



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
La République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de L'enseignement Supérieur et La Recherche Scientifique
جامعة عبد الحميد بن باديس – مستغانم
Université Abdel Hamid IBN Badis – Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculté des Sciences et de La Technologies
قسم الهندسة الميكانيكية
Département de Génie Mécanique



N° d'ordre : M / GM / 2026

PROJET FIN D'ETUDE

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Thème :

**Etude numérique de la réparation de coques en aluminium par
patch composite collé**

Présenté par :

- REZIGA Hesna
- BOUZIANE Roumaissa Elbatoul

Soutenu le /06/2026 devant le jury composé de

Président **Pr. OUINAS Djamel** Université de Mostaganem UMAB

Examineur **Dr. BELHACHEMI Amina** Université de Mostaganem UMAB

Encadrante **Dr. BELOUFA Imane** Université de Mostaganem UMAB

Année Universitaire : 2025 / 2026

Remerciement

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrante **Dr. BELOUFA Imane** pour sa disponibilité, ses précieux conseils, son accompagnement constant et son soutien tout au long de la réalisation de ce travail.

Nos sincères remerciements s'adressent également aux **membres du jury** pour l'intérêt qu'ils portent à ce mémoire ainsi que pour le temps consacré à son évaluation.

Enfin, nous adressons nos plus vifs remerciements à **nos familles** pour leur soutien indéfectible, leur patience et leurs encouragements qui nous ont accompagnés tout au long de notre parcours universitaire.

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

À ma famille, pour son amour, sa patience et les nombreux sacrifices consentis tout au long de mon parcours. Ce travail est le fruit de son soutien indéfectible.

À toutes les personnes qui ont été une source d'inspiration, de motivation et d'encouragement dans la réalisation de ce travail.

À mon binôme, pour sa collaboration, son engagement et les efforts partagés tout au long de cette aventure académique.

À mon encadrante, Mme BELOUFA Imane, pour son accompagnement, sa disponibilité, ses précieux conseils et la confiance qu'elle m'a accordée.

REZIGA Hesna

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mon père et à ma mère, que Dieu lui accorde sa miséricorde, pour leur amour, leurs sacrifices et leur soutien inconditionnel tout au long de mon parcours.

À mes sœurs, pour leur affection, leur présence et leurs encouragements.

À mon binôme, pour sa patience, sa collaboration et tous les efforts fournis tout au long de ce travail.

À mon encadrante, Mme BELOUFA Imane , pour son accompagnement, sa disponibilité, ses précieux conseils et son soutien tout au long de la réalisation de ce travail. Ses orientations et son expertise ont grandement contribué à l'aboutissement de ce projet.

BOUZIANE Roumaïssa Elbatoul

Résumé

Dans ce travail, la méthode des éléments finis tridimensionnels a été utilisée pour déterminer les facteurs d'intensité de contrainte (FIC) au voisinage d'une fissure latérale dans une plaque en aluminium 6061-T6 réparée par un patch composite latéral collé. Les simulations numériques ont été réalisées sous le logiciel Abaqus en utilisant la méthode de l'intégrale de contour (Contour Integral). Une étude de convergence du maillage a été effectuée afin de garantir la fiabilité des résultats, lesquels ont été validés par comparaison avec des solutions analytiques issues de la littérature.

L'analyse a porté sur une fissure latérale en mode I ainsi que sur une fissure inclinée en mode mixte, permettant la détermination des facteurs d'intensité de contrainte K_I et K_{II} . Une étude paramétrique a été menée afin d'évaluer l'influence de la longueur de la fissure, de la hauteur du renfort composite, de l'épaisseur du patch et de l'adhésif, de l'orientation des plis ainsi que de la nature des matériaux constituant le patch composite et la colle. Les résultats obtenus montrent que la réparation par patch composite permet de réduire significativement les facteurs d'intensité de contrainte et de ralentir la propagation de la fissure. Cette réduction dépend fortement des caractéristiques géométriques du système de réparation et des propriétés mécaniques des matériaux mis en œuvre, soulignant l'importance de leur optimisation pour améliorer l'efficacité de la réparation.

Mots-clés : Fissure latérale, Facteur d'intensité de contrainte (FIC), Réparation par collage, Patch composite, Adhésif, Méthode des éléments finis.

Abstract

In this study, the three-dimensional finite element method was used to determine the stress intensity factors (SIFs) for a lateral crack in a 6061-T6 aluminum plate repaired with a bonded lateral composite patch. The numerical simulations were carried out using Abaqus software, employing the contour integral method (Contour Integral). A mesh convergence study was performed to ensure the reliability of the results, which were validated by comparison with analytical solutions from the literature.

The analysis was conducted for both a lateral crack under Mode I loading and an inclined crack under mixed-mode loading, enabling the determination of the stress intensity factors K_I and K_{II} . A parametric study was performed to investigate the influence of crack length, composite reinforcement height, patch and adhesive thicknesses, ply orientation, and the material properties of the composite patch and the adhesive. The results obtained show that the composite patch repair significantly reduces the stress intensity factors and consequently slows down crack propagation. This reduction is strongly influenced by the geometric characteristics of the repair system and the mechanical properties of the materials used, highlighting the importance of optimising these factors to improve the effectiveness of the repair.

Keywords: Lateral crack, Stress intensity factor (SIF), Bonded repair, Composite patch, Adhesive, Finite element method.

ملخص

في هذا العمل، تم استخدام طريقة العناصر المحدودة ثلاثية الأبعاد من أجل تحديد عوامل شدة الإجهاد بالقرب من شق جانبي في صفيحة من الألمنيوم 6061-T6 تم إصلاحها بواسطة رقعة مركبة جانبية ملصقة. أُجريت المحاكاة العددية باستخدام برنامج ABAQUS بالاعتماد على طريقة التكامل المحيطي. كما تم إجراء دراسة لتقارب الشبكة بهدف ضمان موثوقية النتائج والتي تم التحقق من صحتها من خلال مقارنتها بحلول تحليلية مستمدة من المراجع العلمية.

شمل التحليل شقا جانبيا في الوضع الأول بالإضافة الى شق مائل في الوضع المختلط، مما سمح بتحديد معاملات شدة الاجهاد KI و KII. وقد أجريت دراسة بارامترية لتقييم تأثير طول الشق، وارتفاع الرقعة المركبة، وسماكة الرقعة والمادة اللاصقة، واتجاه الطبقات، بالإضافة الى طبيعة المواد المكونة للرقعة المركبة والمادة اللاصقة.

أظهرت النتائج المتحصل عليها ان الإصلاح بواسطة رقعة مركبة يسمح بتقليل عوامل شدة الاجهاد بشكل ملحوظ وابطاء انتشار الشق. كما ابرزت تأثير المعاملات الهندسية والميكانيكية لنظام الإصلاح على فعاليته.

الكلمات المفتاحية: شق جانبي، معامل شدة الإجهاد، الإصلاح باللصق، رقعة مركبة، مادة لاصقة، طريقة العناصر المحددة.

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Résumé

Abstract

ملخص

Listes des figures

Listes des tableaux

Introduction générale

Chapitre I : Introduction à la technologie de réparation par patch composite collé.

I	Introduction à la technologie de réparation par patch composite collé	4
I.1	Introduction.....	4
I.2	Définition de la réparation	4
I.3	Principales technique de réparation.....	5
I.3.1	Réparation par soudage.....	5
I.3.2	Réparation d'assemblage par rivetage/boulonnage	6
I.3.3	Réparation par collage	7
I.4	Considérations liées aux matériaux utilisés pour la réparation par collage	9
I.4.1	Matériaux composites	9
I.4.2	Couche adhésive	10
I.5	Conclusion	12

Chapitre II : Approche de la mécanique de la rupture et modélisation numérique.

II	Approche de la mécanique de la rupture et modélisation numérique	14
II.1	Introduction.....	14
II.2	Étude d'un milieu élastique fissuré	14
II.3	Modélisation d'une structure fissurée	16
II.4	Mode de rupture	16

II.5	Facteur d'intensité des contraintes.....	17
II.6	Modèle numérique : Méthode des Eléments Finis	19
II.6.1	Présentation du logiciel de calcul utilisé.....	19
II.6.2	Modèle géométrique	20
II.6.3	Présentation des Matériaux utilisés	21
II.6.4	Méthode des élément finis	23
II.7	Conclusion	25

Chapitre III : Résultats numériques et discussions

III	Résultats numériques et discussions.....	27
III.1	Introduction.....	27
III.2	Etude de la convergence du maillage	27
III.3	Modèle mathématique et validation	29
III.4	Effet de la hauteur du patch pour différentes orientations du pli	34
III.5	Effet de la largeur du patch composite	37
III.6	Influence de l'épaisseur de l'adhésif	38
III.7	Influence de l'épaisseur du patch.....	40
III.8	Influence de la nature du matériau du patch	41
III.9	Influence de la nature de la couche adhésive	42
III.10	Facteur d'intensité de contraintes en mode mixte	43
III.11	Effet de la séquence des plis sur le FIC et les contraintes de cisaillement dans la couche adhésive	44
III.12	Effet de la séquence des plis sur les contraintes normales dans la couche adhésive	47
III.13	Conclusion	51
IV	Conclusion générale	52
	Références.....	53

Liste des Figures

Chapitre I : Introduction à la technologie de réparation par patch composite collé.

Figure I. 1. Technologie de réparation composite collée [1].	4
Figure I. 2. Réparation par soudage [2].	5
Figure I. 3. Réparation par patch riveté sur fuselage de Boeing [3].	6
Figure I. 4. Réparation par boulonnage [3].	7
Figure I. 5. a) Modèle géométriques, b) Échantillons réparés par colle et non réparés [5].	7
Figure I. 6. Préimprégné en composite Bore/Époxy.	9
Figure I. 7. Réduction du facteur d'intensité de contrainte d'une fissure issue d'une entaille semi-circulaire latérale.	10
Figure I. 8. Adhésif sous forme de film.	11
Figure I. 9. Comparaison du FIC entre les fissures réparées et non réparées [19].	12

Chapitre II : Approche de la mécanique de la rupture et modélisation numérique.

Figure II. 1. (a) Propagation de la fissure. (b) Lignes de force et concentration de contraintes [21].	14
Figure II. 2. Zone délimitant le voisinage d'une pointe de fissure [21].	15
Figure II. 3. Représentation d'une fissure dans un modèle par éléments finis.	16
Figure II. 4. Définitions des modes de rupture.	17
Figure II. 5. Configuration d'une fissure inclinée: (a) géométrie générale de la plaque fissurée ; (b) mise en évidence des pointes de fissure.	18
Figure II. 6. Définition des axes (x,y) et des coordonnées (r,θ) au voisinage de l'extrémité d'une fissure.	18
Figure II. 7. Interface du logiciel Abaqus utilisée pour la modélisation et l'analyse par éléments finis.	19
Figure II. 8. Modèle géométrique.	20

Figure II. 9. Caractérisation mécanique de l'alliage d'aluminium 6061-T6 à partir de l'essai de traction [27].....	21
Figure II. 10. Essai de traction d'une éprouvette araldite 2015 (AFNOR NF T51-111) [27].	22
Figure II. 11. Courbe contrainte-déformation de l'adhésif Araldite® 2015 [27].....	23
Figure II. 12. Maillage de la structure.	25

Chapitre III : Résultats numériques et discussions.

Figure III. 1. Effet du nombre d'éléments Solide (C3D20R) sur la convergence de maillage (a) plaque non réparée ; (b) plaque réparée par un patch composite.	28
Figure III. 2. Variation du FIC en fonction de la longueur de la fissure en mode I.	31
Figure III. 3. Variation du FIC en fonction de l'angle d'orientation de la fissure en mode mixte.	32
Figure III. 4. Evaluation de FIC en fonction de la taille de la fissure.....	35
Figure III. 5. Evaluation de la réduction du FIC en fonction de la taille de la fissure.....	36
Figure III. 6. Évolution du taux de réduction du FIC en fonction de la longueur de fissure pour différentes largeurs de patch.	38
Figure III. 7. Effet de l'épaisseur de la couche adhésive sur la réduction du FIC.	39
Figure III. 8. Effet de l'épaisseur du patch sur la réduction du FIC.....	40
Figure III. 9. Influence de la nature du matériau du patch sur sur la réduction du FIC.	41
Figure III. 10. Influence de la nature de la couche adhésive sur la réduction du FIC.	42
Figure III. 11. Variation des facteurs d'intensité des contraintes KI et KII en fonction de l'angle d'inclinaison de la fissure.....	44
Figure III. 12. Effet de la séquence des plis du patch sur le FIC KI	45
Figure III. 13. Effet de la séquence des plis du patch sur les contraintes de cisaillement dans la couche adhésive.....	46
Figure III. 14. Distribution des contraintes de cisaillement τ_{yz} dans le joint de la colle.	49

Figure III. 15 . Effet de la séquence des plis du patch sur les contraintes normales dans le joint de l'adhésif.....	50
---	----

Listes des Tableaux

Chapitre II : Approche de la mécanique de la rupture et modélisation numérique.

Tableau II. 1. Propriétés mécaniques de l'alliage d'aluminium 6061-T6 [27].....21

Tableau II. 2. Propriétés mécaniques de l'adhésif Araldite® 2015 [27]. 23

Tableau II. 3. Les propriétés mécaniques du composite Bore/Époxy [28]. 24

Chapitre III : Résultats numériques et discussions.

Tableau III. 1. Comparaison du SIF d'une fissure non réparée. 30

Tableau III. 2. Comparaison du FIC d'une fissure inclinée non réparée ($a=10\text{mm}$)....32

Tableau III. 3. Propriétés des matériaux des patch en composites [39].....41

Tableau III. 4. Propriétés mécaniques des adhésifs AV138 et FM73 [39]. 43

Introduction générale

Les structures mécaniques utilisées dans plusieurs domaines notamment l'aéronautique, l'automobile, et de l'industrie sont fréquemment soumises à des sollicitations mécaniques et environnementales susceptibles d'engendrer l'apparition de défauts tels que les fissures. La présence de ces dernières constitue l'une des principales causes de dégradation des performances mécaniques des structures, car elles favorisent la concentration des contraintes et peuvent conduire à une propagation progressive du dommage jusqu'à la rupture.

Dans ce contexte, la mécanique de la rupture constitue un outil essentiel pour l'analyse du comportement des structures fissurées. Parmi les paramètres fondamentaux utilisés pour caractériser l'état de contrainte au voisinage du front de fissure figurent les facteurs d'intensité de contrainte (FIC), qui permettent d'évaluer la sévérité du défaut et de prédire l'évolution de la fissure sous chargement. La détermination précise de ces facteurs revêt donc une importance particulière pour l'évaluation de l'intégrité structurale et la prévision de la durée de vie des composants endommagés.

Afin d'augmenter la durée de vie des structures fissurées et de réduire les coûts liés au remplacement des pièces endommagées, plusieurs techniques de réparation ont été développées. Parmi celles-ci, la réparation par patch composite collé s'est imposée comme une solution particulièrement attractive grâce à sa faible masse, sa bonne résistance mécanique et sa capacité à réduire efficacement les concentrations de contraintes au voisinage des fissures. Cette technique est largement utilisée dans l'industrie aéronautique et suscite un intérêt croissant dans de nombreux autres secteurs industriels.

Le développement des outils numériques, notamment la méthode des éléments finis, a considérablement facilité l'analyse des structures réparées. Cette approche permet de modéliser avec précision le comportement mécanique des systèmes réparés, d'évaluer les facteurs d'intensité de contrainte et d'étudier l'influence de nombreux paramètres géométriques et mécaniques sur l'efficacité de la réparation.

Dans ce contexte, le présent travail porte sur l'étude numérique d'une plaque en aluminium 6061-T6 comportant une fissure latérale réparée par un patch composite latéral collé. La réparation est réalisée à l'aide d'un patch composite bore/époxy associé à un adhésif structural de type Araldite 2015.

Le présent mémoire est structuré en trois chapitres :

- Le premier chapitre représente un état de l'art sur la technologie de réparation par patch composite collé. Il présente les différentes techniques de réparation utilisées dans l'industrie, les domaines d'application de la réparation par collage, les matériaux employés ainsi que les principaux facteurs influençant les performances du système de réparation.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'approche de la mécanique de la rupture et à la modélisation numérique de la structure étudiée. Il présente les notions fondamentales relatives aux facteurs d'intensité de contrainte ainsi que la description du modèle numérique développé sous Abaqus, incluant les caractéristiques géométriques et mécaniques des matériaux, les conditions aux limites, le maillage et la procédure de calcul adoptée.
- Le troisième chapitre est consacré à la présentation, à l'analyse et à la discussion des résultats numériques obtenus. Une attention particulière est portée à la validation du modèle développé ainsi qu'à l'étude de l'influence des différents paramètres de réparation sur les facteurs d'intensité de contrainte et la propagation de la fissure.

Chapitre I :

Introduction à la technologie de réparation par patch composite collé

I Introduction à la technologie de réparation par patch composite collé

I.1 Introduction

Les fissures constituent l'un des principaux modes d'endommagement des structures métalliques soumises à des sollicitations mécaniques répétées ou à des environnements agressifs. Leur apparition et leur propagation peuvent entraîner une diminution significative de la résistance mécanique de la structure et, dans certains cas, conduire à une rupture brutale. Afin d'assurer la sécurité et de prolonger la durée de vie des composants endommagés, différentes techniques de réparation ont été développées et mises en œuvre dans plusieurs secteurs industriels. Le choix d'une méthode de réparation dépend de plusieurs facteurs, notamment la nature du matériau, la géométrie de la structure, la taille de la fissure, les conditions de service ainsi que les contraintes économiques.

I.2 Définition de la réparation

La réparation constitue une action corrective permanente mise en œuvre à la suite de l'apparition d'une défaillance ou d'un endommagement affectant une structure. Son objectif principal est de rétablir les performances fonctionnelles de l'équipement afin qu'il puisse continuer à fonctionner dans les conditions pour lesquelles il a été initialement conçu [1].



Figure I. 1. Technologie de réparation composite collée [1].

Parmi les différentes techniques de réparation, le collage de patches représente une solution largement utilisée pour prolonger la durée de vie des structures endommagées tout en limitant les coûts de maintenance (Figure I. 1). Cette méthode vise principalement à améliorer la résistance à la fatigue, à accroître la durabilité de la structure et à réduire la fréquence des opérations d'inspection. Dans le cas des structures fissurées, un patch est généralement collé sur la zone endommagée afin de diminuer les concentrations de contraintes et de ralentir, voire d'arrêter, la propagation de la fissure. Lorsque la structure présente des dommages dus à la corrosion, les parties dégradées sont éliminées puis remplacées ou renforcées à l'aide d'un matériau de remplissage associé à un patch collé, permettant ainsi de restaurer la capacité portante initiale de l'élément. D'autres procédés de réparation peuvent également être utilisés, notamment le soudage, le rivetage, le perçage d'arrêt de fissure (stop-drilling) ou encore les techniques d'expansion de trous.

I.3 Principes technique de réparation

Plusieurs techniques de réparation des structures endommagées ont été développées, dans le but d'améliorer la durée de vie et la fiabilité des composants mécaniques.

I.3.1 Réparation par soudage

Le soudage est un procédé d'assemblage permanent qui permet de réunir deux ou plusieurs pièces à l'aide d'un apport de chaleur, d'une pression mécanique ou d'une combinaison de ces deux actions. Dans la zone de liaison, le matériau subit généralement une fusion partielle ou totale, ou une déformation plastique suffisante pour assurer la continuité entre les éléments assemblés (Figure I. 2).

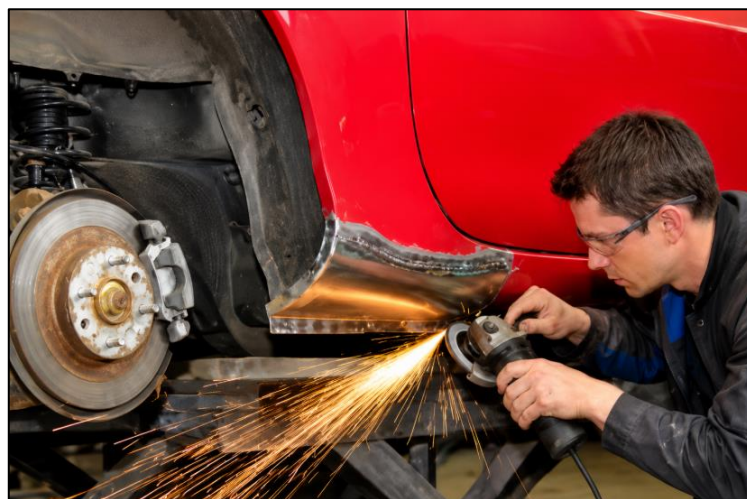


Figure I. 2. Réparation par soudage [2].

Malgré ses nombreux avantages, la réparation par soudage présente certaines limites. L'apport important de chaleur lors de l'opération peut entraîner l'apparition de contraintes résiduelles et de déformations locales susceptibles d'affecter les performances mécaniques de la structure. De plus, la zone affectée thermiquement peut subir des modifications microstructurales conduisant à une diminution des propriétés mécaniques du matériau. Dans le cas des alliages d'aluminium, le soudage peut également provoquer une perte locale de résistance et favoriser l'apparition de nouveaux défauts [2].

I.3.2 Réparation d'assemblage par rivetage/boulonnage

La réparation par rivetage ou boulonnage est une technique mécanique largement utilisée pour restaurer les structures endommagées (Figure I. 3 et Figure I. 4). Cette méthode consiste à fixer une plaque de renfort sur la zone fissurée à l'aide de rivets ou de boulons afin de transférer une partie des charges appliquées et de réduire les concentrations de contraintes au voisinage du défaut [3]. Cette technique présente plusieurs avantages, notamment sa simplicité de mise en œuvre, l'absence d'apport de chaleur et la possibilité d'intervenir directement sur la structure sans modifier significativement les propriétés du matériau de base.

Cependant, le rivetage et le boulonnage présentent certaines limitations. Le perçage des trous nécessaires à la fixation peut introduire de nouvelles concentrations de contraintes et affaiblir localement la structure. De plus, l'augmentation de la masse de l'assemblage ainsi que les risques de desserrage ou de corrosion au niveau des fixations peuvent affecter les performances à long terme de la réparation. Pour ces raisons, cette technique est souvent remplacée par les réparations par collage lorsque les conditions de service le permettent.



Figure I. 3. Réparation par patch riveté sur fuselage de Boeing [3].



Figure I. 4. Réparation par boulonnage [3].

I.3.3 Réparation par collage

La réparation par collage constitue aujourd'hui l'une des techniques les plus prometteuses pour la réhabilitation des structures endommagées. Cette méthode a connu un développement important dans plusieurs secteurs industriels grâce aux nombreux avantages qu'elle offre par rapport aux techniques traditionnelles de réparation. Parmi ces avantages figurent la réduction du poids de la structure, une bonne résistance à la fatigue, une meilleure absorption des chocs ainsi que la possibilité d'assembler des géométries complexes [4].

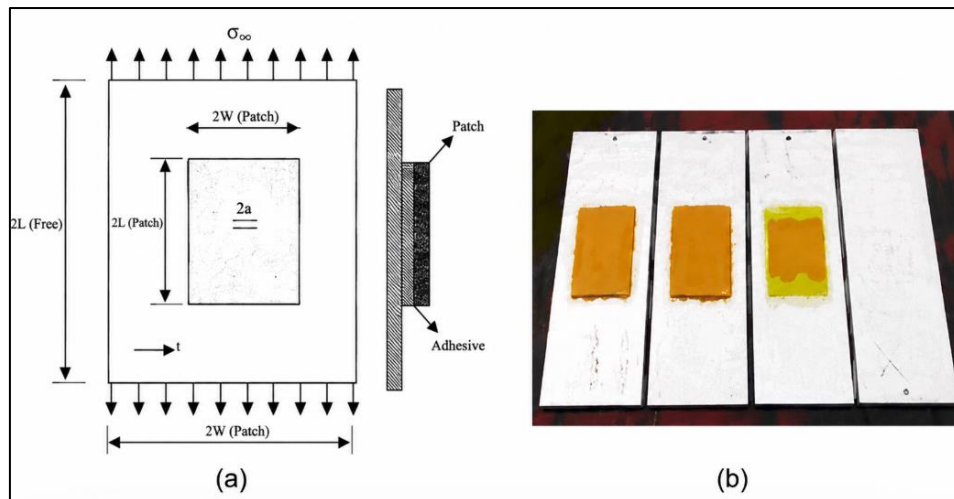


Figure I. 5. a) Modèles géométriques, b) Échantillons réparés par colle et non réparés [5].

De nombreuses études numériques et expérimentales ont été consacrées à l'analyse des structures réparées par collage afin d'évaluer l'influence des patches composites sur le comportement mécanique des structures fissurées. Le principe consiste à coller un patch

composite sur la zone endommagée afin de réduire les concentrations de contraintes et de ralentir la propagation de la fissure. Au cours des dernières décennies, plusieurs travaux de recherche ont porté sur l'optimisation des techniques de réparation par patch composite collé et sur l'étude des paramètres influençant leur efficacité. À titre d'exemple, Abdullah Maleki [5] a étudié le comportement en fatigue de plaques d'aluminium fissurées réparées par des patches composites unilatéraux en verre/époxy (Figure I. 5). Les résultats obtenus ont montré que l'utilisation d'un patch composite permet de réduire significativement la vitesse de propagation de la fissure. L'étude a également mis en évidence l'efficacité de la réparation par collage dans la diminution des concentrations de contraintes au voisinage de la fissure.

• Avantages de collage

La technique du collage présente de nombreux avantages qui expliquent son utilisation croissante :

- Permet l'assemblage de matériaux de nature différente (métaux, composites, polymères, etc.).
- Préserve l'intégrité des matériaux composites en évitant la rupture ou l'endommagement des fibres.
- Autorise l'assemblage de pièces d'épaisseurs différentes.
- Assure une répartition plus uniforme des contraintes grâce à un transfert continu des charges sur toute la surface collée.
- Améliore la résistance aux chocs, aux vibrations et à la fatigue.
- Réduit le risque de corrosion galvanique entre deux matériaux métalliques différents.
- Permet d'obtenir des surfaces lisses, ce qui constitue un avantage important pour les applications aéronautiques en améliorant les performances aérodynamiques.
- Offre une bonne étanchéité vis-à-vis de l'humidité, des fluides et des agents corrosifs.
- Facilite la réparation des structures endommagées sans nécessiter de modifications importantes de la géométrie de la pièce.
- Permet de prolonger la durée de vie des structures tout en réduisant les coûts de maintenance.

Ces nombreux avantages font du collage une solution particulièrement adaptée à la réparation des structures fissurées par patch composite.

I.4 Considérations liées aux matériaux utilisés pour la réparation par collage

I.4.1 Matériaux composites

L'évaluation des matériaux montre que les composites Bore/Époxy et Graphite/Époxy constituent les solutions les plus adaptées pour les réparations par collage. Toutefois, le composite Bore/Époxy est généralement privilégié en raison de son coefficient de dilatation thermique plus compatible avec celui des structures métalliques, notamment celles en aluminium [6].

En tant que matériau de réparation, le composite Bore/Époxy (Figure I. 6) présente plusieurs avantages [7, 8], parmi lesquels :

- Un coefficient de dilatation thermique intermédiaire, permettant de minimiser les contraintes résiduelles induites par les variations de température après le cycle de polymérisation.
- Une excellente combinaison de résistance et de rigidité, aussi bien en traction qu'en compression [7, 9].

Les fibres de graphite sont ainsi aujourd'hui disponibles dans une large gamme de propriétés et sous différentes formes. Bien que ces fibres soient moins dures que les fibres de bore, les composites Graphite/Époxy obtenus après polymérisation présentent un caractère fortement abrasif.



Figure I. 6. Préimprégné en composite Bore/Époxy.

Plusieurs études expérimentales et numériques ont été menées afin d'évaluer les performances des réparations réalisées à l'aide de patchs en Bore/Époxy. Tay et al. [10] ont

analysé l'influence d'un patch en Bore/Époxy sur la rigidité des structures métalliques aéronautiques. Leurs résultats ont montré que la présence du patch ou du renfort en Bore/Époxy permet d'améliorer significativement la rigidité de la structure réparée.

Par ailleurs, Ouinas et al. [11] ont effectué une étude comparative entre les composites Bore/Époxy et Graphite/Époxy dans le cadre de la réparation des structures aéronautiques (Figure I. 7). Les résultats obtenus ont montré que l'utilisation d'un patch en Bore/Époxy entraîne une réduction plus importante du facteur d'intensité des contraintes au niveau de la pointe de fissure. De plus, les contraintes résiduelles thermiques générées lors du processus de polymérisation de l'adhésif sont moins importantes dans le cas du Bore/Époxy, ce qui constitue un avantage supplémentaire pour ce matériau de réparation.

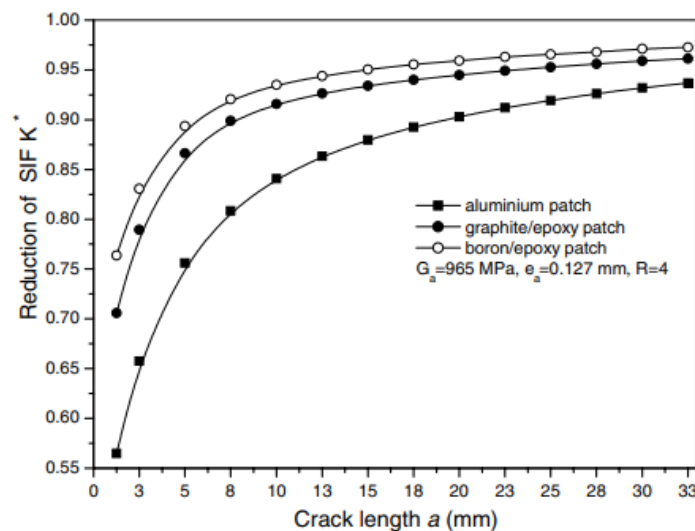


Figure I. 7. Réduction du facteur d'intensité de contrainte d'une fissure issue d'une entaille semi-circulaire latérale.

I.4.2 Couche adhésive

La couche adhésive constitue un élément essentiel dans les réparations par patch composite collé. Son rôle principal est d'assurer le transfert des charges entre la structure endommagée et le patch de réparation. L'efficacité de la réparation dépend fortement des propriétés mécaniques de l'adhésif ainsi que de sa capacité à maintenir une liaison durable entre les matériaux assemblés.

Parmi les adhésifs structuraux les plus utilisés dans les applications aéronautiques figurent le FM-73 et l'Araldite® 2015. Le FM-73 est un adhésif structural en film, Figure I. 8, qui a fait l'objet de nombreuses études en raison de sa bonne résistance mécanique et de sa

durabilité [12, 13]. L'étude des matériaux a montré que cet adhésif offre les performances requises tout en permettant une polymérisation à une température relativement faible de 80 °C.



Figure I. 8. Adhésif sous forme de film.

Dans le cadre de la présente étude, l'adhésif retenu est l'Araldite® 2015. Il s'agit d'un adhésif époxy bicomposant reconnu pour sa bonne résistance mécanique, sa ténacité élevée et son excellente adhérence sur les matériaux métalliques et composites. Grâce à ses propriétés, il assure une répartition efficace des contraintes au niveau de l'interface collée et contribue à améliorer les performances de la réparation. De plus, sa bonne résistance à la fatigue et sa capacité d'absorption des contraintes en font un candidat particulièrement adapté aux réparations de structures fissurées par patch composite [14].

Les propriétés mécaniques de l'adhésif jouent un rôle déterminant dans les performances des réparations par patch composite collé. Bachir Bouiadjra et al. [15] ont montré qu'un adhésif présentant un module de cisaillement élevé permet de réduire le facteur d'intensité des contraintes au niveau de la pointe de fissure, améliorant ainsi l'efficacité de la réparation.

De nombreuses études expérimentales ont démontré l'efficacité des réparations par patch composite collé en tant que solution économique pour la réparation des structures fissurées. Ces travaux ont montré que cette technique permet non seulement de restaurer la résistance résiduelle de la structure à un niveau proche de celui prévu lors de sa conception, mais également de réduire de manière significative la vitesse de propagation des fissures [16, 17].

Dans cette optique, Bachir Bouiadjra et al. [18] ont utilisé la méthode des éléments finis pour quantifier la réduction du facteur d'intensité des contraintes (FIC) en mode I et en mode

mixte, confirmant que la présence du patch atténue considérablement la singularité du champ de contraintes en pointe de fissure (Figure I. 9).

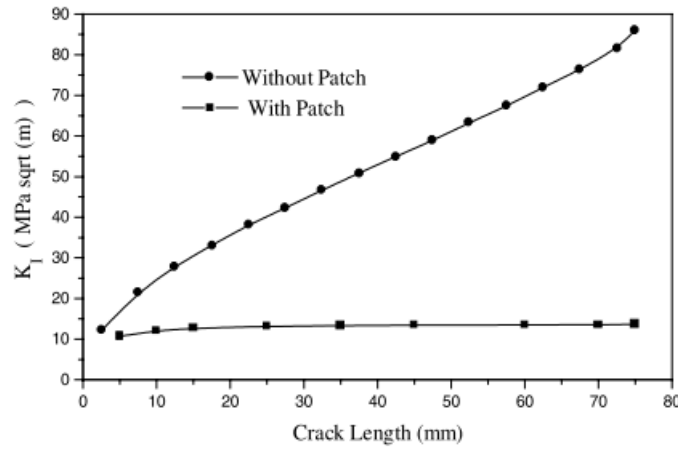


Figure I. 9. Comparaison du FIC entre les fissures réparées et non réparées [18].

Sur cette base, plusieurs auteurs se sont intéressés à l'optimisation des paramètres géométriques du patch afin de maximiser cette réduction. C'est ainsi que Ouinas et al. [19], en comparant différentes géométries de patch, ont montré que le facteur d'intensité des contraintes pour une réparation par patch elliptique est réduit de 5% supplémentaires par rapport à une réparation par patch circulaire. Au-delà de la forme et de l'orientation, l'épaisseur et le nombre de couches du patch constituent également des paramètres déterminants.

I.5 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les principes de la réparation par patch composite collé ainsi que les principaux matériaux utilisés dans ce type d'application. L'étude bibliographique a mis en évidence l'intérêt de cette technique pour améliorer la résistance des structures fissurées et prolonger leur durée de vie. Le chapitre suivant sera consacré aux notions de mécanique de la rupture et à la modélisation numérique de la structure réparée.

Chapitre II :

Approche de la mécanique de la rupture et modélisation numérique

II Approche de la mécanique de la rupture et modélisation numérique

II.1 Introduction

L'étude des structures fissurées nécessite une compréhension approfondie des mécanismes de rupture et de propagation des fissures. La mécanique de la rupture constitue aujourd'hui un outil fondamental pour l'évaluation de l'intégrité structurale des composants soumis à des sollicitations mécaniques. Elle permet d'analyser le comportement des fissures et de prédire les conditions pouvant conduire à la défaillance d'une structure.

Parmi les paramètres les plus importants de cette discipline figure le facteur d'intensité des contraintes (FIC), qui caractérise l'état de contrainte au voisinage de la pointe de fissure et permet d'évaluer le risque de propagation de celle-ci. L'analyse du FIC est particulièrement utile pour l'étude de l'efficacité des réparations par patch composite collé, puisqu'elle permet de quantifier la réduction des concentrations de contraintes obtenue grâce à la réparation.

Ce chapitre rappelle les notions fondamentales de la mécanique de la rupture (modes de fissuration, facteur d'intensité des contraintes), puis présente la démarche de modélisation numérique adoptée : logiciel utilisé, modèle géométrique, matériaux, conditions aux limites et maillage par éléments finis de la structure réparée.

II.2 Étude d'un milieu élastique fissuré

Dans un matériau homogène soumis à une sollicitation uniaxiale, les contraintes se répartissent de manière uniforme et se transmettent progressivement d'une particule à l'autre suivant des lignes de force parallèles (Figure II. 1).

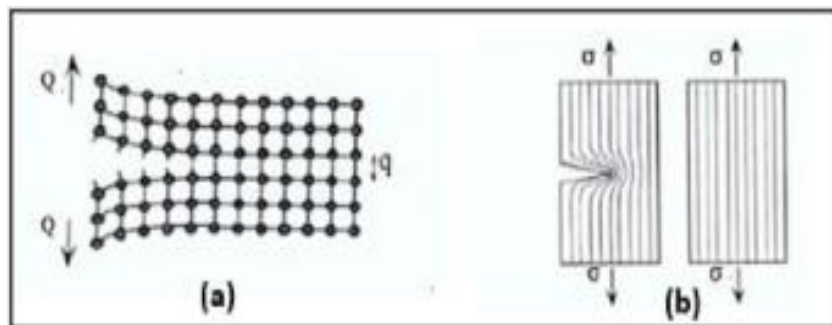


Figure II. 1. (a) Propagation de la fissure. (b) Lignes de force et concentration de contraintes [20].

En présence d'un défaut, tel qu'une fissure, cette répartition est perturbée. Les lignes de force sont alors déviées et contournent le défaut, ce qui provoque leur concentration au voisinage de la pointe de fissure. Cette accumulation engendre une augmentation importante des contraintes locales dans cette zone critique, appelée pointe de fissure, où le risque de propagation de la fissure est le plus élevé.

La mécanique de la rupture s'intéresse à l'interaction entre une discontinuité géométrique, telle qu'une fissure, et le milieu continu qui l'entoure. Au voisinage de la pointe de fissure, le champ mécanique d'un milieu élastique fissuré peut être subdivisé en trois zones distinctes [20] (Figure II. 2) :

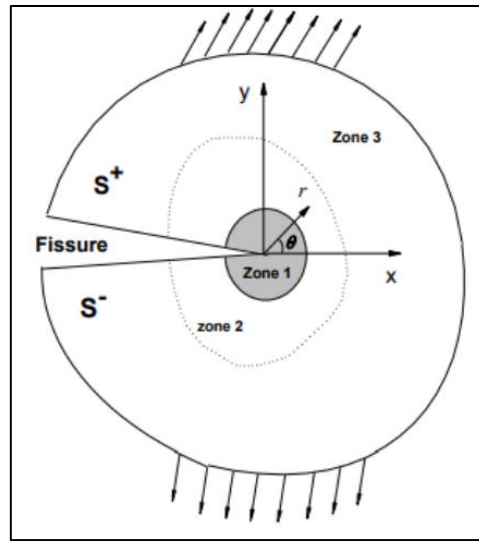


Figure II. 2. Zone délimitant le voisinage d'une pointe de fissure [20].

❖ **Zone 1 : la zone d'élaboration**, localisée à la pointe de la fissure ainsi que dans son sillage de propagation. Cette zone est particulièrement difficile à analyser, les contraintes étant extrêmement élevées, voire tendant vers l'infini, ce qui engendre un endommagement important du matériau.

❖ **Zone 2 : la zone singulière**, où les champs de déplacements, de déformations et de contraintes demeurent continus et obéissent à une formulation indépendante de la géométrie globale de la structure.

❖ **Zone 3 : la zone des champs lointains**, qui assure la transition entre la zone singulière et les conditions aux limites imposées en termes de chargement et de déplacements.

II.3 Modélisation d'une structure fissurée

L'analyse des structures fissurées constitue un domaine important de la mécanique de la rupture. La présence d'une fissure modifie considérablement la répartition des contraintes dans la structure et engendre une concentration importante des contraintes au voisinage de la pointe de fissure.

En mécanique linéaire de la rupture, une fissure est modélisée par une ligne F (voir Figure II. 3) à travers laquelle le champ de déplacement est discontinu. Un modèle construit par la méthode des éléments finis devra donc reproduire cette condition.

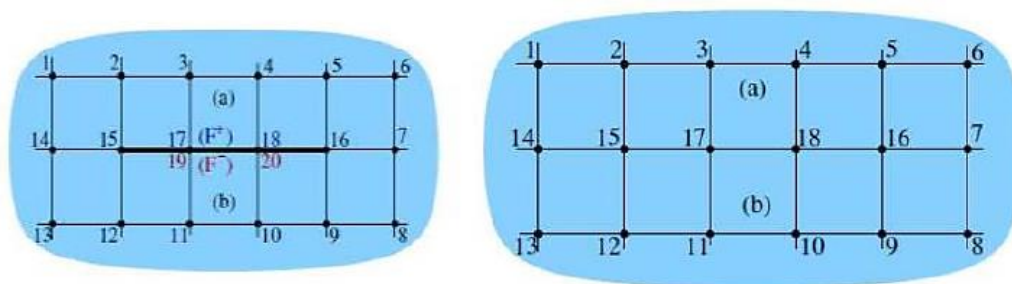


Figure II. 3. Représentation d'une fissure dans un modèle par éléments finis.

Dans la méthode des éléments finis classique, la modélisation d'une fissure nécessite que celle-ci coïncide avec les frontières du maillage. Les nœuds situés sur les lèvres de la fissure sont alors dissociés afin de permettre la discontinuité du champ de déplacement à travers la fissure. Cette approche permet de représenter correctement l'ouverture de la fissure sous l'effet du chargement appliqué.

Afin d'améliorer la précision des résultats numériques, les dispositions suivantes sont généralement adoptées :

- Raffinement du maillage au voisinage de la pointe de fissure afin de mieux représenter les gradients élevés de contraintes.
- Utilisation d'éléments singuliers ou d'un maillage de type rosette autour de la pointe de fissure pour améliorer l'évaluation du facteur d'intensité des contraintes.

II.4 Mode de rupture

En mécanique de la rupture, les fissures peuvent être sollicitées selon différents modes de chargement. La classification la plus couramment utilisée distingue trois modes fondamentaux

de rupture (Figure II. 4), définis en fonction du déplacement relatif des lèvres de la fissure. Ces modes sont :

- ✓ **Mode I (mode d'ouverture)** : les lèvres de la fissure s'écartent perpendiculairement au plan de la fissure sous l'effet d'une contrainte de traction
- ✓ **Mode II (mode de cisaillement plan)** : les lèvres de la fissure glissent l'une par rapport à l'autre dans le plan de la fissure sous l'action d'efforts de cisaillement.
- ✓ **Mode III (mode de cisaillement anti-plan ou déchirement)** : le déplacement relatif des lèvres de la fissure s'effectue parallèlement au front de fissure sous l'effet d'un cisaillement hors du plan.

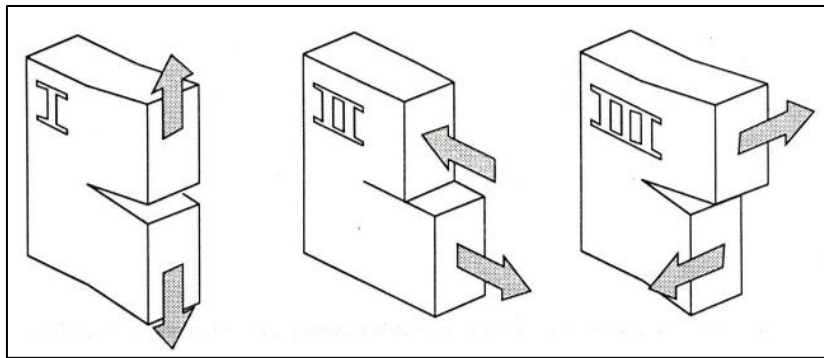


Figure II. 4. Définitions des modes de rupture.

Dans de nombreux cas pratiques, la fissure peut être soumise simultanément à plusieurs modes de chargement. Lorsque la fissure est inclinée par rapport à la direction de la sollicitation, Figure II. 5, les modes I et II apparaissent généralement de manière combinée. Ce phénomène est appelé **mode de rupture mixte**.

II.5 Facteur d'intensité des contraintes

Le facteur d'intensité des contraintes (FIC), noté (K), constitue l'un des paramètres fondamentaux de la mécanique linéaire élastique de la rupture. Il caractérise l'intensité du champ de contraintes au voisinage de la pointe d'une fissure et permet d'évaluer la tendance d'une fissure à se propager sous l'effet d'un chargement appliqué.

Lorsqu'une structure fissurée est soumise à une sollicitation mécanique, les contraintes deviennent très élevées à proximité de la pointe de fissure. Cette concentration de contraintes est décrite par le FIC, qui dépend à la fois de la géométrie de la structure, de la taille de la fissure et du chargement appliqué.

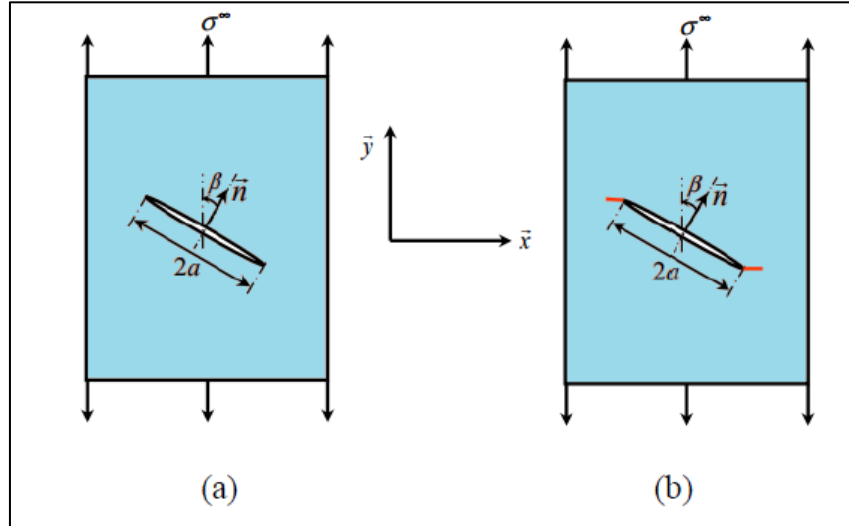


Figure II. 5. Configuration d'une fissure inclinée: (a) géométrie générale de la plaque fissurée ; (b) mise en évidence des pointes de fissure.

En mécanique élastique linéaire de la rupture, la forme générale du champ des contraintes au voisinage de l'extrémité d'une fissure est de la forme :

$$\begin{aligned}\sigma_{ij} &= \frac{k}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \\ \varepsilon_{ij} &= \frac{k}{\sqrt{2\pi r}} g_{ij}(\theta)\end{aligned}\tag{II. 1}$$

Où les coordonnées (r, θ) sont repérées par rapport à l'extrémité de la fissure (Figure II. 6). La fonction adimensionnelle $f_{ij}(\theta)$ dépend du mode de sollicitation, l'autre fonction adimensionnelle $g_{ij}(\theta)$ dépend à la fois du mode de sollicitation, de l'état de contrainte et de la géométrie du corps fissuré.

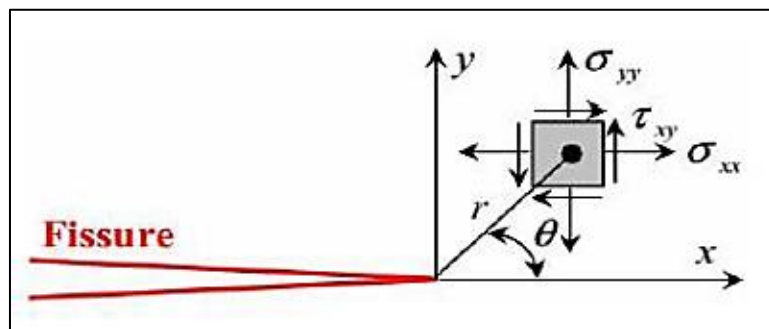


Figure II. 6. Définition des axes (x,y) et des coordonnées (r,θ) au voisinage de l'extrémité d'une fissure.

Dans le cadre des réparations par patch composite collé, l'objectif principal est de diminuer la valeur du facteur d'intensité des contraintes au niveau de la pointe de fissure. Le patch reprend une partie des charges appliquées à la structure, ce qui réduit la concentration des contraintes et ralentit la propagation de la fissure. Ainsi, l'efficacité de la réparation est généralement évaluée à travers la réduction du facteur d'intensité des contraintes obtenue après la mise en place du patch [21].

II.6 Modèle numérique : Méthode des Eléments Finis

Ces dernières années, l'analyse par simulation numérique est devenue l'un des outils de calcul les plus utilisés pour vérifier la validité des choix de conception et optimiser les structures, afin de garantir leur sécurité et leur durabilité. La simulation numérique repose sur la méthode des éléments finis, qui prend en compte les différentes hypothèses de la mécanique de l'endommagement et de la rupture dans les domaines de l'élasticité, de la plasticité et de la dynamique

II.6.1 Présentation du logiciel de calcul utilisé

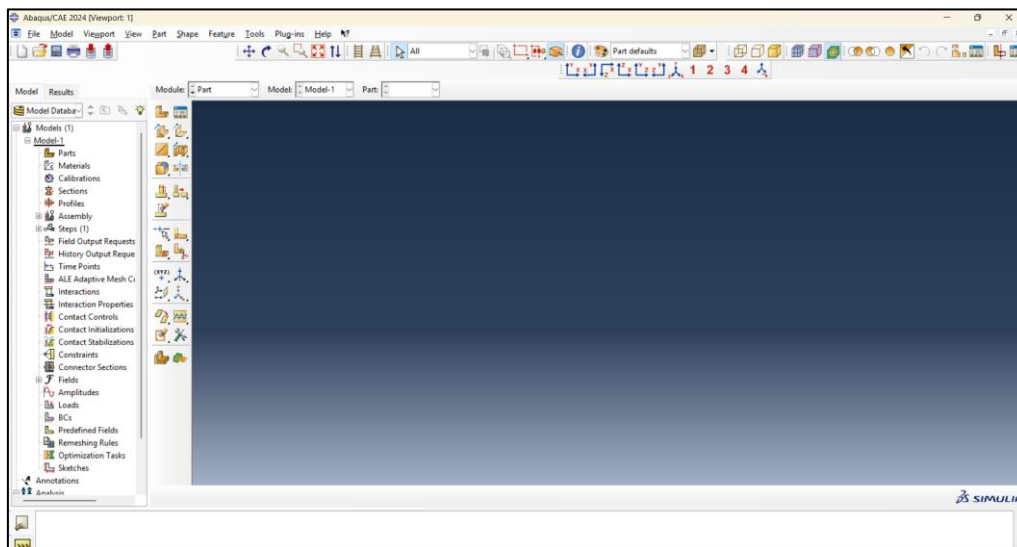


Figure II. 7. Interface du logiciel Abaqus utilisée pour la modélisation et l'analyse par éléments finis.

Dans le cadre de cette étude, les simulations numériques ont été réalisées à l'aide du logiciel *Abaqus/CAE 2024*, développé par la société Dassault Systèmes. Abaqus est un logiciel de calcul basé sur la méthode des éléments finis (MEF), largement utilisé dans les domaines de

l'ingénierie mécanique, de l'aéronautique, de l'automobile et du génie civil pour l'analyse du comportement des structures soumises à différents types de sollicitations (Figure II. 7).

Le logiciel permet de résoudre des problèmes complexes de mécanique des structures, notamment les analyses linéaires et non linéaires, les problèmes de contact, la mécanique de la rupture ainsi que l'étude des matériaux composites. Grâce à ses capacités avancées de modélisation et de simulation, Abaqus constitue un outil particulièrement adapté à l'analyse des structures fissurées réparées par patch composite collé [22].

II.6.2 Modèle géométrique

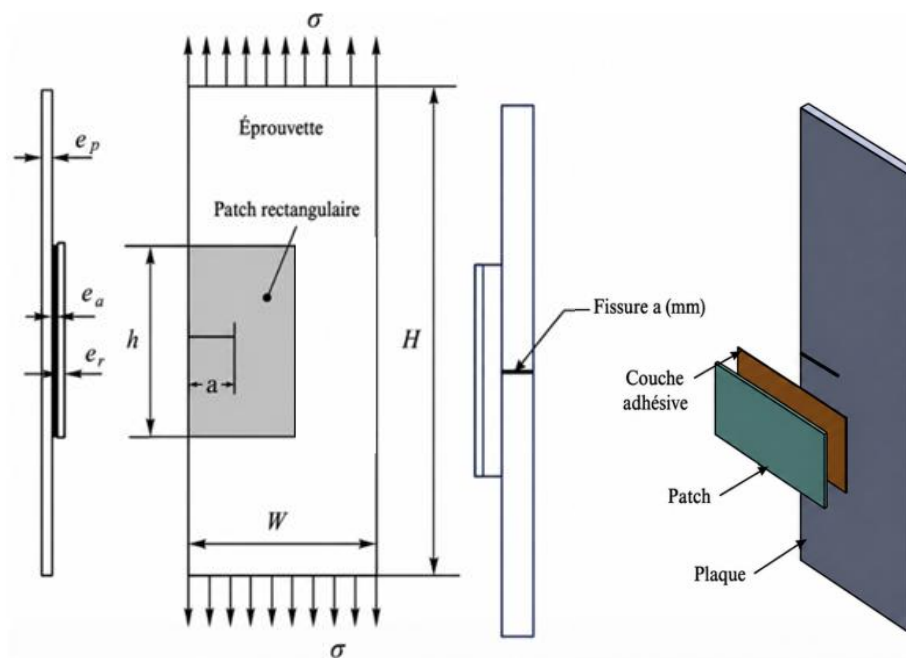


Figure II. 8. Modèle géométrique.

Dans cette modélisation, on considère une éprouvette mince en aluminium 6061 T6 de dimensions suivantes : une longueur $H=200$ mm, une largeur $W=100$ mm et une épaisseur $e_p=2$ mm. L'éprouvette présente une fissure latérale située sur le bord de la plaque et orientée perpendiculairement à la direction de sollicitation. Afin de reproduire les conditions expérimentales, l'éprouvette est soumise à une traction uniaxiale uniforme suivant la direction verticale, sous une contrainte appliquée d'amplitude $\sigma=100$ MPa (ramping pressure) à une extrémité, tandis que l'autre extrémité est encastree. La fissure est réparée à l'aide d'un patch latéral en matériau composite dont les dimensions sont : une hauteur h (variable), une largeur w (variable) et une épaisseur e_r (variable), comme illustré sur la Figure II. 8.

Une adhésion optimale est obtenue lorsque l'épaisseur de la couche adhésive se situe dans une plage comprise entre 0,125 mm et 0,25 mm [23]. Dans cette étude, l'épaisseur de la colle e_a a été fixée à 0,127 mm, valeur retenue comme suffisante pour assurer : meilleure transmission des efforts, moins de déformation de la colle et une réduction des contraintes de pelage [24, 25].

II.6.3 Présentation des Matériaux utilisés

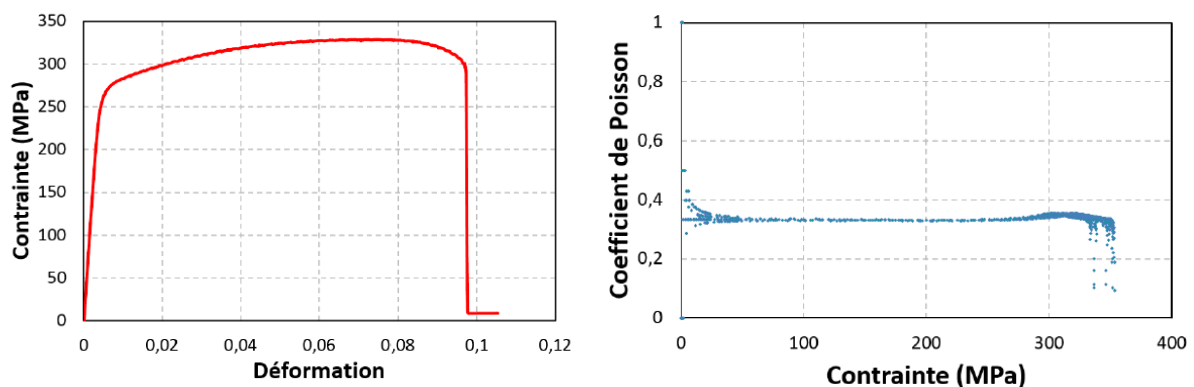
Dans cette étude, trois matériaux sont utilisés : l'alliage d'aluminium constituant la plaque fissurée, le matériau composite utilisé pour le patch de réparation et la couche adhésive assurant la liaison entre la plaque et le patch.

II.6.3.1 Alliage d'aluminium 6061-T6

La plaque étudiée est réalisée en alliage d'aluminium 6061-T6. Ce matériau est largement utilisé dans les structures aéronautiques et industrielles en raison de sa faible densité, de sa bonne résistance mécanique et de sa résistance à la corrosion.

Tableau II. 1. Propriétés mécaniques de l'alliage d'aluminium 6061-T6 [26].

	alliage d'aluminium 6061-T6
Module d'Young, E (GPa)	70
Coefficient de Poisson, ν	0.33



Dans le cadre de cette étude, les propriétés mécaniques de l'alliage ont été déterminées à partir d'essais expérimentaux de traction réalisés sur des éprouvettes en aluminium 6061-T6 par Beloufa [26]. Les résultats obtenus ont permis d'identifier les caractéristiques mécaniques nécessaires à la modélisation numérique, notamment le module d'élasticité, et le coefficient de poisson. Les valeurs retenues pour les simulations sont présentées dans le Tableau II. 1.

La Figure II. 9 présente les résultats obtenus lors de l'essai de traction réalisé sur l'alliage d'aluminium 6061-T6. Elle regroupe la courbe contrainte-déformation ainsi que l'évolution du coefficient de Poisson en fonction de la contrainte.

II.6.3.2 Adhésif Araldite® 2015

L'adhésif utilisé dans cette étude est l'Araldite® 2015, un adhésif époxy bicomposant largement employé dans les réparations par patch composite.

Les propriétés mécaniques de l'adhésif ont été déterminées à partir d'essais expérimentaux réalisés par BELOUFA [26], Figure II. 10. Les résultats obtenus ont permis d'identifier les paramètres nécessaires à la modélisation numérique de la couche adhésive (Tableau II. 2).

✓ Caractéristiques de l'adhésif :

- Adhésif époxy bicomposant à haute performance.
- Excellente résistance mécanique en traction et en cisaillement.
- Bonne ténacité et capacité d'absorption de l'énergie.
- Bonne résistance aux conditions environnementales (humidité, température).
- Assure un transfert efficace des charges entre la structure réparée et le patch.
- Facilité de mise en œuvre et de préparation [14].

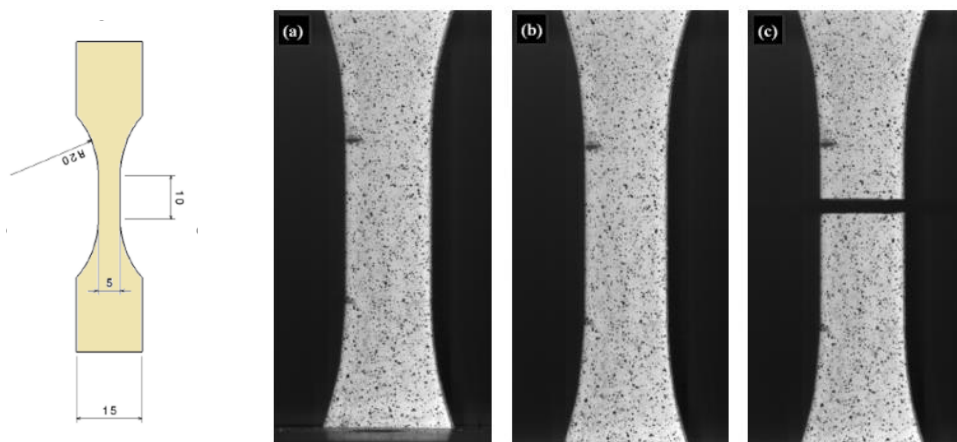


Figure II. 10. Essai de traction d'une éprouvette araldite 2015 (AFNOR NF T51-111) [26].

Tableau II. 2. Propriétés mécaniques de l'adhésif Araldite® 2015 [26].

	Araldite 2015
Module d'Young, E (GPa)	2
Coefficient de Poisson, ν	0.33

La **Figure II. 11** présente la courbe contrainte-déformation obtenue lors de l'essai de traction de l'adhésif Araldite® 2015. Cette courbe a permis de caractériser le comportement mécanique de l'adhésif utilisé dans la réparation (Tableau II. 2).

II.6.3.3 Matériau du patch composite

Le matériau de réparation utilisé dans cette étude est un composite Bore/Époxy. Ce matériau est constitué de fibres de bore incorporées dans une matrice époxy, offrant ainsi une combinaison avantageuse entre une résistance mécanique élevée et une faible masse volumique. Grâce à ses excellentes propriétés mécaniques, le Bore/Époxy est largement utilisé dans les réparations structurales, notamment dans le domaine aéronautique.

Les propriétés mécaniques du composite Bore/Époxy utilisées dans la modélisation numérique sont présentées dans le tableau suivant (Tableau II. 3).

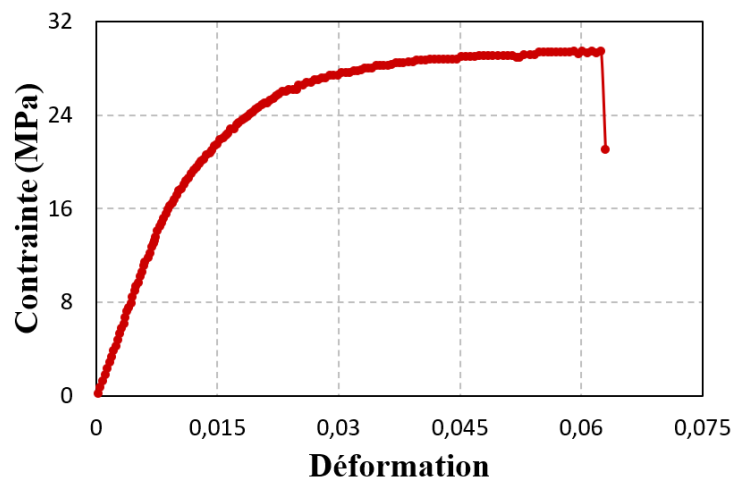


Figure II. 11. Courbe contrainte-déformation de l'adhésif Araldite® 2015 [26].

II.6.4 Méthode des éléments finis

La modélisation numérique de la structure réparée a été réalisée à l'aide de la méthode des éléments finis. Cette méthode consiste à discrétiser la géométrie étudiée en un ensemble

d'éléments de petites dimensions reliés entre eux par des nœuds, permettant ainsi d'obtenir une approximation du comportement mécanique de la structure.

La détermination du facteur d'intensité de contrainte (FIC) au niveau des pointes de fissure a été effectuée à l'aide de la méthode de l'intégrale de contour, reconnue pour sa précision et sa fiabilité dans l'évaluation des paramètres de rupture.

Tableau II. 3. Les propriétés mécaniques du composite Bore/Époxy [27].

Propriétés	Bore/epoxyde
Module de Young Longitudinal E_1 (GPa)	208
Module de Young Transversal E_2 (GPa)	25.4
Module de Young Transversal E_3 (GPa)	25.4
Coefficient de Poisson ν_{12}	0.17
Coefficient de Poisson ν_{13}	0.17
Coefficient de Poisson ν_{23}	0.04
Module de Cisaillement G_{12} (GPa)	7.24
Module de Cisaillement G_{13} (GPa)	7.24
Module de Cisaillement G_{23} (GPa)	4.94

La structure de l'éprouvette a été maillée à l'aide d'éléments hexaédriques dominés quadrilatéraux à intégration réduite de type C3D20R. En présence d'une fissure latérale, le nombre d'éléments quadrilatéraux augmente avec l'évolution de la taille de la fissure. Un maillage raffiné a été adopté au voisinage de la pointe de fissure afin de mieux représenter les importants gradients de contraintes qui s'y développent. Dans cette zone critique, le maillage a été réalisé sous forme de rosette, constituée d'éléments concentriques organisés autour de la pointe de fissure, permettant ainsi une meilleure représentation de la singularité des contraintes et une évaluation plus précise du facteur d'intensité de contrainte, comme illustré à la Figure II. 12.

Les éléments utilisés pour la modélisation de la couche adhésive sont identiques à ceux employés pour l'éprouvette. Concernant le patch composite, des éléments de coque à intégration réduite de type S8R ont été utilisés afin de représenter avec précision le comportement mécanique des différentes couches du composite tout en réduisant le temps de

calcul. Ce type d'élément est particulièrement adapté à l'analyse des structures minces stratifiées soumises à des sollicitations mécaniques complexes.

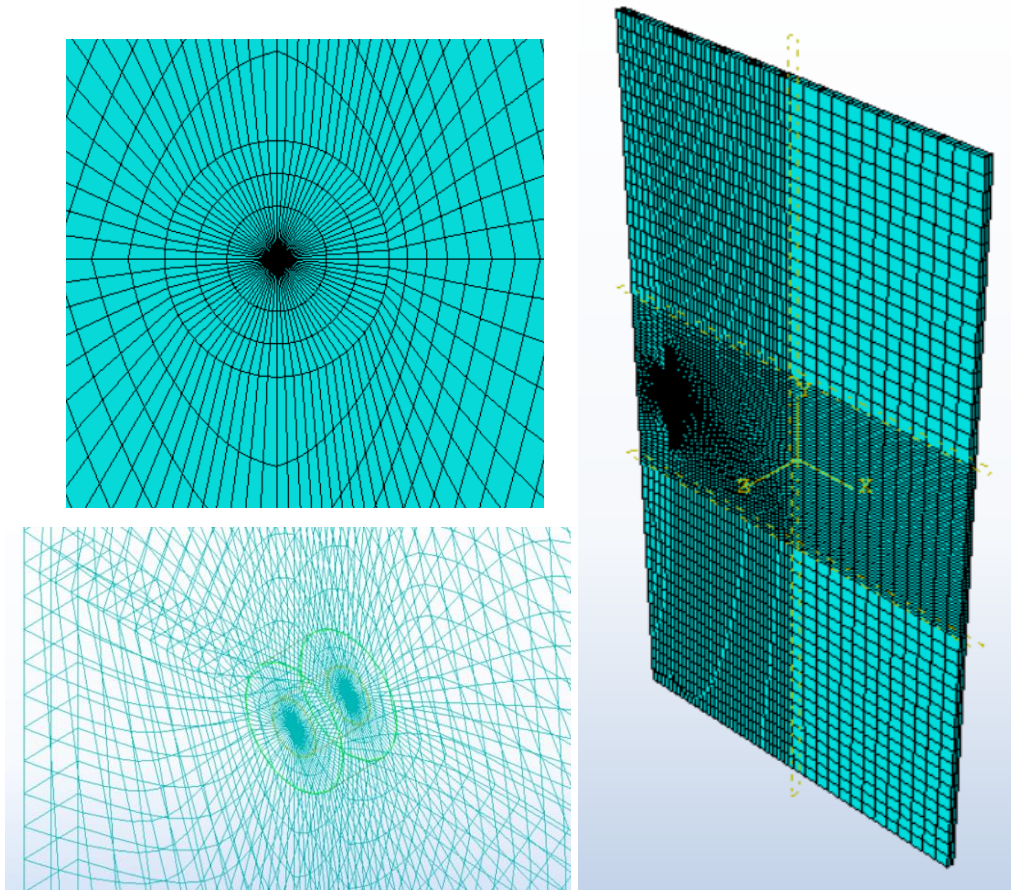


Figure II. 12. Maillage de la structure.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, la modélisation numérique de la plaque fissurée réparée par patch composite a été développée à l'aide du logiciel Abaqus. La géométrie du modèle, les matériaux utilisés ainsi que leurs propriétés mécaniques ont été présentés. Les conditions aux limites et le chargement appliqué ont également été définis afin de reproduire les conditions de fonctionnement de la structure étudiée.

Le chapitre suivant sera consacré à la présentation et à l'analyse des résultats obtenus. L'influence des différents paramètres géométriques du patch composite sur le facteur d'intensité des contraintes sera étudiée afin d'évaluer l'efficacité de la réparation et d'identifier les configurations les plus performantes.

Chapitre III :

Résultats numériques et discussions

III Résultats numériques et discussions

III.1 Introduction

La réparation des structures fissurées par patches composites constitue une solution efficace pour réduire les concentrations de contraintes au voisinage des fissures et prolonger la durée de vie des composants endommagés. Toutefois, l'efficacité de cette technique dépend de nombreux paramètres liés à la géométrie du patch, aux propriétés des matériaux utilisés ainsi qu'aux conditions de chargement.

Dans ce chapitre, une analyse numérique par la méthode des éléments finis est réalisée afin d'évaluer le comportement d'une plaque en aluminium fissurée (fissure latérale) et réparée par un patch composite collé. Dans un premier temps, le modèle numérique développé sous le logiciel ABAQUS est validé à travers une étude de convergence du maillage, puis les résultats numériques sont comparés aux résultats analytiques afin de vérifier la fiabilité du modèle développé.

Dans un second temps, une étude paramétrique est menée afin d'identifier les paramètres les plus influents sur l'efficacité de la réparation, l'influence de la hauteur et de la largeur du patch, de son épaisseur, de l'orientation des fibres et de la nature du matériau composite. En outre, les caractéristiques de la couche adhésive est analysée à travers l'évolution du FIC et de son taux de réduction. Une attention particulière est également portée au cas des fissures inclinées soumises à un chargement en mode mixte afin de vérifier la capacité du modèle à reproduire correctement les modes d'ouverture et de cisaillement. L'objectif est de déterminer la configuration de réparation la plus performante et de fournir des recommandations pour l'optimisation des réparations par patch composite.

III.2 Etude de la convergence du maillage

L'étude de convergence du maillage constitue une étape fondamentale dans l'analyse numérique par la méthode des éléments finis. Elle permet de vérifier la fiabilité, la stabilité et la précision des résultats obtenus en fonction de la densité du maillage adopté. En mécanique de la rupture, cette étape est particulièrement importante en raison de la forte concentration des contraintes au voisinage de la pointe de fissure, où une discrétisation adéquate est nécessaire pour reproduire correctement le comportement singulier du champ de contraintes.

Dans le présent travail, une étude de convergence a été réalisée sur une plaque en aluminium comportant une fissure latérale de longueur $a = 10 \text{ mm}$, afin d'évaluer l'influence du nombre d'éléments finis sur la valeur du facteur d'intensité des contraintes (FIC). Cette étude a été effectuée pour les deux configurations considérées : la plaque fissurée non réparée et la plaque réparée par un patch composite collé bore/époxy. Un raffinement progressif du maillage a été appliqué dans la zone entourant la pointe de fissure afin d'améliorer la précision des résultats numériques.

L'objectif de cette analyse est de déterminer un maillage optimal permettant d'obtenir des résultats indépendants du maillage tout en conservant un temps de calcul raisonnable. La Figure III. 1 présente l'évolution du FIC en fonction du nombre d'éléments finis pour les cas avec et sans patch de réparation.

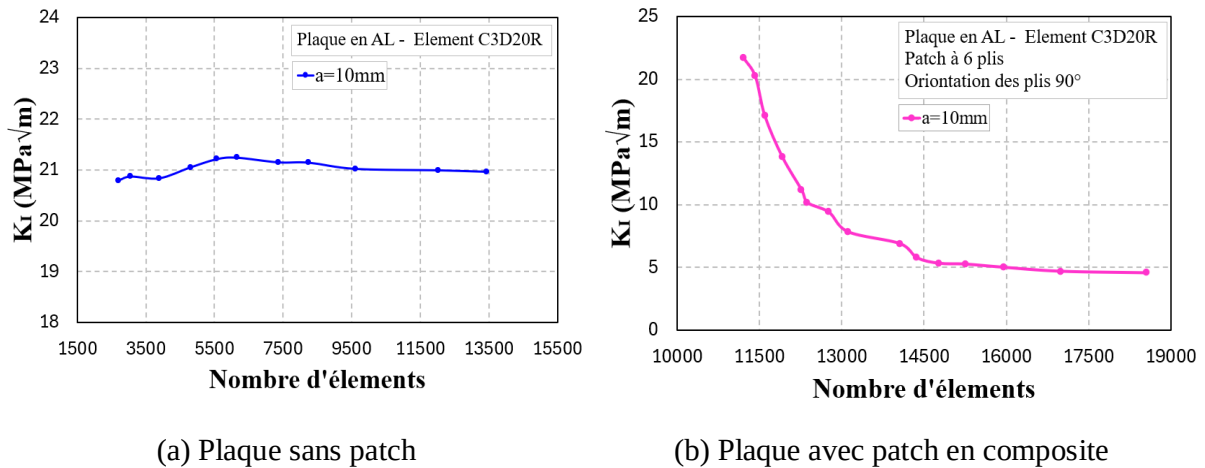


Figure III. 1. Effet du nombre d'éléments Solide (C3D20R) sur la convergence de maillage
(a) plaque non réparée ; (b) plaque réparée par un patch composite.

Dans le cas de la plaque non réparée, les résultats obtenus montrent que les valeurs du facteur d'intensité des contraintes K_I demeurent pratiquement constantes pour l'ensemble des maillages étudiés. La variation observée ne dépasse pas 2.2 %, ce qui indique une très faible sensibilité de la solution numérique au nombre d'éléments utilisés. Cette stabilité montre que le maillage initial adopté est déjà suffisamment fin pour évaluer avec précision le facteur d'intensité des contraintes. Ainsi, les raffinements supplémentaires du maillage n'entraînent aucune modification significative des résultats obtenus.

Ce comportement s'explique par l'homogénéité de la plaque en aluminium ainsi que par l'absence d'interfaces mécaniques complexes susceptibles d'affecter la distribution des

contraintes. Dans ces conditions, le champ de contraintes au voisinage de la pointe de fissure est correctement représenté dès le premier niveau de discrétisation considéré. Des observations similaires ont été rapportées par Anderson [28], qui a montré que, pour les plaques fissurées homogènes, un maillage suffisamment fin autour de la fissure permet d'obtenir des valeurs du facteur d'intensité des contraintes pratiquement indépendantes du maillage.

Dans le cas de la plaque réparée par un patch composite, une sensibilité plus marquée au raffinement du maillage est observée. Le facteur d'intensité des contraintes K_I diminue progressivement lorsque le nombre d'éléments augmente. Au-delà d'environ 15 000 éléments, les variations deviennent très faibles, indiquant que la solution numérique a atteint un état de convergence. Cette sensibilité accrue s'explique par la présence de plusieurs matériaux ainsi que par les interfaces de collage entre la plaque en aluminium, l'adhésif et le patch composite. Ces interfaces génèrent des gradients de contraintes plus complexes que dans le cas de la plaque non réparée, nécessitant un raffinement plus important du maillage afin de représenter correctement le transfert de charge entre les différents constituants.

Des résultats similaires ont été rapportés par Baker et al. [29] ainsi que par Bouiadjra et al. [30], qui ont montré que la modélisation des réparations par patch composite requiert généralement un maillage plus raffiné que celui utilisé pour les plaques fissurées non réparées, en raison de la complexité des interactions mécaniques au niveau des interfaces collées.

III.3 Modelé mathématique et validation

Afin de vérifier la fiabilité du modèle numérique développé sous le logiciel ABAQUS, une validation a été réalisée sur une plaque en aluminium comportant une fissure latérale non réparée. Les résultats numériques obtenus ont été comparés aux solutions analytiques, proposées par Isida [31] pour le mode I et par Tada [32] pour le mode mixte (modes I et II), largement utilisées en mécanique linéaire de la rupture pour l'évaluation des facteurs d'intensité des contraintes.

Isida [31] a développé des fonctions de transformation permettant de déterminer les FICs. Ces fonctions peuvent être utilisées pour calculer les FICs dans les plaques ayant une fissure latérale avec un degré élevé de précision. L'expression du facteur d'intensité des contraintes en mode I est donnée par :

$$K = Y\sigma\sqrt{a} \quad (\text{III. 1})$$

Où Y est le facteur de correction géométrique, fonction du rapport a/W , σ la contrainte appliquée, a la longueur de la fissure et W la largeur de la plaque. Dans le cas d'une fissure latérale, le facteur de correction géométrique est exprimé par :

$$Y = 1.99 - 0.41 \left(\frac{a}{W} \right) + 18.7 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 38.48 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 53.85 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \quad (\text{III. 2})$$

Les valeurs obtenues à partir de l'équation (III. 1) ont été comparées aux résultats numériques, le Tableau III. 1 et la Figure III. 2. Les résultats montrent un excellent accord entre les deux approches pour l'ensemble des longueurs de fissure étudiées. Les écarts relatifs observés varient entre 0.33 et 1.97 %, ce qui confirme la précision du modèle numérique adopté. Cette faible différence met en évidence la bonne convergence du maillage.

Tableau III. 1. Comparaison du SIF d'une fissure non réparée.

	Isida [31]	MEF-C3D20R
$a(mm)$	$K_I(MPa\sqrt{m})$	$K_I(MPa\sqrt{m})$
2	8.89	8.96
3	10.91	11.01
4	12.65	12.77
6	15.68	15.83
8	18.41	18.57
10	21.02	21.09
12	23.60	23.51
14	26.19	25.88
16	28.84	28.25
20	34.42	33.83
25	42.13	41.48
30	51.04	50.21
35	61.64	60.42

Des résultats similaires ont été rapportés par plusieurs chercheurs [33], qui ont montré que les modèles éléments finis utilisant des éléments quadratiques permettent d'estimer avec précision le facteur d'intensité des contraintes dans les plaques fissurées. De plus, le bon accord

obtenu valide la stratégie de modélisation retenue et permet d'utiliser le modèle numérique avec confiance pour l'étude des plaques réparées par patch composite.

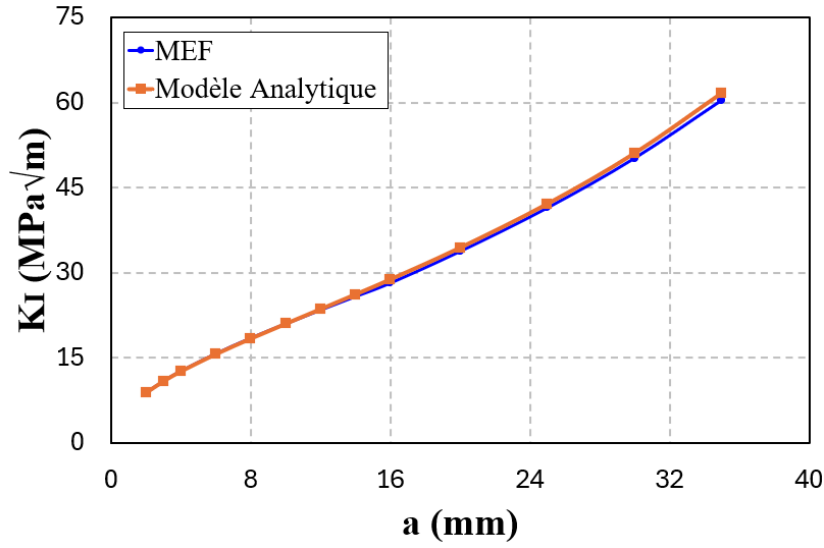


Figure III. 2. Variation du FIC en fonction de la longueur de la fissure en mode I.

Pour le cas des fissures inclinées soumises à un chargement en mode mixte, les facteurs d'intensité des contraintes K_I et K_{II} ont été déterminés à l'aide des expressions analytiques proposées par Tada et al. [32]. Ces relations permettent de prendre en compte simultanément les modes d'ouverture (Mode I) et de cisaillement (Mode II) induits par l'inclinaison de la fissure. Les équations utilisées sont données ci-après :

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \cos^2(\alpha) F\left(\frac{a}{W}\right) \quad (\text{III. 3})$$

$$K_{II} = \sigma \sqrt{\pi a} \sin(\alpha) \cos(\alpha) F\left(\frac{a}{W}\right) \quad (\text{III. 4})$$

Où $F\left(\frac{a}{W}\right)$ est le facteur de correction géométrique et α l'angle d'inclinaison de la fissure par rapport à la direction du chargement.

$$F\left(\frac{a}{W}\right) = 1.12 - 0.231\left(\frac{a}{W}\right) + 10.55\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 21.72\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 30.39\left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad (\text{III. 5})$$

Les valeurs obtenues à partir des équations (III. 3) et (III. 4) ont été comparées aux résultats numériques afin de valider le modèle développé pour les fissures inclinées soumises à

un chargement en mode mixte. Les résultats de cette comparaison sont présentés dans le Tableau III. 2 et la Figure III. 3.

Tableau III. 2. Comparaison du FIC d'une fissure inclinée non réparée ($a=10\text{mm}$).

α°	Tada et al. [32]		MEF-C3D20R	
	$K_I(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$	$K_{II}(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$	$K_I(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$	$K_{II}(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$
0	20.98	0	21.09	0
10	20.35	3.53	20.61	2.32
20	18.52	6.66	19.26	4.29
30	15.74	8.96	17.70	5.86
40	12.31	10.18	15.10	6.76
45	10.49	10.35	13.52	6.92
50	8.67	10.19	11.91	6.88
60	5.24	8.96	7.9	6.30
70	2.46	6.66	3.03	5.07
80	0.63	3.53	0.63	3.19
90	0	0	0	0

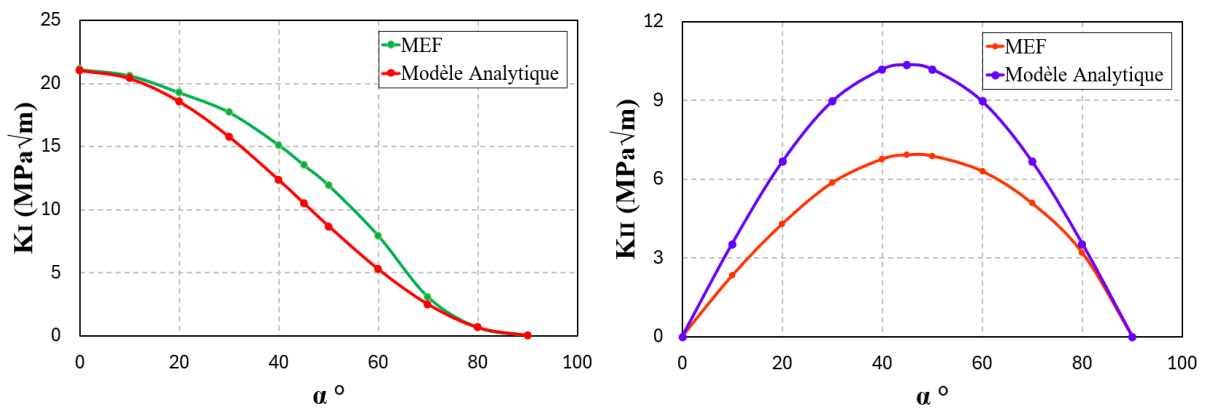


Figure III. 3. Variation du FIC en fonction de l'angle d'orientation de la fissure en mode mixte.

Il est à noter que le facteur d'intensité des contraintes K_I décroît progressivement avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison de la fissure jusqu'à s'annuler pour $\alpha = 90^\circ$. Les valeurs maximales sont obtenues lorsque la fissure est perpendiculaire au chargement appliqué

($\alpha = 0^\circ$), correspondant à une sollicitation en mode I pur. Par ailleurs, le facteur d'intensité des contraintes K_{II} augmente avec l'angle d'inclinaison de la fissure et atteint sa valeur maximale aux environs de 45° , où l'effet de cisaillement est maximal. Au-delà de cet angle, K_{II} diminue progressivement pour devenir nul à $\alpha = 90^\circ$. Ces évolutions sont conformes aux prédictions de la mécanique linéaire de la rupture pour les fissures inclinées soumises à un chargement uniaxial.

La comparaison entre les résultats analytiques et ceux obtenus par la méthode des éléments finis montre une bonne concordance pour les faibles angles d'inclinaison, avec un écart inférieur à 4 % jusqu'à $\alpha = 20^\circ$ pour le FIC K_I . Au-delà, cet écart augmente progressivement pour atteindre 22.4 % à $\alpha = 45^\circ$, tandis que les écarts relatifs à K_{II} sont plus importants sur l'ensemble de la plage angulaire étudiée, variant d'environ 9 à 35 %.

Ces écarts s'expliquent par les limitations inhérentes de la formule de Tada et al. [32]. En effet, bien que cette formule intègre l'angle d'inclinaison α à travers les termes « $\cos^2(\alpha)$ » pour K_I et « $\sin(\alpha)\cos(\alpha)$ » pour K_{II} , le facteur de correction géométrique $F(a/W)$ a été établi pour une fissure droite perpendiculaire au chargement ($\alpha = 0^\circ$) et demeure inchangé quelle que soit l'inclinaison de la fissure. Or, lorsque l'angle d'inclinaison augmente, la fissure inclinée interagit différemment avec les bords de la plaque. De plus, des effets de cisaillement apparaissent en plus de l'ouverture de la fissure. Ces effets influencent les contraintes au voisinage de la pointe de fissure et peuvent contribuer aux écarts observés entre les résultats analytiques et numériques. Ceci explique pourquoi les écarts sont quasi nuls pour $\alpha = 0^\circ$ (0.5 %) et augmentent progressivement avec l'angle d'inclinaison pour K_I , tandis que les écarts sur K_{II} sont plus importants sur l'ensemble de la plage angulaire étudiée. En effet, la composante K_{II} , directement liée aux effets de cisaillement, est généralement plus sensible aux effets géométriques et aux conditions aux limites que K_I .

Par ailleurs, les valeurs numériques de K_I et K_{II} ont été déterminées à l'aide de la méthode de Contour Integral (Interaction Integral), largement utilisée en mécanique de la rupture pour l'évaluation des facteurs d'intensité des contraintes en mode mixte. Plusieurs travaux ont montré que cette méthode fournit des résultats très précis pour le mode I, tandis que l'évaluation de K_{II} est généralement plus sensible aux effets locaux au voisinage de la pointe de fissure et aux interactions entre les modes I et II [28, 34]. Malgré ces écarts, les résultats numériques reproduisent correctement les tendances théoriques attendues, notamment la décroissance monotone de K_I et le maximum de K_{II} à $\alpha = 45^\circ$. Des observations similaires ont été rapportées

par Fayed [35] dans l'étude des fissures latérales inclinées soumises à un chargement en mode mixte.

III.4 Effet de la hauteur du patch à différentes orientations du pli

Afin de mettre en évidence l'influence de la géométrie du patch sur l'efficacité de la réparation, une plaque en aluminium fissurée a été renforcée par un patch composite dont les propriétés mécaniques ont été maintenues constantes. Une étude paramétrique a alors été réalisée en faisant varier la hauteur du patch, tout en conservant inchangés les autres paramètres géométriques et mécaniques. L'évolution du facteur d'intensité des contraintes a été analysée afin d'identifier la configuration offrant les meilleures performances de réparation.

La Figure III. 4 présentent l'effet de la hauteur du patch composite sur l'évolution du FIC en fonction de la longueur de la fissure. Trois orientations des plis ($\theta = 0^\circ, 45^\circ$ et 90°) ont été considérées pour un patch composite constitué de 6 plis. L'étude a été réalisée pour différentes hauteurs de patch, $h = 20, 30, 40$ et 50 mm .

Il est à noter que le FIC augmente avec l'accroissement de la longueur de la fissure pour la plaque non réparée. À titre d'exemple, il passe de 8,97 à 50,21 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ lorsque la longueur de la fissure augmente de $a = 2$ à 30 mm . En revanche, pour les plaques réparées, le FIC augmente principalement pour les faibles longueurs de fissure puis tend à se stabiliser lorsque la fissure devient plus importante, traduisant l'efficacité du patch composite à limiter la concentration des contraintes au voisinage de la pointe de fissure. À titre illustratif, pour une fissure de longueur $a = 20\text{ mm}$, le FIC de la plaque non réparée est de 33,83 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, alors qu'il est réduit à 13.01, 9.80 et 4.62 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ après réparation par un patch orienté respectivement à $\theta = 0, 45$ et 90° .

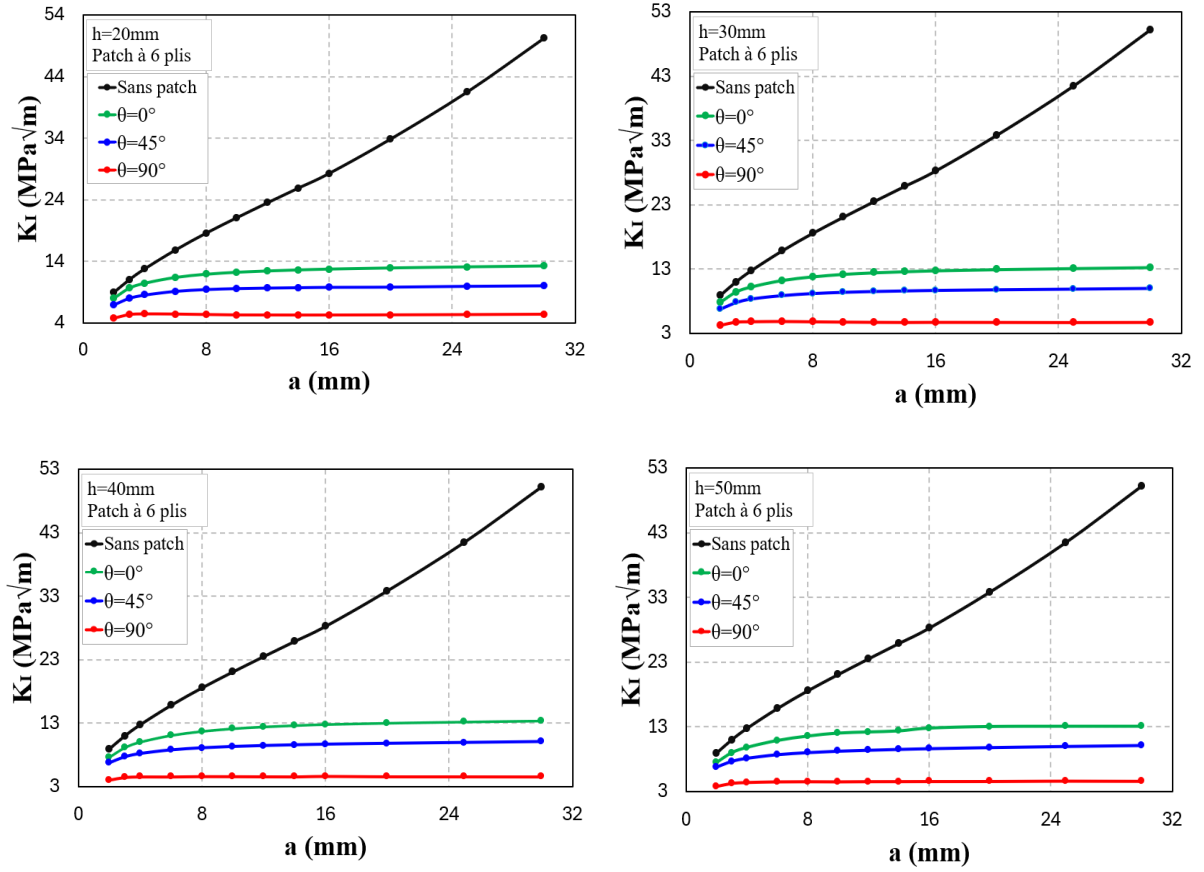


Figure III. 4. Evaluation de FIC en fonction de la taille de la fissure.

Pour une meilleure apparence des résultats des FIC d'une fissure réparée, on introduit l'évolution de la réduction du FIC par rapport à la longueur de la fissure pour des différentes hauteurs du patch. Cette réduction est définie par le paramètre suivant [36] :

$$K_{RI} = 1 - \frac{K_p}{K_s} \quad (\text{III. 6})$$

Où K_p et K_s sont les FIC de la fissure avec et sans patch respectivement.

La Figure III. 5 présente l'évolution du taux de réduction du facteur d'intensité des contraintes K_{RI} en fonction de la longueur de fissure a . Il est observé que la réduction du FIC augmente avec l'accroissement de la longueur de la fissure pour toutes les configurations étudiées. Cette tendance indique que l'efficacité du patch composite devient plus importante lorsque la fissure se propage, en raison d'un meilleur transfert des charges de la plaque vers le renfort composite.

L'orientation des fibres exerce une influence significative sur l'efficacité du patch. L'orientation des plis à $\theta = 90^\circ$ conduit systématiquement aux taux de réduction les plus élevés, atteignant 89.21% pour $h = 20 \text{ mm}$ et 90.86% pour $h = 40 \text{ mm}$ à une longueur de fissure $a = 30 \text{ mm}$. L'orientation des fibres à $\theta = 45^\circ$ présente des performances intermédiaires avec des taux de réduction de l'ordre de 80%, tandis que l'orientation $\theta = 0^\circ$ donne les valeurs les plus faibles, de l'ordre de 73.6%. Ces résultats confirment que l'orientation des couches à $\theta = 90^\circ$, perpendiculaire à la direction de propagation de la fissure, est la plus efficace pour limiter l'ouverture de la fissure et réduire le FIC. De plus, ce comportement est directement lié à la rigidité du patch dans la direction de reprise des efforts, qui influence la quantité de charge transférée loin de la pointe de fissure. Une rigidité plus élevée favorise le transfert des efforts mécaniques de la plaque fissurée vers le patch, réduisant ainsi la concentration des contraintes au voisinage de la pointe de fissure et, par conséquent, la valeur du facteur d'intensité des contraintes.

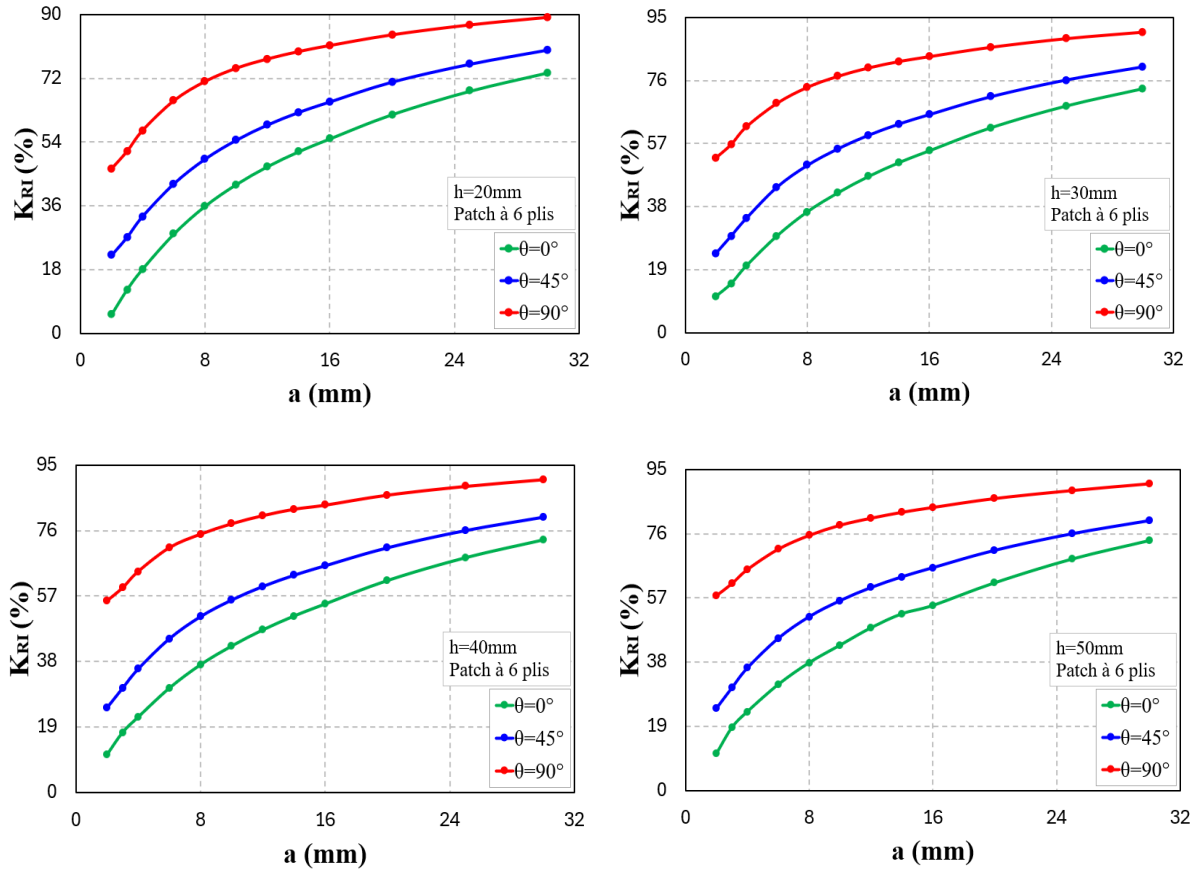


Figure III. 5. Evaluation de la réduction du FIC en fonction de la taille de la fissure.

Par ailleurs, l'augmentation de la hauteur du patch améliore le taux de réduction du FIC. Par exemple, pour l'orientation des plis à $\theta = 90^\circ$ à une longueur de fissure $a = 2 \text{ mm}$, le taux

de réduction passe d'environ 46% pour $h = 20$ mm à près de 57% pour $h = 40$ mm. Cette évolution met en évidence l'effet bénéfique de l'augmentation de la surface de contact entre le patch et la plaque. Toutefois, cet effet devient moins significatif à partir d'une hauteur de $h = 40$ mm. En effet, les courbes obtenues pour $h = 40$ et 50 mm sont très proches, indiquant qu'une augmentation supplémentaire de la hauteur du patch n'apporte qu'un gain limité en termes de réduction du FIC. Ainsi, un compromis entre l'efficacité de la réparation, la consommation de matériau composite et surtout le temps de calcul numérique conduit à retenir une hauteur de patch de 40 mm pour la suite de l'étude.

Des observations similaires ont été rapportées par Baker et al. [29], Bouiadjra et al. [30] et Ouinas et al. [37], qui ont montré que l'augmentation des dimensions du patch améliore l'efficacité de la réparation jusqu'à une valeur optimale, au-delà de laquelle les gains deviennent faibles, tandis que l'orientation des fibres demeure l'un des paramètres les plus influents sur la réduction du facteur d'intensité des contraintes.

III.5 Effet de la largeur du patch composite

La largeur du patch constitue un paramètre géométrique important dans la réparation des structures fissurées par matériaux composites. En effet, elle détermine la surface de recouvrement transversale entre le patch et la plaque, et influence ainsi la capacité du renfort à redistribuer les contraintes loin de la pointe de fissure. Afin d'évaluer son influence sur l'efficacité de la réparation, une étude paramétrique a été réalisée en faisant varier la largeur du patch tout en conservant constants les autres paramètres géométriques et mécaniques.

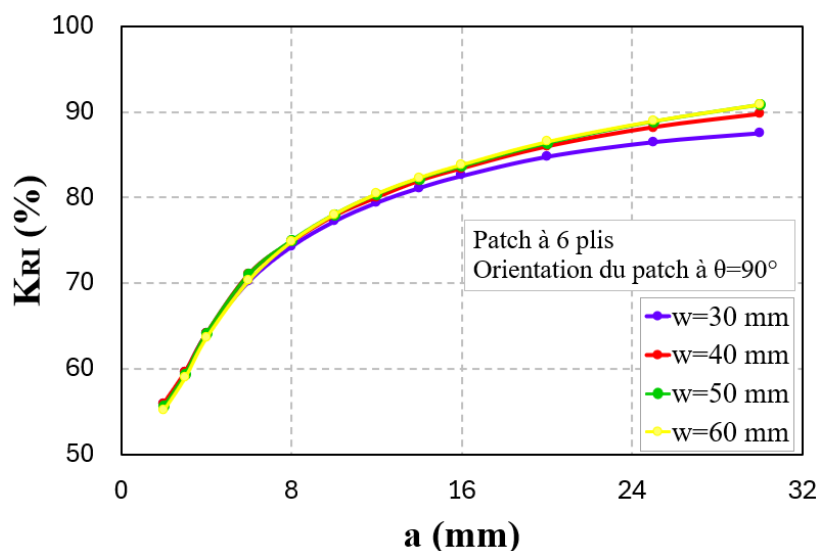


Figure III. 6. Évolution du taux de réduction du FIC en fonction de la longueur de fissure pour différentes largeurs de patch.

La Figure III. 6 présente l'évolution du taux de réduction du FIC en fonction de la longueur de fissure pour différentes largeurs de patch ($w = 30, 40, 50$ et 60 mm). Les résultats ont été obtenus pour une hauteur de patch fixée à $h = 40\text{ mm}$, conformément aux conclusions de l'étude précédente, un empilement de six plis et une orientation des fibres de $\theta = 90^\circ$.

Il est observé que le taux de réduction du FIC augmente progressivement avec l'accroissement de la longueur de la fissure, quelle que soit la largeur du patch considérée. Cette évolution traduit une amélioration de l'efficacité de la réparation lorsque la fissure devient plus importante. Ainsi, pour une largeur de patch de 60 mm , le taux de réduction passe d'environ 55 % pour une fissure de longueur $a = 2\text{ mm}$ à plus de 90 % pour $a = 30\text{ mm}$.

L'influence de la largeur du patch demeure toutefois très faible pour les petites longueurs de fissure. En effet, pour $a = 2\text{ mm}$, les taux de réduction obtenus sont respectivement de 55.78, 55.92, 55.57 et 55.15 % pour les largeurs de 30, 40, 50 et 60 mm . Les courbes sont donc pratiquement confondues, indiquant que l'augmentation de la largeur du patch n'apporte qu'aucun gain lorsque la fissure est de petite dimension.

En revanche, pour les grandes longueurs de fissure, l'effet de la largeur du patch devient plus perceptible. Notamment, pour $a = 30\text{ mm}$, le taux de réduction passe de 87.53 % pour une largeur $w = 30\text{ mm}$ à 89.74 % pour $w = 40\text{ mm}$. Au-delà de cette valeur, les gains deviennent très faibles, les courbes correspondant aux largeurs de 40, 50 et 60 mm étant pratiquement confondues. Par conséquent, afin de limiter le temps de calcul numérique, une géométrie de patch de $(40 \times 40)\text{ mm}$ a été retenue pour la suite de notre étude.

III.6 Influence de l'épaisseur de l'adhésif

Il est bien connu que la colle représente souvent le point faible du renforcement pour des niveaux de contraintes élevés. Elle est à l'origine des défaillances des structures renforcées [36]. La rupture ou la décohésion de la colle provoque le détachement du renfort composite. Par ailleurs, l'épaisseur de la couche adhésive joue un rôle important dans la transmission des contraintes de la plaque fissurée vers le patch composite. Afin d'évaluer l'influence de ce paramètre sur l'efficacité de la réparation, l'évolution du taux de réduction du FIC en fonction

de l'épaisseur de l'adhésif, pour différents nombres de plis du patch composite, est présentée Figure III. 7.

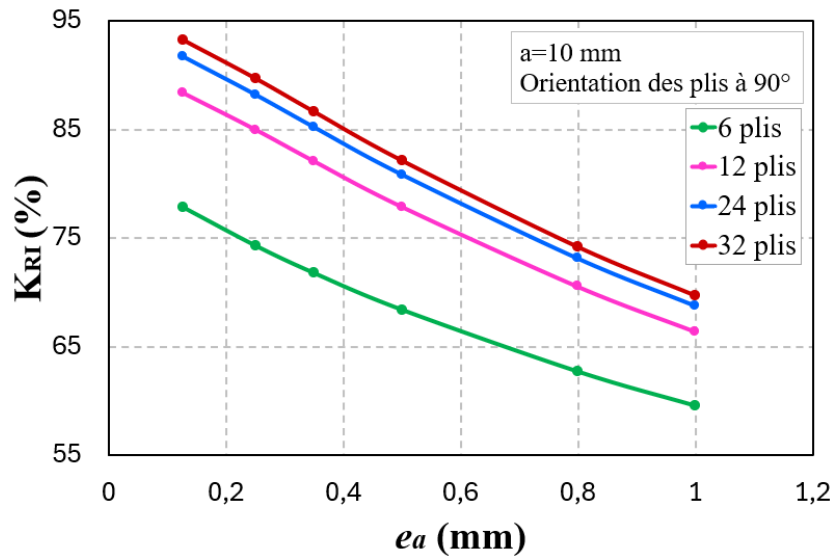


Figure III. 7. Effet de l'épaisseur de la couche adhésive sur la réduction du FIC.

On peut constater, que l'accroissement de l'épaisseur de la colle réduit la valeur du facteur de réduction, ce qui signifie qu'une faible épaisseur de la couche adhésive est souhaitable pour réparer les structures endommagées. Une grande épaisseur renforce l'adhésion mais réduit la capacité d'absorption du champ de contraintes par le patch de réparation.

Il est à noter que la valeur du facteur K_{RI} d'un patch composite à 6 plis orientés à $\theta = 90^\circ$, de longueur $a = 10 \text{ mm}$ avec une couche adhésive d'épaisseur $e_a = 0.127 \text{ mm}$, atteint 77.83 %. Cette valeur diminue progressivement pour atteindre 72.89, 68.36, 63.95 et 59.54 % lorsque l'épaisseur de l'adhésif augmente respectivement à 0.25 mm, 0.35 mm, 0.50 mm et 1 mm. Une tendance similaire est observée pour toutes les configurations de patch étudiées. À titre d'exemple, pour un patch composite à 32 plis, la valeur du facteur K_{RI} passe de 93.22 % pour une épaisseur d'adhésif de 0.127 mm à 69.72 % lorsque l'épaisseur atteint 1 mm.

En outre, l'influence du nombre de plis apparaît clairement sur la Figure III. 7. Pour une même épaisseur d'adhésif, le taux de réduction du FIC augmente avec l'accroissement du nombre de plis du patch composite. C'est le cas notamment pour $e_a = 0.127 \text{ mm}$, le facteur K_{RI} atteint respectivement 77.83, 86.05, 91.63 et 93.22 % pour des patches comportant 6, 12, 24 et 32 plis. Cette amélioration est attribuée à l'augmentation de la rigidité du patch qui réduit davantage les contraintes au voisinage de la pointe de fissure.

En conclusion, les résultats obtenus montrent qu'une faible épaisseur d'adhésif permet d'obtenir une meilleure efficacité de réparation.

III.7 Influence de l'épaisseur du patch

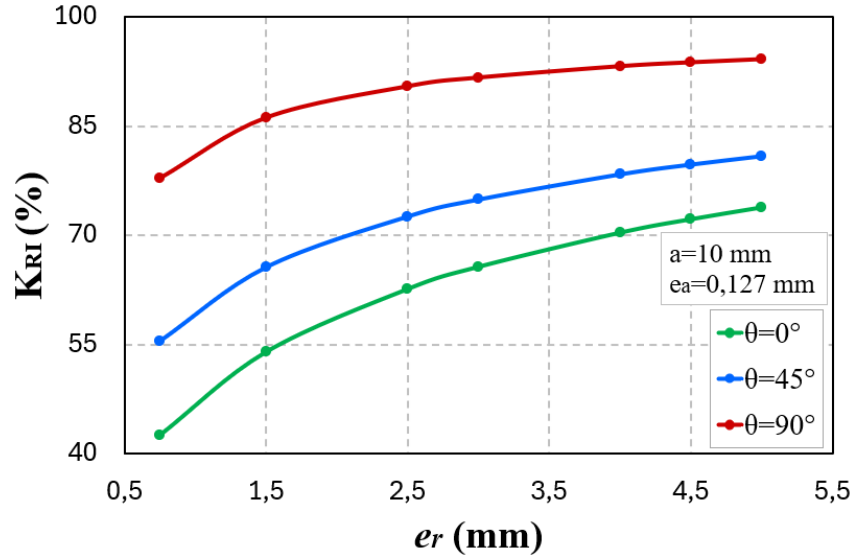


Figure III. 8. Effet de l'épaisseur du patch sur la réduction du FIC.

La Figure III. 8 montre l'effet de l'épaisseur du patch sur la variation du facteur de réduction d'intensité de contraintes en fonction de l'épaisseur du patch composite pour une fissure de longueur $a = 10 \text{ mm}$. L'épaisseur du joint de l'adhésif est $0,125 \text{ mm}$.

On peut constater que l'augmentation de l'épaisseur du patch de réparation réduit la valeur du FIC aux pointes de la fissure de façon proportionnelle. Toutefois, cette amélioration devient moins importante pour les grandes épaisseurs du patch.

Par ailleurs, l'orientation des fibres influence fortement les performances du patch composite. Le patch unidirectionnel dont les fibres sont orientées à $\theta = 90^\circ$ présente les meilleures performances de réparation. Pour une épaisseur de patch $e_r = 0,75 \text{ mm}$ (soit 6 plis), la réduction maximale atteint respectivement 42.59 %, 55.44 % et 77.83 % pour les orientations $\theta = 0^\circ$, 45° et 90° . Lorsque l'épaisseur du patch augmente jusqu'à $e_r = 5 \text{ mm}$ (soit 40 plis), la réduction atteint 73.81 %, 80.88 % et 94.19 % pour les mêmes orientations.

En conclusion, l'augmentation de l'épaisseur du patch améliore l'efficacité de la réparation, tandis que l'orientation des fibres à $\theta = 90^\circ$ constitue la configuration la plus performante pour réduire le facteur d'intensité des contraintes.

III.8 Influence de la nature du matériau du patch

Le choix du matériau constituant le patch composite influence directement l'efficacité de la réparation, puisque ses propriétés mécaniques déterminent sa capacité à reprendre les charges appliquées et à réduire les contraintes au voisinage de la fissure. Afin d'évaluer l'influence de ce paramètre, une comparaison a été réalisée entre trois matériaux de patch composites : Bore/époxy, Graphite/époxy et Verre/époxy. Les résultats obtenus pour un patch à six plis orienté à $\theta = 90^\circ$ sont présentés à la Figure III. 9. Les propriétés mécaniques des matériaux composites utilisés pour les patches sont résumées dans le Tableau III. 3

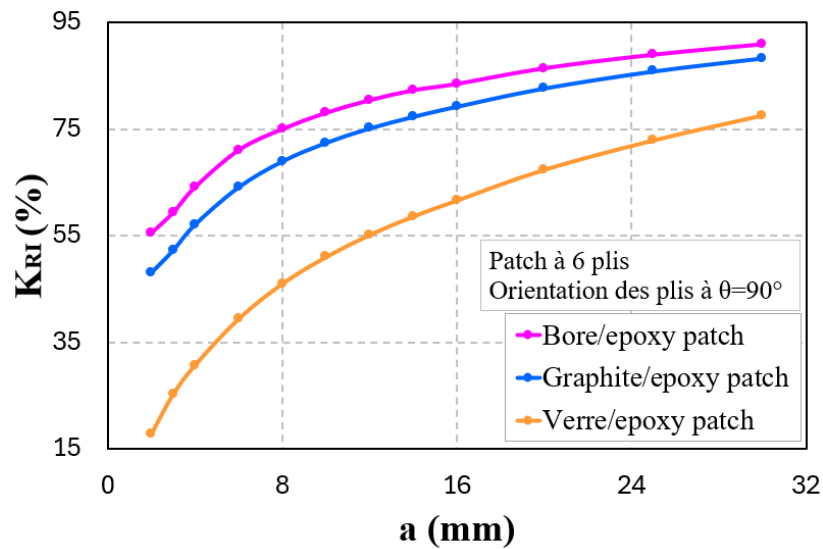


Figure III. 9. Influence de la nature du matériau du patch sur sur la réduction du FIC.

Tableau III. 3. Propriétés des matériaux des patch en composites [38].

	Graphite/époxy	Verre/époxy
E₁ (GPa)	180	38.6
E₂ (GPa)	10.3	8.27
v₁₂	0.28	0.26
G₁₂ (GPa)	7.17	4140
G₁₃ (GPa)	7.17	4140
G₂₃ (GPa)	3.9	2.9

Les résultats obtenus montrent que le patch Bore/époxy présente les meilleures performances de réparation, suivi du Graphite/époxy puis du Verre/époxy. Cette hiérarchie est directement liée aux propriétés mécaniques des matériaux utilisés. En effet, le composite Bore/époxy possède le module d'élasticité longitudinal le plus élevé, ce qui lui confère une plus grande rigidité et une meilleure capacité à reprendre les charges appliquées. À l'inverse, le composite Verre/époxy présente une rigidité plus faible, ce qui limite son efficacité dans la réduction du facteur d'intensité des contraintes.

On observe que pour une fissure de longueur $a = 2 \text{ mm}$ réparée par un patch Bore/époxy, la réduction atteint environ 55 %, contre 48 % pour le Graphite/époxy et seulement 17 % pour le Verre/époxy. En outre, lorsque la longueur de la fissure est maximale, le facteur K_{RI} atteint respectivement près de 92, 89 et 78 % pour les patches en Bore/époxy, Graphite/époxy et Verre/époxy.

Les résultats montrent également que le comportement du patch en Graphite/époxy reste relativement proche de celui du Bore/époxy, tandis que le patch en Verre/époxy présente des performances nettement inférieures sur l'ensemble de la plage étudiée. Ces résultats confirment la pertinence du choix du composite Bore/époxy adopté dans notre étude et justifient son utilisation pour les analyses paramétriques réalisées dans la suite du travail.

III.9 Influence de la nature de la couche adhésive

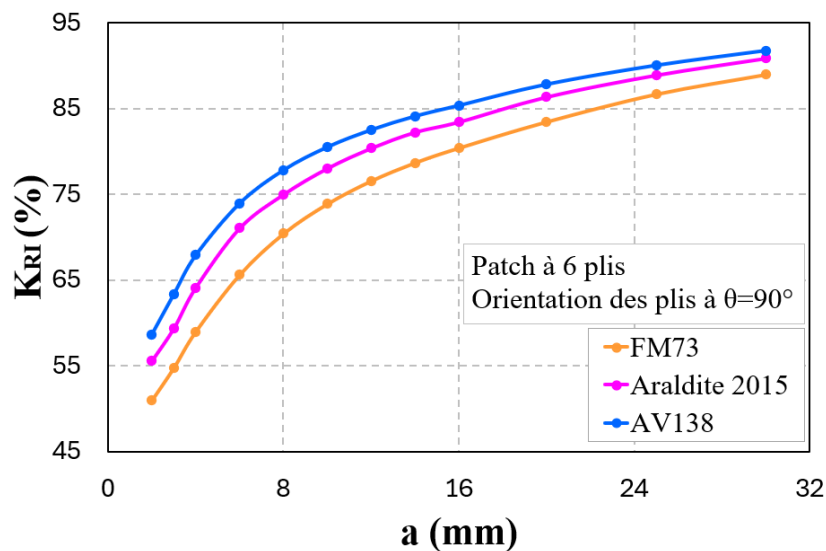


Figure III. 10. Influence de la nature de la couche adhésive sur la réduction du FIC.

La couche adhésive constitue l'élément assurant la liaison mécanique entre le patch composite et la plaque fissurée. Ses propriétés mécaniques influencent directement le transfert des charges et, par conséquent, l'efficacité de la réparation. Afin d'évaluer l'influence de ce paramètre, une comparaison a été effectuée entre trois adhésifs couramment utilisés dans les réparations collées : l'Araldite 2015, le FM73 et l'AV138. Les résultats obtenus pour un patch Bore/époxy à 6 plis orienté à $\theta = 90^\circ$ sont présentés à la Figure III. 10.

Les résultats obtenus indiquent que l'adhésif AV138 présente les meilleures performances de réparation sur l'ensemble de la plage étudiée, suivi de l'Araldite 2015 puis du FM73. Cette hiérarchie est directement liée aux propriétés mécaniques des adhésifs, notamment à leur rigidité, qui conditionne la qualité du transfert des charges entre la plaque fissurée et le patch composite (Tableau III. 4). À titre d'exemple, pour une fissure de longueur $a = 2 \text{ mm}$, la réduction atteint respectivement 58.67, 55.57 et 50.99 % pour les adhésifs AV138, Araldite 2015 et FM73. Lorsque la longueur de la fissure atteint sa valeur maximale, le facteur K_{RI} augmente pour atteindre 91.77, 90.86 et 88,97 % respectivement.

Tableau III. 4. Propriétés mécaniques des adhésifs AV138 et FM73 [38].

	AV138	FM73
Modèle de cisaillement G_{12} (GPa)	4.89	0.965
Coefficient de poisson ν	0.35	0.32

III.10 Facteur d'intensité de contraintes en mode mixte

La Figure III. 11 représente la variation du facteur d'intensité de contraintes K_I et K_{II} respectivement en fonction de l'inclinaison de la fissure réparée et non réparée.

Les résultats montrent que le facteur d'intensité des contraintes K_I diminue avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison de la fissure, quelle que soit l'orientation des fibres du patch composite. Il atteint sa valeur maximale lorsque la fissure est perpendiculaire à l'axe de chargement, correspondant à une sollicitation en mode I pur. À titre d'exemple, pour une fissure de longueur $a = 10 \text{ mm}$ réparée par un patch à six plis, la valeur de K_I est de l'ordre de 12.14, 9.40 et $4.64 \text{ MPa}\sqrt{m}$ pour les orientations des fibres $\theta = 0, 45$ et 90° , respectivement. L'augmentation de l'angle d'inclinaison provoque une diminution progressive de K_I , qui s'annule lorsque la fissure est orientée parallèlement à l'axe de chargement.

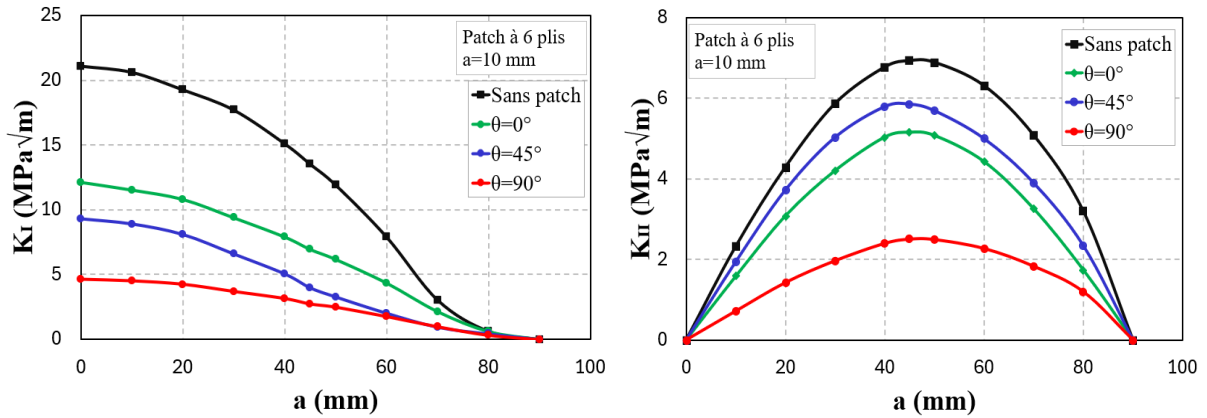


Figure III. 11. Variation des facteurs d'intensité des contraintes K_I et K_{II} en fonction de l'angle d'inclinaison de la fissure.

Nous remarquons également que le facteur d'intensité des contraintes K_{II} atteint sa valeur maximale pour une inclinaison de fissure voisine de $\theta = 45^\circ$, correspondant à une sollicitation maximale en cisaillement. Pour cet angle, les valeurs de K_{II} sont de l'ordre de 5.15 , 5.85 et 2.51 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ pour les orientations des fibres $\theta = 0, 45$ et 90° , respectivement. En revanche, K_{II} est nul pour $\theta = 0$ et 90° , où la fissure est soumise respectivement à un mode I pur et à une configuration ne générant plus de composante de cisaillement.

Les résultats montrent également que l'orientation des fibres à $\theta = 90^\circ$ permet d'obtenir les plus faibles valeurs de K_I et K_{II} sur l'ensemble des angles étudiés, ce qui confirme la meilleure efficacité de cette configuration pour limiter simultanément les effets d'ouverture et de cisaillement au voisinage de la pointe de fissure.

III.11 Effet de la séquence des plis sur le FIC et les contraintes de cisaillement dans la couche adhésive

Dans un assemblage collé, le joint de la colle est l'élément critique de la structure, et les contraintes de cisaillement dans l'adhésif sont considérées comme paramètres déterminants.

La Figure III. 12 montre la variation du FIC K_I en fonction de l'angle d'orientation des fibres θ pour différentes séquences d'empilement du patch composite. La position des plis croisés en contact avec la fissure est ainsi mise en évidence.

On observe que, quelle que soit la séquence d'empilement considérée, les valeurs de K_I demeurent pratiquement stables pour les faibles orientations des fibres, lorsque $\theta < 40^\circ$. Dans ce cas, le patch est saturé et l'effet de l'orientation des plis n'est pas significatif. Au-delà de

cette valeur, une nette diminution de K_I est constatée avec l'augmentation de l'orientation des fibres. La séquence $[(\theta/-\theta)_3]$ présente les valeurs les plus élevées de K_I , tandis que les séquences $[(90/0)_2/(\theta/-\theta)]$ et $[(0/90)_2/(\theta/-\theta)]$, conduisent aux valeurs les plus faibles, traduisant d'une meilleure aptitude au transfert de charge entre le patch et la plaque fissurée. La réduction du FIC atteint environ 46 % et 50 % pour les patches de séquences $[(\theta/-\theta)_3]$ et $[45/-45/(\theta/-\theta)_2]$, respectivement. En revanche, elle est de l'ordre de 77 % pour les patches composites présentant les séquences $[(90/0)_2/(\theta/-\theta)]$ et $[(0/90)_2/(\theta/-\theta)]$. Lorsque l'orientation des fibres dépasse environ 60° , les courbes tendent à se rapprocher et les écarts entre les différentes séquences deviennent moins importants, ce qui traduit une influence moins prononcée de la séquence d'empilement sur l'efficacité de la réparation.

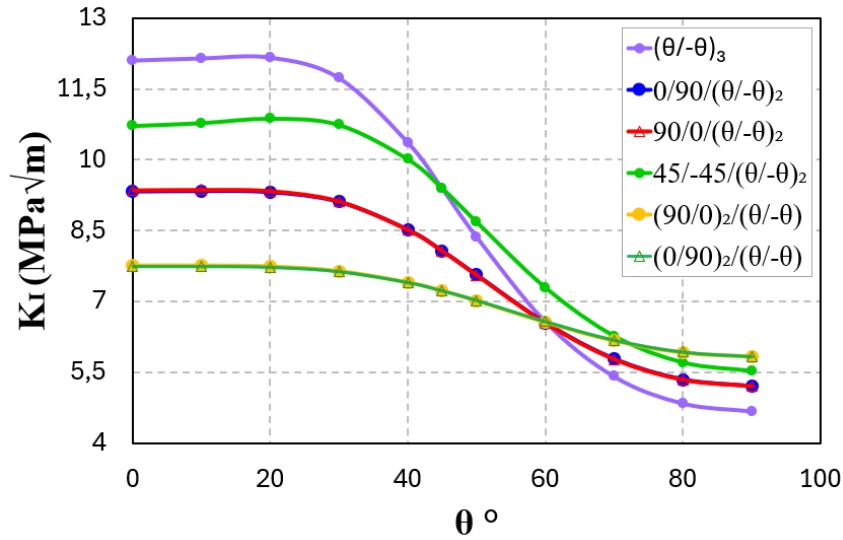


Figure III. 12. Effet de la séquence des plis du patch sur le FIC K_I .

Une attention particulière est accordée à l'analyse de la distribution des contraintes de cisaillement dans le joint de la colle. Les variations des contraintes τ_{xy} , τ_{xz} , et τ_{yz} , sont représentées en fonction de l'angle d'orientation des fibres θ dans la Figure III. 13.

On observe que la séquence d'empilement influence significativement les contraintes de cisaillement dans l'adhésif. Les séquences $[(90/0)_2/(\theta/-\theta)]$ et $[(0/90)_2/(\theta/-\theta)]$, conduisent globalement aux plus faibles niveaux de contraintes pour les trois composantes étudiées, tandis que les séquences $[(\theta/-\theta)_3]$ et $[45/-45/(\theta/-\theta)_2]$ génèrent les valeurs les plus élevées.

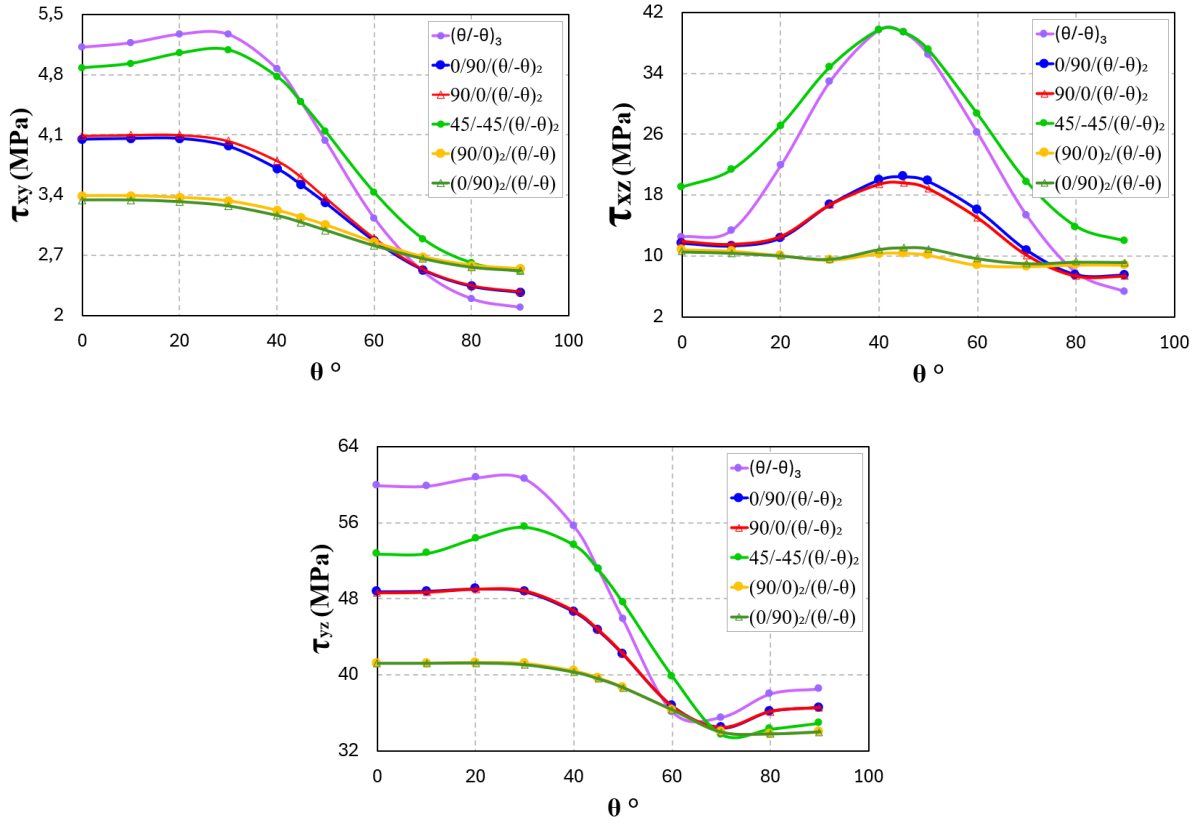


Figure III. 13. Effet de la séquence des plis du patch sur les contraintes de cisaillement dans la couche adhésive.

La contrainte τ_{xy} présente les plus faibles valeurs, comprises entre 2 et 5,5 MPa. Cette faible sollicitation s'explique par le fait que τ_{xy} correspond à un cisaillement dans le plan de la couche adhésive. Les sollicitations dans cette direction sont moins importantes que celles faisant intervenir l'épaisseur de l'adhésif, ce qui conduit à des niveaux de contraintes relativement faibles.

En revanche, les composantes τ_{xz} , et τ_{yz} atteignent des niveaux de contraintes nettement plus élevés, pouvant atteindre respectivement près de 40 MPa et 60 MPa. Ces contraintes sont associées au transfert des charges entre le patch composite et la plaque à travers la faible épaisseur de la couche adhésive. Elles constituent donc les sollicitations les plus critiques de l'assemblage collé, car des niveaux élevés de cisaillement peuvent favoriser l'amorçage du décollement de l'interface adhésive.

Par ailleurs, la contrainte τ_{xz} présente un pic de contrainte aux environs de $\theta = 45^\circ$, particulièrement marqué pour les séquences $[(\theta/-\theta)_3]$ et $[45/-45/(\theta/-\theta)_2]$. À l'inverse, les séquences $[(90/0)_2/(\theta/-\theta)]$ et $[(0/90)_2/(\theta/-\theta)]$ permettent de limiter les trois

contraintes de cisaillement, traduisant une meilleure répartition des efforts dans la couche adhésive.

Ces résultats confirment que les séquences $[(90/0)_2/(\theta/-\theta)]$ et $[(0/90)_2/(\theta/-\theta)]$ offrent les meilleures performances, en réduisant simultanément les contraintes de cisaillement dans la couche adhésive et, par conséquent, le risque de dégradation de la liaison collée.

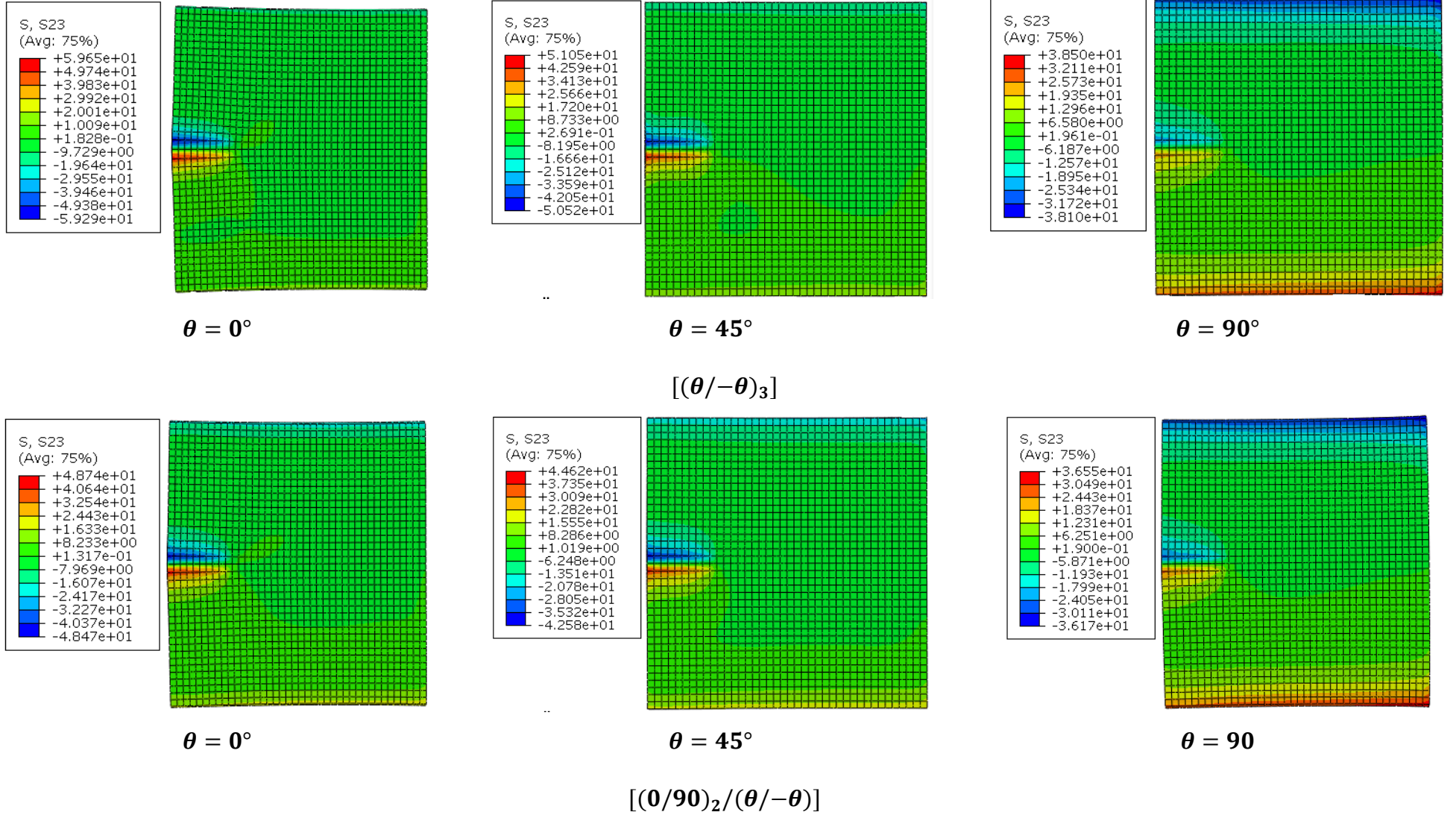
La Figure III. 14 illustre la distribution de contrainte de cisaillement de la colle pour quelques séquences d'empilement des plis du patch de réparation utilisés (pour $\theta = 0^\circ, 45^\circ, \text{et } 90^\circ$ successivement). Les résultats montrent que, quelle que soit la séquence d'empilement, les concentrations de contraintes sont localisées principalement au voisinage des pointes et des lèvres de la fissure pour des orientations des fibres inférieures à $\theta < 45^\circ$. Au-delà de cette valeur, les zones de fortes contraintes se déplacent progressivement vers les extrémités longitudinales du patch.

Par ailleurs, les niveaux de contraintes les plus élevés sont obtenus avec la séquence $\theta < 45^\circ$, suivie de la séquence $[45/-45/(\theta/-\theta)_2]$. En revanche, les séquences comportant des plis croisés $((90/0))$ ou $((0/90))$ au voisinage de la couche adhésive conduisent à une réduction significative des contraintes. Cette diminution devient plus importante lorsque le nombre de plis croisés en contact avec la couche adhésive augmente.

Cette réduction des contraintes peut être attribuée à une meilleure répartition des efforts dans la couche adhésive, résultant d'une transition plus progressive des rigidités entre la plaque, l'adhésif et le patch composite. Ainsi, le positionnement des plis croisés au voisinage de la couche adhésive contribue à limiter les concentrations de contraintes et à améliorer l'efficacité de la réparation.

III.12 Effet de la séquence des plis sur les contraintes normales dans la couche adhésive

Afin de montrer l'effet de la position des plis du patch adjacents à la couche adhésive sur l'efficacité de la réparation, les contraintes normales σ_{xx} , σ_{yy} et σ_{zz} sont représentées à la Figure III. 15 en fonction de l'angle d'orientation des fibres θ . Différentes séquences des plis du patch composites ont été considérées.



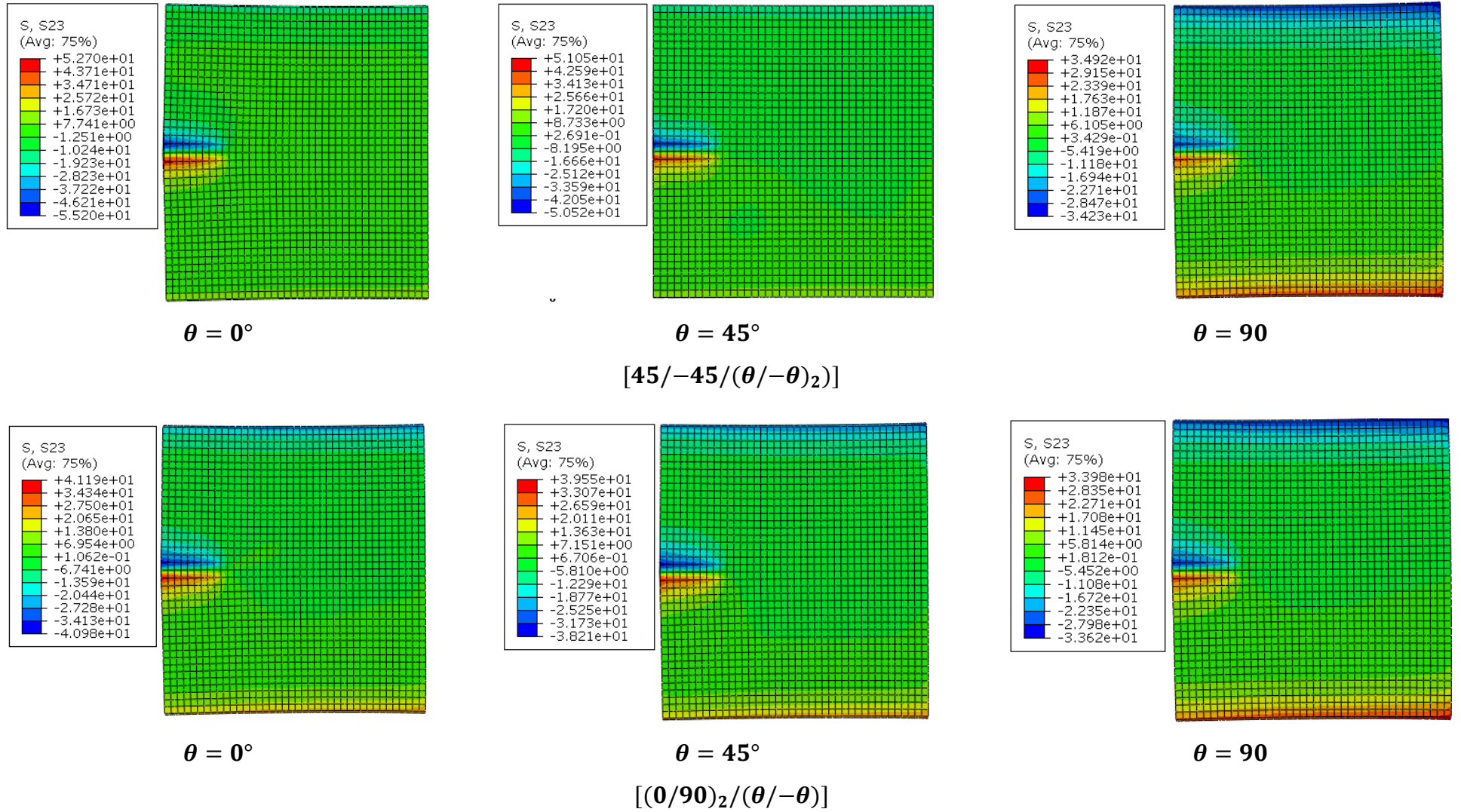


Figure III. 14. Distribution des contraintes de cisaillement τ_{yz} dans le joint de la colle.

On observe que, La contrainte σ_{yy} atteint les valeurs les plus élevées, tandis que σ_{xx} présente les plus faibles niveaux de contraintes. Cette différence s'explique par le fait que la direction (y) correspond à la direction principale de sollicitation de la structure, alors que les contraintes suivant les autres directions restent plus limitées.

Lorsque $\theta = 0^\circ$, les réductions des contraintes normales σ_{xx} , σ_{yy} et σ_{zz} obtenues par la séquence de patch $[(0/90)_2/(\theta/-\theta)]$, est de l'ordre de 44%, 45% et 28%, respectivement, par rapport à la séquence du patch $[(\theta/-\theta)_3]$. C'est intéressant de montrer que la valeur des contraintes normales dans la couche adhésive réparée avec un patch de type $[(0/90)_2/(\theta/-\theta)]$, est faible par rapport aux autres séquences. Par conséquent, l'augmentation des couches croisées ($0^\circ/90^\circ$) en contact avec l'adhésif conduit à une réduction des contraintes normales et tangentielles dans la couche adhésive et à une réduction du FIC de la fissure réparée, lorsque $\theta < 45^\circ$.

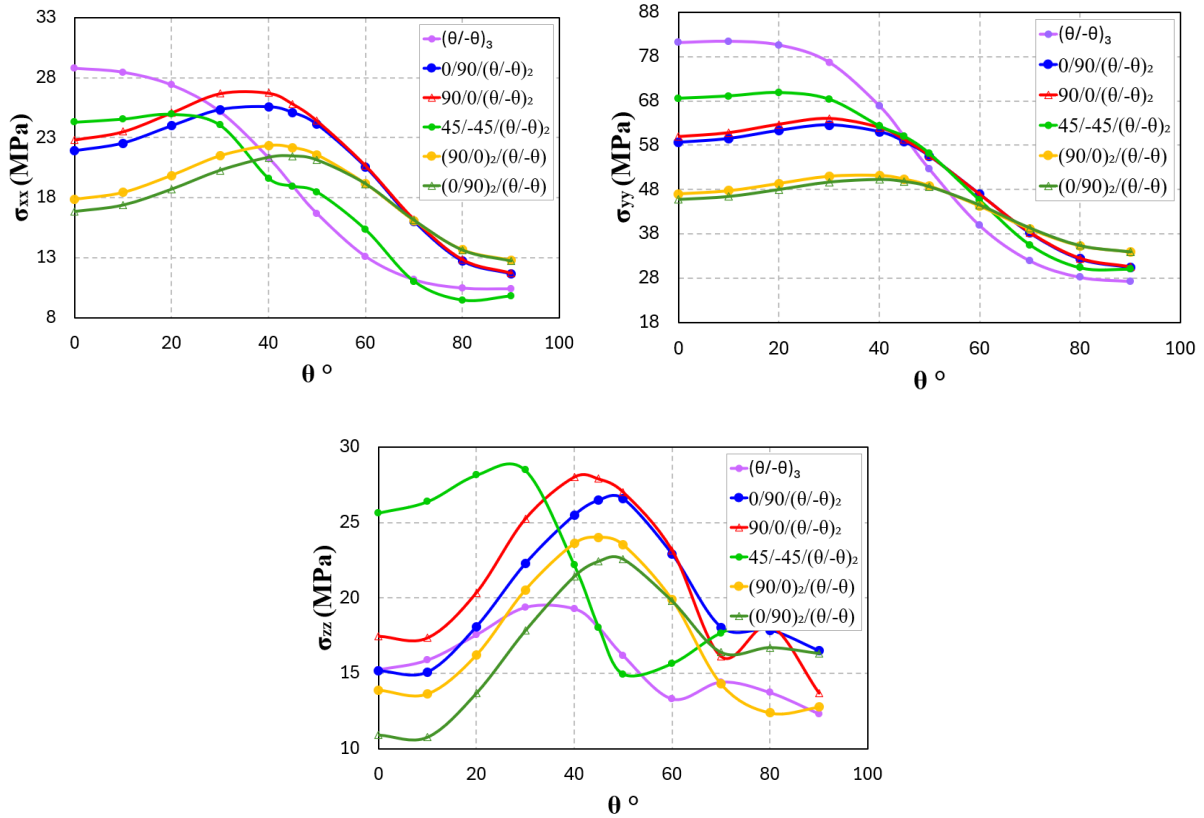


Figure III. 15 . Effet de la séquence des plis du patch sur les contraintes normales dans le joint de l'adhésif.

Ces observations sont en bon accord avec les résultats rapportés dans la littérature. Des tendances similaires ont été mises en évidence par BELOUFA. I et al. [39], qui ont montré que les séquences d'empilement comportant des plis croisés ($0^\circ/90^\circ$) au voisinage de la couche adhésive permettent de réduire les contraintes développées dans l'adhésif et d'améliorer les performances de la réparation par patch composite.

III.13 Conclusion

Au terme de ce chapitre, une étude numérique de la réparation d'une plaque en aluminium comportant une fissure latérale a été réalisée à l'aide de la méthode des éléments finis. La validation du modèle numérique par comparaison avec les résultats analytiques a montré une bonne concordance, confirmant sa capacité à prédire correctement les facteurs d'intensité des contraintes pour les fissures droites et inclinées.

L'étude paramétrique a permis de mettre en évidence l'influence des principaux paramètres géométriques et mécaniques sur l'efficacité de la réparation. Les résultats obtenus ont montré que l'orientation des fibres, les dimensions du patch, son épaisseur ainsi que les caractéristiques de l'adhésif jouent un rôle important dans la réduction du facteur d'intensité des contraintes.

Par ailleurs, l'analyse des fissures inclinées soumises à un chargement en mode mixte a confirmé la capacité du patch composite à réduire simultanément les composantes K_I et K_{II} .

IV Conclusion générale

Ce travail a porté sur l'étude numérique de la réparation d'une plaque en aluminium fissurée par un patch composite collé, en utilisant la méthode des éléments finis sous Abaqus. L'objectif principal était d'évaluer l'influence des différents paramètres géométriques et mécaniques sur l'efficacité de la réparation.

- La surface de contact entre le patch et la structure réparée constitue un paramètre déterminant dans l'efficacité de la réparation. Les résultats montrent qu'une surface de contact de 1600 mm², correspondant à un patch carré de hauteur $h = 40 \text{ m}$, est suffisante pour ralentir efficacement la propagation de la fissure et réduire le facteur d'intensité des contraintes (FIC).
- Une épaisseur du patch suffisante est souhaitable afin d'améliorer la rigidité de la réparation, de réduire le facteur d'intensité des contraintes et de ralentir la propagation de la fissure.
- Une faible épaisseur de la couche adhésive est préférable afin d'assurer un meilleur transfert des efforts entre le patch et la structure, ce qui permet de réduire le facteur d'intensité des contraintes ainsi que les contraintes développées dans l'adhésif.
- Le composite bore/époxy s'est révélé être le matériau de patch le plus performant, grâce à sa rigidité élevée, permettant une réduction plus importante du facteur d'intensité des contraintes et une meilleure efficacité de la réparation.
- L'analyse en mode mixte a montré que l'orientation de la fissure influence les facteurs d'intensité des contraintes. La réparation par patch composite reste néanmoins efficace en réduisant les FIC, améliorant ainsi la résistance de la structure fissurée.
- La diminution de la rigidité du patch et surtout la rigidité des plis avec l'interface de la colle, permet d'abaisser les contraintes de cisaillement dans la colle et empêcher le décollement du patch composite. Le patch sera plus rentable et plus efficace lorsqu'on utilise des plis croisés ($0^\circ/90^\circ$) en contact avec le joint de la colle.
- D'une manière générale, les résultats obtenus montrent que le choix judicieux du matériau du patch, de l'adhésif, de la séquence d'empilement ainsi que des paramètres géométriques permet d'optimiser l'efficacité de la réparation et d'améliorer significativement la durée de vie des structures fissurées.

Références

- [1] La norme AFNOR X 60-010-1994.
- [2] S. Kou, *Welding Metallurgy*, 2nd Edition, Wiley-Interscience, 2003.
- [3] A.C. Okafor, N. Singh, Design, Analysis and Performance of Adhesively Bonded Composite Patch Repair of Cracked Aluminum Aircraft Panels, la revue *Composite Structures*.
- [4] A. baker, «bonded composite repair of fatigue-cracked primary aircraft structure,» *compos.Struct.*, vol. 47, n° 11, pp. 431-443, 1999.
- [5] A. Maleki, M. Saeedifar, M.A. Najafabadi, D. Zarouchas, «The Fatigue Failure Study of Repaired Aluminum Plates by Composite Patches using Acoustic Emission,» *Engineering Fracture Mechanics*, 2017.
- [6] L.M Butkus, R.V Valentin , W. Sohnson , «Fatigue analysis of cracked thick aluminum plate bonded with composite patches,» *Composite Structures*, vol. 64, pp. 79-90, 2004.
- [7] H. Hosseini-Toudeshky, «Effects of composite patches on fatigue crack propagation of single-side repaired aluminum panels,» *Composite Structures*, vol. 76, n° 13, pp. 243-251, 2006.
- [8] J. Wang, Z. Zhou, R. Vodicka, W.K. Chiu, «Selection of patch and adhesive materials for helicopter battle damage repair applications,» *Composite Structures*, vol. 91, pp. 278-285, 2009.
- [9] D.C. Seo, J.J -Lee, «Fatigue crack growth behavior of cracked aluminum plate repaired with composite patch,» *Composite Structures*, vol. 5, pp. 323-330, 2002.
- [10] T.E. Tay, F. Chau , «Bonded boron-epoxy composite repair and reinforcement of cracked aluminium structures,» *Composite Structures*, vol. 34, pp. 339-347, 1996.
- [11] D. Ouinas, B.B. Bouiadjra, B. Serier, M. SaidBekkouche, «Comparison of the effectiveness of boron/epoxy and graphite/epoxy patches for repaired cracks

- emanating from a semicircular notch edge,» *Composite Structure*, vol. 80, p. 514–522, 200.
- [12] C. N. Duong, J. Yu, «An analytical estimate of thermal effects in a composite bonded repair: plane stress analysis,» *International Journal of Solids and Structures*, vol. 39, pp. 1003-1014, 2002.
- [13] A. Deheeger, J.D. Mathias, M. Grédiac, «Static characteristics and fatigue behavior of composite-repaired aluminum plates,» *Composite Structures*, vol. 56, pp. 151-155, 2002.
- [14] Huntsman Advanced Materials, Araldite® 2015 Structural Adhesive , «Technical Data Sheet, Huntsman Corporation».
- [15] B. Bachir Bouiadjra, M. Belhouari, B. Serier, «Computation of the stress intensity factors for repaired cracks with bonded composite patch in mode I and mixed mode,» *Composite Structures*, pp. 401-406, 2005.
- [16] A. Baker, N. Rajic, C. Davis, «Towards a practical structural health monitoring,» *Composites Part A: Applied Science and*, vol. 40, pp. 1340-1352, 2009.
- [17] W. Baker, I. McKenzie, R. Jones, «Development of life extension strategies for Australian military aircraft, using structural health monitoring of composite repairs and joints,» *Composite Structures*, vol. 66, pp. 133-143, 2004.
- [18] B. Bachir Bouiadjra, M. Belhouari, B. Serier, « Computation of the stress intensity factors for repaired cracks with bonded composite patch in mode I and mixed mode,» *Composite Structures*, vol. 47, pp. 431-443., 2002.
- [19] D. Ouinas, A. Hebbbar, B. Bachir Bouiadjra , M. Belhouari, B. Serier, «Numerical analysis of the stress intensity factors for repaired cracks from a notch with bonded composite semicircular patch,» *Composites Part B: Engineering*, vol. 40, n° 18, pp. 804-810, 2009.
- [20] C.H. Zhang, «Elastodynamic analysis of a periodic array of mode III crack in transversely isotropic solids,» *Journal of Applied Mechanics*, vol. 59, pp. 366-371, 1992.

- [21] Y. Murakami, Stress Intensity Factors Handbook, 1987: Pergamon Press.
- [22] Abaqus, Abaqus Documentation, «Dassault Systèmes Simulia,» 2004.
- [23] O.A. Chukwujekwu, N. Singh, UE. Enemouh , SV. Rao , «Design, analysis and performance of adhesively bonded composite patch repair of cracked aluminium aircraft panels,» *Composite Structure*, vol. 71, p. 258–270, 2005.
- [24] A.A. Baker, L.R.F. Rose, R. Jones, Advances in the Bonded Composite Repair of Metallic Aircraft Structure, Elsevier, 2002.
- [25] M. Fari Bouanani, F. Benyahia, A. Albedah, A. Aid, B. Bachir Bouiadjra, M. Belhouari, T. Achour, «Analysis of the adhesive failure in bonded composite repair of aircraft structures using modified damage zone theory,» *Materials and Design*, vol. 50, pp. 433-439, 2013.
- [26] H.I. BELOUFA , «Etude du comportement mécanique des coques en composites renforcées sous l’effet du flambage,» *Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem*, p. 128, 2022.
- [27] M. R. Ayatollahi, R. Hashemi, «Computation of stress intensity factors (K I, K II) and Tstress for cracks reinforced by composite patching,» *Composite Structure*, vol. 78, pp. 602-609, 2007.
- [28] T.L. Anderson , Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, 4th Edition, CRC Press, 2017.
- [29] A.A. Baker, L.R.F. Rose , R. Jones , «Advances in the Bonded Composite Repair of Metallic Aircraft Structures,» *Elsevier, Oxford*, 2003.
- [30] B. Bachir Bouiadjra , M. Belhouari , B. Serier , «Computation of the stress intensity factors for repaired cracks with bonded composite patch,» *Applied Composite Materials*, 2002.
- [31] M. Isida , Stress Analysis of Cracks Handbook, Oxford: Pergamon Press, 1973.
- [32] H. Tada , P.C. Paris , G.R. Irwin , The Stress Analysis of Cracks Handbook, New York: 3rd Edition, ASME Press, 2000.

- [33] D. Ouinas, B. Bachir Bouiadjra, S. Himouri, N. Benderdouche , «Progressive edge cracked aluminium plate repaired with adhesively bonded composite patch under full width disbond,» *Composites Part B: Engineering*, vol. 43, n° 13, pp. 805-811, 2012.
- [34] M.H. Aliabadi , D.P. Rooke, «Numerical Fracture Mechanics,» *Computational Mechanics Publications*, 1991.
- [35] A.S. Fayed, «Numerical analysis of mixed mode I/II stress intensity factors of edge slant cracked plates,» *Engineering Solid Mechanics*, 5(1), 61–70, vol. 5, n° 11, pp. 61-70, 2017.
- [36] B. Bachir Bouiadjra, W. Oudad, A. Albedah, F. Benyahia, M. Belhouari , «Effects of the adhesive disbond on the performances of bonded composite repairs in aircraft structures,» *Material Design*, vol. 37, p. 89/95, 2012.
- [37] D. Ouinas, B. Bachir Bouiadjra, S. Himouri, N. Benderdouche , «Progressive edge cracked aluminium plate repaired with adhesively bonded composite patch under full width disbond,» *Composites Part B: Engineering*, vol. 43, n° 13, pp. 805-811, 2012.
- [38] Ayatollahi M. R., Hashemi R. , «Computation of stress intensity factors (K I, K II) and Tstress for cracks reinforced by composite patching,» *Composite Structure*, vol. 78, pp. 602-609, 2007.
- [39] H.I. Beloufa, D. Ouinas, M. Tarfaoui, N. Benderdouche, «Effect of stacking sequence of the bonded composite patch on repair performance,» *tructural Engineering and Mechanics*, vol. 52, n° 17, pp. 295-313, 2016.