frontières de grains. Ces frontières limitent le mouvement des dislocations et ralentissent la propagation des fissures. Les matériaux à grains gros, en revanche, sont plus susceptibles à la propagation rapide des fissures car les frontières de grains sont plus espacées, offrant moins de résistance aux fissures.
- **Phases secondaires et inclusions** : Certaines phases secondaires, comme les carbures ou les céramiques, peuvent bloquer la propagation des fissures. Ces phases

secondaires agissent comme des obstacles et dispersent l'énergie de la fissure. Cependant, des inclusions telles que des oxydes ou des impuretés peuvent servir de points de nucléation pour les fissures, accélérant ainsi leur formation. L'impact de ces inclusions dépend de leur taille, de leur distribution et de leur compatibilité avec la phase principale du matériau.

- **Ductilité et dureté** : Les matériaux ductiles, comme l'aluminium ou certains aciers, peuvent se déformer de manière significative avant que des fissures ne se propagent. Cette capacité à se déformer plastiquement permet de dissiper l'énergie de manière progressive. En revanche, des matériaux plus durs, comme les céramiques ou certains alliages d'acier à haute résistance, ont une plus grande susceptibilité à la fracture fragile, où la fissuration se produit rapidement, avec peu ou pas de déformation plastique.

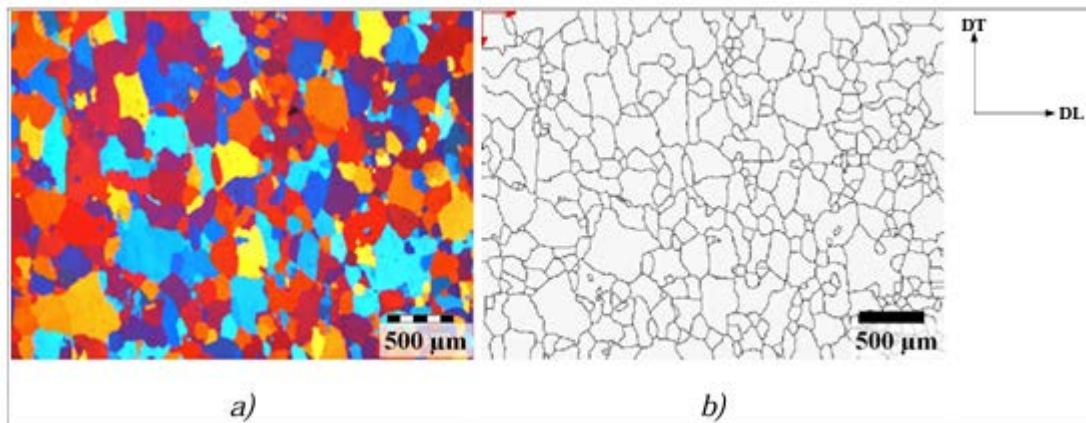


Figure 5 Structure micrographique des grains pour une tôle d'épaisseur 2mm sur la face DN– a) photographie (grossissement X5) – b) Image typique de numérisation des joints grossissement x5 [25]

### 1.3.4 Relations entre Propriétés Mécaniques et Résistance à la Fissuration

Les propriétés mécaniques d'un matériau jouent un rôle central dans la résistance à la fissuration. La compréhension de cette relation permet d'anticiper le comportement du matériau sous sollicitation.

- **Limite d'élasticité et ténacité** : La ténacité à la rupture est une propriété essentielle pour la résistance à la fissuration. Elle mesure la capacité d'un matériau à résister à l'extension des fissures avant de se briser. Les matériaux ayant une grande limite

d'élasticité et une haute ténacité sont capables d'absorber une grande quantité d'énergie avant la propagation de fissures critiques. Ces matériaux montrent une propagation stable et contrôlée des fissures.

- **Module d'élasticité et rigidité** : Un matériau avec un module d'élasticité élevé est rigide et résiste moins à la déformation sous charge. Cette rigidité augmente la probabilité de propagation rapide des fissures, car le matériau n'a pas la capacité de se déformer suffisamment pour dissiper l'énergie. En revanche, un faible module d'élasticité permet plus de flexibilité et de déformation, retardant ainsi la propagation de fissures.
- **Comportement en fatigue** : Le comportement des matériaux en fatigue est crucial dans des applications soumises à des charges cycliques, comme les ponts, les ailes d'avion ou les moteurs. Un matériau avec une faible résistance à la fatigue développera rapidement des fissures sous de nombreux cycles de sollicitation, tandis qu'un matériau résistant à la fatigue présentera une propagation lente des fissures, même sous stress répétitif.

### 1.3.5 Effets des Contraintes Résiduelles et Traitements de Surface

Les contraintes résiduelles et les traitements de surface jouent un rôle essentiel dans la résistance à la fissuration des matériaux. Ces contraintes peuvent être générées durant les processus de fabrication et influencent directement la propagation des fissures sous diverses sollicitations. Les traitements thermiques, mécaniques et de surface sont couramment utilisés pour optimiser les propriétés des matériaux, mais leur effet sur la fissuration dépend des modifications qu'ils apportent à la microstructure et aux contraintes internes. Une gestion efficace de ces facteurs est cruciale pour éviter la dégradation prématurée des matériaux, particulièrement dans des applications critiques où la résistance à la fissuration est primordiale[26, 27].

- **Origine des contraintes résiduelles** : Les contraintes résiduelles sont induites par divers procédés de fabrication, tels que le soudage, l'usinage et la mise en forme. Par exemple, lors du soudage, les variations de température créent des déformations plastiques qui génèrent des tensions résiduelles pouvant entraîner des fissures.

- L'usinage, quant à lui, génère des contraintes dues aux forces de coupe, ce qui peut affaiblir la surface du matériau et le rendre plus vulnérable aux fissures. Lors de la mise en forme, comme l'emboutissage ou le forgeage, des déformations permanentes peuvent introduire des contraintes internes qui altèrent la réponse du matériau sous sollicitation, affectant sa résistance à la fissuration[28, 29].
- **Impact des traitements thermiques et mécaniques sur la fissuration** : Les traitements thermiques et mécaniques influencent les propriétés des matériaux, mais peuvent aussi affecter leur comportement en termes de fissuration. Par exemple, la trempe, qui vise à augmenter la dureté du matériau, peut induire des contraintes internes importantes qui facilitent l'apparition de fissures. De même, les traitements mécaniques, comme la déformation plastique, peuvent améliorer la résistance du matériau en modifiant sa microstructure, mais génèrent également des contraintes résiduelles. Ces traitements, bien que renforçant la résistance, doivent être soigneusement contrôlés pour éviter une propagation prématurée des fissures[30, 31].
  - **Effets des traitements de surface** : Les traitements de surface, tels que le grenailage, la trempe ou l'anodisation, sont des techniques utilisées pour améliorer la résistance des matériaux à la fissuration. Le grenailage crée une couche de contraintes résiduelles compressives à la surface, ce qui limite l'initiation et l'expansion des fissures. Ce traitement est particulièrement efficace dans les composants soumis à des charges répétitives. L'anodisation modifie la surface de certains matériaux, comme l'aluminium, en renforçant la couche extérieure, ce qui augmente sa résistance à la fissuration et à la corrosion. Ces traitements permettent ainsi d'améliorer la durabilité et la performance du matériau, notamment dans des environnements où les fissures superficielles sont une menace potentielle[32].

### 1.3.6 Facteurs Influent sur la Propagation des Fissures

Il est essentiel d'évaluer la résistance à la propagation des fissures de fatigue pour toute structure soumise à des charges cycliques. Comme la présence de défauts dans les pièces est fréquente, il est crucial de comprendre leur évolution potentielle et d'analyser leur comportement face à la fatigue. Dans ce contexte, nous examinerons les principaux

facteurs influençant l'apparition et l'évolution des fissures de fatigue. Ces facteurs, qu'ils soient d'origine mécanique ou microstructurale, ont un impact variable en fonction du domaine de fissuration étudié et des conditions d'essai. Ils peuvent être classés en deux groupes : les paramètres intrinsèques (tels que la microstructure et le comportement élastoplastique) et les paramètres extrinsèques (tels que le rapport de charge et l'environnement). Par ailleurs, certaines interactions entre ces paramètres peuvent accentuer ou modifier leur influence sur le processus de fissuration[33].

## 1.4 Propagation des fissures sous chargement variable

### 1.4.1 Influence du rapport de charge

Une augmentation du rapport de charge  $R$  entraîne une accélération de la propagation des fissures pour une même valeur de  $K$ , tout en conservant des courbes  $\frac{da}{dN} - \Delta K$  de forme similaire [34, 35]. En d'autres termes, un matériau soumis à un rapport de charge plus élevé présente une moindre résistance à la fissuration. Cependant, cet effet peut être favorable lorsqu'on exprime la durée de vie en fonction de la contrainte maximale.

Lorsqu'on représente la vitesse de propagation en tenant compte uniquement des contraintes efficaces  $\frac{da}{dN} - \Delta K_{eff}$ , on observe un comportement indépendant du rapport de charge, comme illustré dans la Figure 6. Ainsi, le concept de fermeture de fissure permet de neutraliser l'influence du niveau moyen de contrainte appliquée. À cet égard, Elber a suggéré de remplacer  $K$  par  $K_{eff}$  dans la loi de Paris pour mieux décrire la propagation des fissures.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{eff})^m \quad 1$$

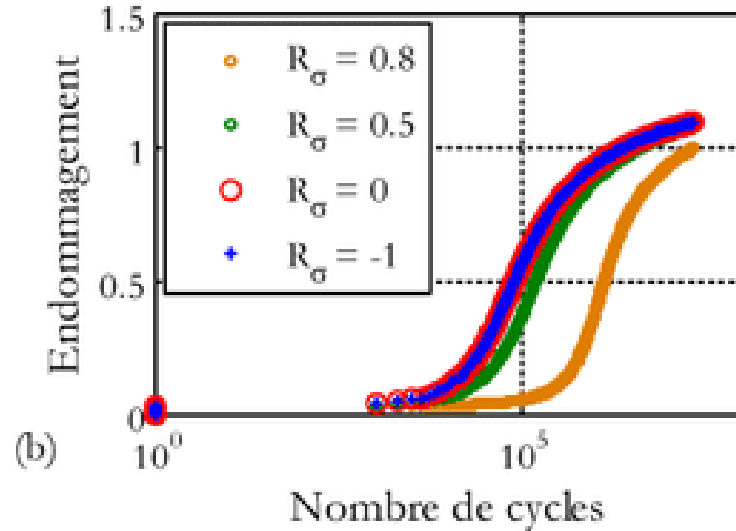


Figure 6 Influence du rapport de charge sur la durée vie

#### 1.4.2 Influence de l'environnement

L'influence de l'environnement sur les matériaux se manifeste par l'action des milieux corrosifs (air humide, oxygène, vapeur d'eau, hydrogène), affectant la durée de vie, la propagation des fissures et les surfaces de rupture [36]. La fatigue-corrosion résulte de l'interaction entre un environnement agressif et des charges cycliques, réduisant d'autant plus la durée de vie que la contrainte est élevée [37]. Même à faibles charges, le phénomène peut apparaître, avec une contribution accrue de la corrosion.

Des études sur divers matériaux (titane, tantale, niobium, Ti6Al-7Nb) ont montré une dégradation significative des performances en fatigue en milieu corrosif [38]. Pour l'acier AISI 1018, la propagation des fissures est plus lente en eau traitée qu'en eau domestique, tandis que pour l'aluminium 7178-T6, elle est plus rapide en milieu humide qu'en sec, la corrosion par exfoliation amplifiant ce phénomène à faibles  $\Delta K$ . De plus, les alliages d'aluminium 707 présentent un seuil de fissuration plus bas en air qu'en vide, en raison de la fragilisation par l'hydrogène [39].

En général, la résistance à la fissuration est meilleure sous vide qu'en air, bien que l'oxydation favorise la fermeture des fissures. Enfin, une température plus élevée et des charges accrues accélèrent la fatigue, tandis que des conditions plus froides et des charges faibles prolongent la durée de vie [40].

### 1.4.3 Influence de surcharge

Les structures en service subissent des chargements dont l'amplitude évolue dans le temps, ce qui influence la propagation des fissures. Ces variations peuvent soit accélérer, soit ralentir leur progression. Par exemple, l'application soudaine d'une surcharge lors d'un essai de propagation de fissure sous un chargement d'amplitude constante entraîne un ralentissement, voire un arrêt temporaire de la fissure, nécessitant un grand nombre de cycles avant sa reprise Figure 6. Ce phénomène est attribué à la formation d'une zone plastique étendue et à l'augmentation des contraintes résiduelles de fermeture, ce qui accroît la contrainte d'ouverture. À l'inverse, une sous-charge peut provoquer une accélération de la fissuration.

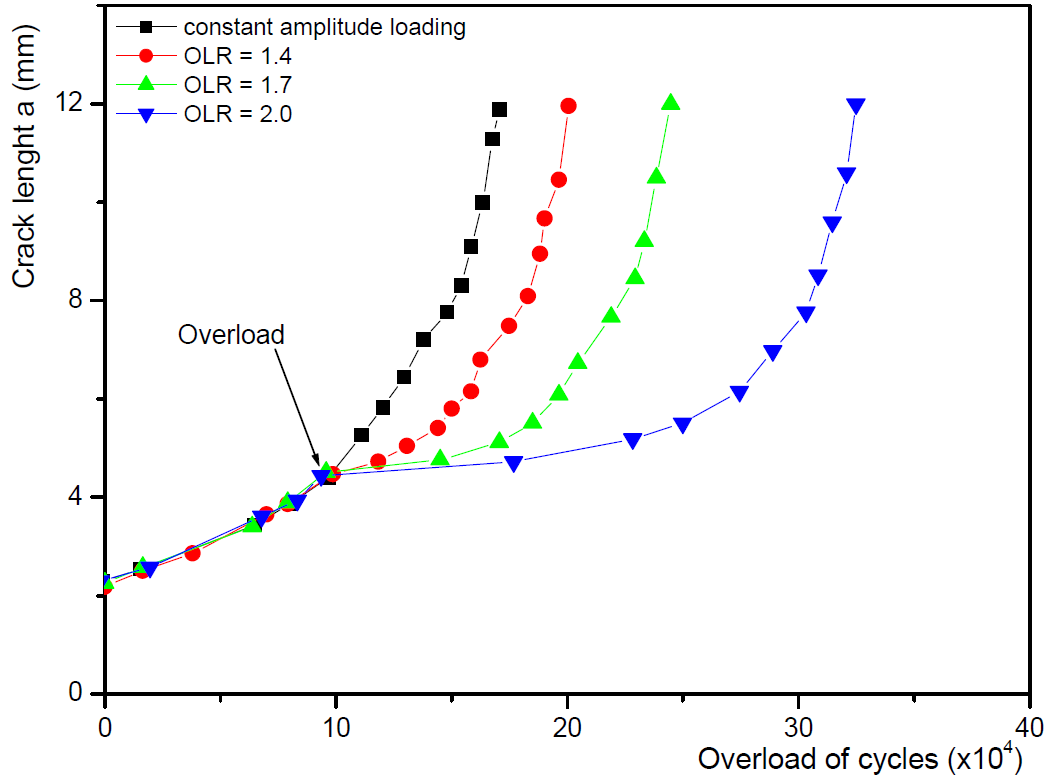


Figure 7 Comparaison de l'effet du rapport de surcharge (ORL) sur la croissance de fissure sous chargement cyclique -Évolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de cycles [41]

Grâce à son effet retardateur, la surcharge peut être envisagée comme un moyen de ralentir l'évolution d'une fissure et ainsi prolonger la durée de vie en fatigue. Il est généralement admis que l'ampleur du retard augmente avec l'intensité de la surcharge [5, 41, 42] a

montré que ce retard est dû à plusieurs mécanismes combinés : contraintes résiduelles dans la zone plastique, fermeture induite par la plasticité et modification du trajet de la fissure. Desforges et al [43] a étudié ces effets sur un acier E550 en mesurant les contraintes en pointe de fissure après une surcharge, à l'aide de la diffraction des rayons X. Il a observé que les surcharges répétées modifient le champ de contrainte, générant des compressions qui réduisent la contrainte en pointe de fissure. Toutefois, lorsqu'une sous-charge précède une surcharge, son influence sur le retard est limitée. Inversement, si la sous-charge suit la surcharge, l'effet retardateur est atténué [43].

L'effet d'une surcharge appliquée à une fissure sous chargement constant peut se traduire par un ralentissement, un arrêt temporaire, voire un blocage définitif. Il existe un seuil minimal de surcharge ( $\sigma_{\min}$ ) en dessous duquel aucun retard n'est observé, ainsi qu'un seuil maximal ( $\sigma_{\max}$ ) au-delà duquel la fissure est définitivement stoppée [44].

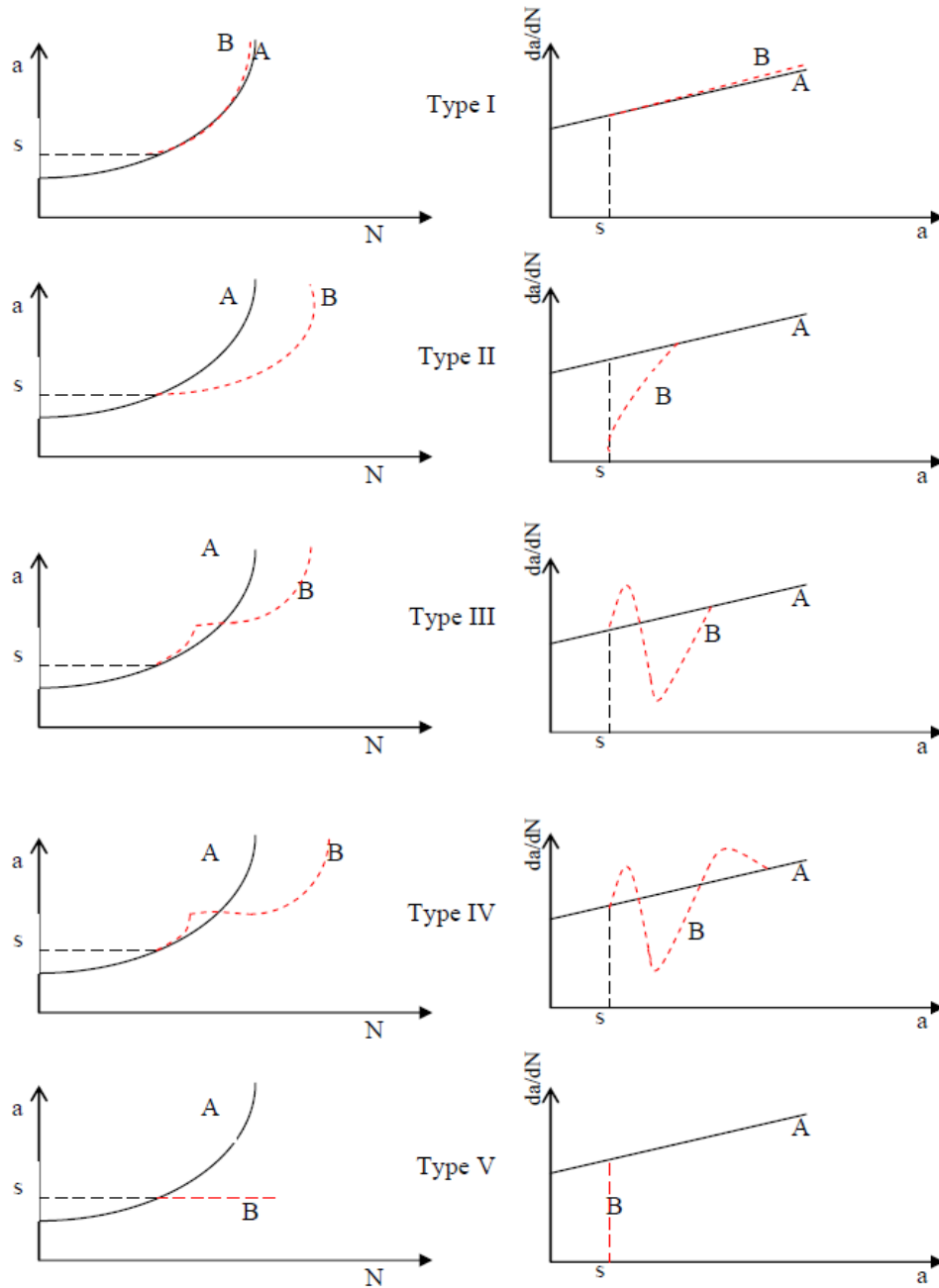


Figure 8 Différents types du comportement au retard après application des surcharges [44]

## 1.5 Fatigue des Matériaux et model de propagation des fissures

### 1.5.1 Introduction à la Fatigue

La fatigue des matériaux constitue un phénomène critique en ingénierie mécanique, caractérisé par une dégradation progressive de l'intégrité structurale sous l'effet de charges cycliques. Ce processus, souvent imperceptible à l'œil nu, conduit à l'amorçage et à la propagation de fissures, menant in fine à la rupture brutale de la structure. Les études sur la fatigue se divisent en deux catégories principales : la fatigue à grand nombre de cycles (FGN), associée à des contraintes élastiques répétées sur des milliers ou millions de cycles, et la fatigue à faible nombre de cycles (FFN), impliquant des déformations plastiques localisées sur quelques centaines ou milliers de cycles. Ces mécanismes diffèrent fondamentalement par leur relation contrainte-déformation, leur énergie dissipée et leurs modèles prédictifs. Des exemples emblématiques incluent la défaillance de ponts métalliques soumis à des vibrations continues, ou la fissuration de pièces aéronautiques sous charges thermomécaniques cycliques. Une compréhension approfondie de ces phénomènes est essentielle pour optimiser la durée de vie des structures et prévenir les catastrophes industrielles.

### 1.5.2 Model décrivant la Propagation des Fissures

- **Les différents modèles existants**

Pour analyser de manière rigoureuse l'évolution des fissures dans les matériaux, divers modèles ont été élaborés au fil des années. Chacun d'eux repose sur des principes particuliers et cherche à reproduire au mieux le comportement réel de la fissuration en fonction du type de sollicitation appliquée. Ci-dessous, un résumé des approches les plus fréquemment adoptées dans ce domaine.

- **Loi de Paris :**

Dans le but de prolonger la durée de vie des matériaux et de garantir une conception plus sûre et plus économique, le chercheur Paris et ses collaborateurs ont étudié la relation entre

le facteur d'intensité de contrainte  $K$  et le taux de propagation des fissures  $\frac{da}{dN}$  sous chargement cyclique. Cette étude a conduit à la formulation de l'expression bien connue sous le nom de « loi de Paris » :

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad 2$$

Où :

- $\Delta K$  : Représente la différence entre les valeurs maximale et minimale du facteur d'intensité de contrainte au cours d'un cycle de chargement, et s'exprime par la relation:  $\Delta K = K_{max} - K_{min}$
- $K_{max}$  : Facteur d'intensité de contrainte maximal pendant le cycle.
- $K_{min}$  : Facteur d'intensité de contrainte minimal pendant le cycle.

Cette équation montre que  $\Delta K$  constitue le principal paramètre influençant la vitesse de propagation des fissures : plus cette différence est grande, plus la propagation est rapide.

- $C$  et  $m$  sont des constantes expérimentales, spécifiques au matériau et aux conditions de chargement, déterminées à partir d'essais en laboratoire.

Bien que la loi de Paris se distingue par sa simplicité et sa facilité d'application, elle présente certaines limites dans les situations complexes telles que les variations de chargement. En effet, elle ne prend en compte que la variation instantanée du facteur d'intensité de contrainte  $\Delta K$ , sans considérer les effets cumulatifs des cycles de chargement antérieurs [45].

### 1.5.3 Model décrivant la Propagation des Fissures après application de surcharge

#### a. Modèle de Wheeler

Parmi les modèles les plus simples permettant de modéliser le retard de propagation induit par une surcharge, on trouve celui proposé par Wheeler (1972). Ce modèle repose sur l'idée

que la vitesse de propagation des fissures est temporairement réduite après l'application d'une surcharge. Cette réduction est modélisée par une fonction de retard  $\phi$ , telle que :

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{\text{retarde}} = \phi \left(\frac{da}{dN}\right)_{\text{non retarde}} \quad 3$$

La fonction retard est définie comme suit :

$$\phi = \left(\frac{Z_{pi}}{\lambda}\right)^{m_w} = \left(\frac{Z_{pi}}{a_0 + Z_{psurch} - a_i}\right)^{m_w} \quad 4$$

- $Z_{pi}$  : Étant la taille de la zone plastique due au chargement de base,
- $Z_{psurch}$  : De la zone plastique due à la surcharge.
- $m_w$  : Un paramètre matériau déterminé expérimentalement.
- $a_0$  : Est la longueur initiale de la fissure.
- $a_i$  Est la longueur de la fissure après surcharge,

### b. Modèle de Willenborg

Le modèle de Willenborg, dérivé de celui de Wheeler, suppose que la surcharge induit des contraintes résiduelles de compression qui retardent temporairement la propagation des fissures de fatigue. Il utilise une forme modifiée de la loi de Paris, dans laquelle un facteur d'intensité de contrainte effectif  $\Delta k_{eff}$  est introduit :

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

Avec :

$$\Delta k_{eff} = K_{max-eff} - K_{min-eff} \quad 6$$

Et :

$$K_{max-eff} = K_{max} - K_r \quad 7$$

$$K_{min-eff} = K_{min} - K_r \quad 8$$

Le terme  $K_r$  représente l'effet des contraintes résiduelles dues à la plastification locale suite à la surcharge. Ce modèle est principalement adapté aux cas de surcharge, mais il ne prend pas en compte l'effet accélérateur des sous-charges.

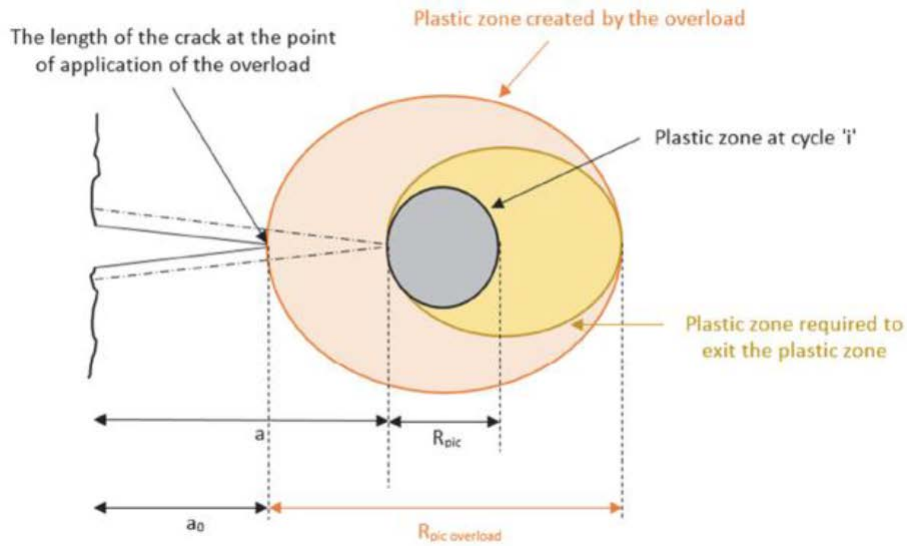


Figure 9 Modèle de Willenborg décrivant le retard après surcharge

**c. Modèle généralisé (Gallager & Hughes) :**

Pour étendre l'applicabilité du modèle aux cas combinant surcharge et sous-charge, Gallager et Hughes ont proposé une version généralisée du modèle de Willenborg. Ce modèle introduit un paramètre supplémentaire : le rapport d'arrêt de surcharge (SOLR), une propriété intrinsèque du matériau.

Dans ce cadre, le facteur d'intensité effectif permet de recalculer le rapport de charge  $R_{eff}$  selon :

$$R_{eff} = \frac{K_{min-eff}}{K_{max-eff}} \tag{9}$$

La valeur de  $K_r$  est déterminée par :

$$K_r = \varphi \left( K_{max(ol)} \sqrt{1 - \frac{a-a(ol)}{r_p}} - K_{max} \right) \tag{10}$$

Où :

-  $a$  est la longueur actuelle de la fissure,

-  $a(OL)$  la longueur au moment de la surcharge,

-  $r_p(OL)$  la zone plastique développée par la surcharge, donnée par :

$$r_p(OL) = (K_{max(ol)}/\sigma_{0.2})^2 \times (1 / \alpha\pi) \quad 11$$

Le facteur  $\varphi$  s'exprime comme suit :

$$\varphi = (1 - \Delta K_{th} / K_{max}) / (SOLR - 1) \quad 12$$

Ce modèle, notamment intégré dans le logiciel AFGROW, permet une prédiction plus précise de la durée de vie en fatigue des composants soumis à des séquences de chargement complexes incluant des surcharges et des sous-charges [10].

# **Chapitre 2**

## **Généralités sur les composites**

## **2 Généralités sur les matériaux composites**

### **2.1 Introduction**

Les matériaux composites sont des matériaux d'exception conçus en combinant plusieurs composants distincts, dans le but d'atteindre des performances supérieures à celles des matériaux traditionnels. Cette combinaison se compose généralement d'un renfort, souvent sous forme de fibres, et d'une matrice qui enrobe ces fibres pour assurer leur cohésion et la transmission des efforts au sein du matériau. La structure composite, grâce à cette architecture, offre des avantages considérables tels qu'une légèreté accrue, une résistance mécanique supérieure et une durabilité remarquable. Ces propriétés font des composites des matériaux de choix dans des secteurs industriels exigeants comme l'aéronautique, l'automobile, le génie civil et les équipements sportifs, où les performances des matériaux sont essentielles pour répondre aux contraintes techniques et environnementales.

Les matériaux composites offrent une polyvalence qui leur permet de répondre à des besoins spécifiques dans une variété d'applications. Par exemple, les fibres de carbone, connues pour leur résistance exceptionnelle, sont souvent utilisées dans des environnements où la performance mécanique est primordiale, tandis que les fibres de verre, plus économiques, sont couramment utilisées pour des applications industrielles de moindre contrainte. La matrice, qu'elle soit thermoplastique ou thermodurcissable, peut être choisie en fonction des besoins particuliers de l'application, offrant ainsi une flexibilité qui permet de personnaliser les propriétés des matériaux composites.

Dans le domaine des réparations des structures métalliques, l'utilisation de patches composites s'est imposée comme une solution efficace pour prolonger la durée de vie des matériaux endommagés, notamment dans les secteurs où les composants sont soumis à des sollicitations cycliques répétées, comme dans le cas de l'alliage d'aluminium. Les réparations par patches composites consistent à appliquer un matériau composite sur une zone endommagée afin de redistribuer les contraintes et limiter la propagation des fissures. Ces patches peuvent être renforcés de fibres et collés avec des adhésifs spécifiques, permettant ainsi de restaurer les propriétés mécaniques du matériau réparé. En particulier,

l'adhésif graphite-époxy est couramment utilisé en raison de ses excellentes propriétés de résistance à la fatigue et de durabilité, qui sont cruciales dans des applications telles que celles de l'aéronautique et de l'automobile.

L'alliage d'aluminium, en particulier l'aluminium 6061-T6, est largement utilisé dans des domaines où la légèreté, la résistance à la corrosion et la résistance mécanique sont requises, comme dans les structures aéronautiques et automobiles. Cependant, cet alliage, bien qu'excellent dans de nombreuses applications, est susceptible de se détériorer sous des charges cycliques répétées, ce qui entraîne la formation de fissures. Dans ce contexte, les réparations par patches composites offrent une solution efficace pour prolonger la durée de vie de l'aluminium, en retardant la propagation des fissures et en renforçant les zones endommagées. L'application de patches composites, en particulier ceux renforcés avec des adhésifs résistants à la fatigue, permet de maintenir l'intégrité structurelle de l'aluminium et d'améliorer sa durabilité, même sous des conditions de sollicitation sévères.

Ainsi, l'intégration de patches composites dans les réparations des structures métalliques, et plus particulièrement de l'aluminium, représente une méthode prometteuse pour maintenir la performance des matériaux tout en prolongeant leur durée de vie dans des environnements industriels exigeants.

## **2.2 Les constituants du matériau composite**

Un matériau composite est constitué de deux éléments fondamentaux qui lui confèrent ses propriétés mécaniques et structurelles. Le premier est le renfort, qui se présente sous différentes formes, notamment des fibres de carbone, de verre ou d'aramide, ainsi que des particules ou des structures tissées. Il a pour principale fonction d'apporter au matériau une résistance accrue et une rigidité optimisée. Le second élément est la matrice, qui joue un rôle essentiel dans la cohésion de l'ensemble en maintenant les renforts en place et en assurant la transmission des charges mécaniques. Selon les besoins spécifiques de l'application, la matrice peut être constituée de polymères, de métaux ou de céramiques, chacun offrant des propriétés distinctes en termes de résistance thermique, chimique et mécanique[46].

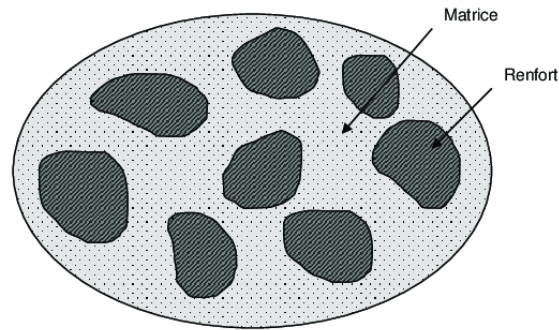


Figure 10 Matrice Renforcée[46]

Ces constituants influencent directement les performances du composite, en déterminant notamment sa résistance à la traction, sa rigidité et sa tenue en environnement agressif.

### 2.2.1 Les matrices

La matrice est un élément essentiel du composite puisqu'elle enveloppe les fibres de renfort et leur permet de travailler ensemble pour supporter les charges appliquées. Elle joue également un rôle protecteur contre les agressions extérieures, telles que l'humidité, la température et les produits chimiques.

Les matrices utilisées dans les composites se classent en trois grandes catégories :

- **Les matrices thermoplastiques** : Les matrices thermoplastiques sont des polymères capables de se ramollir sous l'effet de la chaleur et de retrouver leur solidité en refroidissant. Cette propriété leur confère une grande facilité de mise en œuvre et une recyclabilité accrue. Elles sont appréciées pour leur résistance aux chocs, leur flexibilité et leur capacité à supporter des environnements chimiques agressifs. Parmi les plus utilisées, on trouve le polypropylène (PP), le polyamide (PA) et le polyétheréthercétone (PEEK).



Figure 11 Support en composite à matrice thermoplastique renforcé par des fibres de carbone[47]

- **Les matrices thermodurcissables** : Les matrices thermodurcissables sont des polymères qui durcissent de manière irréversible sous l'effet de la chaleur ou d'un agent catalyseur. Elles offrent une excellente rigidité, une bonne stabilité dimensionnelle et une résistance élevée aux températures extrêmes. Ces caractéristiques en font un choix privilégié pour les applications structurelles exigeantes, notamment dans l'aéronautique et l'automobile.



Figure 12 Gaine de protection en composite à matrice thermodurcissable renforcée pour câbles électriques

- **Les matrices élastomères** : Les matrices élastomères se distinguent par leur grande élasticité, ce qui leur permet d'absorber les chocs et les vibrations tout en conservant leur forme initiale. Elles sont principalement utilisées dans des applications nécessitant une bonne résistance à la déformation et à l'usure, comme les joints d'étanchéité, les revêtements et les éléments amortissants.



Figure 13 Joints d'étanchéité en composite à matrice élastomère renforcée

## 2.2.2 Les résines

Les résines sont les composants principaux des matrices polymères utilisées dans les composites. Elles assurent l'adhésion entre les renforts et influencent directement les propriétés mécaniques du matériau final.

### 2.2.2.1 Les divers types de résine

Les résines se classent en plusieurs catégories, parmi lesquelles les résines thermodurcissables, thermoplastiques et thermostables. Chacune possède des propriétés spécifiques qui la rendent adaptée à différentes applications industrielles.

- **Les résines thermodurcissables** : Les résines thermodurcissables sont largement utilisées en raison de leur rigidité et de leur résistance aux sollicitations mécaniques et thermiques. Une fois durcies, elles ne peuvent plus être ramollies par la chaleur, ce qui les rend très stables mais non recyclables. Elles sont couramment utilisées dans l'industrie aéronautique, les équipements sportifs et les applications nécessitant des performances mécaniques élevées.
- **Les résines polyesters** : Les résines polyesters sont les plus répandues dans l'industrie des composites grâce à leur faible coût et leur facilité de mise en œuvre. Elles possèdent une bonne résistance chimique et mécanique, bien que leur rigidité soit inférieure à celle des résines époxydes. Elles sont principalement utilisées dans la construction navale, les équipements de loisirs et l'automobile.
- **Les résines époxydes** : Les résines époxydes sont parmi les plus performantes des résines thermodurcissables. Elles se distinguent par leur résistance mécanique

exceptionnelle, leur adhérence élevée aux renforts et leur excellente tenue thermique et chimique. Très utilisées dans l'aéronautique, l'automobile et les structures composites avancées, elles offrent une excellente longévité et une forte capacité à absorber les charges mécaniques.

- **Les résines thermoplastiques : Contrairement** aux résines thermodurcissables, les résines thermoplastiques peuvent être fondues et remodelées plusieurs fois, ce qui facilite leur recyclage. Elles sont particulièrement utilisées dans les applications nécessitant une grande résilience aux impacts et une résistance chimique accrue.
- **Les résines thermostables :** Les résines thermostables conservent leurs propriétés mécaniques même à des températures élevées. Elles sont essentielles pour des applications de haute performance, notamment dans les moteurs d'avions et les composants soumis à des conditions extrêmes.

### 2.3 Matériaux Composites et Réparation des Structures

Les matériaux composites désignent une classe de matériaux hétérogènes formés par l'association de plusieurs constituants distincts aux propriétés physico-chimiques spécifiques. Ils se composent généralement d'une phase de renforcement, constituée de fibres ou de particules, et d'une matrice qui assure la cohésion et la transmission des efforts mécaniques. Cette structuration permet d'optimiser les performances globales du matériau en combinant les avantages des différents éléments qui le composent. Grâce à une ingénierie précise au niveau microscopique, les matériaux composites se distinguent par des propriétés mécaniques, thermiques et fonctionnelles supérieures à celles de leurs constituants pris individuellement. Leur conception repose sur une synergie entre les phases, conduisant à une amélioration significative en termes de résistance, de durabilité et d'adaptabilité à divers environnements d'application. [48-50]. L'évolution des matériaux composites s'inscrit dans une dynamique historique marquée par l'adaptation aux exigences croissantes de l'industrie. Dès l'Antiquité, des formes rudimentaires de composites étaient utilisées, comme certaines structures renforcées par des éléments naturels, illustrant une première tentative d'optimisation des propriétés des matériaux disponibles. Toutefois, leur développement scientifique structuré et leur industrialisation à grande échelle ne prennent véritablement forme qu'au cours du siècle dernier, en réponse

aux besoins croissants de secteurs stratégiques. L’aéronautique, l’ingénierie navale et l’industrie automobile jouent alors un rôle central dans l’essor de ces matériaux innovants, nécessitant des solutions combinant légèreté, résistance mécanique et durabilité. L’introduction des composites à fibres de carbone dans les années 1960 constitue une avancée majeure, révolutionnant la conception des structures grâce à un compromis optimal entre rigidité et masse réduite. Cette innovation technologique ouvre la voie à de nouvelles applications, favorisant leur intégration dans des domaines variés, de la construction aux technologies de pointe.[51, 52]

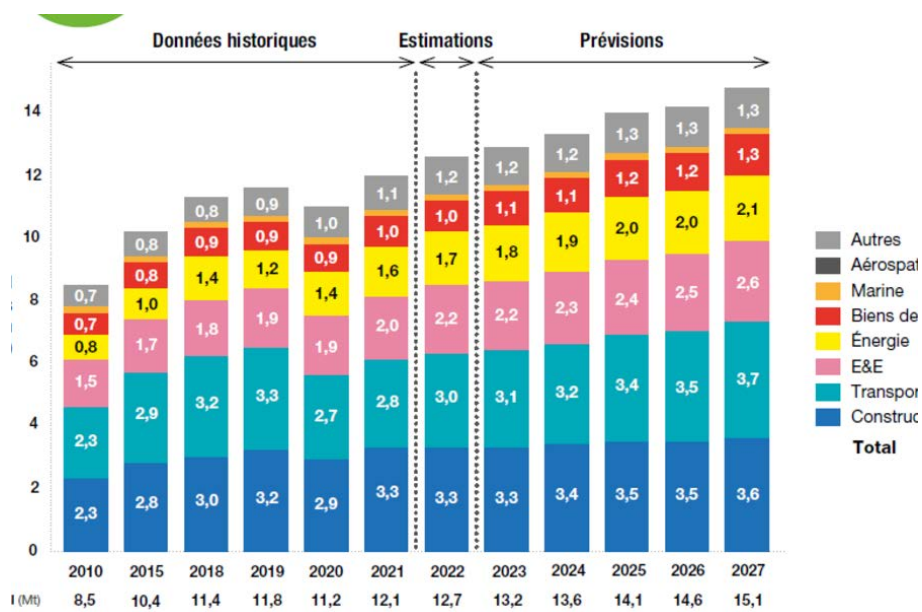


Figure 14 Chronologie des innovations en matériaux composites[53].

Contrairement aux matériaux métalliques traditionnels, caractérisés par une structure isotrope et une réponse homogène aux sollicitations mécaniques, les composites présentent une anisotropie marquée, dictée par l’orientation des renforts. Cette particularité, couplée à une densité inférieure (1,5 à 2,0 g/cm<sup>3</sup> pour les PMC contre 2,7 g/cm<sup>3</sup> pour l’aluminium), en fait des candidats privilégiés pour les applications nécessitant un ratio résistance/poids optimal (Chawla, 2012). Par ailleurs, leur comportement viscoélastique (pour les matrices polymères) et leur résistance à la corrosion électrochimique les distinguent radicalement des alliages métalliques, sujets à la fatigue et à l’oxydation. Une analyse comparative

détaillée des propriétés mécaniques (module d'Young, limite élastique) et thermiques (conductivité, dilatation)

La classification des composites s'articule principalement autour de la nature de la matrice, paramètre clé influençant leur domaine d'emploi, leur procédé de fabrication et leur plage de températures d'utilisation :

- **Composites à matrice polymère (PMC)** : Dominants sur le marché (70 % des applications), ils associent une matrice organique (thermodurcissable comme l'époxy ou thermoplastique comme le PEEK) à des renforts discontinus (particules) ou continus (fibres de verre, aramide). Leurs propriétés, ajustables via le taux de renfort et l'architecture des plis, en font des solutions idéales pour les coques de bateaux, les profilés aéronautiques ou les équipements sportifs: *Microstructure d'un stratifié CFRP*). Toutefois, leur sensibilité aux hautes températures ( $T_g < 300^\circ\text{C}$ ) limite leur usage en milieu extrême.
- **Composites à matrice métallique (MMC)** : Employés dans des contextes exigeant une conductivité thermique élevée et une résistance au fluage, ces composites intègrent une matrice d'aluminium, de magnésium ou de titane, renforcée par des céramiques ( $\text{SiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ou des nanotubes de carbone. Leurs procédés de fabrication (frittage, infiltration) permettent des applications structurales dans les moteurs à réaction ou les disques de frein hautes performances, où les températures dépassent  $500^\circ\text{C}$  [54].
- **Composites à matrice céramique (CMC)** : Développés pour résister à des environnements thermomécaniques critiques ( $> 1000^\circ\text{C}$ ), ces matériaux combinent une matrice réfractaire ( $\text{SiC}$ , oxyde d'aluminium) à des fibres de carbone ou de carbure de silicium. Leurs faibles ténacité et ductilité, inhérentes à la fragilité de la matrice, sont compensées par des mécanismes de pontage de fissures, comme illustré dans : *Comportement en rupture d'un CMC*. Leurs applications couvrent les turbines gaz, les boucliers thermiques spatiaux et les réacteurs nucléaires.

Cette classification triadique, bien que simplifiée, souligne l'adaptabilité des composites aux contraintes multidisciplinaires de l'ingénierie moderne. Elle s'accompagne néanmoins

de défis scientifiques majeurs, notamment liés à l'hétérogénéité des interfaces matrice/renfort, aux coûts de production ou au recyclabilité, sujets centraux des recherches actuelles (voir *Annexe A.3 : Enjeux technologiques des composites*). Une modélisation approfondie des mécanismes de transfert de charge et d'endommagement reste indispensable pour optimiser ces matériaux, comme en témoignent les récents travaux en micromécanique et en intelligence artificielle appliquée aux sciences des matériaux [54].

## **2.4 Propriétés Mécaniques et Anisotropie des Composites**

### **2.4.1 Effet de l'orientation des fibres sur les caractéristiques mécaniques**

Les matériaux composites sont caractérisés par leur anisotropie, ce qui signifie que leurs propriétés mécaniques dépendent fortement de la direction des sollicitations appliquées. Contrairement aux matériaux métalliques, qui présentent un comportement homogène, les composites tirent avantage de l'orientation des fibres pour renforcer leur résistance et leur rigidité. Cette particularité influence leur performance sous différents types de charges, notamment en traction et en flexion. L'étude approfondie de ces comportements permet de mieux comprendre les mécanismes de défaillance et d'adapter la conception des structures composites en fonction des contraintes mécaniques rencontrées [55].

La tenue mécanique des composites sous traction est étroitement liée à l'orientation des fibres. Lorsque celles-ci sont alignées dans la direction de l'effort appliqué, elles assurent une répartition optimale des charges, conférant ainsi une résistance accrue au matériau. À l'inverse, une disposition perpendiculaire ou aléatoire des fibres réduit cette performance, la matrice devant alors absorber une part plus importante des contraintes. Des recherches ont mis en évidence que l'orientation des fibres influe également sur la résistance après fissuration. En particulier, des fibres positionnées perpendiculairement au plan de fissuration augmentent considérablement la capacité du matériau à freiner la propagation des fissures, avec des gains pouvant dépasser 100 % dans certaines configurations [56]. À l'opposé, des fibres orientées parallèlement au plan de fissuration ont un effet limité sur cette capacité de résistance [56]. Ces résultats mettent en avant l'importance de la maîtrise de l'orientation des fibres pour optimiser le comportement en traction des composites.

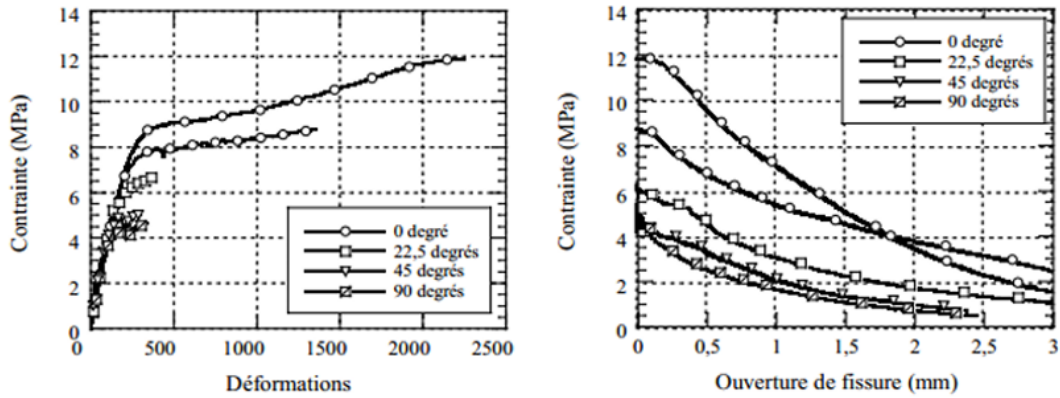


Figure 15 Comportement en traction d'un BFUP pour différentes orientations de fibres (Delsol, 2012)[55]

La réponse mécanique des composites face à une sollicitation en flexion dépend également de l'orientation des fibres. Une orientation adéquate permet d'améliorer la résistance à la flexion ainsi que la ductilité du matériau, favorisant ainsi l'apparition d'un mécanisme d'écroutissage qui améliore sa capacité à supporter les charges. En revanche, une orientation peu favorable réduit ces effets, limitant ainsi l'aptitude du matériau à dissiper les efforts avant rupture. Des études sur les poutres en béton fibré ultra-performant (BFUP) ont montré que lorsque les fibres sont bien alignées dans la direction des contraintes principales, elles augmentent la ductilité et retardent la rupture du matériau [57]. Ce phénomène s'explique par une meilleure répartition des contraintes et un ancrage optimisé des fibres dans la matrice. En revanche, une orientation moins optimisée des fibres entraîne un faible gain de ductilité et ne favorise pas le développement d'un écroutissage efficace [58, 59]. Ces résultats soulignent l'importance d'une conception soignée des composites pour garantir une meilleure tenue en flexion, en particulier pour les applications soumises à des charges dynamiques, comme dans les domaines de l'aéronautique et du génie civil.

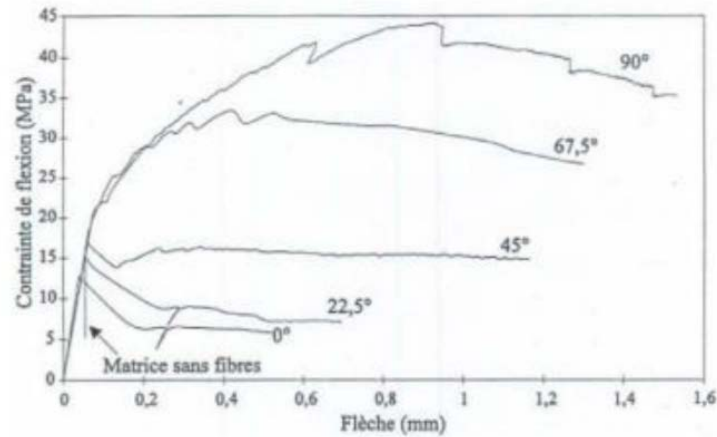


Figure 16 comportement flexionnel en fonction de l'orientation théorique des fibres[55]

#### 2.4.2 Réponse des composites à la fatigue comparée aux métaux

Les composites et les métaux présentent des comportements distincts face aux sollicitations répétées. Contrairement aux alliages métalliques, qui peuvent supporter un nombre illimité de cycles sous un certain seuil de contrainte, les composites ne possèdent pas de limite de fatigue clairement définie. Lors d'une sollicitation cyclique, ils subissent une détérioration progressive qui peut résulter en des mécanismes tels que la rupture des fibres, l'apparition de microfissures dans la matrice ou encore la délamination entre les couches. Toutefois, l'optimisation du type et de l'orientation des fibres permet d'améliorer leur résistance à la fatigue, ce qui les rend parfois plus performants que certains métaux dans des environnements spécifiques [60].

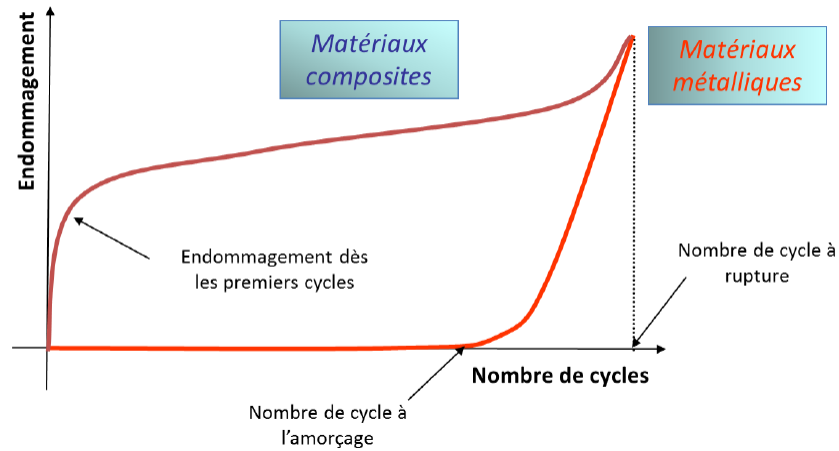


Figure 17 Comparaison de l'évolution des dommages en fonction du nombre de cycles entre composite et métal[60]

### 2.4.3 Comportement aux chocs et aux charges dynamiques

La capacité des matériaux composites à supporter les impacts et les charges dynamiques dépend largement de la nature des fibres et de la matrice qui les constituent. Les composites renforcés par des fibres de carbone ou de verre se distinguent par leur rigidité et leur résistance mécanique élevées. Toutefois, ils présentent une sensibilité aux impacts pouvant entraîner des délaminations internes, compromettant ainsi leur intégrité structurelle. En revanche, les composites à base de fibres d'aramide, comme le Kevlar, se révèlent particulièrement efficaces dans les applications nécessitant une grande capacité d'absorption d'énergie, notamment pour la protection balistique. D'autre part, les composites à matrice métallique ou céramique sont privilégiés pour leur résistance aux hautes températures et aux charges dynamiques, bien que leur comportement puisse être plus fragile sous certaines conditions. Grâce à leur excellent rapport résistance/poids, ces matériaux sont largement utilisés dans des secteurs tels que l'aéronautique, l'automobile et le spatial [61].

L'impact de faibles énergies sur le comportement mécanique des composites est complexe à évaluer et dépend notamment de la fraction volumique des fibres. Lorsque cette fraction atteint environ 60 %, les chocs entraînent des délaminations au niveau des interfaces des plis les plus proches de la zone d'impact, sans toutefois laisser de traces visibles en surface.

En revanche, lorsque la teneur en fibres est plus faible, certaines matrices permettent d'absorber partiellement l'énergie de l'impact grâce à leurs propriétés viscoplastiques, limitant ainsi la dégradation des performances mécaniques [61, 62].

Toutefois, quelle que soit l'ampleur des dommages initiaux causés par un impact, ceux-ci ont tendance à s'aggraver sous sollicitations cycliques. Par exemple, un impact de faible énergie sur un composite à base de fibres de carbone et de résine thermodurcissable (T300/5208) peut réduire la résistance à la traction d'environ 30 % et entraîner une diminution de près de 60 % de la résistance en compression. Cette vulnérabilité des composites en compression est également observable en fatigue. Lorsqu'un matériau impacté est soumis à des cycles de traction ondulée, sa limite de fatigue reste inférieure à sa résistance en traction initiale. Toutefois, c'est en compression que l'impact s'avère le plus dommageable, la limite de fatigue pouvant chuter jusqu'à seulement 20 % de la résistance ultime à la traction du matériau sain [61, 62].

Ces observations mettent en évidence la nécessité d'une conception adaptée des structures composites soumises à des environnements dynamiques, notamment en intégrant des stratégies de renforcement pour minimiser les effets des impacts et des sollicitations cycliques.

## **2.5 Techniques de Réparation des Structures par Patch Composite**

L'intégration de patches composites dans la réparation des structures métalliques représente une approche innovante permettant d'améliorer la durée de vie des composants tout en minimisant leur poids. Ces solutions, largement adoptées dans les domaines de l'aéronautique, de l'automobile et du génie civil, permettent de restaurer l'intégrité mécanique des structures endommagées en optimisant leur résistance aux contraintes. Trois méthodes principales sont couramment utilisées : le collage, le rivetage et les solutions hybrides combinant ces deux techniques. Chacune présente des spécificités qui influencent la durabilité, la résistance mécanique et la performance en fatigue des structures réparées [63].

### 2.5.1 Réparation par patch collé

Le collage consiste à fixer un patch composite sur une structure métallique endommagée à l'aide d'un adhésif spécifique. Cette méthode est appréciée pour sa capacité à restaurer les propriétés mécaniques d'une structure sans engendrer de concentrations de contraintes localisées, contrairement aux techniques de fixation mécanique.

Les adhésifs les plus utilisés sont les résines époxy et les méthacrylates. Les résines époxy sont reconnues pour leur rigidité et leur excellente tenue thermique, ce qui les rend particulièrement adaptées aux applications aéronautiques et industrielles. En revanche, les méthacrylates se distinguent par leur flexibilité et leur polymérisation rapide, facilitant ainsi leur mise en œuvre.

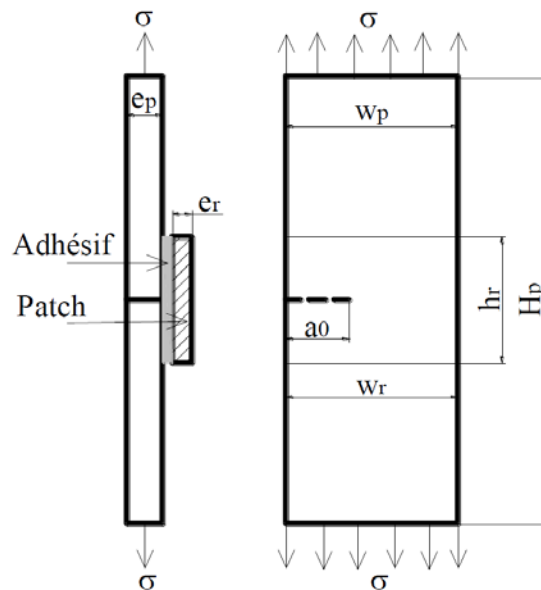


Figure 18 Schéma de la configuration de collage par patch composite avec adhésif pour la réparation de structures métalliques endommagées[64]

L'un des aspects critiques de cette technique repose sur la préparation de la surface métallique, qui doit être soigneusement traitée (dégraissage, sablage, traitement chimique) afin d'assurer une adhérence optimale. Malgré ses nombreux avantages, la réparation par collage peut être affectée par l'humidité, les variations thermiques et la propagation des fissures sous contrainte, ce qui peut limiter sa durabilité dans certaines conditions.

### **2.5.2 Réparation par patch riveté**

Le rivetage consiste à fixer mécaniquement un patch composite à la structure métallique endommagée à l'aide de rivets. Cette technique est souvent privilégiée pour les réparations soumises à des charges dynamiques importantes, où l'adhésion par collage seule pourrait ne pas suffire.

Contrairement au collage, cette méthode ne dépend pas des conditions environnementales, ce qui la rend plus fiable en milieu humide ou soumis à des températures extrêmes. Cependant, le rivetage crée des concentrations de contraintes aux points de fixation, ce qui peut accélérer l'apparition et la propagation de fissures. De plus, le perçage nécessaire à la mise en place des rivets affaiblit la structure, ce qui peut influencer négativement son comportement mécanique, notamment sous fatigue.

Malgré ces limites, le patch riveté reste une solution robuste pour les réparations nécessitant une mise en œuvre rapide et une résistance immédiate aux charges appliquées.

### **2.5.3 Techniques hybrides : combinaison collage-rivetage**

L'assemblage hybride, qui associe le collage et le rivetage, représente une alternative efficace pour la réparation des structures métalliques avec des patches composites. Cette approche permet de combiner les avantages de ces deux méthodes : le collage assure une répartition homogène des contraintes et limite la propagation des fissures, tandis que le rivetage offre un renforcement mécanique immédiat et une meilleure résistance aux charges dynamiques. Toutefois, pour garantir la performance optimale de cet assemblage, il est crucial de bien équilibrer la répartition des efforts entre l'adhésif et les fixations mécaniques afin d'éviter des sollicitations excessives aux points de rivetage et prévenir les risques de délamination [65].

Selon l'étude réalisée par [66], l'assemblage hybride combinant collage et rivetage a été analysé afin d'évaluer son efficacité par rapport aux méthodes d'assemblage uniquement collées ou rivetées. L'objectif était de comprendre la répartition des contraintes et le transfert de charge entre l'adhésif et les fixations mécaniques. Les résultats ont mis en

évidence que l'ajout de rivets dans un assemblage collé permet d'améliorer la résistance globale en évitant le décollement du patch composite sous fortes sollicitations. Le collage, quant à lui, contribue à réduire la concentration des contraintes autour des points de fixation, ce qui diminue les risques de fissuration et de délamination.

L'étude a également montré que la répartition des contraintes dans un assemblage hybride est plus homogène que dans un assemblage uniquement boulonné, où les efforts se concentrent principalement autour des rivets. Ainsi, la combinaison des deux techniques permet d'optimiser la durabilité et la performance mécanique des réparations, en particulier pour les structures soumises à des charges dynamiques et à la fatigue. La Figure 16, qui illustre le modèle géométrique et le maillage d'un assemblage collé et boulonné, est particulièrement pertinente pour visualiser cette interaction entre l'adhésif et les fixations mécaniques.

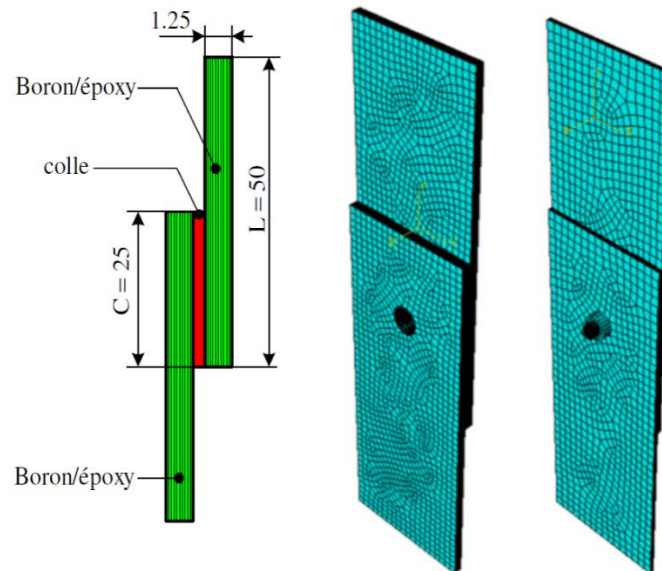


Figure 19 Modèle géométrique et maillage de l'assemblage colle et boulonné[66]

# **Chapitre 3**

## **Simulation numérique**

### 3 Matériaux et méthodes

#### 3.1 Matériaux utilisés dans l'étude

L'étude se concentre sur l'alliage d'aluminium 6061-T6, qui est largement utilisé dans diverses applications industrielles en raison de ses propriétés mécaniques et de sa résistance à la corrosion. Ce matériau est particulièrement adapté aux secteurs de l'aéronautique, de l'automobile et de la construction, où des performances élevées et une légèreté sont requises. L'alliage d'aluminium 6061-T6 est un alliage traité thermiquement, offrant une bonne résistance à la traction, une grande ductilité et une forte résistance à la corrosion dans des environnements variés.

Les propriétés mécaniques de l'alliage 6061-T6 sont détaillées dans le tableau suivant, ce qui permet de caractériser ses performances sous différentes conditions de chargement, notamment lors des simulations de fatigue.

**Tableau 1 : Tableau des propriétés mécaniques de l'alliage 6061-T6**

Propriété	E (MPa)	$\nu$	Re (MPa)	K1e (MPa·√m)	K1c (MPa·√m)	C (mm/cycle)	n	$\Delta K_o$ (MPa·√m)	$\Delta K_{th}$ (MPa·√m)
Valeur	68947.6	0.33	282	39.55	28.5	1.8404e-3	2.3	3.8	1.5

#### 3.2 Logiciel utilisé dans la simulation

Les simulations de fatigue ont été réalisées à l'aide du logiciel AFGROW, un outil de simulation numérique avancé, permettant de modéliser le comportement des matériaux métalliques sous des chargements cycliques. Le modèle de fatigue a été développé en utilisant les propriétés mécaniques de l'alliage 6061-T6, telles que la résistance à la traction, le module de Young, et la contrainte d'élasticité, fournies dans la section précédente.

Le logiciel AFGROW permet de simuler les cycles de charge en fonction des conditions de sollicitation appliquées au matériau. La méthode de simulation utilisée repose sur

l'application de charges de traction et de compression répétées, à différentes amplitudes, pour simuler des conditions réalistes de fonctionnement dans des environnements industriels. Le modèle de fatigue utilisé suit la loi de Paris pour la croissance des fissures et utilise les paramètres ajustés à partir des données expérimentales pour prédire la durée de vie du matériau.



Figure 20 Interface utilisateur du logiciel AFGROW

### 3.3 Réparation par Patch utilise dans l'étude

Parallèlement aux simulations de fatigue, une analyse de la réparation par patch a été réalisée. Cette méthode consiste à appliquer un patch de matériau composite sur la zone endommagée de l'alliage 6061-T6 afin de redistribuer les contraintes et ainsi prolonger la durée de vie du composant. Le patch utilisé est un matériau composite renforcé, choisi en fonction de sa compatibilité avec l'alliage d'aluminium et de ses capacités à supporter des charges supplémentaires.

Les simulations de réparation ont été menées en modélisant l'application d'un patch à une zone critique, après avoir déterminé les zones susceptibles de présenter des fissures ou des défaillances sous fatigue. Les performances de la réparation ont été évaluées en comparant

la durée de vie estimée du matériau réparé avec celle du matériau non réparé, en tenant compte de l'augmentation de la résistance mécanique locale après l'application du patch.

**Tableau 2 : Propriétés mécaniques des adhésives utilisés**

Adhésif	$E_L$ (MPa)	$E_T$ (MPa)	$G_{LT}$ (MPa)	$\nu_{LT}$
<b>Bore/Époxyde</b>	206,843	19,305.3	5,171.07	0.2
<b>Graphite/Époxyde</b>	172,369	10,342.1	4,826.33	0.3
<b>Glare</b>	71,016	71,016	34,473.8	0.3

### 3.4 Model géométrique

Dans l'ensemble des simulations réalisées à l'aide du logiciel AFGROW, une éprouvette de type CT-75 (Compact Tension) a été utilisée afin de modéliser la propagation des fissures dans des conditions représentatives. Cette configuration a été retenue aussi bien pour les éprouvettes intactes que pour celles ayant fait l'objet d'une réparation par patch composite. Cette approche permet d'évaluer de manière comparative l'évolution de la fissure dans les deux cas.

Les simulations ont été effectuées sous un chargement de traction uniaxiale, appliqué de façon perpendiculaire au plan de fissuration. Les conditions aux limites imposées dans AFGROW comprennent un encastrement d'un côté de l'éprouvette et un déplacement imposé de l'autre côté, reproduisant ainsi fidèlement les conditions d'un essai de fatigue. Cette configuration est couramment utilisée dans les études de mécanique de la rupture pour son efficacité à représenter la croissance des fissures en mode I. Les résultats obtenus dans ce contexte ont permis d'analyser l'efficacité des réparations composites en termes de ralentissement de la propagation des fissures.

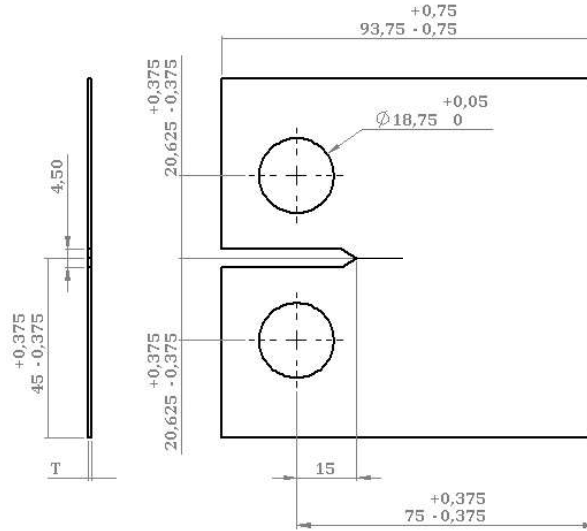


Figure 21 Model geometries CT75

Dans l'ensemble des simulations, une réparation par patch composite constituée de six plis de dimensions fixes (60 mm × 60 mm) a été utilisée. Les orientations des fibres ont été conservées identiques pour tous les cas, selon la séquence suivante : 0° / 45° / -45° / 0° / 45° / -45° / 0°. La figure suivante présente un schéma détaillé des orientations des plis.

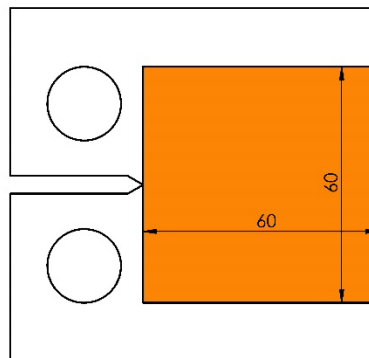


Figure 22 Position et dimension de la réparation par patch composite

La figure 20 ci-après illustre les orientations des fibres utilisées dans la réparation par patch composite. Il convient de souligner que cette configuration d'orientation a été conservée identique pour l'ensemble des simulations réalisées.

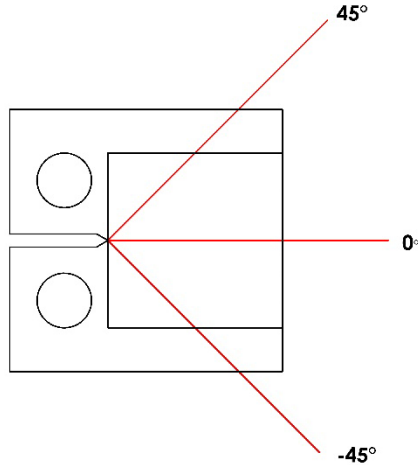


Figure 23 orientation des fibres utiliser dans la réparation par patch composites

### 3.5 Résultats et Discussion

#### 3.5.1 Étude de l'Influence du Rapport de Charge $R$ sur la Durée de Vie en Fatigue

Dans cette partie, nous avons étudié l'influence du rapport de charge  $R$  sur la durée de vie en fatigue de l'alliage d'aluminium 6061-T6, sans aucune réparation appliquée. Pour ce faire, des simulations ont été réalisées à différents rapports de charge, à savoir  $R=0.1$ ,  $R=0.3$ , et  $R=0.5$ . L'objectif de cette étude est de mettre en lumière l'impact du rapport de charge sur la propagation des fissures et la durée de vie en fatigue du matériau.

La figure 21 présente l'avancée de la fissure en fonction du nombre de cycles pour les différents rapports de charge. Les résultats montrent clairement une différence marquée dans la propagation des fissures en fonction de  $R$ . À  $R=0.5$ , la propagation des fissures est plus lente, tandis qu'à  $R=0.1$ , la fissure progresse beaucoup plus rapidement, réduisant ainsi la durée de vie estimée du matériau.

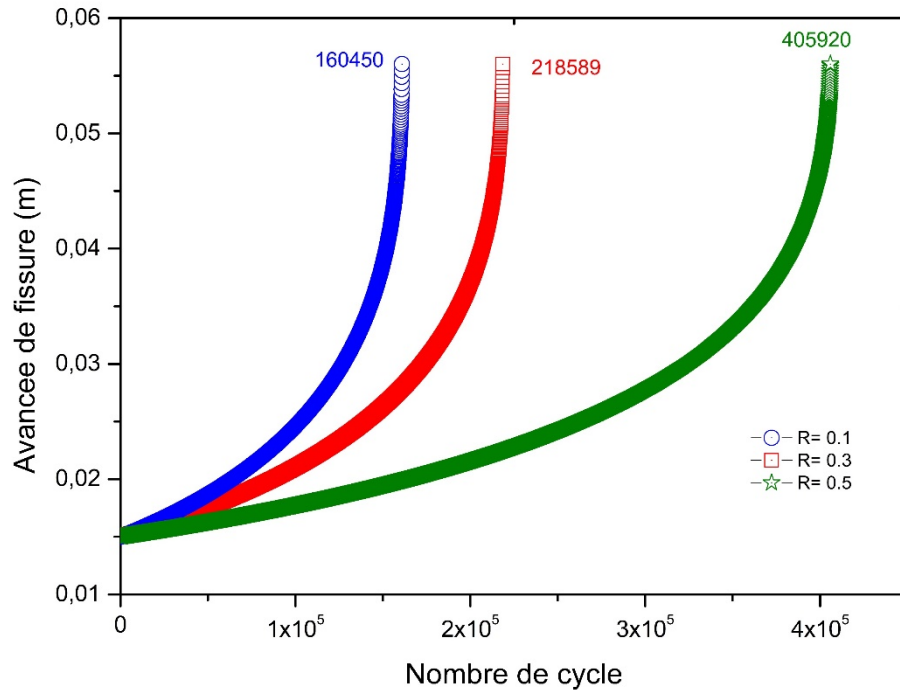


Figure 24 Propagation de la fissure en fonction du nombre de cycles pour différents rapports de charge

Les courbes de propagation des fissures, présentées dans la figure, indiquent que l'augmentation du rapport de charge (R) réduit le nombre de cycles nécessaires pour atteindre une certaine avancée de la fissure. À  $R=0.5$ , la fissure atteint 0,05 m après environ  $4,5 \times 10^5$  cycles, tandis qu'à  $R=0.1$ , la fissure atteint la même avancée après seulement  $1,6 \times 10^5$  cycles. Cette réduction de 64 % du nombre de cycles nécessaires montre que des charges cycliques plus élevées favorisent la formation et l'expansion des fissures, entraînant ainsi une diminution de la durée de vie du matériau. Ce comportement confirme les théories classiques de la fatigue des matériaux, où une charge plus élevée accélère l'accumulation de déformations plastiques et de fissures au fil du temps.

La figure 25 présente la relation entre l'amplitude de la contrainte  $\Delta K$  et la vitesse de propagation de la fissure  $da/dN$  pour les trois rapports de charge. Nous observons que la vitesse de propagation augmente à mesure que  $\Delta K$  augmente, et cette tendance est plus prononcée pour  $R=0.5$ , suivi de  $R=0.3$ , et enfin  $R=0.1$ .

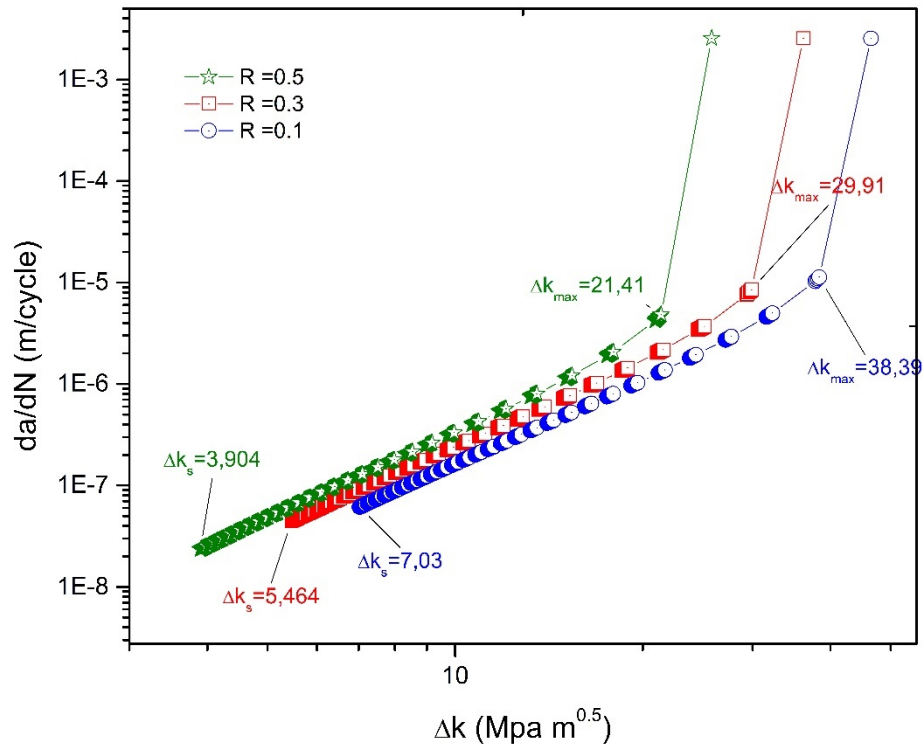


Figure 25 Variation de la vitesse de propagation des fissures en fonction de l'amplitude de la contrainte pour différents rapports de charge et comparaison des courbes de propagation

Il est important de noter que la contrainte de seuil ( $\Delta k_s$ ) augmente avec le rapport de charge. À  $R=0.5$ ,  $\Delta k_s$  est de  $3,904 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , ce qui est plus faible que les valeurs observées à  $R=0.3$  ( $\Delta k_s=5,464 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ) et à  $R=0.1$  ( $\Delta k_s=7,03 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ). Cela suggère que les matériaux soumis à des charges plus élevées ( $R$  plus grand) nécessitent une contrainte plus importante pour initier la propagation de la fissure.

D'autre part, les valeurs de  $\Delta k_{max}$  indiquent la contrainte maximale atteinte pendant le processus de propagation des fissures. À  $R=0.1$ , la contrainte maximale  $\Delta k_{max}$  est de  $38,39 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , tandis qu'à  $R=0.3$ , elle est de  $29,91 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , et à  $R=0.5$ , elle atteint  $21,41 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Cela démontre que plus le rapport de charge est élevé, plus la contrainte maximale est faible, ce qui suggère que des charges cycliques plus élevées favorisent une propagation plus rapide de la fissure.

La figure 25 montre que l'augmentation du rapport de charge ( $R$ ) modifie significativement les seuils de contrainte et les contraintes maximales. Les matériaux soumis à des rapports de charge plus élevés ( $R$ ) ont un seuil de contrainte plus faible, et la propagation des fissures est plus rapide, ce qui peut réduire la durée de vie du matériau. Cela confirme l'impact des charges cycliques élevées sur la résistance à la fatigue et la durée de vie du matériau.

### **3.5.2 Évaluation de l'Impact de la Réparation par Patch sur la Durée de Vie en Fatigue**

Dans cette partie, nous avons simulé une éprouvette sans réparation et une autre réparée par patch afin d'évaluer la différence de comportement en fatigue. Pour l'éprouvette réparée, nous avons utilisé un patch composé de six couches et un adhésif graphite-époxy, offrant une rigidité augmentée de 110 %. Des simulations ont été réalisées pour comparer l'impact de la réparation par patch sur la durée de vie en fatigue de l'alliage d'aluminium 6061-T6, en observant son effet sur la propagation des fissures et la durabilité du matériau. Cette approche nous a permis d'analyser l'efficacité du patch dans la réduction de la propagation des fissures et dans l'amélioration de la résistance à la fatigue du matériau réparé.

La figure 26 présente l'évolution de la propagation de la fissure en fonction du nombre de cycles pour les conditions avec et sans réparation par patch.

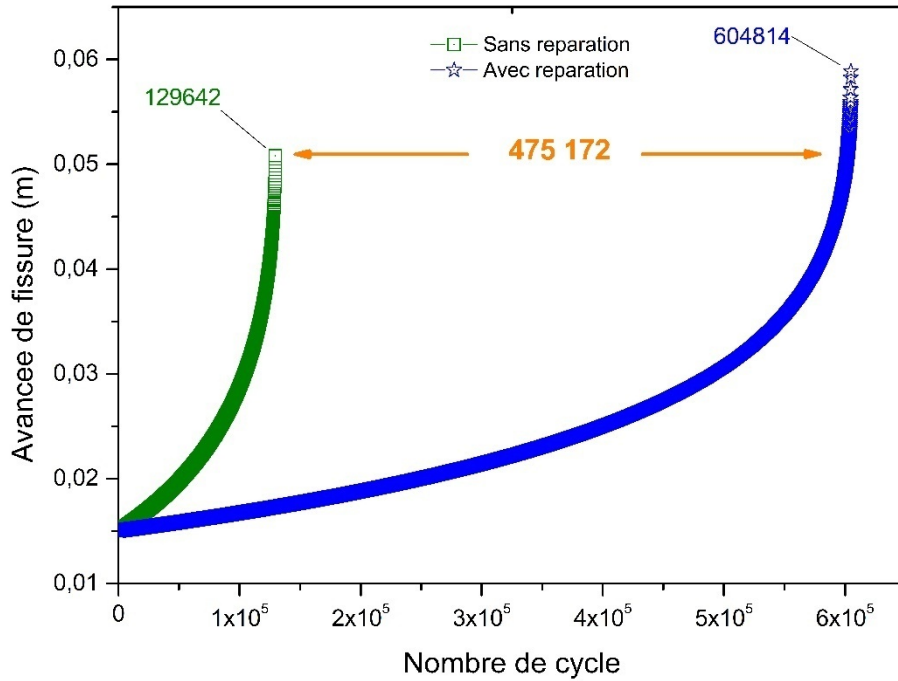


Figure 26 Impact de la Réparation par Patch sur la Durée de Vie en Fatigue

Les résultats montrent une amélioration notable de la durée de vie en fatigue grâce à l'application du patch. En l'absence de réparation, l'alliage d'aluminium 6061-T6 présente une défaillance rapide après 130 000 cycles, avec une avancée de fissure de 0,05 m. Cela indique que, sans réparation, le matériau atteint rapidement un seuil critique où la propagation des fissures devient accélérée, ce qui mène à la rupture prématurée de la structure sous charge cyclique.

En revanche, lorsqu'un patch est appliqué, l'avancée de la fissure est significativement retardée, nécessitant environ 475 000 cycles pour atteindre une avancée similaire. Cette différence de performance illustre l'efficacité du patch, qui agit en redistribuant les contraintes dans la zone endommagée. En réduisant la concentration de stress localisée, le patch limite la propagation rapide des fissures et permet au matériau de mieux résister aux cycles de charge. Ainsi, la réparation par patch offre une solution efficace pour augmenter

la durée de vie en fatigue des composants, retardant la formation de fissures critiques et prolongeant l'intégrité du matériau sous sollicitation.

Cette amélioration prouve l'efficacité de la technique de réparation par patch, soulignant son potentiel à prolonger la durabilité des matériaux utilisés dans des applications soumises à des charges cycliques répétées, et offre des perspectives intéressantes pour la gestion de la fatigue dans les structures métalliques.

La figure 27 présente la relation entre l'amplitude de la contrainte ( $\Delta K$ ) et la vitesse de propagation de la fissure  $da/dN$  pour les cas avec et sans réparation par patch.

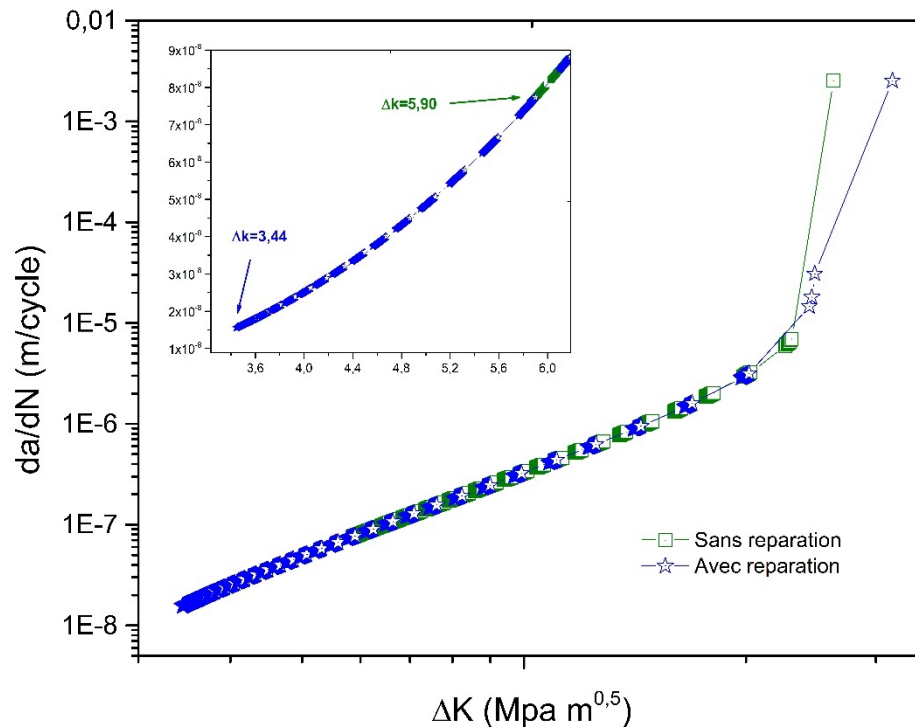


Figure 27 Effet de la réparation par patch sur la vitesse de propagation des fissures en fonction de l'amplitude de la contrainte

L'analyse de la figure 27 met en évidence que la réparation par patch ralentit de manière significative la propagation des fissures, en particulier à des niveaux élevés de l'amplitude

de contrainte ( $\Delta K$ ). Sans réparation, la vitesse de propagation des fissures augmente rapidement avec  $\Delta K$ , ce qui témoigne d'une dégradation accélérée du matériau sous des charges cycliques croissantes. Ce comportement est typique des matériaux métalliques soumis à des cycles répétés de charges, où l'accumulation de contraintes favorise l'extension rapide des fissures, réduisant ainsi la durée de vie du matériau.

Cependant, après l'application de la réparation par patch, la propagation des fissures demeure modérée, même à des valeurs élevées de  $\Delta K$ . Plus spécifiquement, la fissure n'avance que lorsque le seuil de contrainte  $\Delta K$  atteint  $5,9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Avant d'atteindre ce seuil, la propagation est complètement bloquée. À  $\Delta K=5,9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , la vitesse de propagation est de  $8 \times 10^{-9} \text{ m/cycle}$  sans réparation, alors qu'elle chute à  $3,44 \times 10^{-9} \text{ m/cycle}$  après réparation. Cette diminution de 57 % dans la vitesse de propagation démontre l'efficacité du patch, qui permet de limiter l'expansion des fissures. En redistribuant les contraintes et en renforçant la résistance locale du matériau, le patch atténue les effets de la fatigue et accroît ainsi la durabilité du composant réparé.

L'impact du patch sur la réduction de la propagation des fissures est essentiel, car un taux de propagation plus faible signifie que la structure peut supporter un plus grand nombre de cycles avant d'atteindre un seuil critique de défaillance. Ce ralentissement de la propagation des fissures permet de prolonger la durée de vie du matériau, ce qui est crucial dans des applications industrielles où les composants sont soumis à des sollicitations cycliques sévères.

Des études similaires [10] ont montré que l'application de réparations par patches améliore considérablement la résistance à la fatigue des matériaux métalliques, en ralentissant la propagation des fissures et en prolongeant la durée de vie des composants.

Les résultats des simulations ont clairement démontré que l'application de la réparation par patch améliore significativement la durée de vie en fatigue de l'alliage d'aluminium 6061-T6. La réparation a permis de ralentir la propagation des fissures et de prolonger la durabilité du matériau, en réduisant la vitesse de propagation des fissures et en retardant leur avancée. Ces résultats soulignent l'importance de la réparation par patch comme

méthode efficace pour améliorer la performance des matériaux soumis à des charges cycliques répétées

### 3.5.3 Impact des Adhésifs sur la Durée de Vie des Réparations par Patch sous Charges Cycliques

L'analyse de la figure 25 met en lumière l'influence de l'adhésif sur la durée de vie du matériau après réparation. Cette comparaison a été effectuée entre une éprouvette non réparée et trois éprouvettes réparées avec différents types d'adhésifs : Graphite/Epoxy, Boron/Epoxy et Claire.

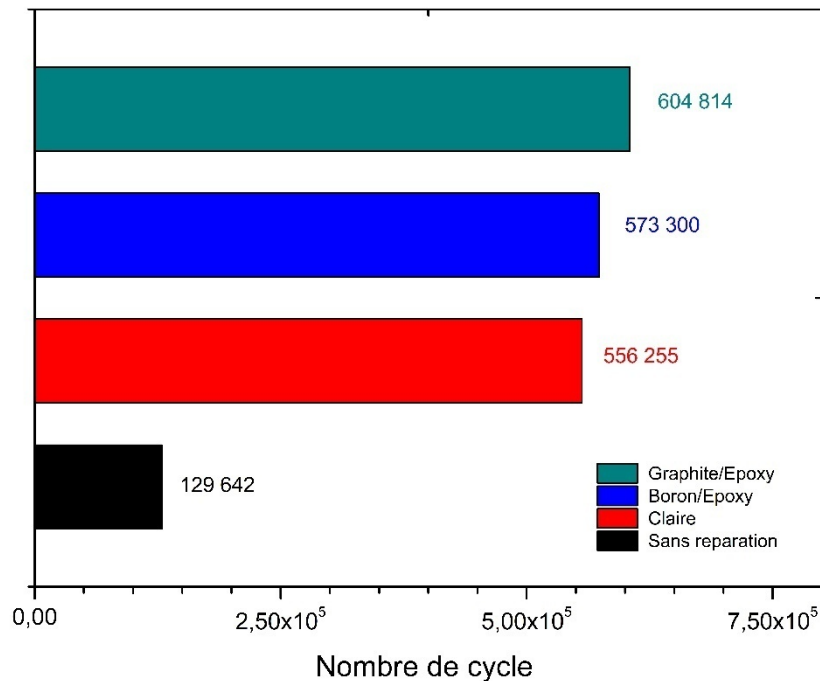


Figure 28 Comparaison de la Durée de Vie en Fatigue des Éprouvettes Réparées avec Différents Adhésifs

L'éprouvette réparée avec l'adhésif Graphite/Epoxy a montré une durée de vie de 604 814 cycles, soit une durée de vie nettement supérieure à celle de l'éprouvette non réparée, qui ne supporte que 129 642 cycles. La différence de cycles entre l'éprouvette réparée et

l'éprouvette non réparée est de 475 172 cycles, ce qui représente une augmentation de 336 % de la durée de vie.

L'éprouvette réparée avec l'adhésif Boron/Epoxy a une durée de vie de 573 300 cycles, soit 443 658 cycles de plus que l'éprouvette sans réparation. Cette différence correspond à une augmentation de 342 % de la durée de vie par rapport à l'éprouvette non réparée.

Enfin, l'éprouvette réparée avec l'adhésif Claire affiche une durée de vie de 556 255 cycles, soit 426 613 cycles de plus que l'éprouvette non réparée. Cela représente une augmentation de 329 % de la durée de vie.

Les résultats montrent que l'adhésif Graphite/Epoxy est celui qui offre la meilleure amélioration de la durée de vie, suivi de l'adhésif Boron/Epoxy et de l'adhésif Claire. Le Graphite/Epoxy, en particulier, bénéficie de ses propriétés de résistance élevée à la fatigue et de durabilité sous des charges cycliques, tandis que les autres adhésifs, bien que plus performants que l'absence de réparation, ne surpassent pas ce niveau de performance. Ces différences peuvent être attribuées aux propriétés intrinsèques de chaque adhésif, telles que la résistance mécanique, la flexibilité et la capacité à redistribuer les contraintes, influençant ainsi la propagation des fissures et la durée de vie des composants réparés.

#### **3.5.4 Influence de la Rigidité des Patches de Réparation sur les Performances en Fatigue des Matériaux**

La figure présente l'effet de la rigidité des patches réparateurs sur la durée de vie en fatigue d'un matériau, où des réparations sont réalisées à différents niveaux de rigidité (80 %, 100 %, 120 %, 140 %) en utilisant un adhésif Graphite/Epoxy. L'objectif est d'analyser comment l'augmentation de la rigidité du patch influence la propagation des fissures sous des charges cycliques, en mesurant l'avancée de la fissure (en mètres) par rapport à l'amplitude de contrainte ( $\Delta k$ ) appliquée.

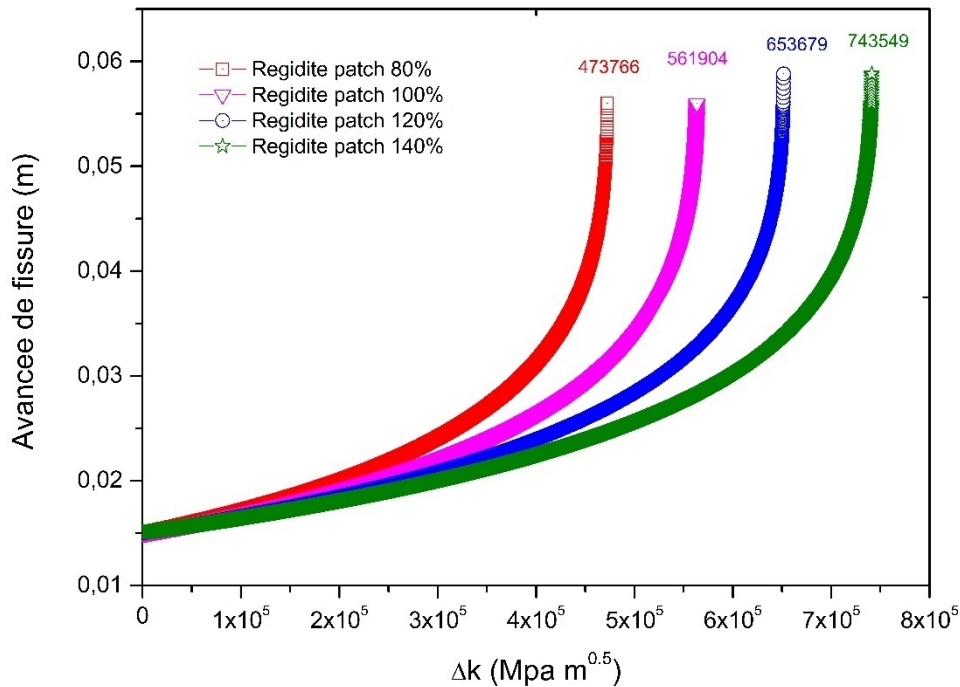


Figure 29 Effet de la Rigidité des Patchs de Réparation sur la Propagation des Fissures et la Durée de Vie en Fatigue du Matériau

Les résultats montrent que l'augmentation de la rigidité des patchs ralentit de manière significative la propagation des fissures et prolonge la durée de vie en fatigue du matériau. À mesure que la rigidité du patch augmente, la courbe de propagation des fissures montre une progression plus lente de l'avancée de la fissure, indiquant une meilleure résistance aux charges cycliques. Cela peut être expliqué par plusieurs phénomènes mécaniques : un patch plus rigide redistribue plus efficacement les contraintes appliquées sur la zone réparée, réduisant ainsi l'intensité des contraintes localisées qui favorisent la propagation des fissures. De plus, un patch rigide minimise les déformations plastiques dans le matériau sous-jacent, limitant ainsi l'accumulation de dommages. Les résultats montrent qu'à 140 % de rigidité, la durée de vie est augmentée de 13,7 % par rapport à une réparation à 120 %, ce qui souligne l'importance de la rigidité dans le contrôle de la fatigue. En somme, un patch rigide améliore la performance du matériau en augmentant sa capacité à résister à la propagation des fissures, ce qui augmente sa durabilité sous des charges cycliques.

La figure 30 présente une analyse de l'impact de la rigidité des patches réparateurs sur la propagation des fissures dans un matériau soumis à des charges cycliques. Les réparations ont été réalisées avec des patches de rigidité variable (80 %, 100 %, 120 %, 140 %) en utilisant un adhésif Graphite/Epoxy. L'objectif était d'évaluer comment l'augmentation de la rigidité du patch influence la durée de vie en fatigue du matériau, en fonction de l'amplitude de contrainte ( $\Delta K$ ), en mettant l'accent sur deux paramètres clés : le seuil de contrainte ( $\Delta K_{seuil}$ ) et la contrainte maximale ( $\Delta K_{max}$ ) qui influence la propagation des fissures.

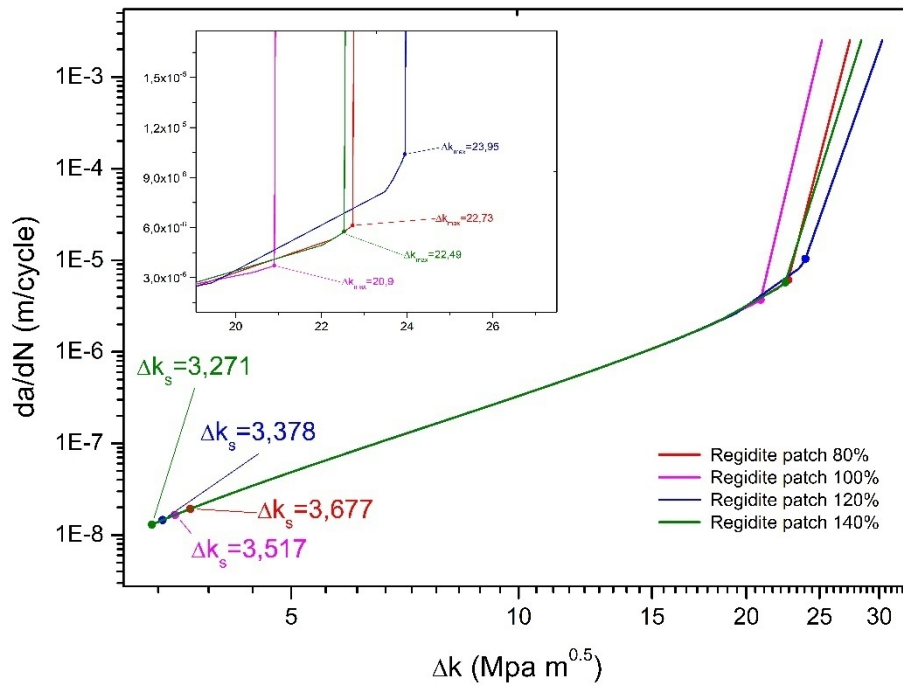


Figure 30 Impact de la Rigidité des Patches de Réparation sur les Paramètres de Contrainte  $\Delta K_{seuil}$  et  $\Delta K_{max}$  et leur Influence sur la Propagation des Fissures

Les résultats montrent que l'augmentation des valeurs de  $\Delta K_{seuil}$  et  $\Delta K_{max}$  avec l'augmentation de la rigidité du patch modifie de manière significative, influençant directement la propagation des fissures. À mesure que la rigidité du patch augmente, le seuil de contrainte  $\Delta K_{seuil}$  diminue, ce qui signifie que la fissure commence à se propager

sous des charges plus faibles. Par exemple, pour un patch réparé à 140 % de rigidité, le  $\Delta K_{\text{seuil}}$  est de 3,271 MPa $\sqrt{\text{m}}$ , indiquant que la fissure progresse plus rapidement sous des charges cycliques, mais la contrainte maximale  $\Delta K_{\text{max}}$  est réduite à 22,49 MPa $\sqrt{\text{m}}$ , limitant ainsi la propagation. Cette combinaison de seuils plus faibles et de contraintes maximales plus faibles permet une meilleure résistance du matériau réparé aux charges cycliques, retardant la croissance des fissures. En revanche, Les résultats montrent une baisse constante de  $\Delta K_{\text{seuil}}$  avec l'augmentation de la rigidité, mais  $\Delta K_{\text{max}}$  ne suit pas ce même ordre, étant plus élevée à 120 % et 140 % qu'à 100 %. La rigidité du patch joue donc un rôle crucial dans le contrôle de la fatigue, en redistribuant les contraintes et en améliorant la résistance locale du matériau réparé.

### **3.5.5 Influence de la Surcharge sur la Durée de Vie en Fatigue des Matériaux Réparés**

Dans le cadre de l'étude de l'influence de la surcharge, nous avons réalisé une simulation comparant deux éprouvettes : l'une sous chargement cyclique à amplitude constante avec un rapport de charge de  $R=0.5$ , et l'autre sous chargement cyclique à amplitude variable. Une surcharge a été appliquée à 46 000 cycles sur la seconde éprouvette. Pour modéliser le retard dans la propagation des fissures, nous avons utilisé le modèle de Wilburg, qui décrit la croissance retardée des fissures dans les matériaux réparés sous chargement cyclique.

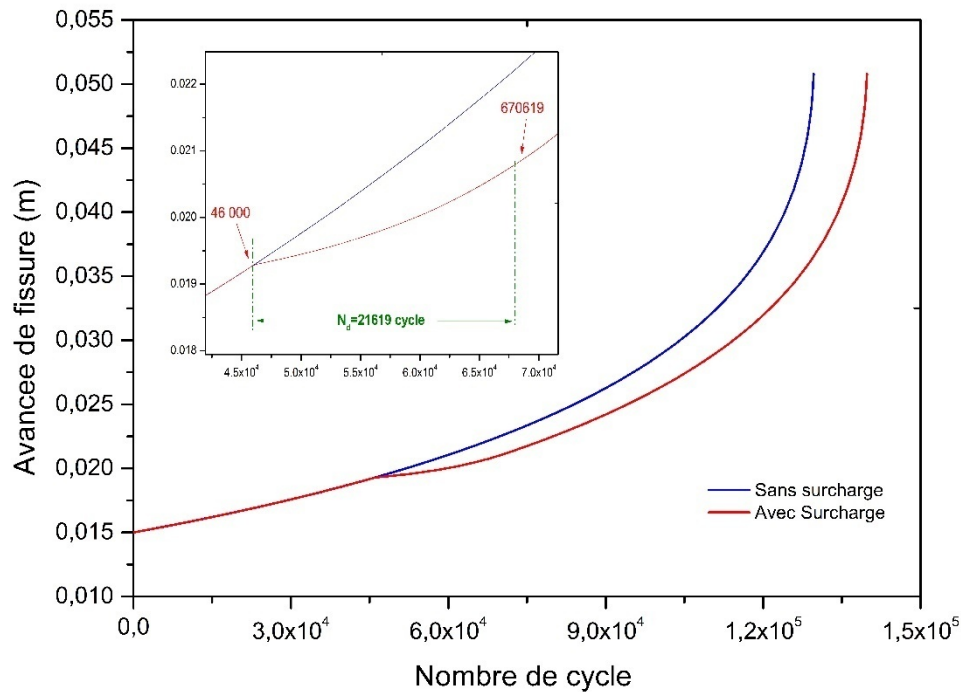


Figure 31 Comparaison de la Vitesse de Propagation des Fissures avec et sans Surcharge sous Chargement Cyclique à Amplitude Variable

Après l'application de la surcharge à 46 000 cycles, il a été observé que la propagation des fissures dans l'éprouvette sous surcharge était plus lente que dans celle soumise à un chargement à amplitude constante. Un retard de 21 619 cycles a été constaté avant qu'une propagation significative des fissures n'apparaisse, ce qui met en évidence l'efficacité de la réparation. Ce retard peut être attribué à la formation d'une zone plastique autour de la fissure après application de la surcharge, entraînant une déformation localisée qui joue un rôle essentiel dans l'absorption de l'énergie appliquée et la redistribution des contraintes. Cela limite la propagation rapide de la fissure, contribuant ainsi à prolonger la durée de vie de la structure réparée. Le modèle de Wilburg explique ce phénomène, en soulignant que l'application de surcharge génère une zone plastique qui réduit l'intensité des contraintes au sommet de la fissure, retardant ainsi sa propagation. L'interaction entre l'effet de retardation dû au patch composite et celui induit par la surcharge entraîne une réduction significative de la vitesse de propagation de la fissure, prolongeant ainsi la durée de vie de

la structure réparée. Ce phénomène a été observé dans plusieurs études : Bachir Bouiadjra et al. [67] ont démontré que l'application de surcharge avant la réparation par patch composite prolongeait de manière significative la durée de vie en fatigue des plaques réparées en ralentissant la propagation des fissures. De même, Abdul Aabid et al. [68] ont étudié l'optimisation des réparations à l'aide de patches composites unilatéraux et bilatéraux sous surcharge, mettant en évidence l'amélioration des performances de réparation grâce à l'application de surcharge et à l'optimisation des paramètres de réparation.

La figure 32 montre l'évolution de la vitesse de fissuration  $da/dN$  en fonction de l'amplitude  $\Delta K$  pour deux conditions : une éprouvette soumise à surcharge et une autre sans surcharge.

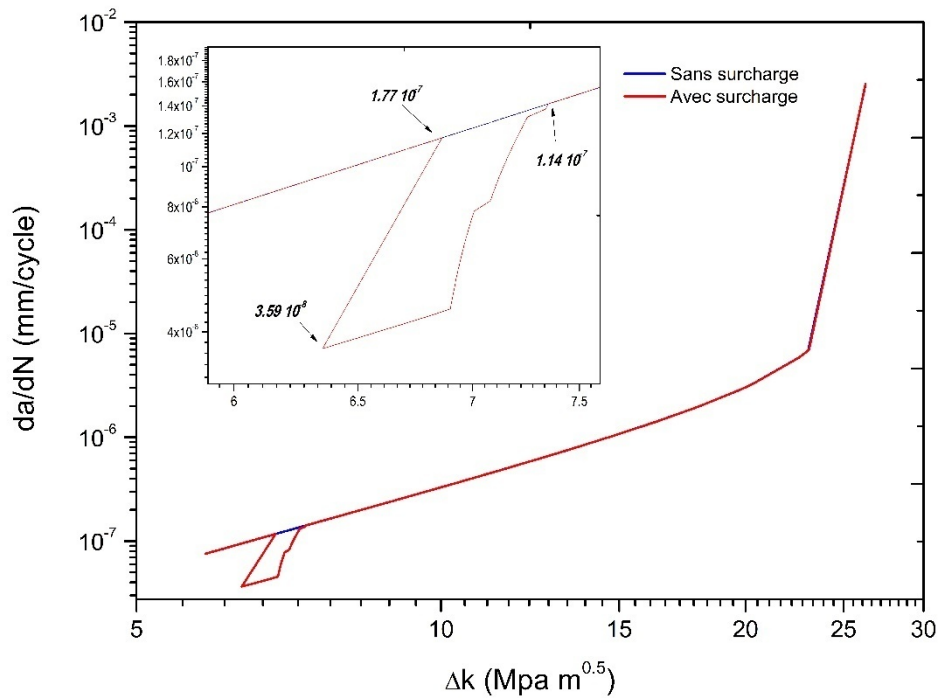


Figure 32 Comparaison de la Durée de Vie en Fatigue des Matériaux Sous Surcharge avec et Sans Réparation par Patch

On observe que, dans la zone de propagation des fissures, l'éprouvette sous surcharge présente une diminution significative de la vitesse de fissuration par rapport à l'éprouvette

sans surcharge. Ce ralentissement est particulièrement marqué lorsque la vitesse de fissuration atteint une valeur minimale de  $3.59 \times 10^{-8}$  mm/cycle, ce qui souligne l'effet retardateur de la surcharge.

Après avoir quitté la zone plastifiée, la vitesse de fissuration de l'éprouvette après surcharge reprend une valeur normale de  $1.14 \times 10^{-7}$  mm/cycle, similaire à celle de l'éprouvette sans surcharge. Ce phénomène peut être attribué à la formation d'une zone plastifiée autour de la fissure, qui redistribue les contraintes et ralentit la propagation de la fissure. Ce retard est en accord avec les résultats de plusieurs études antérieures. B. B. Verma et al[69]. Ont montré que la surcharge induit une zone plastifiée au sommet de la fissure, et que la fermeture de fissure joue un rôle majeur dans le retard de la croissance des fissures. De plus, A. Albedah et al[70]. Ont observé que la surcharge génère une zone plastifiée plus grande pour l'alliage 2024-T3, ce qui induit un retard significatif de la fissuration. Ils ont constaté que le retard dans la propagation des fissures dure environ 10 mm pour le 2024-T3 et 1 mm pour le 7075-T6 à partir du point d'application de la surcharge.

### **3.5.6 Influence du Taux de Surcharge sur la Durée de Vie en Fatigue des Matériaux Réparés par Patch**

Dans cette section, afin d'évaluer l'influence du taux de surcharge sur la durée de vie en fatigue d'une éprouvette ayant une rigidité de 110%, nous avons simulé plusieurs taux de surcharge : 1,5, 2, 2,5, 3 et 3,5. Nos résultats ont montré que l'effet de retard dû à la surcharge est toujours présent, mais pour les taux de surcharge inférieurs à 2,5, ce retard est relativement faible. En revanche, pour un taux de surcharge de 3, le retard devient considérable, ce qui démontre un impact plus marqué sur la propagation des fissures. Cependant, pour un taux de surcharge de 3,5, nous avons observé que l'éprouvette n'a pas résisté, malgré la réparation par patch, ce qui suggère que des taux de surcharge trop élevés peuvent compromettre la durabilité de la réparation.

Des études précédentes confirment ces observations. Par exemple, Mohammed et al[67]. Ont étudié l'effet de la surcharge sur la croissance des fissures dans des alliages

d'aluminium 2024-T3 et 7075-T6. Ils ont conclu que la surcharge générait une zone plastifiée au sommet de la fissure, réduisant ainsi sa propagation, avec un retard de croissance d'environ 10 mm pour le 2024-T3 et de 1 mm pour le 7075-T6, des résultats qui sont en accord avec nos constatations. De manière similaire, Seriari et al[71]. Ont observé que l'application de surcharge avant la réparation par patch composite prolongeait significativement la durée de vie en fatigue des plaques 7075-T6, produisant un quasi-retard infini dans la propagation des fissures. Ces résultats confirment l'impact positif de la surcharge sur la performance des réparations, ce qui corrobore nos observations et souligne l'importance d'un dosage adéquat de la surcharge pour optimiser la durée de vie en fatigue des structures réparées.

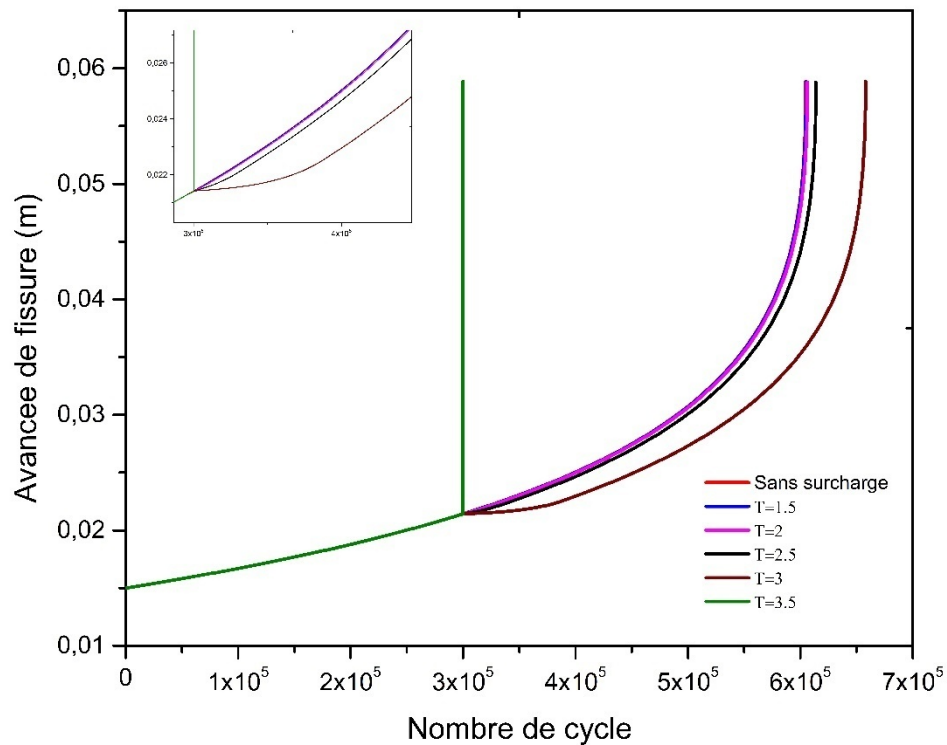
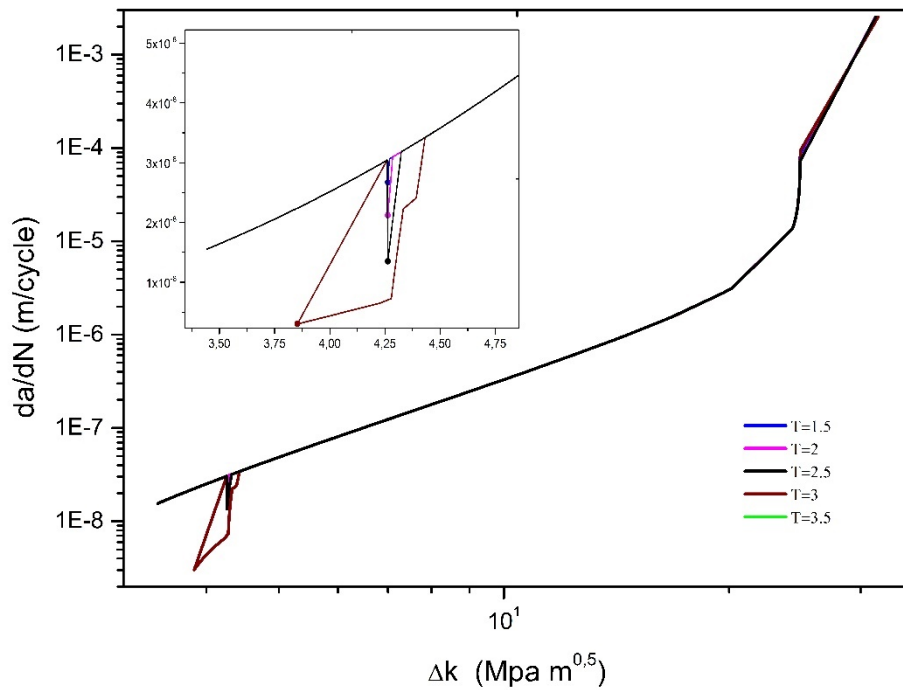


Figure 33 Impact du Taux de Surcharge sur la Croissance des Fissures et la Résistance à la Fatigue des Réparations par Patch

Cette figure illustre l'analyse de la croissance de fissures par fatigue en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte  $\Delta K$  pour différents taux de surcharge. Lorsqu'une surcharge est appliquée, en particulier pour  $T=3.5$ , on observe que la vitesse de propagation des fissures  $da/dN$  devient nulle après application de la surcharge, ce qui signifie que le matériau a résisté temporairement à la propagation de la fissure, mais que la réparation n'a pas tenu face à cette surcharge. Ce phénomène peut être expliqué par le comportement en fatigue du matériau, où la vitesse minimale de propagation de la fissure est plus faible entre  $T=1.5$  et  $T=3$ . En effet, chaque fois qu'une surcharge est appliquée, la vitesse de propagation des fissures diminue, indiquant un retard dans la croissance des fissures. Cela montre que l'effet de la surcharge est plus marqué à chaque augmentation de la taux de surcharge ce qui se traduit par un nombre plus important de cycles de retard. Ces résultats sont cruciaux pour comprendre les dynamics de la fatigue dans les matériaux, en particulier sous des conditions de surcharge, ce qui influence directement la durée de vie du matériau avant la défaillance.



*Figure 34 Comparaison de la Vitesse de Propagation des Fissures Avant et Après Application de la Surcharge pour Divers Taux de Surcharge*

### **3.5.7 Impact de la Rigidité du Patch sur la Durée de Vie en Fatigue et la Propagation des Fissures sous Surcharge Cyclique**

Dans le but de voir l'influence de la rigidité du patch, en particulier au moment de l'application de la surcharge, nous avons procédé à différentes simulations avec des rigidités de patch de 80%, 100% et 120%, en utilisant un adhésif en graphite époxy, tout en appliquant le même taux de surcharge, soit  $t = 3$ . La surcharge a été appliquée sur un total de 300 000 cycles. Les résultats montrent que l'augmentation de la rigidité du patch ralentit la progression de la fissure et améliore la durabilité du matériau.

En observant la figure 35, on constate que le patch à 120% de rigidité présente la plus grande résistance à la rupture, atteignant environ 700 000 cycles avant la rupture, tandis que le patch à 100% de rigidité supporte environ 500 000 cycles avant d'atteindre la rupture. En revanche, le patch à 80% de rigidité montre la progression la plus rapide de la fissure et se fracture après seulement 350 000 cycles. Cela montre clairement que l'augmentation de la rigidité du patch retarde de manière significative la rupture de la structure.

Concernant les zones plastiques, une partie de l'énergie de surcharge est utilisée pour créer une zone plastique autour de la fissure, tandis que l'autre partie est absorbée par le patch. Pour les patches avec des rigidités de 100% et 120%, une plus grande proportion de l'énergie est absorbée par le patch, limitant ainsi la formation de zones plastiques et retardant la progression de la fissure. À l'inverse, pour un patch à 80% de rigidité, une plus grande proportion de l'énergie est dissipée sous forme de déformation plastique, ce qui génère une zone plastique plus importante et favorise une progression plus rapide de la fissure.

Cette analyse démontre que l'augmentation de la rigidité du patch permet de mieux absorber l'énergie, réduisant ainsi la taille des zones plastiques et ralentissant la progression des fissures. Cela améliore la durabilité des matériaux sous surcharge cyclique, ce qui est

crucial pour les applications en ingénierie où la résistance des structures composites est essentielle.

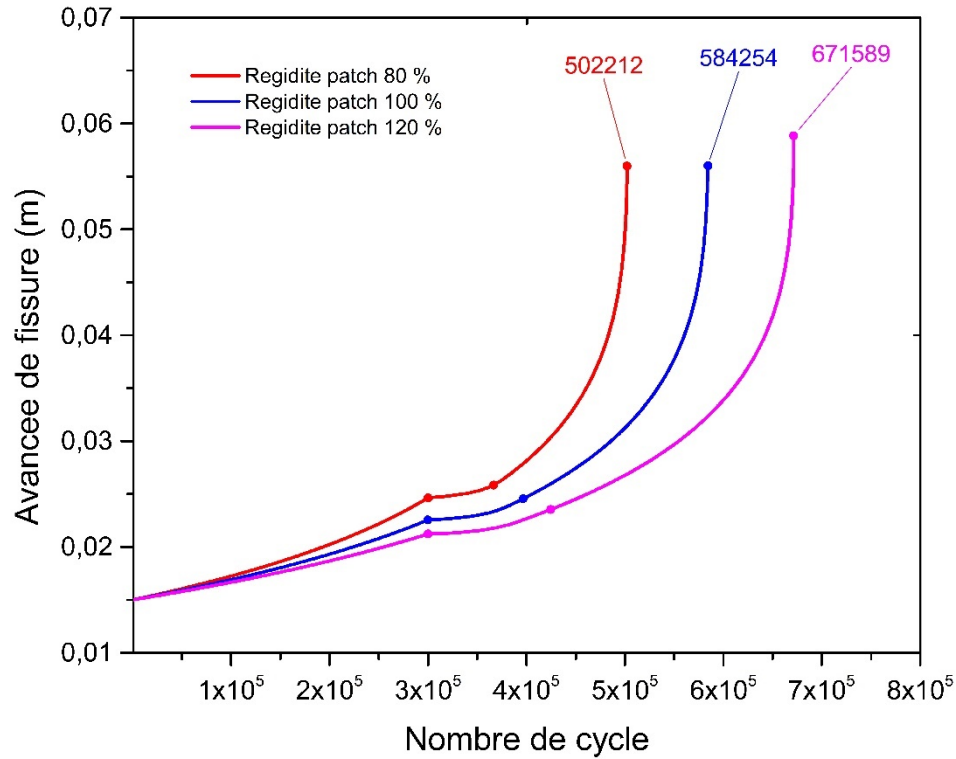


Figure 35 Effet de la Rigidité du Patch sur la Durée de Vie en Fatigue sous Surcharge Cyclique

Cette figure 36 analyse l'impact de la rigidité du patch sur la vitesse de propagation de la fissure sous surcharge cyclique. Les courbes montrent l'évolution de la vitesse de propagation de la fissure  $da/dN$  en fonction du facteur de contrainte  $\Delta K$ , pour différents niveaux de rigidité du patch (80%, 100% et 120%). Les résultats révèlent que l'augmentation de la rigidité du patch ralentit de manière significative la progression de la fissure.

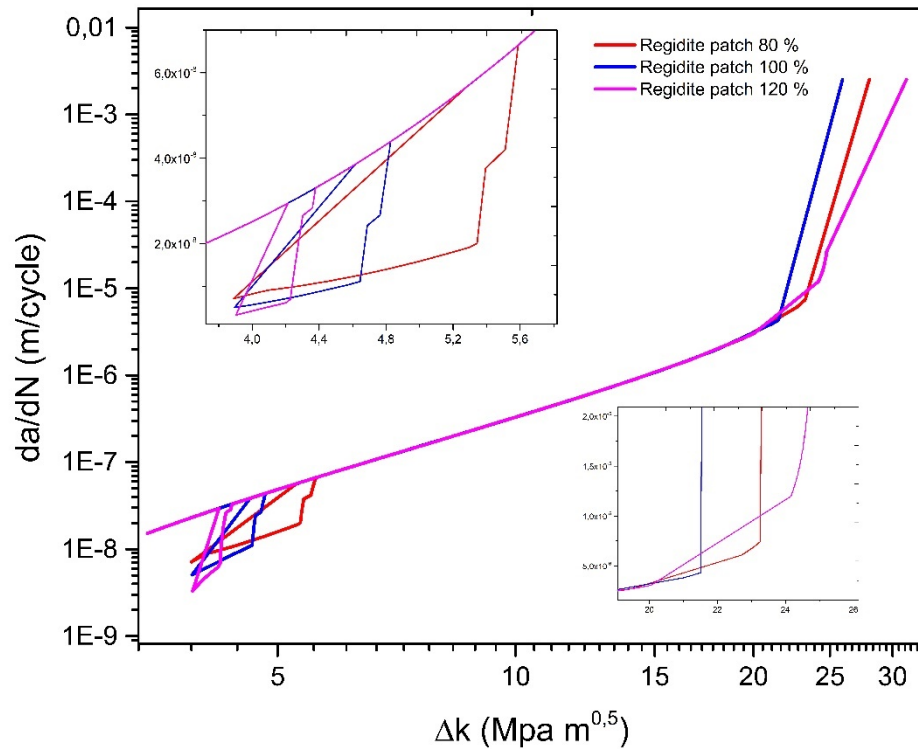


Figure 36 Effet de la Rigidité du Patch sur la Vitesse de Propagation des Fissures sous Surcharge Cyclique

Pour le patch à 120% de rigidité, On observe qu'à la suite de la surcharge, la vitesse de fissuration diminue nettement, passant de  $2,944 \times 10^{-8}$  à une valeur minimale de  $3,283 \times 10^{-9}$  m/cycle. Cette diminution traduit un effet retard, typique de l'inhibition temporaire de la propagation de fissure dans la zone influencée plastiquement par la surcharge.

Au-delà de ce point, avec l'augmentation progressive du facteur d'intensité de contrainte, la vitesse de propagation augmente graduellement jusqu'à atteindre  $3,282 \times 10^{-8}$  m/cycle, ce qui indique une reprise de la croissance de fissure une fois la fissure sortie de la zone plastique induite par la surcharge.

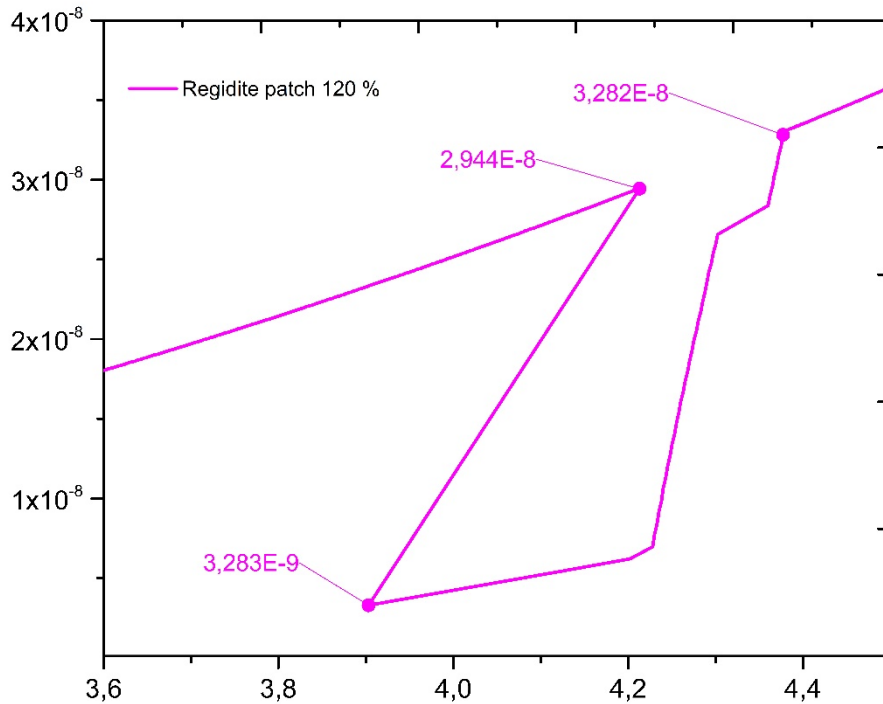


Figure 37 Zoom sur la Vitesse de Propagation des Fissures pour le Patch à 120% de Rigidité après Application de la Surcharge en Fonction de l'Amplitude  $\Delta K$

Dans le cas du patch Rigidité à 100 %, la vitesse de fissuration diminue à une valeur minimale de  $5,058 \times 10^{-9}$  m/cycle après surcharge. Par la suite, elle augmente à  $3,837 \times 10^{-8}$  puis à  $4,407 \times 10^{-8}$  m/cycle, suivant une tendance similaire aux autres configurations. La baisse initiale de la vitesse de propagation montre que l'effet retard est présent, et que la couverture complète de la fissure initiale par le patch apporte une amélioration significative de la durée de vie en fatigue.

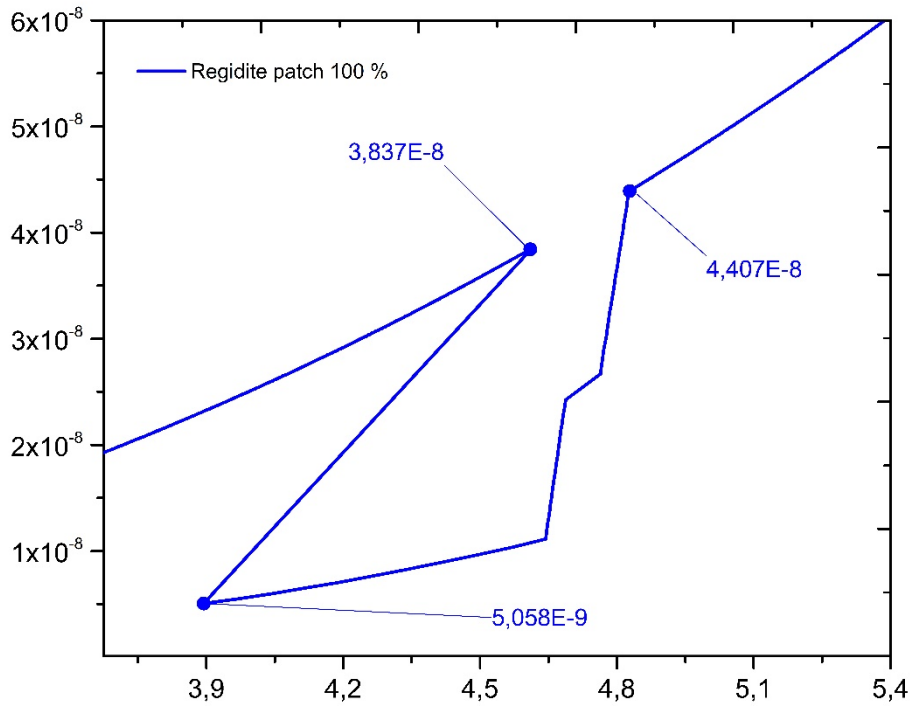


Figure 38 Zoom sur la Vitesse de Propagation des Fissures pour le Patch à 100% de Rigidité après Application de la Surcharge en Fonction de l'Amplitude  $\Delta K$

La courbe associée au patch Rigidité appliqué à 80 % montre également un comportement typique d'effet retard après surcharge. La vitesse de propagation de fissure chute initialement à  $7,117 \times 10^{-9}$  m/cycle, avant d'augmenter progressivement pour atteindre  $5,685 \times 10^{-8}$  puis  $6,648 \times 10^{-8}$  m/cycle. Cette évolution indique une efficacité relative du patch, bien que la vitesse minimale reste plus élevée que celles observées avec des patches de couverture plus étendue (100 % et 120 %), traduisant une moindre efficacité du renforcement.

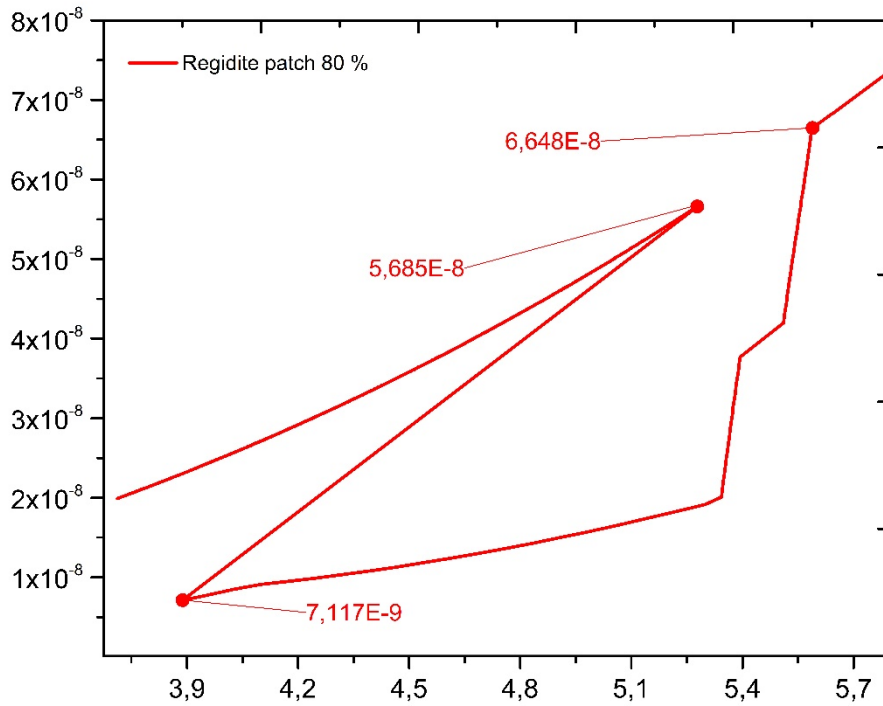


Figure 39 Zoom sur la Vitesse de Propagation des Fissures pour le Patch à 80% de Rigidité après Application de la Surcharge en Fonction de l'Amplitude  $\Delta K$

**Tableau 1** Tableau récapitulatif des vitesses minimales observées et efficacité du patch

Configuration de patch	Vitesse initiale avant chute (m/cycle)	Vitesse minimale après surcharge (m/cycle)	Réduction (%)	Remarques sur l'efficacité
Rigidité 80 %	$5,685 \times 10^{-8}$	$7,117 \times 10^{-9}$	<b>87,5 %</b>	Moins efficace, réduction modérée
Rigidité 100 %	$3,837 \times 10^{-8}$	$5,058 \times 10^{-9}$	<b>86,8 %</b>	Bonne réduction, amélioration significative

Rigidité 120 %	$2,944 \times 10^{-8}$	$3,283 \times 10^{-9}$	<b>88,9 %</b>	Meilleure efficacité, effet retard marqué
----------------	------------------------	------------------------	---------------	---

Ces résultats montrent clairement que la rigidité du patch a une influence majeure sur la vitesse de propagation des fissures. Les patches à 120% de rigidité offrent la meilleure résistance à la propagation des fissures, retardant leur développement et augmentant ainsi la durabilité du matériau. En revanche, les patches à 80% de rigidité favorisent une propagation plus rapide des fissures, tandis que les patches à 100% de rigidité offrent un compromis, avec une propagation plus lente que celle du patch à 80%, mais plus rapide que celle du patch à 120%. Ces résultats soulignent l'importance de la rigidité du patch pour optimiser la résistance des matériaux sous charges cycliques répétées.

## **Conclusion Générale**

### **Conclusion Générale**

L'objectif de cette étude était d'évaluer l'impact de différents facteurs sur la durée de vie en fatigue de l'alliage d'aluminium 6061-T6, avec un accent particulier sur la rigidité des patches de réparation, la surcharge cyclique et l'effet des différents adhésifs utilisés pour les réparations. À travers une série de simulations, nous avons exploré comment ces paramètres influencent la propagation des fissures, la durabilité du matériau et les performances globales des réparations sous chargement cyclique.

Les résultats montrent que l'augmentation du rapport de charge  $R$  accélère la propagation des fissures, réduisant ainsi la durée de vie en fatigue du matériau. À mesure que  $R$  augmente, la vitesse de propagation des fissures s'intensifie, ce qui confirme les théories classiques de la fatigue des matériaux où des charges plus élevées favorisent l'expansion rapide des fissures. De plus, les valeurs de  $\Delta K_{seuil}$  et  $\Delta K_{max}$  ont montré des modifications significatives selon les variations de  $R$ , indiquant que des charges plus élevées nécessitent une contrainte plus importante pour initier la propagation des fissures.

En ce qui concerne les réparations par patch, les résultats ont mis en évidence l'efficacité de l'application d'un patch composite pour prolonger la durée de vie en fatigue de l'alliage d'aluminium 6061-T6. L'application d'un patch rigide (140%) a significativement retardé la propagation des fissures, prolongeant ainsi la durabilité du matériau. En revanche, les patches moins rigides (80%) ont montré des performances moins favorables, accélérant la propagation des fissures sous charges cycliques. Cette observation a confirmé que l'augmentation de la rigidité du patch améliore la performance en fatigue, principalement en redistribuant plus efficacement les contraintes et en limitant les déformations plastiques locales.

L'étude a également démontré l'impact de la surcharge cyclique sur la durabilité du matériau réparé. L'application de surcharge a retardé la propagation des fissures, en particulier pour les taux de surcharge modérés (jusqu'à  $t=3$ ), où un retard significatif de la progression des fissures a été observé. Cependant, des taux de surcharge trop élevés ( $t=3.5$ ) ont compromis la durabilité de la réparation, soulignant l'importance de contrôler les taux

## *Conclusion générale*

---

de surcharge pour optimiser la performance du matériau réparé. Le modèle de Wilburg a expliqué ce phénomène en mettant en évidence la formation d'une zone plastique au sommet de la fissure, qui réduit l'intensité des contraintes et ralentit la propagation des fissures.

En outre, l'étude a mis en lumière l'influence des adhésifs utilisés pour la réparation. L'adhésif Graphite/Epoxy a montré une amélioration substantielle de la durée de vie en fatigue des matériaux réparés, surpassant les autres adhésifs comme Boron/Epoxy et Glare, en raison de sa résistance élevée à la fatigue et de sa capacité à redistribuer efficacement les contraintes. Cela a confirmé que le choix de l'adhésif est un facteur déterminant dans l'efficacité des réparations par patch.

Cette étude démontre que l'optimisation de la rigidité du patch, l'application d'une surcharge cyclique contrôlée et le choix d'un adhésif approprié sont des facteurs clés pour améliorer la durabilité des réparations par patch dans des matériaux soumis à des charges cycliques. Les résultats obtenus offrent des perspectives intéressantes pour la gestion de la fatigue et la prolongation de la durée de vie des structures métalliques dans des applications industrielles où la résistance à la propagation des fissures est essentielle.

# **Perspectives**

## **Perspectives**

Cette étude ouvre plusieurs pistes de recherche pour améliorer la durabilité des réparations par patch. Il serait intéressant d'explorer l'impact de configurations de patches variées, notamment multicouches, et d'examiner leur efficacité sous des charges combinées (traction, compression, torsion). De plus, l'optimisation des paramètres de surcharge en fonction des propriétés des matériaux réparés pourrait améliorer la performance des réparations. Une étude approfondie sur l'effet de la corrosion sur la résistance en fatigue des réparations serait également bénéfique, tout comme l'application de techniques de modélisation avancée pour mieux prédire la durée de vie en fatigue. Ces perspectives permettront de développer des solutions plus efficaces et adaptées aux conditions réelles des structures métalliques.

### Références

- [1] A. Hohenwarter, T. Leitner, R. Pippan, *Annual Review of Materials Research*, 54 (2024).
- [2] M.M. Mohammed, *Multidiscip. Mater. Chron*, 1 (2024) 49-61.
- [3] A.M. Alshoaibi, Y.A. Fageehi, *Applied Sciences*, 14 (2024) 9297.
- [4] A. Yousefi, S. Jolaiy, R. Hedayati, A. Serjouei, M. Bodaghi, *Materials*, 14 (2021) 1421.
- [5] K. Bahram, M. Chaib, A. Slimane, B. Bouchouicha, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 136 (2025) 1409-1419.
- [6] A. Aabid, M. Hrairi, J.S.M. Ali, T.A. Sebaey, *Materials*, 15 (2022) 3086.
- [7] M. Mohammadabadi, V. Yadama, L. Smith, *Composite Structures*, 241 (2020) 112133.
- [8] M. Koyama, H. Noguchi, K. Tsuzaki, *Microstructural crack tip plasticity controlling small fatigue crack growth*, in: *The Plaston Concept: Plastic Deformation in Structural Materials*, Springer Nature Singapore Singapore, 2022, pp. 213-234.
- [9] W. Liu, J. Huang, J. Liu, X. Wu, K. Zhang, A. Huang, *International Journal of Fatigue*, 148 (2021) 106203.
- [10] F.Z. Seriari, M. Benachour, M. Benguediab, *Fracture and Structural Integrity*, 12 (2018) 43-56.
- [11] H. Hosseini-Toudeshky, A. Jasezadeh, B. Mohammadi, *Applied Composite Materials*, 18 (2011) 571-584.
- [12] T. Kobayashi, *Materials Science and Engineering: A*, 280 (2000) 8-16.
- [13] G. Huang, Z.-H. Li, L.-M. Sun, X.-W. Li, K. Wen, L.-Z. Yan, B.-Q. Xiong, Y.-A. Zhang, *Rare Metals*, 40 (2021) 2523-2529.
- [14] S.G. Pantelakis, A.T. Kermanidis, *Fatigue crack growth of aircraft aluminum alloys*, in: *Multiscale Fatigue Crack Initiation and Propagation of Engineering Materials: Structural Integrity and Microstructural Worthiness: Fatigue Crack Growth Behaviour of Small and Large Bodies*, Springer, 2008, pp. 345-366.
- [15] Y.I. Yang, H. Chen, J. Shen, Y. Li, *Study on Fatigue Damage of Automotive Aluminum Alloy Sheet Based on CT Scanning*, in: *Advances in Condition Monitoring and Structural Health Monitoring: WCCM 2019*, Springer, 2021, pp. 519-525.
- [16] P.H. Tjahjanti, S.H. Sujiatanti, *Finite Element Methods and Their Applications*, (2021) 221.
- [17] F. Abdollahi-Mamoudan, C. Ibarra-Castanedo, X.P. Maldague, *Sensors*, 25 (2025) 3635.
- [18] H. Li, J. Gao, Q. Li, *Applied Sciences*, 8 (2018) 2626.
- [19] I. Alqahtani, A. Starr, M. Khan, *Metals*, 14 (2024) 336.
- [20] T.L. Anderson, *Fracture mechanics: fundamentals and applications*, CRC press, 2005.
- [21] H.A. RICHARD, M. Fulland, M. Sander, *Fatigue & fracture of engineering materials & structures*, 28 (2005) 3-12.
- [22] D. Picard, (2007).
- [23] B. Meddour, *Université de Laghouat*, (2016).
- [24] M. Kaminski, in: *École Nationale Supérieure des Mines de Paris*, 2007.
- [25] A. Pineau, *Local approach to fracture*, (2004) 33-78.
- [26] D. Hammond, S. Meguid, *Engineering Fracture Mechanics*, 37 (1990) 373-387.
- [27] I. Altenberger, *Shot Peening*, (2003) 419-434.
- [28] Y. Li, J. Chen, J. Wang, X. Shi, L. Chen, *International Journal of Fatigue*, 139 (2020) 105750.

- [29] S.-g. Chen, H.-j. Gao, Q. Wu, Z.-h. Gao, X. Zhou, *Journal of materials research and technology*, 17 (2022) 2950-2974.
- [30] M. Nasser, A. Schubnel, R. Young, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44 (2007) 601-616.
- [31] S. Zhirafar, A. Rezaeian, M. Pugh, *Journal of Materials Processing Technology*, 186 (2007) 298-303.
- [32] C.-H. Su, T.-C. Chen, Y.-S. Ding, G.-X. Lu, L.-W. Tsay, *Materials*, 16 (2023) 1160.
- [33] A.E.M. Alaoui, in, *Université de Metz*, 2005.
- [34] J. Petit, J. Mendez, in, *Pergamon*, 1, 1996.
- [35] O. Oni, in, *Compiègne*, 1986.
- [36] W. Maeng, Y. Kang, T. Nam, S. Ohashi, T. Ishihara, *Journal of nuclear materials*, 275 (1999) 194-200.
- [37] M. Du, F. Chiang, S. Kagwade, C. Clayton, *International Journal of Fatigue*, 20 (1998) 743-748.
- [38] M. Papakyriacou, H. Mayer, C. Pypen, H. Plenk Jr, S. Stanzl-Tschegg, *International Journal of Fatigue*, 22 (2000) 873-886.
- [39] H. Alawi, J. Alhajji, M. Reda, *Engineering fracture mechanics*, 53 (1996) 387-398.
- [40] S. Zhu, L. Peng, T. Moriya, Y. Mutoh, *Materials Science and Engineering: A*, 290 (2000) 198-206.
- [41] A. Miloudi, M. Laredj, A. Lousdad, B. Benguediab, *Fracture and Structural Integrity*, 13 (2019) 193-207.
- [42] K. Bahram, M. Chaib, A. Slimene, B. Bouchouicha, *Fracture and Structural Integrity*, 14 (2020) 467-476.
- [43] M.M. Alani, in: *2010 7th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*, IEEE, 2010, pp. 1-4.
- [44] M. Abdelkader, Z. Mokhtar, B. Mohamed, M. Mohamed, A. Abdelwaheb, *Materials Research*, 16 (2013) 1161-1168.
- [45] M.I. BENTOUILA, M.M. SABRI, K. BAHRAM, in, 2022.
- [46] T. Ouahbi, A. Saouab, J. Breard, P. Ouagne, S. Chatel, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38 (2007) 1646-1654.
- [47] <https://www.demgy.com/fr/page/technologies/creation-transformation-of-composite-materials>.
- [48] V. Kozák, J. Vala, *Materials*, 17 (2024) 3177.
- [49] P.W. Beaumont, *Applied Composite Materials*, 27 (2020) 449-478.
- [50] X. Huang, S. Su, Z. Xu, Q. Miao, W. Li, L. Wang, *Buildings*, 13 (2023) 2406.
- [51] Borel, L. Goff, Lucine, *Matériaux & Techniques*, 72 (1984) 203-206.
- [52] S. Fouquet, in, *Université Bordeaux 1*, 2003.
- [53] <https://www.usinenouvelle.com/article/composites-chiffres-et-tendances-mondiales-2022-2027.N2114316>.
- [54] K.U. Kainer, *Metal Matrix Composites: Custom-made Materials for Automotive and Aerospace Engineering*, (2006) 1-54.
- [55] J.D. Barbant, *Impact de l'orientation des fibres sur les comportements en traction, en flexion et en cisaillement d'un béton renforcé de fibres métalliques*, Ecole Polytechnique, Montreal (Canada), 2018.

- [56] A. Abrishambaf, J.A. Barros, V.M. Cunha, *Cement and concrete research*, 51 (2013) 57-66.
- [57] M. Behloul, in, Cachan, Ecole normale supérieure, 1996.
- [58] L. Ferrara, M. Faifer, S. Toscani, *Materials and structures*, 45 (2012) 575-589.
- [59] C. Hollmann, K. Wille, in: 5th International conference on structural engineering, mechanics and computation, SEMC, 2013, pp. 1721-1726.
- [60] L. Muller, F. Pagano, M. Kaminski, F.-H. Leroy, J.-F. Maire, in: 21ème Journées Nationales sur les Composites, 2019.
- [61] B. Hami, *Journal of Materials, Processes and Environment*, 1 (2013) 57-61.
- [62] J. Renard, *Fatigue des matériaux composites renforcés de fibres continues*, Ed. Techniques Ingénieur, 2010.
- [63] T. ACHOUR, F. MILI.
- [64] M. Saad, D. Ouinas, *Journal of Materials, Processes and Environment*, 1 (2013) 86-92.
- [65] C. Bois, M. Colt, H. Wagnier, J.-C. Wahl, in: 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), 2011, pp. 173.
- [66] M. Benchaâ, D. Ouinas, M. Sahnoun, *J Mater Process Environ*, 2 (2014) 34-40.
- [67] B.A. Bachir Bouiadjra, S. Mohammed, F. Benyahia, A. Albedah, *Metals*, 11 (2021) 2025.
- [68] A. Aabid, Y.E. Ibrahim, M. Hrairi, J.S.M. Ali, *Materials*, 16 (2023) 1581.
- [69] B. Verma, A. Kumar, P. Ray, (2000).
- [70] A. Albedah, B.B. Bouiadjra, S. Mohammed, F. Benyahia, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 27 (2020) 83-90.
- [71] M. Benachour, N. Benachour, F. Seriari, M. Benguediab, *Engineering Mechanics*, (2012) 27.