

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences & Technologie

Filière : Électro-Mécanique

Parcours : Master

Spécialité: Maintenance industrielle

THÈME

Modélisation et réparation d'une plaque fissurée latéralement par patch en composite.

Préparé par:

Mlle : ABDERRAHMANE Aicha

Mlle : ABDOUS Khaldia

Devant le jury composé de :

Nom et prénom	Grade	Qualité	Structures de rattachement
MAKHFI Souad	MCB	Président	Université de Tiaret
ZAGANE Mohamed El Salah	MCB	Examineur	Université de Tiaret
MOULGADA Abdelmadjid	MCA	Encadreur	Université de Tiaret

PROMOTION 2018 /2019

Remerciements

Tout d'abord, on tient à remercier ALLAH le tout puissant, de nous avoir donnée la force, la patience et le courage pour réaliser ce travail.

En second lieu, on remercie chaleureusement notre encadreur Monsieur **MOULGADA Abdelmadjid** de nous avoir données la possibilité de réaliser ce travail sous son suivie et pour le temps qu'il nous a consacré, sa patience, ses précieux conseils, son soutien tout le long de la réalisation de notre mémoire ainsi que pour son gentillesse, son bienveillance et ses qualités profondément humaines qui ont été remarquables.

Nos vifs remerciements vont également aux membres de jury de ce mémoire qui ont accepté de juger ce travail :

Un merci particulier à Madame **MAKHFI Souad**, de nous avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du jury de notre mémoire.

Un merci particulier à Monsieur **ZAGANE Mohamed. El Salah**, pour avoir accepté d'examiner et évaluer notre travail.

Un grand remerciement pour tous nos enseignants département de Génie Mécanique, faculté des Sciences Appliquées, Université Ibn-Khaldoun, Tiaret.
Plus précisément Monsieur **GUEMMOUR Boutkhil Mohamed**.

Dédicace

Nous remercions tout d'abord ALLAH qui nous a donné la force. Et le courage pour terminer ce modeste travail.

Je dédie cet ouvrage

***A** ma maman qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'études.*

Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

***A** mon frère et sa femme, mes sœurs et Ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. It m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.*

***A** ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.*

***A** tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.*

***A** tous ceux que j'aime.*

Merci!

ABDERRAHMANE Aicha

Dédicace

*Avant tout, mes remerciements à l'**Allah** le tout puissant qui m'a donné le courage, la volonté, la patience pour faire ce travail. Gloire à Allah.*

*Je dédie ce modeste travail à tous ceux qui me sont chers, en particulier mon **cher père** qui ne cesse de donner sans jamais recevoir, dont je suis fière et j'espère que Dieu lui accorde une longue vie pour qu'il puisse assister à d'autres succès.*

*A ma **chère mère**, symbole du sacrifice et du dévouement, qui m'a accompagnée durant tout ce parcours laborieux, veillé sur moi m'offrant ce qu'une mère a de mieux, l'amour et la compréhension.*

*A mes chers sœurs ; **Nour Ihouda, Lynda**, ainsi mon frère **laide** en témoignage de l'attachement, de l'amour et de l'affection que je porte pour vous. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.*

*A ma copine **Aicha** qui ma aider d'achever ce modeste travail.*

*Spéciale dédicace pour vous mes chéries "**Fatiha, Khadîdja**". Et à toutes les personnes que j'ai connues (famille, amis, collègues de travail) qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, et je n'oublier pas bien sur mes chères ; **Fatima** et **Salima** pour leur amitié.*

A toutes personnes qui ont dû me supporter pendant la préparation de ce travail.

Abdous khaldia

Liste des symboles

Liste des symboles

τ_m	La contrainte de cisaillement moyenne (MPa).
E	Module d'Young du matériau (GPa).
e	Epaisseur (mm).
G	Le module de cisaillement de l'adhésif (GPa).
τ_{max}	la contrainte de cisaillement maximale (MPa).
M_f	Moment de flexion (N.m).
E_a	Le module d'élasticité.
μ_a	Le module de cisaillement de l'adhésif.
G_c	La valeur critique du taux.
F	La force (N).
W	Travail effectué par les forces extérieures (N).
ν	Coefficient de poisson du matériau.
K_I	Facteur d'intensité de contrainte ($MPa\sqrt{m}$).
k	La rigidité en torsion.
L	Longueur (mm).
b	Largeur (mm).
R_i	Rayon interne (mm).
R_e	Rayon externe (mm).
M	Couple (N.m).
R	Distance radiale (mm).
θ	Un angle($^\circ$).
σ	La contrainte (MPa).
δ	La déformation (N/mm).
U	L'énergie emmagasinée (N/mm^2).
ΔK	la variation du facteur d'intensité de contrainte ($MPa\sqrt{m}$).
R	Rapport de charge.
f	La contribution de la fermeture de la fissure.
ΔK_{th}	L'amplitude du facteur d'intensité de contrainte ($MPa\sqrt{m}$).

Listes des figures et tableaux

Listes des figures

Chapitre I Généralités sur les assemblages collés		
Figure I.1	Exemple d'un mouillage pour l'ancrage mécanique (a) bon mouillage, (b) mauvais mouillage.	2
Figure I.2	Représentation schématique de différentes géométries d'assemblage.	3
Figure I.3	Mode de sollicitation d'un joint collé.	4
Figure I.4	Représentation schématique de la géométrie d'un joint à simple recouvrement.	5
Figure I.5	Répartition des contraintes de cisaillement dans le joint à simple recouvrement.	6
Figure I.6	Distribution de contraintes selon Goland et Reissner.	6
Figure I.7	Essai de double torsion.	7
Figure I.8	Principe de test de torsion/cisaillement.	8
Figure I.9	Représentation schématique du pelage.	8
Figure I.10	Essai de flexion.	9
Figure I.11	Essai de traction en bout.	10
Figure I.12	Essai de clivage.	11
Figure I.13	Le joint adhésif collé (à simple recouvrement).	11
Figure I.14	Défauts typiques présents dans un joint de colle.	14
Figure I.15	Différents modes de ruptures.	14
Figure I.16	Différents modes de sollicitations mécaniques.	15
Chapitre II Comportement des matériaux en mécanique de la rupture		
Figure II.1	Propagation de fissure.	17
Figure II.2	Ligne de force et concentration de contrainte.	17

Figure II.3	Zone délimitant le voisinage d'une pointe de fissure.	17
Figure II.4	Rupture fragile par clivage dans un acier faiblement allié microscopie à balayage.	19
Figure II.5	1- Rupture inter granulaire fragile par fluage dans un acier au Cr- Mo. Les petites cavités sur les joints sont des cavités de fluage.	19
Figure II.5	2- Rupture inter granulaire ductile dans un alliage A base nickel inconel 718.	20
Figure II.6	Rupture ductile inter granulaire dans un acier 0.30 C.1 Cr -0.25 Ma.	20
Figure II.7	Courbe d'écroutissage d'un matériau fragile.	22
Figure II.8	Courbe d'écroutissage d'un matériau ductile.	22
Figure II.9	Courbe effort-surface de fissure (a) rupture fragile(b) rupture ductile.	24
Figure II.10	Les différents types de fissures.	24
Figure II.11	Propagation en mode I.	26
Figure II.12	Propagation en mode II.	26
Figure II.13	Propagation en mode III.	26
Figure II.14	Evolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de Cycle.	27
Figure II.15	Représentation schématique des différents régimes de propagation.	28
Figure II.16	Influence du rapport de charge sur la vitesse de fissuration.	29
Figure II.17	Evolution de ΔK_s en fonction de R.	29
Figure II.18	Schéma d'étude du comportement mécanique d'une structure en matériau composite.	34
Chapitre III Modélisation et simulation		
Figure III.1	Modèle géométrique de la plaque réparée.	37

Figure III.2	Modèle géométrique et maillage de la structure (Plaque et patch).	38
Figure III.3	Courbe Traction contrainte-déformation. a) - adhésif ADEKIT b) - plaque d'aluminium.	39
Figure III.4	Distribution des contraintes équivalentes de Von Mises.	41
Figure III.5	Distribution des contraintes normales σ_{xx} .	43
Figure III.6	Distribution des contraintes tangentielles maximales τ_{xy} .	45
Figure III.7	Distribution des contraintes normales σ_{yy} .	47
Figure III.8	Distribution des contraintes équivalentes de Von Mises.	49
Figure III.9	Variation des contraintes équivalentes maximales de Von Mises en fonction des différents chargements.	50
Figure III.10	Distribution des contraintes normales σ_{xx} .	52
Figure III.11	Variation des contraintes normales maximales σ_{xx} en fonction des différents chargements.	52
Figure III.12	Distribution des contraintes tangentielles τ_{xy} .	54
Figure III.13	Variation des contraintes tangentielles maximales τ_{xy} en fonction des différents chargements.	55
Figure III.14	Distribution des contraintes normales σ_{yy} .	57
Figure III.15	Variation des contraintes normales maximales σ_{yy} en fonction des différents chargements.	58
Figure III.16	Représentation de l'intégrale (J) pour différents chargements.	58
Figure III.17	Représentation de l'intégrale (J) pour différents chargements.	59

Liste de tableau

Tableau II.1	Les different alliages.	23
Tableau III.1	Propriétés mécaniques du composite Bore/époxy.	37
Tableau III.2	Propriétés mécaniques de l'aluminium 2024-T3 et de l'adhésif A140.	37
Tableau III.3	Les différentes propriétés de l'alliage d'aluminium 2024-T3.	38
Tableau III.4	Propriétés mécaniques du composite Carbone/époxy.	48

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I : Généralité sur les assemblages collés

I-1.Introduction	1
I-2.Les mécanismes d'adhésion.....	1
I-2.1.L'adhésion mécanique	1
I-3.Les assemblages collés.....	2
I-3.1.Différentes sollicitations sur les assemblages.....	3
I-4.Contrôle mécanique des assemblages collés	4
I-4.1.Essai à simple recouvrement.....	4
I-4.2.Mesures en torsion	7
I-4.3.Essai à double torsion.....	7
I-4.4.Essai de torsion annulaire	7
I-4.5.Pelage	8
I-4.6.Essais en flexion.....	9
I-4.7.Essai de traction en bout (ISO 6922-1987).....	9
I-4.8.Essai de clivage	10
I-5.Différents travaux scientifiques	11
I-6.Le comportement des assemblages collés	11
I-6.1.La longueur de recouvrement	12
I-6.2.La rigidité des substrats	12
I-6.3.La rigidité de l'adhésif.....	12
I-6.4.Le comportement mécanique des adhésifs	13
I-7.Les défauts dans les assemblages collés	13
I-7.1.Procédés non destructifs de contrôle des assemblages collés.....	14
I-7.2.Procédés destructifs de contrôle des assemblages collés.....	14
I-8.Conclusion.....	15

Chapitre II : Comportement des matériaux en mécanique de la rupture

II-1.Introduction	16
II-2.Mécanique de la rupture.....	16
II-2.1.Rupture fragile	18
II-2.2.Rupture ductile.....	20
II-2.3.Rupture par fatigue d'un poly cristal	21

II-3.Essai de la rupture.....	21
II-4.Schématisation de la rupture	21
II-4.1.Rupture par endommagement de l'élément de volume.....	21
II-4.1.1.Endommagement macro-fragile.....	22
II-4.1.2.Endommagement plastique ductile	22
II-4.1.3.Endommagement viscoplastique fragile.....	22
II-4.1.4.Endommagement de fatigue	23
II-4.2.Rupture par fissuration d'une structure.....	23
II-4.2.1.Fissuration par rupture fragile.....	23
II-4.2.2.Fissuration par rupture ductile	23
II-4.2.3.Fissuration par fluage	24
II-4.2.4.Fissuration par fatigue	24
II-5. Modélisation de la fissure	24
II-6.Les modes de propagation des fissures.....	25
II-6.1.Stades de fissuration par fatigue	26
II-6.1.1.Les types de fissuration	28
II-6.2.Paramètres d'influence sur le comportement en fatigue	28
II-6.2.1.Influence de la contrainte moyenne.....	29
II-6.2.2.Effet d'échelle	30
II-7.Modèles décrivant la propagation d'une fissure.....	30
II-8.Propriété de l'Aluminium pur	32
II-8.1.Conséquences sur l'étude du comportement mécanique des matériaux composites....	33
II-9.Conclusion.....	35

Chapitre III : Modélisation et simulation

III-1.Introduction.....	36
III-2.Présentation du logiciel de calcul.....	36
III-3.Présentation du modèle.....	36
III-4.Discussions	39
III-4.1.Les contraintes équivalentes de Von Mises	39
III-4.2.Contraintes normales σ_{xx}	42
III-4.3.Contraintes tangentielles τ_{xy}	44
III-4.4.Contraintes normales σ_{yy}	46

III-5.Réparation par patch Carbone/époxy.....	48
III-5.1.Contraintes équivalentes de Von Mises	48
III-5.2.Contrainte normale de σ_{xx}	50
III-5.3.Contraintes tangentielles τ_{xy}	53
III-5.4.Contrainte normale σ_{yy}	55
III-6.Intégrale J.....	58
III-7.Conclusion	59
Conclusion générale	61
Références bibliographiques.....	62

Introduction générale

Introduction générale

Les matériaux composites sont des matériaux à très haute performances mécaniques, qui peuvent être façonnés à volonté aux grés du concepteur, de manière à obtenir les propriétés souhaitées en faisant un choix à approprié des constituants.

L'adaptabilité de ce matériau en fait à atout incontestable qui explique son utilisation de plus en plus répandue dans l'industrie de transport notamment dans l'industrie aéronautique. Lorsque les composites des appareils souffrent de fissure qui sont causées par le dommage, l'évaluation du niveau de ce dommage permette de choisir la procédure de réparation la plus adaptés , la réparation de la structure fissurée parfois présente plusieurs obstacles à cause du délais raisonnable et même elle est très couteuse à cause de ces raisons, les industriels, sont amenés à rechercher une méthode de réparation faible et économique permettant de maintenir la structure en service et en toute sécurité pour une durée de vie limitée, parmi les méthodes de rupture qui ont été élaborés, on a la réparation des fissures par collage avec un patch en matériaux composites, cette fabrication a attesté son efficacité pour réduire le facteur d'intensité de contrainte aux points de la fissure et par conséquence l'augmentation de la durée de vie totale.

Plusieurs études expérimentales, de modélisations ou de simulations numériques ont été entreprises en vue de mieux cerner l'évaluation de la durée de vie résiduelle des composants mécaniques. Généralement, la prévision de durée de vie est basée sur la notion du facteur d'intensité des contraintes.

L'objet de cette étude est analyser le comportement d'une fissure avec et sans le renforcement par un patch en composite d'une plaque en aluminium en mode I en utilisant la méthode des éléments finis. Le patch de réparation est le Bore/époxy et le Carbone/époxy qui sont utilisés avec beaucoup de succès par de nombreux chercheurs .Les différentes chargements ont été sollicitées sur cette plaque, les différentes contraintes ont été tirées après simulation et faire une comparaison entre contraintes induites dans la plaque non réparée et plaque réparée, ensuite l'intégrale J a été mis en évidence pour les deux réparations.

Le présent mémoire est organisé en trois chapitres :

1. Le premier chapitre : on parle sur des généralités des assemblages collés.
2. Le deuxième chapitre : est consacré à l'étude le comportement des matériaux en mécanique de la rupture.
3. Le troisième chapitre porte sur la modélisation et simulation.

Et enfin une conclusion générale illustrant tous les résultats obtenus.

Chapitre –I–

Généralités sur les assemblages collés

I-1.Introduction

Les collages sont de plus en plus employés dans l'industrie, aussi bien pour les liaisons entre pièces métalliques qu'entre pièces composites. Les assemblages collés sont parfois plus intéressants que les méthodes classiques car il élimine les concentrations de contraintes dues aux trous et les éléments de liaison. Les tensions sur les extrémités sont aussi réduites car la colle remplit tout l'espace entre les deux éléments rassemblés, ce qui favorise la répartition des efforts. Grâce à de nombreux avantages, le collage remplace souvent les procédés traditionnels d'assemblages tels que le boulonnage, le rivetage, le vissage, l'agrafage ou bien même le soudage. Une brève énumération des avantages de l'assemblage par collage met en évidence une répartition plus régulière des contraintes, la possibilité d'assembler des matériaux de nature différente grâce aux progrès constants de l'industrie chimique, un amortissement des vibrations dans la structure grâce aux propriétés de l'adhésif, un allègement des structures, une amélioration de l'esthétique, un prix de revient souvent inférieur aux techniques d'assemblages classiques [1].

D'un point de vue industriel donc, si le collage est intéressant en termes de coûts et d'allègement des structures, il est encore difficile d'évaluer avec précision la fiabilité, dans le temps et en service, des joints collés. L'incertitude est amplifiée si les assemblages sont soumis à des environnements agressifs (forte humidité, température élevée, produits corrosifs,...). Ce constat provoque toujours, par conséquent, une certaine réticence dans les bureaux d'études vis-à-vis de cette technique d'assemblage [2].

I-2.Les mécanismes d'adhésion

On retrouve une difficulté au niveau des considérations théoriques, puisqu'il n'existe pas de théorie unifiée de l'adhésion mais de nombreux modèles dans lesquels l'approche du problème est différente. Ainsi, si les chimistes, par exemple, justifient l'adhésion par la création de liaisons covalentes fortes, les physiciens considèrent, quant à eux, les dissipations d'énergie. Quelques auteurs ont essayé de regrouper ces modèles selon différentes approches, par exemple, la revue de Shanahan qui a proposé une classification en considérant l'adhésion mécanique, spécifique et massique.

I-2.1.L'adhésion mécanique

Cette théorie, également appelée théorie de "l'ancrage mécanique", Il y a phénomène d'adhérence car l'adhésif va se loger dans les pores, les aspérités du substrat. Cette théorie fait donc intervenir la rugosité du substrat et la notion du mouillage (aptitude qu'à un liquide à occuper la plus grande surface possible quand nous l'étendons sur une surface solide).

La rugosité paraît donc être un facteur favorable quand l'adhésif mouille bien (augmentation de la surface de contact et meilleur ancrage mécanique) dans une certaine limite. Plus précisément, le mouillage qui n'est pas réalisé dans les creux peut constituer des amorces de rupture de l'assemblage, de plus, il y a concentration de contraintes au sommet des aspérités. Il semble qu'une surface obtenue par grenailage ou sablage (rayon de courbure faible des aspérités) soit préférable.

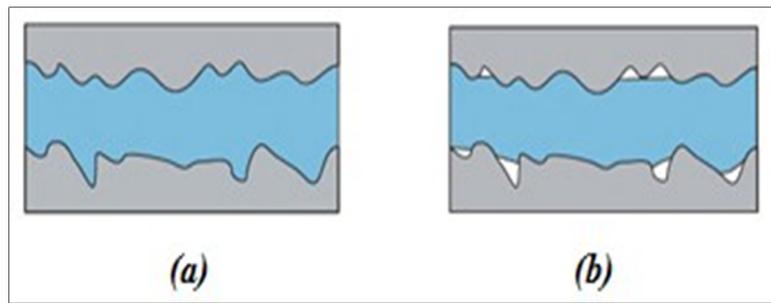


Figure I.1 : Exemple d'un mouillage pour l'ancrage mécanique

(a) bon mouillage, (b) mauvais mouillage.

I-3. Les assemblages collés

Les assemblages collés ont une très grande efficacité. Ils permettent de distribuer les efforts transférés sur une plus grande surface. Les joints collés peuvent être entre deux métaux ou entre une structure composée en stratifié et en métal. Pour les applications aéronautiques qui nous intéressent, ces assemblages collés sont tels que le joint de colle travaille en cisaillement dans son plan. La géométrie de base est le recouvrement simple ou double. Pour atténuer les contraintes de pelage, deux géométries peuvent être utilisées plus particulièrement : la jonction en escalier et la jonction biseautée. Nous notons que ces jonctions peuvent être simples ou double (Figure I.2).

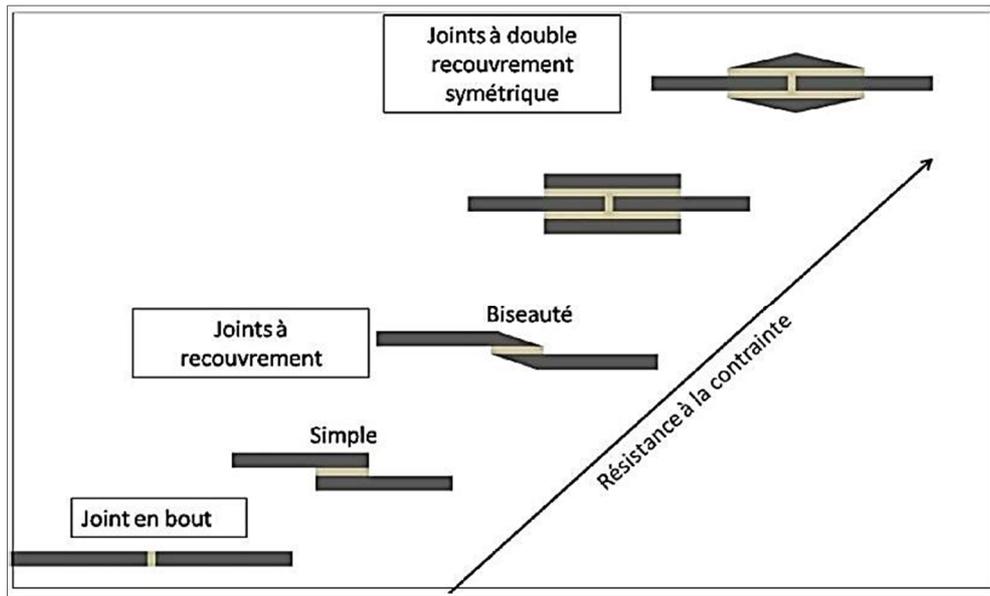


Figure I.2 : Représentation schématique de différentes géométries d'assemblage.

Le joint à simple recouvrement avec les caractéristiques de la simplicité et efficacité a été appliqué largement dans beaucoup d'applications et devient un spécimen standard d'essai pour déterminer les propriétés mécaniques des adhésifs [3].

I-3.1. Différentes sollicitations sur les assemblages

Un assemblage collé dans une structure industrielle peut être sollicité mécaniquement par de nombreuses manières (Figure I.3). Ces sollicitations peuvent être classées en fonction de l'état de contraintes qu'elles génèrent dans la couche de colle. Le cisaillement qui consiste à appliquer à un substrat un effort axial de traction, permet d'obtenir une répartition des contraintes de cisaillement assez homogènes. La traction, obtenue en tirant un substrat perpendiculairement au plan de collage, génère principalement des contraintes de traction mais également un peu de cisaillement à cause de l'effet Poisson sur la colle. Pour obtenir du clivage, on considère que les substrats sont très rigides par rapport à la colle et ne se déforment pas. On tire alors sur l'extrémité d'un substrat tout en bloquant l'autre. On obtient un moment de flexion générant un état de contrainte assez complexe dans l'adhésif. Le pelage quant à lui se rapproche fortement du clivage à l'exception près qu'un des substrats peut se déformer. Sur une structure industrielle, ces sollicitations n'apparaissent jamais seules et on rencontre plutôt une superposition de ces efforts ce qui rend l'étude très complexe. Il est reconnu que les efforts de traction provoquent des ruptures prématurées des assemblages, notamment par ouverture des microcavités existantes dans la couche de colle ou à l'interface (bulle d'air dans l'adhésif, mauvais collage,...).

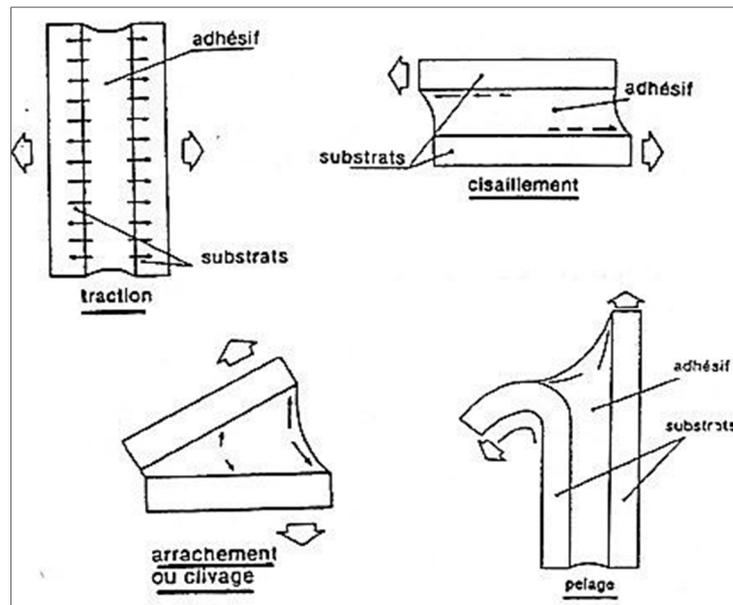


Figure I.3 : Mode de sollicitation d'un joint collé.

La rupture dans un assemblage collé est également très complexe du fait de la nature hétérogène de l'assemblage collé (adhésif/métal). La rupture peut s'effectuer dans la colle ou dans un des substrats, on parle alors de rupture cohésive. Mais on peut également casser à l'interface entre la colle et un des substrats, soit par décollement soit par rupture de l'interphase qui est la zone de transition entre l'adhésif et le substrat et qui possède ses propriétés propres, on parlera alors de rupture interfaciale ou adhésive. Dans certains cas, la rupture peut s'amorcer dans la colle et se propager à l'interface ou dans le substrat, on parle de mode mixte de rupture [4].

I-4. Contrôle mécanique des assemblages collés

Parmi les différentes approches permettant d'obtenir des informations ou des critères de durabilité, l'approche expérimentale, basée sur les essais mécaniques, permet de prédire le comportement des joints collés. La plupart des tests mécaniques sollicitent l'ensemble du système (substrats, adhésif et interfaces). La rupture ne se faisant pas sans déformation, il paraît important de rester dans des domaines de déformation élastique. Les résultats, exprimés sous forme de force, de contrainte de rupture ou de taux de restitution critique d'énergie, sont représentatifs du comportement mécanique de l'assemblage. En général les tests destructifs favorisent la rupture interfaciale substrat/adhésif par des concentrations de contrainte maximales à l'interface [5].

I-4.1. Essai à simple recouvrement

Les essais de cisaillement sont probablement les essais les plus utilisés en raison de leur simplicité de mise en œuvre et du fait qu'ils permettent de reproduire des conditions de sollicitation proches de celles des joints dans leurs fonctions usuelles.

Parmi les essais de cisaillement, les plus répandus sont les essais à simple ou double recouvrement. La géométrie de l'essai du joint à simple recouvrement est présentée (Figure I.4).

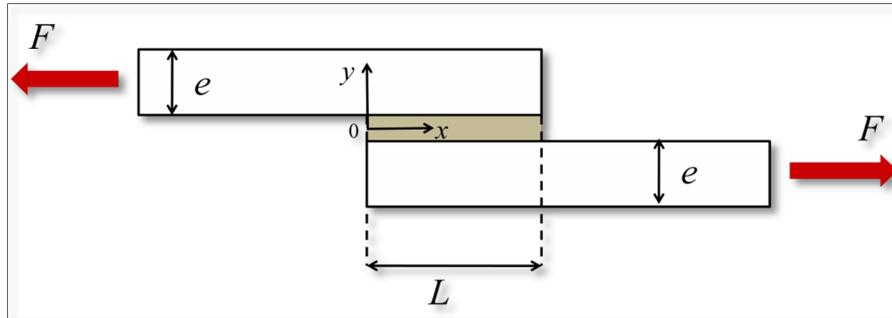


Figure I.4 : Représentation schématique de la géométrie d'un joint à simple recouvrement.

L'approche la plus simple consiste à considérer que les substrats sont rigides et que seul l'adhésif se déforme en cisaillement. Pour un échantillon de largeur b , d'épaisseur e et de longueur de recouvrement L , la contrainte de cisaillement est donnée par :

$$\tau = \frac{F}{bL} \tag{I.5}$$

Cependant la distribution de contrainte dans le joint n'est pas uniforme en raison de l'élongation des substrats qui augmente dans la zone de recouvrement à partir des extrémités. L'effet observé, représenté dans la (Figure I.4), est une forte concentration de contrainte en cisaillement proche des extrémités de la zone de recouvrement.

L'analyse de Volkersen [6] permet d'exprimer la distribution de contraintes en cisaillement dans l'adhésif :

$$\tau(x) = \tau_m \frac{wL}{2} \left[\frac{\cosh(wx)}{\sinh(\frac{wL}{2})} + \frac{E_1 e_1 - E_2 e_2}{E_1 e_1 + E_2 e_2} \cdot \frac{\sinh(wx)}{\cosh(\frac{wL}{2})} \right] \tag{I.6}$$

Où τ_m est la contrainte de cisaillement moyenne, E_1 et E_2 sont les modules de Young des substrats, e_1 et e_2 leurs épaisseurs, et :

$$w = \sqrt{\frac{G}{e} \left(\frac{1}{E_1 e_1} + \frac{1}{E_2 e_2} \right)} \tag{I.7}$$

Avec e , l'épaisseur de joint, et G , le module de cisaillement de l'adhésif.

Dans le cas où les substrats sont de même nature, $E_1 = E_2$, (l'équation I.6) peut être simplifiée en prenant $e_1 = e_2$ (Équation I.8). Dans ces conditions, le système est dit équilibré et la contrainte de cisaillement maximale τ_{max} est donnée par :

$$\tau_{\max} = \tau_m \frac{wL}{2} \coth\left(\frac{wL}{2}\right) \quad \text{I.8}$$

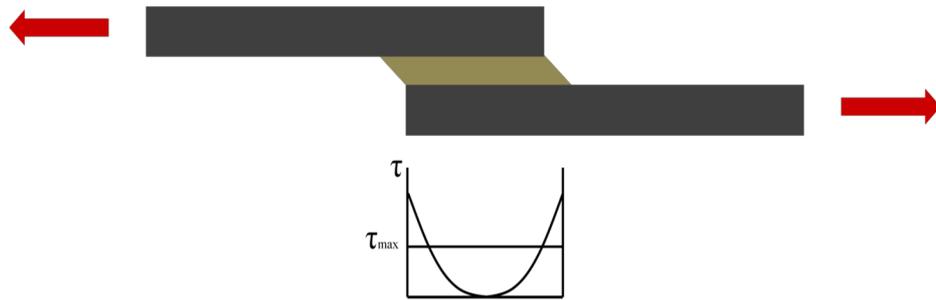


Figure I.5 : Répartition des contraintes de cisaillement dans le joint à simple recouvrement (Volkersen, 1938).

Cependant, pour un joint à simple recouvrement, l'application de la force est excentrée. Il existe donc un moment de flexion M_f qui provoque la rotation du joint à l'origine de l'apparition de contraintes de pelage normales au joint qui viennent s'additionner aux contraintes de cisaillement. Goland et Reissner [7] ont introduit la contrainte de pelage à l'analyse de Volkersen (Figure I.5).

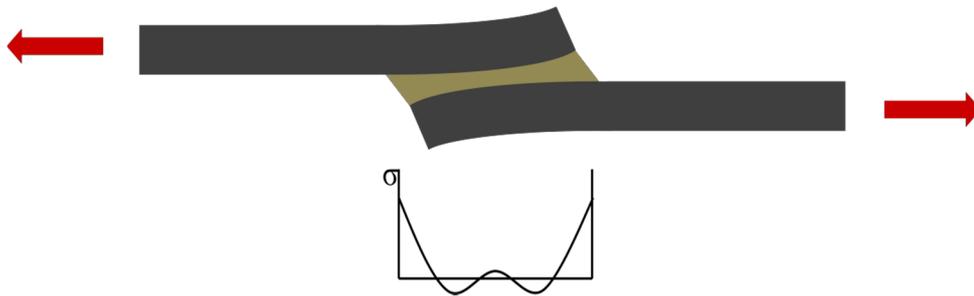


Figure I.6 : Distribution de contraintes selon Goland et Reissner.

L'analyse de Ferlund et Spelt [8] permet de définir les taux de restitution d'énergie en mode 1 et 2 :

$$G_1 \approx \frac{e}{2} \frac{\sigma_{\max}^2}{E_a} \quad \text{I.9}$$

Et

$$G_2 \approx \frac{e}{2} \frac{\tau_{\max}^2}{\mu_a} \quad \text{I.10}$$

Avec E_a et μ_a : respectivement le module d'élasticité et le module de cisaillement de l'adhésif. On peut alors déduire la valeur critique du taux de restitution d'énergie associée à l'énergie de rupture :

$$G_c = \sqrt{G_1^2 + G_2^2} \quad \text{I.11}$$

I-4.2. Mesures en torsion

Une autre méthode de caractérisation des joints adhésifs est l'utilisation des essais de torsions. Parmi les mesures de torsion, nous présentons deux essais qui sont l'essai à double torsion et l'essai de torsion annulaire. La méthode à double torsion est très utilisée pour l'étude de fractures lentes grâce à sa stabilité mécanique. Ensuite, la méthode de torsion annulaire est généralement utilisée pour étudier les réponses des adhésifs au cisaillement ou aux contraintes de traction et compression.

I-4.3. Essai à double torsion

L'essai à double torsion a été introduit à la fin des années 60 [9], [10] et a été fortement développé notamment pour l'analyse des joints de colle. La configuration d'un essai à double torsion fait intervenir l'assemblage de deux pièces rectangulaires, d'épaisseur e (Figure I.7).

Ces pièces sont collées en laissant une longueur de fissure initiale a_0 . Ensuite une force F est appliquée sur la ligne de fissure produisant un couple sur chaque bras formé par pré-fissuration. L'énergie de rupture est donnée par l'expression suivante [11] :

$$G = \frac{1}{2} \frac{F^2}{ke} \quad \text{I.12}$$

Où k est la rigidité en torsion, et e , l'épaisseur des substrats.

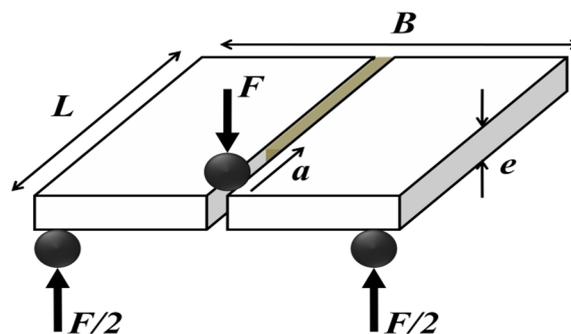


Figure I.7 : Essai de double torsion.

I-4.4. Essai de torsion annulaire

Alors que la plupart des essais de cisaillement présentent des distributions de contrainte non uniformes dans les adhésifs, l'essai de torsion annulaire permet d'obtenir une distribution de contrainte uniforme. Ce test permet de mesurer les contraintes de cisaillement ainsi que la déformation. L'essai consiste à assembler deux tubes de rayon interne R_i et externe R_e (Figure I.8), ou un tube et une plaque par un adhésif d'épaisseur [12]. Ensuite, un

couple M est appliqué sur l'axe du tube. Si le comportement est purement élastique, la contrainte de cisaillement τ à une distance radiale R de l'axe central est donnée par la relation suivante :

$$\tau = \frac{2MR}{\pi(R_e^4 - R_i^4)} \quad \text{I.13}$$

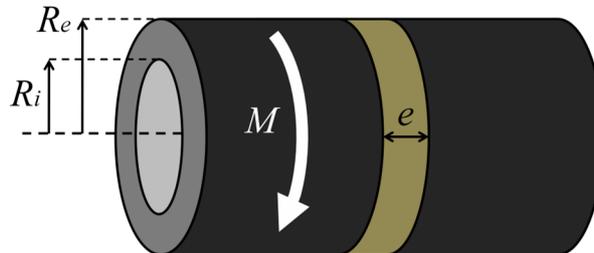


Figure I.8 : Principe de test de torsion/cisaillement.

I-4.5.Pelage

Les essais de pelage sont réputés très sévères, et sont très utilisés. Ils permettent de caractériser l'adhérence de revêtements minces. Les essais de pelage consistent à mesurer une force nécessaire au décollement d'un substrat mince assemblé à un substrat rigide.

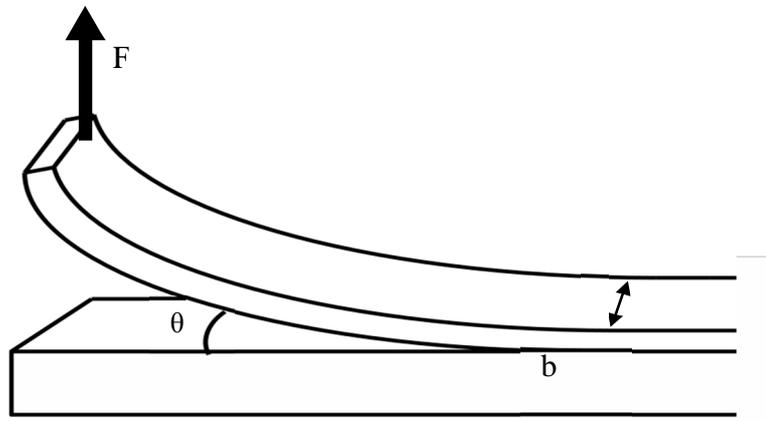


Figure I.9 : Représentation schématique du pelage.

Dans le cas où les déformations sont élastiques, l'énergie de fracture d'un joint de largeur b est reliée à la force F de pelage sous un angle θ et est exprimée par la relation suivante [13] :

$$G = \underbrace{\frac{F}{b}(1 - \cos\theta)}_{\text{de la force}} - \underbrace{\frac{F^2}{2b^2eE}}_{\text{d'allongement du film mince}} \quad \text{I.14}$$

Avec e , l'épaisseur du substrat mince et E le Module de Young pour ce même substrat. Le premier terme de G correspond à l'énergie fournie pour déplacer la force F . Le second terme correspondant à l'énergie nécessaire pour allonger élastiquement le film. Ce dernier

devient négligeable lorsque le film mince est considéré comme indéformable (ou inextensible) [14]. L'équation est simplifiée pour devenir :

$$G = \frac{F}{b} (1 - \cos\theta) \quad \text{I.15}$$

L'énergie de fracture peut donc être simplement obtenue par mesure de la force de pelage. Cependant, cette relation n'est valable que dans des cas de faible adhésion, car en pratique l'extension du film et les mécanismes de déformation plastique et/ou viscoélastique interviennent et les énergies de déformation peuvent devenir prédominantes.

I.4.6. Essais en flexion

Une autre méthode d'évaluation de l'énergie d'adhésion est l'utilisation des essais de flexion, dans lequel la rupture est induite par l'extension élastique d'un substrat au voisinage d'un film adhésif. Pour un essai de flexion trois points, un joint collé repose sur deux appuis et une force F , est appliquée en son centre (Figure I.10). L'assemblage subit une déformation en mode II [15] et par la théorie des poutres on obtient l'expression de l'énergie de fissuration suivante :

$$G = \frac{4,5l^2 F^2}{Eb^2 e^3} \quad \text{I.16}$$

Où l est la longueur de fissure, E le module du substrat et e son épaisseur.

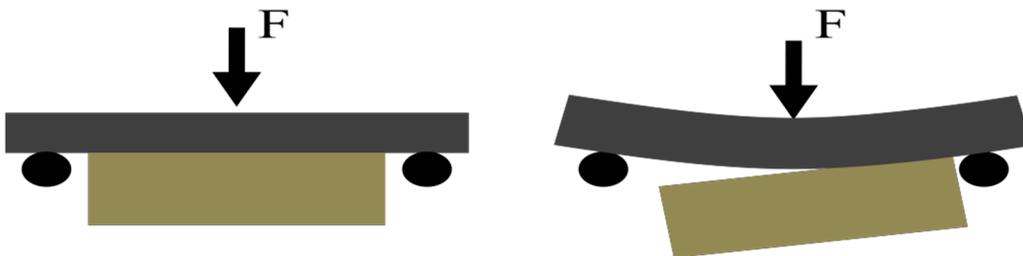


Figure I.10 : Essai de flexion.

I-4.7. Essai de traction en bout (ISO 6922-1987)

Parmi les essais mécaniques, l'essai de traction est l'un des plus fondamentaux. Il permet de déterminer de nombreux paramètres mécaniques. L'utilisation d'éprouvettes collées en bout ou « Butt Joint » permet de tester des joints adhésifs. Le principe de l'essai consiste à assembler deux cylindres bout à bout par un joint adhésif d'épaisseur e (Figure I.11). Les deux cylindres subissent ensuite une force de traction, F . La difficulté de cet essai réside dans la préparation des échantillons, mais aussi le maintien de conditions de traction axisymétriques. Sous la tension imposée, la fracture peut être initiée en différents points, notamment si la fracture naît en bordure [16], l'essai devient un essai de clivage à force

constante. Lorsque la fracture naît au centre de l'adhésif, la séparation se fait par cavitation. Ces phénomènes donnent lieu à des résultats dispersés.

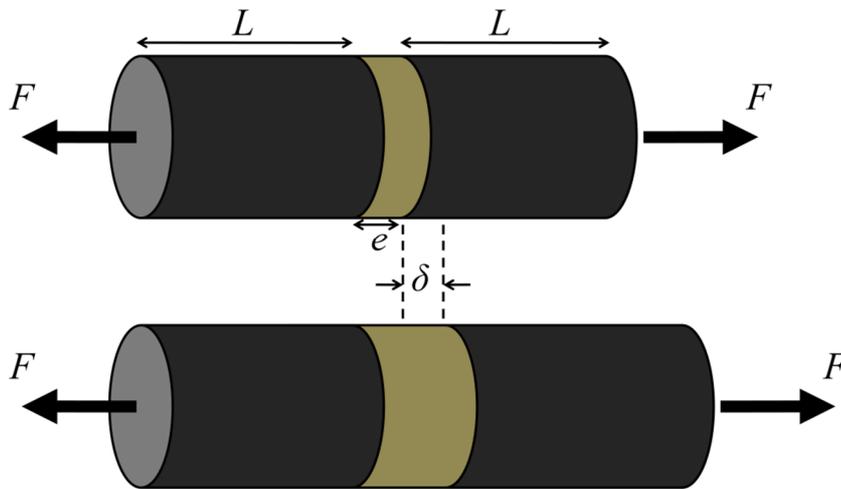


Figure I.11 : Essai de traction en bout.

Dans des conditions idéales, la contrainte en traction est donnée par l'expression suivante :

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{I.17}$$

Où A est l'aire de la section du cylindre. La déformation est donnée par :

$$\delta = \frac{FL}{AE} \quad \text{I.18}$$

Où L : est la longueur initiale et E, le module de Young.

L'énergie emmagasinée, U, est donnée par l'expression suivante [17] :

$$U = \frac{E_a}{2} \left(\frac{\delta}{e} \right)^2 \quad \text{I.19}$$

I-4.8.Essai de clivage

Parmi les contrôles destructifs de l'adhésion, Il s'agit d'un test de mécanique de la rupture avec propagation de fissure entre deux substrats (Figure I.12). Le comportement de la propagation de fissure est généralement estimé par un test de clivage à charge ou à déplacement imposé.

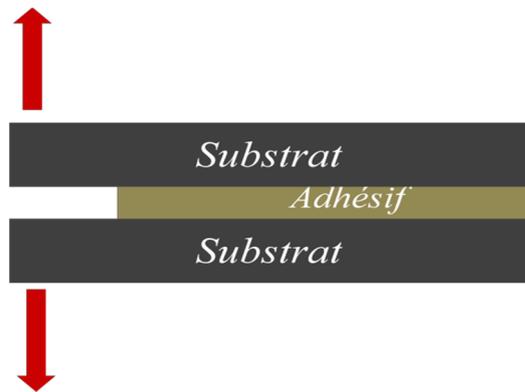


Figure I.12 : Essai de clivage.

I-5. Différents travaux scientifiques

Un joint adhésif collé est une structure composée de deux adhérents jointifs par un adhésif. Adams et Wake définissent l'adhésif en tant que « un matériau polymère qui, une fois appliqué aux surfaces, peut les joindre ensemble et résister à la séparation » et adhérents comme membres d'une structure qui sont joints ensemble par un adhésif. Beaucoup de modèles pour les joints adhésif collés ont été développés les géométries des joints à simple recouvrement (Figure I-13). Cette configuration a été adoptée par la société américaine des matériaux d'essai comme essai mécanique standard pour la détermination de la résistance au cisaillement [18].

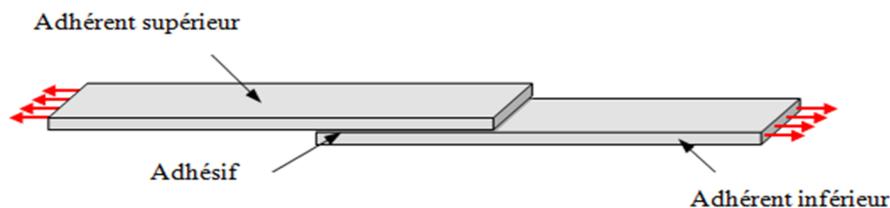


Figure I.13 : Le joint adhésif collé (à simple recouvrement).

Il y a deux approches de base pour analyser les joints adhésifs collés : analytique et numérique. Dans la première approche, un ensemble d'équations et d'états de frontière est formulé. Les solutions de ces équations sont des expressions analytiques qui donnent des valeurs des contraintes à un point quelconque du joint. En la deuxième approche, des solutions des équations sont obtenues par la méthode numérique est représenté par un modèle discret au départ. Dans ce dernier, un système des équations algébriques est dérivé, généralement des fonctions d'énergie.

I-6. Le comportement des assemblages collés

Les travaux de Goland et Reissner et de Hart-Smith apparaissent comme étant des travaux références. En effet, Goland et Reissner sont les premiers à prendre en compte la flexion des substrats, tandis que Hart-Smith, sur la base des travaux de Goland et Reissner, analyse les assemblages collés sous toutes ses configurations. Par conséquent, ces travaux offrent la possibilité assez simplement d'être considéré comme référant à d'autres analyses.

De ces analyses, nous pouvons dégager le comportement général en fonction des paramètres suivants :

- La longueur de recouvrement.
- La rigidité (épaisseur et module d'élasticité) des substrats.
- La rigidité (épaisseur et module d'élasticité) de l'adhésif.
- Le comportement mécanique de l'adhésif.

I-6.1. La longueur de recouvrement

Les contraintes adhésives maximales en bord de joint augmentent quand la longueur de recouvrement augmente, l'effort est donc transféré préférentiellement aux extrémités du joint. La charge moyenne à rupture augmente avec la longueur de recouvrement jusqu'à atteindre un plateau, d'où l'existence d'une valeur optimale de recouvrement, c'est la longueur de recouvrement qui permet de supporter un effort maximal pour une surface collée minimale.

I-6.2. La rigidité des substrats

L'augmentation de l'épaisseur des substrats diminue la concentration des contraintes de cisaillement et augmente la concentration de contrainte de pelage. De Bruyne, montre que la résistance au cisaillement et le rapport $\frac{\sqrt{e}}{L}$ est liée.

L'augmentation de la rigidité de flexion permet de diminuer la concentration des contraintes de cisaillement aux extrémités du joint. Cependant, l'augmentation de la rigidité des substrats par une augmentation de leur épaisseur ou de leur module d'Young augmente le facteur de moment fléchissant et donc une augmentation des contraintes de pelage. Un facteur important est le rapport de la rigidité relative du substrat sur la rigidité relative de la colle : E_{ie} / E_{ei} . Plus ce rapport sera élevé, plus les contraintes de pelage seront faibles.

I-6.3. La rigidité de l'adhésif

Théoriquement, la résistance du joint collé augmente avec l'épaisseur de l'adhésif. Pourtant, les résultats expérimentaux montrent que la charge moyenne à rupture augmente

puis décroît au-delà d'une certaine épaisseur jusqu'à une certaine limite. Dans [19], l'auteur explique que c'est le développement des contraintes d'arrachement aux extrémités du joint, croissant avec l'épaisseur de l'adhésif, qui entraîne une diminution de la résistance au cisaillement. Son étude met en évidence qu'aux extrémités du joint, il existe des zones à très fort gradient de contraintes de pelage, accompagnant l'annulation des contraintes de cisaillement aux bords libres. Il montre par ailleurs que les ruptures du joint de colle tendent à être adhésives et non cohésives quand l'épaisseur augmente (ce n'est donc pas la structure interne de la colle qui s'affaiblit quand l'épaisseur croît), les contraintes sont d'autant plus élevées à l'interface substrat/adhésif que le joint est épais. Quand le module de cisaillement de la colle augmente, la résistance au cisaillement diminue, ceci pourrait être expliqué par l'augmentation des contraintes maximales adhésives des adhésifs quand leur module augmente.

I-6.4. Le comportement mécanique des adhésifs

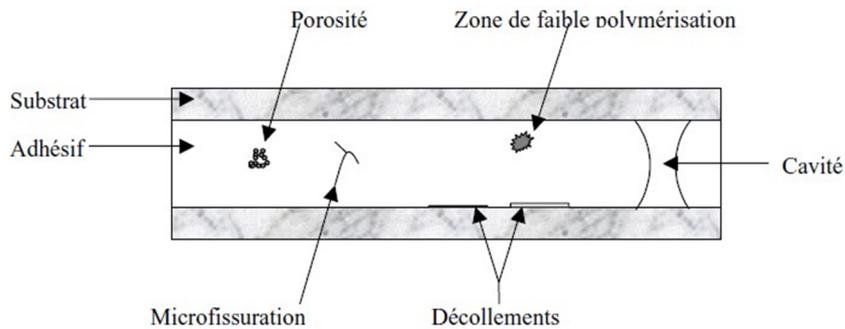
Sous les hypothèses simplificatrices prises par Hart-Smith, l'auteur montre que la prise en compte du comportement plastique de l'adhésif permet d'accorder résultats théoriques et expérimentaux. Cela montre donc l'importance du comportement adhésif considéré. De plus, cela montre que des modélisations, pour lesquelles l'adhésif est simulé par des ressorts agissant dans le plan et hors plan, suffisent, même si l'état de contrainte nulle en bord libre n'est pas vérifié. La prise en compte du comportement visqueux, des adhésifs montre l'évolution au cours du temps des assemblages collés. Par conséquent, la prise en compte de la variation temporelle des propriétés mécaniques des matériaux au cours du temps permet alors de prédire le comportement de l'assemblage collé au cours du temps.

I-7. Les défauts dans les assemblages collés

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

- Une **porosité** due à des gaz de polymérisation ou de l'air emprisonné pendant la fabrication de l'assemblage.
- Des **micros fissures** dues à un fluage de l'adhésif, des contraintes résiduelles ou à des phénomènes de fatigue.
- Des **zones de faible polymérisation** causées par exemple par un mauvais mélange de l'adhésif, un mauvais dosage des composants ou un temps de polymérisation insuffisant.
- Des **cavités** dues à une mauvaise application de l'adhésif ou à des dégagements gazeux durant la polymérisation.

– Des zones de **décollements** pouvant être conséquentes et provenant généralement d'une déficience de la préparation de surface du substrat, de phénomènes de condensation à



l'interface, ou à la présence de contaminants lors du collage.

Figure I.14 : Défauts typiques présents dans un joint de colle.

Lors de la réalisation d'un assemblage collé, de nombreux types de défauts sont susceptibles d'être créés. Ces défauts sont évidemment des sites préférentiels pour l'amorçage de la rupture. La (Figure I.14) représente les défauts typiques d'un assemblage collé.

I-7.1.Procédés non destructifs de contrôle des assemblages collés

L'objectif de tels procédés de mesure est de déterminer une corrélation directe entre la résistance mécanique du joint et des grandeurs mécaniques, physiques ou chimiques du joint sans toutefois l'endommager ou le détruire comme précédemment. De telles méthodes sont capables de localiser ou d'identifier des défauts qui peuvent diminuer les performances ou la durée de vie de l'assemblage. Il existe deux zones bien distinctes d'examen des propriétés de l'adhésif : la partie cohésive de l'assemblage qui permet d'évaluer les propriétés intrinsèques du joint et la zone interfaciale qui permet d'identifier la résistance du joint entre l'adhésif et le substrat. De plus, les cavités, les décollements localisés et la porosité créent une classe de défauts supplémentaire qui doit être inspectée. Avant d'étudier les méthodes d'identification non destructives des défauts pouvant entamer la résistance du joint, il est nécessaire d'identifier la nature de ces défauts.

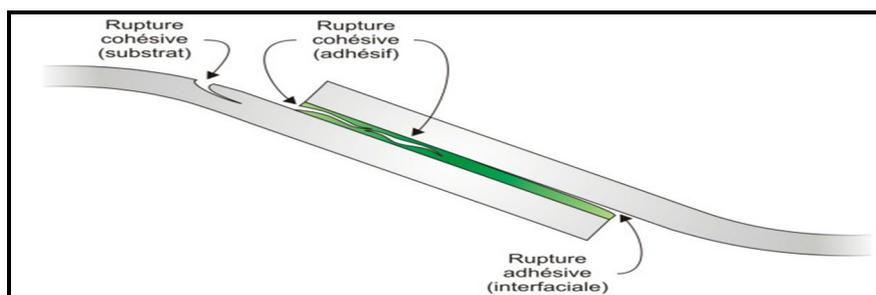


Figure I.15 : Différents modes de ruptures.

I-7.2. Procédés destructifs de contrôle des assemblages collés

Même si ces méthodes permettent d'identifier des paramètres pouvant affecter la résistance intrinsèque de l'assemblage et son vieillissement, les essais de contrôle les plus usités restent les essais de séparation des substrats. Avec le choix du test s'impose en réalité la nature des contraintes mises en jeu. On peut imposer à un joint de colle les sollicitations suivantes :

- Des contraintes normales au plan du joint (traction, compression).
- Des contraintes tangentielles au plan du joint (cisaillement).
- Des contraintes de pelage lorsque au moins l'un des matériaux est souple.
- Des contraintes de clivage qui résultent de l'application de la force à l'extrémité d'un assemblage de matériaux rigides [20].

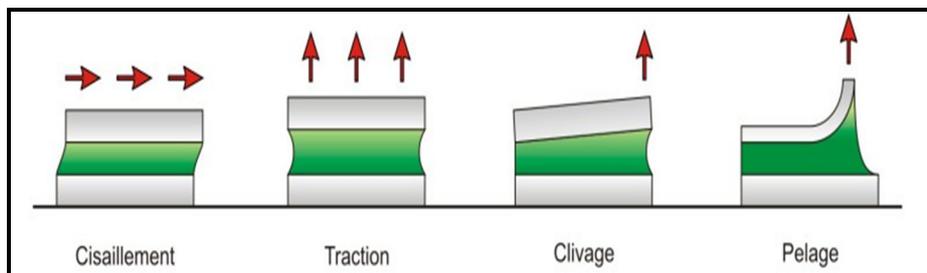


Figure I.16 : Différents modes de sollicitations mécaniques.

I-8. Conclusion

Le collage est une technique d'assemblage performante et les avantages sont nombreux. Cette technique est utilisée par de nombreuses industries: automobile, bâtiment, électroménager, électronique, loisirs, aéronautique, mécanique ...

- Le collage est une technique universelle puisqu'à priori il est possible de tout coller, si nous conditionnons convenablement les surfaces à assembler.
- Le collage altère peu les substrats puisque seul le traitement de surface des substrats intervient (dans le sens où le décapage dégrade la surface mais moins que le perçage).
- Le collage permet d'obtenir une meilleure répartition des contraintes, due au transfert de charge continu, ceci implique une meilleure tenue aux chocs, aux vibrations.
- Le collage permet d'assembler des matériaux composites, sans en rompre les fibres.
- Le collage diminue le risque de corrosion galvanique entre deux métaux différents.
- Le collage permet de réduire le poids de la structure assemblée (comparée à une structure boulonnée).

- Le collage permet d'obtenir des structures lisses (avantage aérodynamique).
- Le collage permet d'assembler entre eux des matériaux différents sans précaution particulière (corrosion).

Chapitre –II–

Comportement des matériaux en mécanique de la rupture

II-1.Introduction

La naissance des fissures dans une structure métallique dans n'importe quel domaine telles que les structures aéronautiques et les structures marines, est une préoccupation majeure des opérateurs de maintenance.

La réparation de ces fissures par collage avec un patch en matériaux composite, a attesté son efficacité pour réduire le facteur d'intensité de contraintes (FIC) aux pointes de la fissure, et offrir de nombreux avantages, d'amélioration du comportement de la fatigue, de la corrosion réduite et une bonne performance qui conduisent à améliorer la vie de la structure endommagée.

Il est bien connu que la méthode des éléments finis donne avec une grande précision les facteurs d'intensité de contraintes en pointe de fissure. Parmi les auteurs utilisant la méthode de calcul du facteur dans le cas des fissures renforcées, on peut citer. Une étude a été réalisée sur la réparation d'une fissure émanant d'entaille circulaire par un patch composite semi circulaire.

L'objet de cette étude est d'analyser le comportement d'une fissure émanant d'entaille avec et sans le renforcement par un patch en composite d'une plaque en aluminium. Le patch de réparation est le bore/époxy qui est utilisé avec beaucoup de succès par de nombreux chercheurs. Les effets des épaisseurs de la couche adhésive et du patch en composites sur les variations de facteur d'intensité de contraintes sont ainsi examinés.

II-2.Mécanique de la rupture

La mécanique linéaire de la rupture s'applique aux matériaux ayant un comportement élastique obéissant à la loi de Hooke. Elle est valable lorsqu'on est en régime de plasticité confinée (localisée), c'est-à-dire lorsqu'il se développe dans une structure globalement élastique, une faible plastification près de zones de concentration des contraintes de types entaille ou fissure.

Dans un matériau présentant une plastification plus importante près de ces zones, les analyses reposant sur l'hypothèse de plasticité confinée ne sont plus valables malgré toutes les corrections qu'il est possible d'y apporter. Depuis les années 60, les concepts de la mécanique de la rupture se sont développés pour mieux tenir compte des différents types de comportement non linéaire des matériaux (plasticité étendue, viscoplasticité ...) ainsi que des effets dynamiques. Il s'agit pour la plupart, d'extensions de la mécanique linéaire de la rupture (MLR).

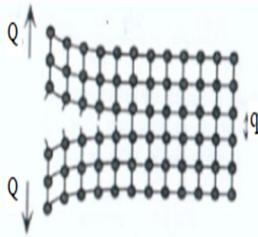


Figure II.1 : Propagation de fissure.

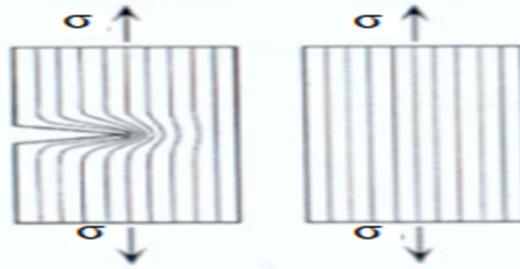


Figure II.2 : ligne de force et concentration de contrainte.

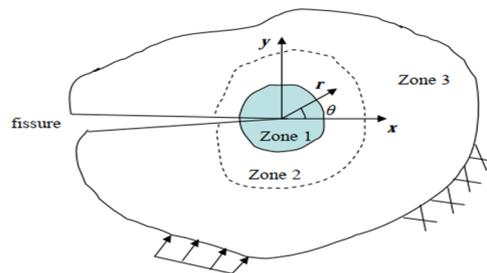


Figure II.3 : Zone délimitant le voisinage d'une pointe de fissure.

La zone d'élaboration 1: elle se trouve à la pointe de fissure et dans le sillage laissé par la fissure au cours de sa propagation. L'étude de cette zone est très complexe à cause des contraintes importantes qui ont fortement endommagé le matériau. Elle est discontinue au sens de la mécanique des solides. La théorie classique de la mécanique de la rupture réduit cette zone à un point pour les problèmes plans et à une courbe pour les problèmes tridimensionnels.

La zone singulière 2: dans laquelle les champs de déplacements, déformations et contraintes sont continus et possèdent une formulation indépendante de la géométrie lointaine de la structure. On démontre que dans cette zone, les composantes de champ de contraintes sont infinies au voisinage du front de fissure ($r \rightarrow 0$).

Plus exactement, la singularité est en $(1/\sqrt{r})$ en milieu élastique linéaire. Le matériau ayant une limite élastique, il existe un rayon r_p autour de la pointe de fissure qui détermine la forme de la zone plastique. En fonction de la valeur de r_p , on dira que la rupture est fragile pour r_p petit et qu'elle est ductile pour r_p grand. Cette distinction sur la base du paramètre r_p est très importante car elle conditionne la validité de la théorie utilisée:

- La Mécanique Linéaire de la Rupture pour les ruptures fragiles.

– La Mécanique Non Linéaire de la Rupture dans le cas de zone plastique non négligeable (rupture ductile).

La zone 3 extérieure comprenant les champs lointains se raccordant d'une part, à la zone singulière, et d'autre part aux conditions aux limites en charges et en déplacements. Dans cette zone, les champs de déplacements, déformations et contraintes varient peu et peuvent être approximés par des polynômes communément utilisés dans la méthode des éléments finis.

Diverses méthodes d'analyse permettent d'étudier les champs de déplacements, déformations et contraintes au voisinage d'une fissure. On regroupe l'ensemble de ces méthodes sous deux types d'approches [21].

– Approches directes : qui sont fondées sur l'utilisation des fonctions d'Airy, ces approches résolvent des problèmes plans et font appel à la recherche de fonctions analytiques. En particulier dans notre étude, nous avons utilisé l'expansion de Williams qui est basée sur ce type d'approches.

– Approches énergétiques qui sont basées sur l'analyse énergétique du milieu continu contenant une fissure. il s'agit d'un bilan énergétique global intégrant le taux de restitution d'énergie dû à un accroissement virtuel de la fissure.

II-2.1.Rupture fragile

La rupture dite fragile ne met en jeu que des ruptures de liaisons interatomiques sans déformations plastiques globales appréciables. Ces ruptures interviennent lorsque l'énergie de déformation locale due aux sollicitations extérieures devient égale à l'énergie nécessaire à la décohésion atomique. Les défauts du réseau ou les accidents géométriques qui engendrent toujours des concentrations de contraintes locales jouent un rôle essentiel dans l'amorçage du processus.

La rupture fragile par clivage est une séparation directe dans les plans cristallographiques particuliers. Dans un cristal, plusieurs surfaces de clivage parallèles peuvent se développer et se rejoindre perpendiculairement sous forme de « marches » disposées en « rivières ». Aux joints de grains des surfaces de clivage changent de direction pour suivre celle des plans cristallographiques de clivage.

Les cristaux cubiques à face centrées (CFC) sont peu sujets au clivage.

Ce sont surtout les cristaux cubiques centrés(CC) tels que les aciers à faible teneur en carbone et les cristaux hexagonaux compacts (HC) tels que le zinc et le magnésium qui se rompent par clivage.

La rupture inter granulaire est un clivage qui suit les joints de grains .Elle se manifeste sous deux formes :

- La rupture fragile proprement dite qui se produit à produit à basse température quand des éléments d'importés ségrévés aux joints de grains diminuent l'énergie de cohésion de ces joints.
- La rupture inter granulaire par fluage qui s'observe surtout aux températures moyennes et élevées (supérieures au tiers de la température absolue de fusion). Elle peut exister avec ou sans déformation viscoplastique globale importante, ce qui justifie le terme « fragile ».

Les défauts qui conduisent à ce mode de rupture sont initialement des cavités, qui apparaissent aux joints par accumulation de dislocation. Puis croissent en volume et se multiplient, ou des décohésions appelées points triples. Créées aux intersections de trois cristaux par suite des glissements inter cristallins. Ces décohésions inter granulaires se manifestent au cours du temps. Par exemple en fluage à haute température. Lorsque la décohésion s'étend sur plusieurs joints de grains adjacents on peut dire qu'une fissure inter cristalline est amorcée [22].



Figure II.4 : Rupture fragile par clivage dans un acier faiblement allié microscopie à balayage.

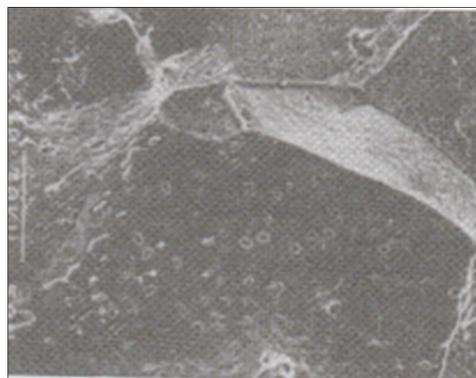


Figure II.5 : 1 a- Rupture inter granulaire fragile par fluage dans un acier au Cr-Mo, Les petites cavités sur les joints sont des cavités de fluage.



Figure II.5 : 2- Rupture inter granulaire ductile dans un alliage base nickel inconel 718.

II-2.2.Rupture ductile

La rupture ductile est le résultat de l'instabilité des très grandes déformations locales engendrées au voisinage des défauts cristallins. Selon la densité de ces défauts la déformation macroscopique globale peut être importante ou non, si bien qu'un matériau montrant des faciès de rupture ductile peut présenter un comportement global ductile ou fragile. Les défauts responsables de l'amorçage de la rupture ductile sont :

- Les particules d'éléments d'addition dans les alliages.
- Les inclusions.
- Les précipités de mise en solution par traitements thermique.
- Les empilements de dislocations.
- Les joints de grains et principalement les points triples.

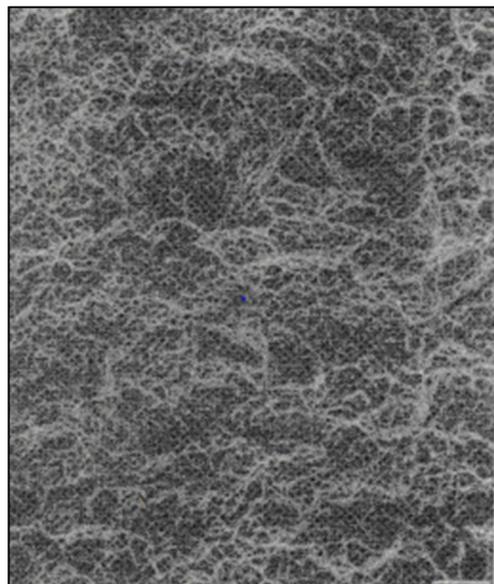


Figure II.6 : Rupture ductile inter granulaire dans un acier 0.30 C, 1 Cr -0.25 Mn.

II-2.3.Rupture par fatigue d'un poly cristal

La rupture d'un élément dans des conditions de service met le plus souvent en jeu différents mécanismes qui interagissent les uns sur les autres. La rupture par fatigue sous sollicitations cycliques en est un exemple qu'il est intéressant de décrire sommairement pour bien distinguer. A des fins de modélisation. Les différentes phases. Considérons donc un poly cristal soumis à une sollicitation périodique.

II-3.Essai de la rupture

On utilise les types d'essai précédent en mesurant les conditions correspondantes à la rupture :

- Contrainte et déformation à rupture.
- Temps ou nombre de cycles à rupture.
- Energie dissipée à rupture.

II-4.Schématisation de la rupture

La caractérisation de la rupture est un travail délicat car elle repose en partie sur l'examen physique de la morphologie des cassures et dépend de l'échelle à laquelle l'analyse est effectuée, échelle microscopique des mécanismes de rupture, échelle macroscopique de l'élément de volume, échelle de la structure.

L'observation des faciès de rupture des métaux impose une préparation des échantillons qui relève des techniques de métallographie. L'examen visuel est limité à une résolution de l'ordre de 0.1 mm La loupe binoculaire, avec un grossissement maximal de l'ordre de 100X, permet déjà de détecter les zones de cassures qui correspondent à une rupture macro fragile (aspect brillant), à une rupture par fatigue (aspect plus mat) ou à une rupture macro ductile (changement de géométrie).

C'est avec le microscope optique (grossissement maximal de l'ordre de 1000X) que l'on commence à observer les décohésions de rupture micro-fragile, les stries de rupture par fatigue et les cavités de rupture micro ductile.

II-4.1.Rupture par endommagement de l'élément de volume

Au niveau de l'élément de volume. Des micros décohésions fragiles et des micros ductilités mettant en jeu des déformations plastiques locales très importantes sont presque toujours présentes mais en proportion variable et c'est sur cette proportion que joue la schématisation. L'élément de volume est considéré comme totalement endommagé, c'est-à-dire rompu, lorsqu'une fissure macroscopique est amorcée. Dans une structure, une taille

conventionnelle de fissure de 1mm^2 ou une dimension caractéristique de 1mm est raisonnable par rapport à la nature cristalline ou moléculaire des métaux et polymères et par rapport à l'analyse de la mécanique des milieux continus. Cette dimension est de l'ordre de 1cm pour le bois et de 10cm pour le béton.

II-4.1.1. Endommagement macro-fragile

C'est l'endommagement par décohesion que subissent, sous sollicitation monotones, certains matériaux comme le béton.

En l'absence de déformation irréversible macroscopique. Les seules déformations irréversibles présentes sont celles qui résultent de l'arrangement des fissures qui constituent cet endommagement. Dans l'essai d'écroutissage, la rupture intervient sans striction appréciable.

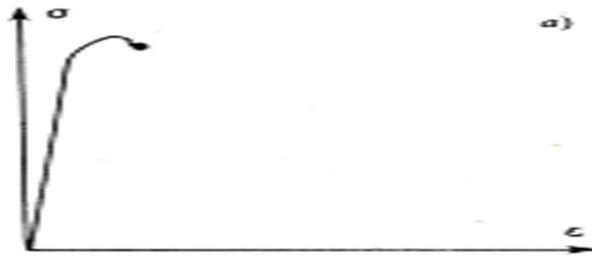


Figure II.7 : Courbe d'écroutissage d'un matériau fragile.

II-4.1.2. Endommagement plastique ductile

Schématiquement, il s'agit de l'endommagement associé aux grandes déformations plastiques qui engendrent la croissance et la coalescence de cavités par le mécanisme d'instabilité micro ductile.

- La déformation plastique cumulée est supérieure à 10 ou $50 \cdot 10^{-2}$
- La courbe d'écroutissage présente une grande phase de striction.

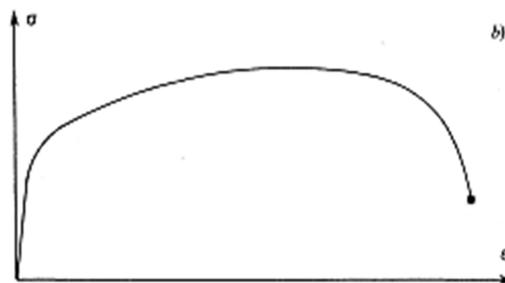


Figure II.8 : Courbe d'écroutissage d'un matériau ductile.

II-4.1.3. Endommagement viscoplastique fragile

C'est l'endommagement qui accompagne les déformations de fluage. Il concerne donc les métaux aux températures moyennes et élevées pour lesquels les décohésions de rupture micro fragile aux joints de grains sont prépondérantes. Les déformations irréversibles peuvent être importantes mais elles n'influent pas directement sur le mécanisme de décohésion. Il est essentiellement fonction de la variable temps.

Les deux mécanismes de décohésion et de déformation étant présents simultanément, les essais globaux ne permettent pas de caractériser ce type d'endommagement qui ne peut être décelé que par des examens micrographiques de cassures.

II-4.1.4. Endommagement de fatigue

Sous l'action de sollicitation répétées, périodiques ou non, des ruptures micro fragiles discontinues dans le temps interviennent. Elles sont souvent intra cristallines et se manifestent par des stries sur les faciès de rupture.

Cet endommagement existe dans le domaine des petites déformations et est essentiellement fonction du nombre de cycles de sollicitations.

II-4.2. Rupture par fissuration d'une structure

Une fissure étant amorcée dans une structure (1mm, 10mm), sous l'effet de sollicitations, elle peut croître et provoquer la rupture de cette structure, c'est-à-dire sa séparation en plusieurs morceaux. Là encore, selon les matériaux et le type de sollicitation, différents mécanismes peuvent intervenir.

II-4.2.1. Fissuration par rupture fragile

La propagation de la fissure résulte d'un phénomène d'instabilité. Elle se propage à grande vitesse sans dissipation plastique appréciable. Les seules énergies mises en jeu sont l'énergie élastique emmagasinée et l'énergie de rupture pour créer la surface de discontinuité que constitue la fissure. Le graphe effort- longueur ou surface de fissure à l'allure indiquée sur la (Figure II.9).

II-4.2.2. Fissuration par rupture ductile

La croissance de la fissure est stable, elle progresse à une vitesse qui n'est fonction que de la vitesse de mise en charge de la structure. Dans le bilan énergétique on doit prendre en considération l'énergie dissipée en déformations plastiques dans la région voisine du front de fissure. Le graphe correspondant à l'allure indiquée sur la (Figure II.9).

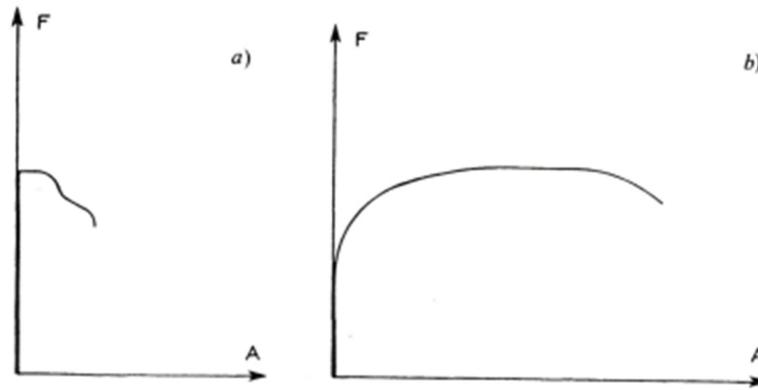


Figure II.9 : Courbe effort-surface de fissure (a) rupture fragile(b) rupture ductile.

II-4.2.3.Fissuration par fluage

Dans les métaux à haute température la fissure peut croître sous sollicitation constante à une vitesse qui dépend du niveau de cette sollicitation.

II-4.2.4.Fissuration par fatigue

Par le même mécanisme que pour l'élément de volume, des sollicitations répétées, périodiques ou non, engendrent une progression discontinue de la fissure pour laquelle le nombre de cycles est la variable de description cinématique. Sur la surface de fissure on observe des stries [22].

II-5. Modélisation de la fissure

Une fissure est une petite fente dans un solide. Cette fente peut apparaître à la surface de la Pièce (fissure superficielle), se trouver complètement à l'intérieur et être donc invisible depuis L'extérieur (fissure interne), ou traverser complètement la pièce (fissure traversante). Ces trois Cas de figure sont schématisés sur la (Figure II.10).

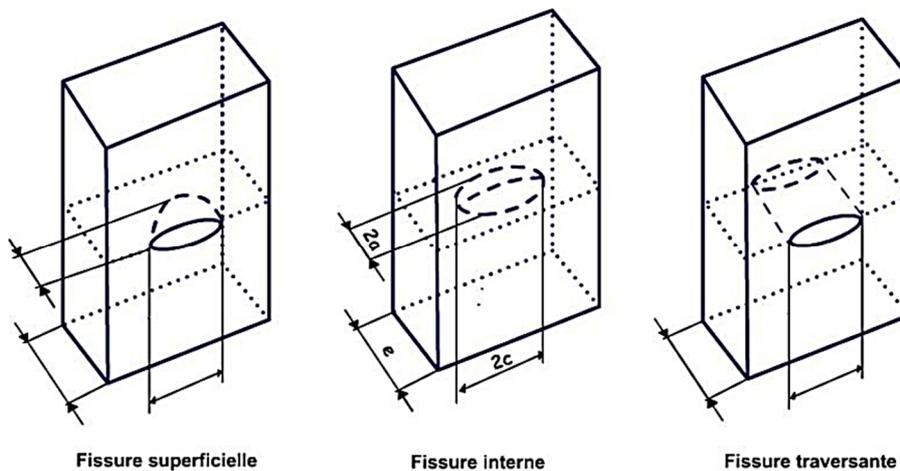


Figure II.10 : Les différents types de fissures.

Pour modéliser les fissures, on suppose souvent que leur géométrie est simple :

- Leur forme est elliptique, semi-elliptique ou en forme de coin.
- Les deux faces de la fissure sont planes, parallèles et écartées d'une distance très petite devant les deux autres dimensions de la fissure. On assimile donc la fissure à son plan moyen.
- Les deux faces se rejoignent selon un bord anguleux et, en conformité avec l'hypothèse précédente (faces parallèles), forment un angle quasiment nul.

La fissure est donc modélisée par une discontinuité de la matière, plane, « pointue » et d'épaisseur nulle. Lorsque les deux faces ne se touchent pas, on dit que la fissure est ouverte.

Dans le cadre de la mécanique des milieux continus (c'est-à-dire en termes de déplacements et de contraintes), la fissure est alors modélisée en écrivant les conditions aux limites suivantes sur le plan moyen :

- Le vecteur contrainte est nul (car chacune des deux faces est un bord libre), et
- Le déplacement peut être discontinu de part et d'autre du plan (et sa discontinuité correspond alors à l'ouverture de la fissure).

II-6. Les modes de propagation des fissures

Nous supposons ici que les fissures sont planes et se propagent dans leur plan. Il est ainsi possible de montrer que l'état général de propagation se limite à la superposition de trois modes :

- Mode I (mode par ouverture) : les surfaces de la fissure se déplacent perpendiculairement au plan de fissure,
- Mode II (glissement de translation) : les surfaces de la fissure se déplacent dans le plan de fissure et dans une direction perpendiculaire au front de fissure.
- Mode III (glissement de rotation) : les surfaces de la fissure se déplacent dans le plan de fissure et dans une direction parallèle au front de la fissure.

Le mode I est souvent le plus critique et les études théoriques sont donc souvent limitées à ce mode de propagation [23].

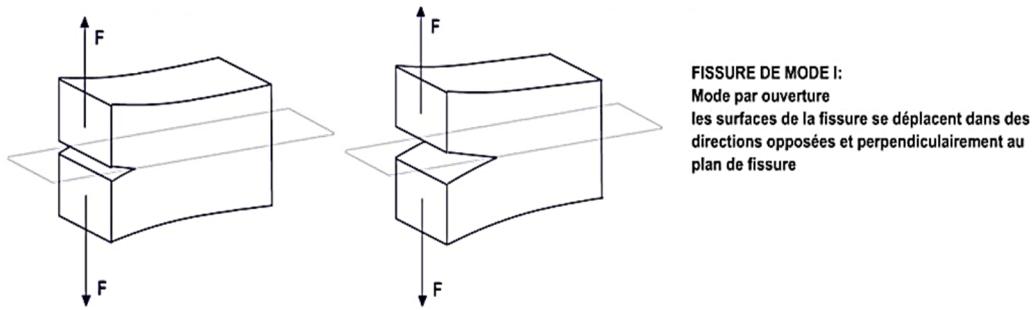


Figure II.11 : Propagation en mode I.

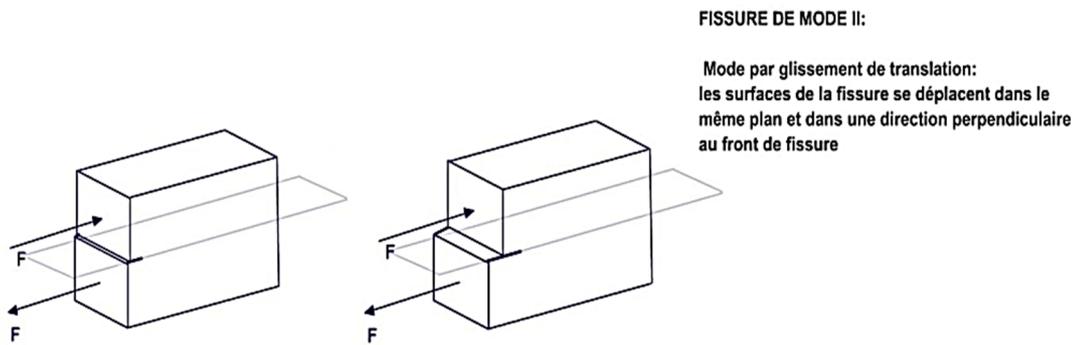


Figure II.12 : Propagation en mode II.

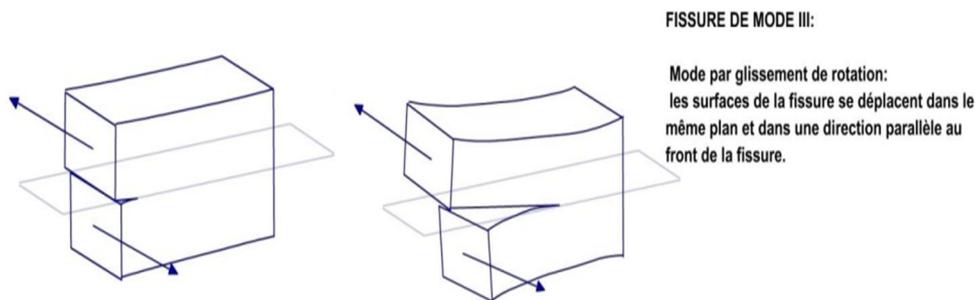


Figure II.13 : Propagation en mode III.

II-6.1. Stades de fissuration par fatigue

La rupture par fatigue est le phénomène de propagation d'une fissure sous chargement variable passant par les 2 stades (amorçage, propagation stable). La compréhension de ce phénomène réside dans l'étude de la vitesse de propagation fissure par fatigue, dans ce cadre la mécanique de la rupture a fortement contribué à l'étude de nombreuses lois liant la vitesse de fissuration en fatigue à des paramètres caractéristiques déterminés analytiquement. D'une façon générale nous pouvons expliciter une loi semi-théorique « loi de propagation de fissure » Si nous considérons une structure contenant une fissure de longueur (a), et on suit le comportement de cette fissure (la longueur en fonction du nombre de cycles appliqués N)

pendant un essai de fissuration, sous un chargement cyclique à amplitude constant, on constate que cette croissance continue jusqu'à la rupture (Figure II.14).

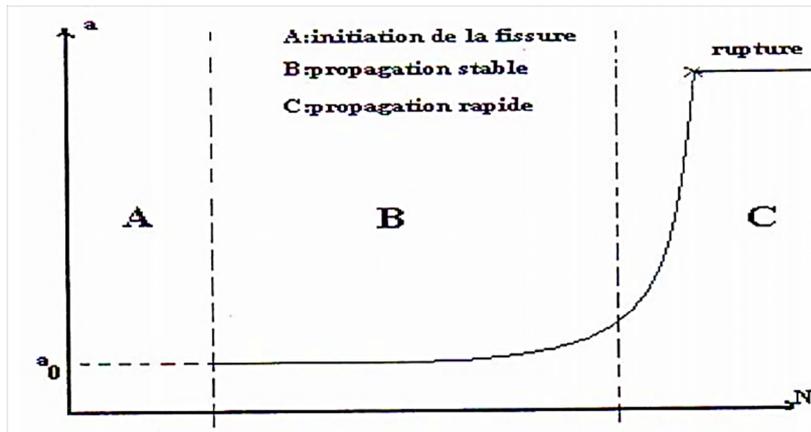


Figure II.14 : Evolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de Cycle.

En générale l'expérience nous montre que l'amorçage des fissures résulte de la concentration de déformation plastique qui se produit dans un domaine de dimension finie.

Une fois que les fissures se sont amorcées, elles peuvent se propager sous l'action de sollicitations. Les trois domaines de fissuration sont schématisés par la figure

Domaine I:

C'est le domaine des faibles vitesses de fissuration, ou un seul de non fissuration K_s , dont l'existence est marqué selon les matériaux c'est un seul en dessous duquel une fissure préexistante ne se propage plus.

Domaine II :

Dans ce domaine on obtient une relation linéaire entre (da/dN) et ΔK pour plusieurs métaux. De nombreuses relations empiriques permettant de relier la vitesse de propagation au facteur d'intensité de contrainte ont été établie, telle que la loi de Paris.

La loi de propagation dite de Paris s'écrit sous la forme :

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^m$$

Domaine III :

Ce domaine caractérise par une accélération de la vitesse de propagation de fissure en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte qui se termine par la rupture brutale lorsque le niveau de sollicitation approche la condition de la rupture, caractérisé par

$K_{\max} = K_{IC}$, (K_{IC} est le facteur d'intensité de contrainte critique à la rupture)

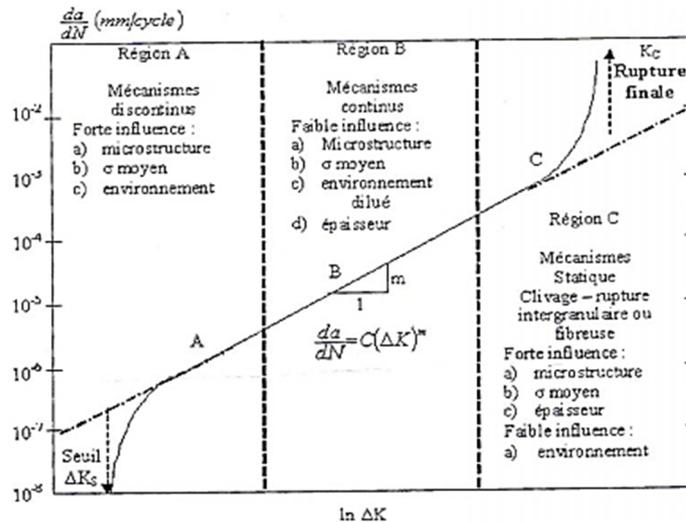


Figure II.15 : Représentation schématique des différents régimes de propagation.

II-6.1.1. Les types de fissuration

Le mécanisme de rupture par fissuration peut intervenir selon deux types de fissuration :

1. **La fissuration brutale** : pour les solides, ou pour les matériaux à très haute résistance, les contraintes de travail sont très élevées, une énergie potentielle considérable est ainsi créée.

La présence de petites fissures peut alors conduire à une rupture brutale qui souvent ne s'accompagne pas de déformation plastiques macroscopiques par suite de la très faible ductilité.

2. **La fissuration successive** : il s'agit ici, d'une succession de mécanismes (fragile ductile) qui, sous contraintes répétées, entraîne la fissuration successive, appelée la rupture par fatigue. Les facteurs qui influencent le comportement à la rupture par fissuration des matériaux sont de deux natures.

Métallurgique et mécanique. Les facteurs mécaniques concernent l'état de déplacements, déformations et contraintes, ainsi que les conditions d'environnement tel que la température ou le taux d'humidité relative.

II-6.2. Paramètres d'influence sur le comportement en fatigue

Le rapport de charge R ($R = K_{\min}/K_{\max}$) est probablement le paramètre qui a le plus d'effets sur les vitesses de fissuration et sur de propagation. Cette influence se traduit expérimentalement par un décalage des courbes de fissuration vers la gauche lorsque R croît (Figure II.16). C'est-à-dire que pour une valeur de ΔK donnée, un rapporte R élevé se traduit

par une vitesse de propagation plus forte. En particulier, la valeur de ΔK_s est influencée par le rapport.

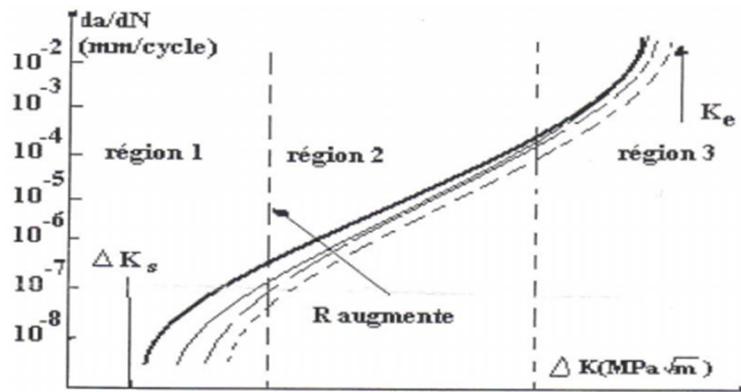


Figure II.16 : Influence du rapport de charge sur la vitesse de fissuration

Klenstil et Lukas ont considéré que le seuil de propagation ΔK_s diminue quand R augmente, cela est valable quand le rapport de charge est positif. L'évolution de ΔK_s en fonction de R est proposée sous la forme suivante :

$$\Delta K_s = \Delta K_{s0} \cdot (1 - R)^Y$$

Où ΔK_{s0} est la valeur du seuil pour R=0 qui dépend du matériau et de l'environnement. La valeur de y dans l'aire varie entre 0,50 et 1 suivant les matériaux.

Y=0.5 pour un acier au carbone, Y=0.53 pour les alliages A5083, Y=0.75 pour un acier de construction et Y=1 pour l'alliage (7075-T651).

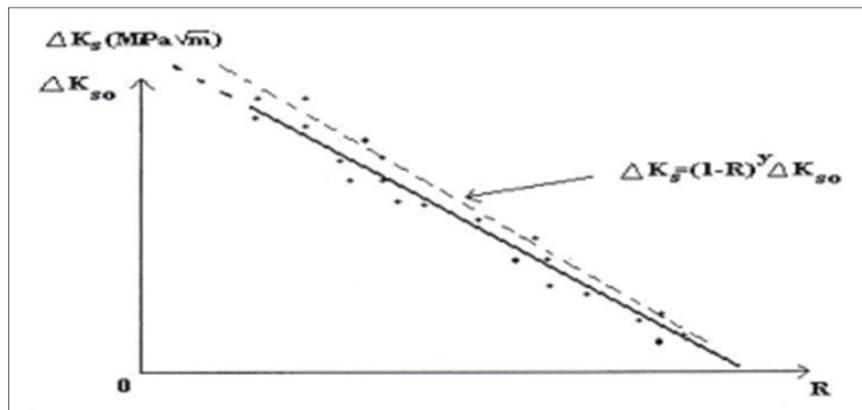


Figure II.17 : Evolution de ΔK_s en fonction de R.

II-6.2.1. Influence de la contrainte moyenne

A amplitude de chargement constante, si σ_m augmente la durée de vie diminue. La période de signal a en générale peu d'influence sur la durée de vie. Cette règle est confirmée quand le phénomène de fatigue est associé à d'autres d'endommagement en fonction

du temps : fatigue corrosion, fatigue- fluage, ou lorsque la rapidité des sollicitations produit un échauffement .Dans le cas des chargements variables, les paramètres prépondérants sont :

La présence de surcharge, la répétition d'une surcharge peut retarder la propagation de fissure.

L'ordre d'apparition de cycles :

- Accidents de forme (discontinuité dans la géométrie : entailles, trous, etc.....)

Un accident de forme augment localement le niveau de contrainte. Cette augmentation peut être traduite par un coefficient de contrainte élastique K_t : rapport de charge entre la contrainte locale maximale et la contrainte nominale.

Dans le domaine d'endurance limité (domaine visé par le l'industrie aéronautique), si la valeur de K_t augmente, la durée de vie diminue.

II-6.2.2.Effet d'échelle

A niveau de contrainte égale, deux pièce de même géométrie mais de dimensions différentes n'auront pas la même tenue en fatigue, plus dimensions d'une pièce croissent, plus sa résistance à la fatigue diminue. Cette observation s'explique principalement par le volume de matière sollicité, plus celui-ci est grand, plus la probabilité des défauts métallurgiques est grande.

Généralement, l'endommagement par fatigue apparaît en premier lieu à la surface des pièces. La prise en compte des deux aspects suivants améliore la tenue en fatigue L'aspect micro géométrique de la surface, un mauvais usinage provoque en surface des microreliefs susceptibles d'augmenter localement le niveau de contrainte, l'amorçage des fissures en surface est donc retardé lorsque la rugosité est faible

L'aspect des contraintes résiduelles, l'usinage peut introduire des contraintes résiduelles de traction en surface (elles sont équilibrées en profondeur par des contrainte résiduelles des comprissions), ces contraintes se superposant à celles du chargement accélèrent.

L'endommagement par fatigue influence de l'environnement un milieu agressif (température élevée, milieux corrosifs...) aggrave le phénomène de fatigue. Il apparaît des phénomènes nouveaux comme le fluage ou la corrosion. Leur action est proportionnelle au temps d'exposition.

II-7.Modèles décrivant la propagation d'une fissure

Plusieurs modèles ont été proposés pour prédire la durée de vie et la vitesse de fissuration " da/dN " sous différentes conditions.

➤ Loi de Paris

Pour les matériaux à comportement élastique, Paris a proposé d'utiliser la variation du facteur d'intensité de contrainte ΔK pour décrire la croissance stable des fissures par fatigue en élasticité linéaire (domaine II) :

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)$$

Cette démarche empirique est justifiée dans le cas où il n'y a pas de fermeture à la pointe de la fissure ni d'émoussement. La loi proposée par Paris ne décrit pas la totalité de la courbe de propagation, cependant, d'autres lois empiriques ou analytiques ont été proposées pour décrire l'ensemble de la courbe de propagation.

➤ Loi de Forman

Pour tenir compte de l'augmentation asymptotique de la vitesse de fissuration quand K_{\max} tend vers KIC, Forman a proposé la relation.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \cdot (\Delta K_I)^m}{(1 - R) \cdot (K_{Ic} - \Delta K_I)}$$

Cette loi a été vérifiée sur plusieurs alliages d'aluminium et est couramment utilisées en aéronautique pour "da/dN" supérieure à 10^{-5} mm/cycle et m de l'ordre de 4.

Toutefois, cette loi ne semble pas décrire convenablement le comportement des aciers ou l'effet du rapport (R) est généralement moins marqué. On remarque, que dans la relation précédant, le rapport "da/dN" tend vers l'infini quand K_{\max} tends vers KIC. De plus, cette relation ne tient pas compte de l'existence d'un seuil de fissuration. Pour rendre compte de l'effet de seuil dans la région I, Klesnil et Lucas proposèrent quant à eux une modification de la relation sous la forme :

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \cdot (\Delta K_I)^m}{(1 - R) \cdot (K_{Ic} - K_{\max})}$$

Où

ΔK : désigne la variation du facteur d'intensité de contrainte

C et m : sont des constantes propres au matériau et à l'environnement considéré

R: rapport de charge

➤ Modèle NASGRO

L'élaboration de modèles de propagation a pris une grande vitesse afin de tenir compte de plusieurs paramètres et conditions imposés de service ou de laboratoire qui agissent sur la propagation des fissures. Les paramètres qui agissent peuvent être classés en deux catégories

à savoir les paramètres intrinsèques qui dépendent du matériau : module de Young, limite d'élasticité, propriétés cycliques et état métallurgiques du matériau et paramètres extrinsèques qui dépendent des conditions de l'essai, différemment de la nature du matériau étudié : température, fréquence, environnement, dimensions des éprouvettes, rapport de charge...etc.

Le modèle NASGRO utilisé dans la prédiction de la vitesse de propagation des fissures de fatigue a été développé par Forman et al. Pour tenir compte de toute la courbe de propagation. L'équation NASGRO est écrite sous la forme :

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

f : représente la contribution de la fermeture de la fissure.

Les paramètres C, n, p, q sont déterminés expérimentalement, ΔK_{th} est l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte seuil pour des charges à amplitudes constantes. K_{max} et K_{crit} sont respectivement le facteur d'intensité de contrainte maximale et le facteur d'intensité de contrainte critique.

II-8. Propriété de l'Aluminium pur

L'aluminium pur possède une structure cristalline cubique à face centre (CFC). Les propriétés physiques sont présentées ci-dessus

Paramètre de maille : 0.405 nm à 298°K.

Masse volumique à 25°C : 2698.7 kg/m³

Point de fusion : 660°C.

- Coefficient de dilatation moyen entre 20 et 300°C : $2.55 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$
- Retrait volumique : 5.6% en cours de solidification
- Capacité thermique massique à 20 °C : $c = 950 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- Conductivité thermique à 20 °C : $\lambda = 217.6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- Résistivité électrique à 20 °C : $\rho = 2.63 \mu\Omega \text{ cm}$

L'aluminium peut être utilisé à différents degrés de pureté ou sous forme d'alliages, avec la plupart des métaux (cuivre, manganèse, magnésium, silicium, zinc, etc.).

Série	Alliage correspondant
1xxx	Aluminium pur (>99at%)
2xxx	Aluminium / Cuivre
3xxx	Aluminium / Manganèse
4xxx	Aluminium / Silicium
5xxx	Aluminium / Silicium
6xxx	Aluminium / Magnésium / Silicium
7xxx	Aluminium / Zinc
8xxx	Autres alliages d'aluminium

Tableau II.1 : Les différents alliages.

✓ Les différents alliages d'Aluminium

Les alliages d'aluminium sont appelés aussi les alliages corroyés, c'est-à-dire mis en Forme par déformation à chaud. Ces alliages sont divisés en deux catégories, à Savoir

- Nom trempant : qui ne peuvent ne subir aucun durcissement structural.
- Trempant : à durcissement structural.

Le durcissement structural est un procédé thermique qui permet d'avoir une Partition optimale des précipités et comporte trois stades.

- Mise en solution à haute température de l'élément d'addiction.
- Trempe : baisse rapide de la température jusqu'à la température ambiante, en vue d'obtenir une solution solide sursaturée.
- Vieillissement à une température inférieure à celle du solvus, en vue de favoriser un retour partiel vers les conditions d'équilibre et d'obtenir ainsi les propriétés mécaniques visées [24].

II-8.1. Conséquences sur l'étude du comportement mécanique des matériaux composites

L'étude de la mise en œuvre des matériaux composites a montré l'importance des stratifiés et des matériaux sandwiches. L'architecture de ces matériaux nous permet maintenant de dégager les grandes lignes de l'étude de leur comportement mécanique Cette étude comportera deux phases :

1. L'étude du comportement mécanique de chaque couche, parfois appelé comportement micromécanique ou microscopique du matériau composite. Cette étude est assez souvent désignée par microanalyse du matériau composite.

2. L'étude du comportement global du matériau constitué de plusieurs couches, et désigné généralement par comportement macroscopique du matériau composite ou comportement du stratifié.

Ces deux études étant effectuées, le comportement mécanique global d'une structure en composite sera ensuite analysé en adaptant les outils classiques du calcul des structures au comportement macroscopique des matériaux composites. L'analyse des structures simples (poutres et plaques) peut généralement être abordée par une méthode analytique, alors que l'étude de structures complexes nécessite l'utilisation de la méthode des éléments finis l'analyse du comportement mécanique d'une structure en matériau composite est schématisée sur la (Figure II.18), [25].

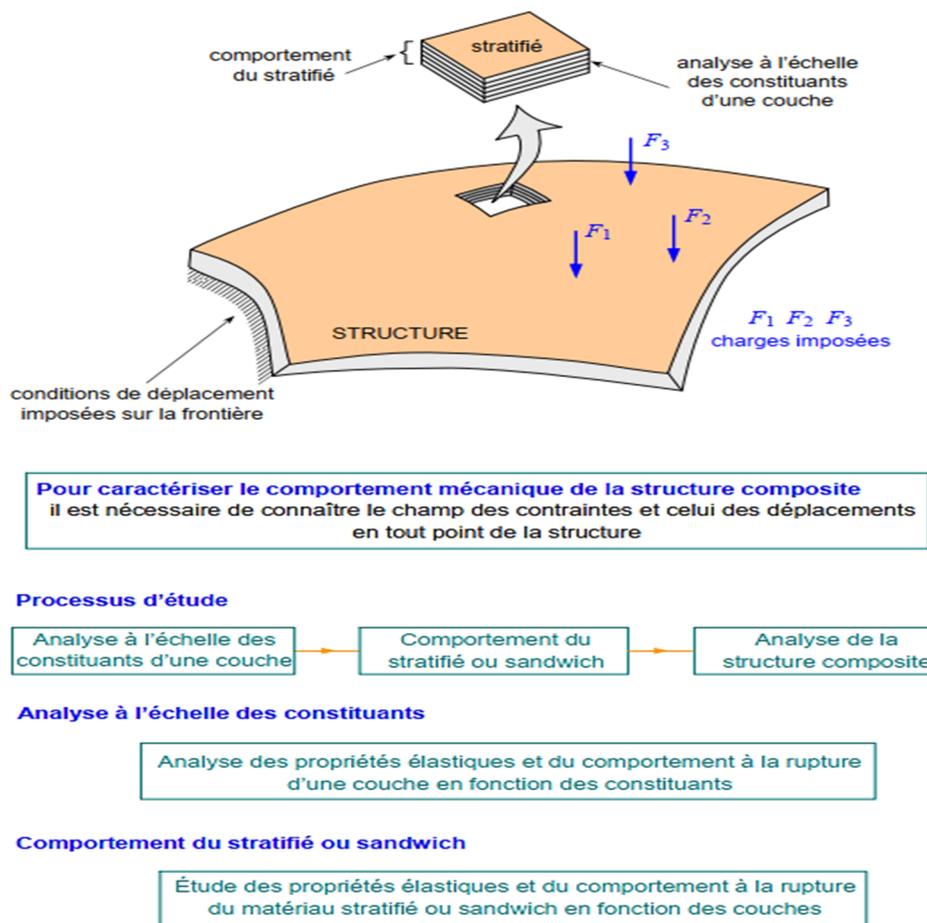


Figure II.18 : Schéma d'étude du comportement mécanique d'une structure en matériau composite.

II-9. Conclusion

La mécanique de la rupture est devenue un élément essentiel dans les processus de dimensionnement des industriels. Le calcul de durée de vie résiduelle en propagation de fissure permet de définir des plans d'inspection pour des pièces intégrant des défauts liés au processus de fabrication, au matériau même, aux manipulations effectuées au montage, aux charges ou évènements subis durant le cycle de vie d'une structure mécanique. La mécanique linéaire de la rupture permet de répondre à la plupart des problématiques rencontrées et des modélisations plus complexes, et des simulations numériques permettent de prendre en compte de manière plus réaliste la physique du cas traité (plasticité, multi axialité, couplages, multi physiques).

Chapitre –III–

Modélisation et simulation

III-1.Introduction

Des patches en matériaux composites sont classiquement utilisés dans l'aéronautique pour la réparation des structures métalliques présentant des dommages de type fissures.

La réparation de ces fissures par collage à une seule face ou aux deux à la fois avec un patch en matériaux composite, a attesté son efficacité pour réduire le facteur d'intensité de contraintes (FIC) au pointes de la fissure, et offrir de nombreuses avantages, d'amélioration du comportement de la fatigue, de la corrosion réduite et une bonne performance qui conduisent à améliorer la vie de la structure endommagée .

L'utilisation de la méthode numérique, en particulier la méthode des éléments finis, a considérablement contribué à la compréhension du comportement mécanique des structures endommagées collées par un patch en composite. Ainsi, il est bien connu que la méthode des éléments finis donne avec une grande précision des facteurs d'intensité de contraintes en pointe de fissure. La méthode des éléments finis a été utilisée pour l'étude de la fissure par de nombreux auteurs.

III-2.Présentation du logiciel de calcul

Abaqus 6.14 emploie une technologie de résolution idéale pour les événements dynamiques lents et statiques, qui exigent des solutions de traitement des contraintes d'une extrême précision. Abaqus est pris en charge dans l'environnement de modélisation pour tous les besoins communs.

Le logiciel Abaqus permet de modéliser les structures par différents types d'éléments bidimensionnels, triangulaires à trois et six nœuds, et quadratique à huit nœuds.

Nous trouvons une variété de types de chargements notamment des charges concentrées, des charges uniformément et linéairement réparties ; des chargements dynamiques et des chargements thermiques.

Les résultats pris à tout point d'une exécution peuvent utilisés comme conditions de départ pour la suite de l'analyse. La flexibilité offerte par cette intégration permet d'appliquer aux parties de l'analyse adaptées à une technique de résolution implicite, comme les analyses de transport statique, dynamique lente ou stationnaire.

III-3.Présentation du modèle

Dans cette modélisation, on considère une plaque rectangulaire mince en aluminium 2024-T3 ayant les dimensions suivantes : longueur $H=250\text{mm}$, largeur $W=127\text{mm}$, et d'épaisseur $e=3\text{mm}$, Une fissure latérale de 5mm de longueur dans la plaque perpendiculaire à la direction de chargement.

La plaque considérée est sollicitée en traction uni-axiale dans la direction verticale "y" sous la contrainte appliquée maximale d'amplitude $\sigma = 100\text{MPa}$.

La plaque a été réparée par un patch rectangulaire externe .Le patch composite est collé à la plaque fissurée pour le renforcement de la fissure latérale (Figure III.1). Les dimensions du patch sont : Longueur $H_r=127\text{mm}$, largeur $W_r=63.5\text{mm}$ et épaisseur $e_r=2\text{mm}$

Les caractéristiques mécaniques des matériaux de l'assemblage (plaque, patch et la couche adhésive) sont reportées dans (Tableau III.1). Et la Figure (III.1), montre le modèle géométrique de la structure utilisée.

Matériau	E1	E2	E3	G12	G13	G23	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
Bore/époxy	109000	8819	8819	4315	4310	3200	0.342	0.342	0.38

Tableau III.1: Propriétés mécaniques du composite Bore/époxy.

Materiaux	E (GPa)	G (GPa)	ν
Adekit A140	2.690	0.99	0.3
Aluminium 2024T3	69	36.92	0.3

Tableau III.2: Propriétés mécaniques de l'aluminium [2024-T3] et de l'adhésif [A140].

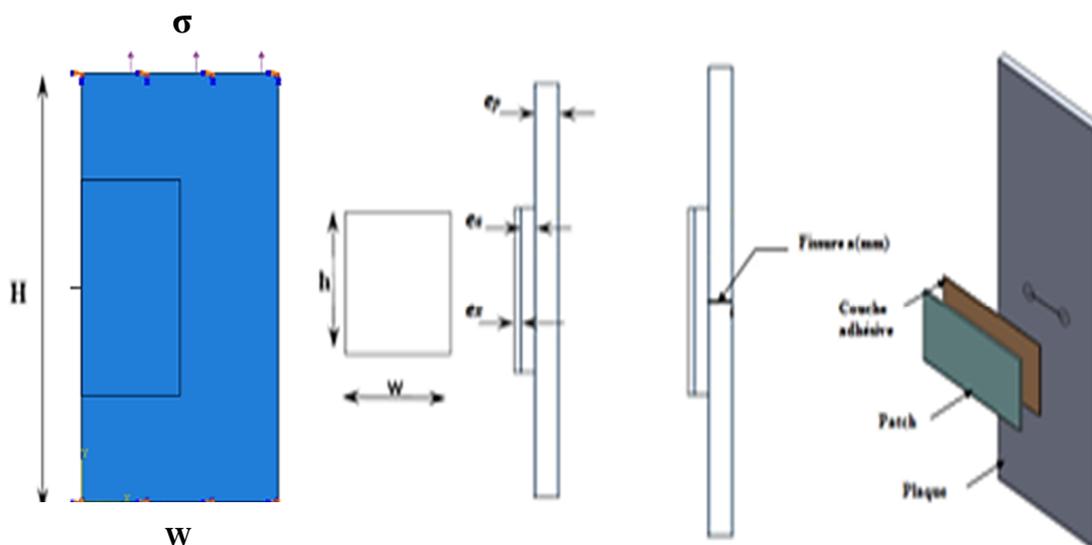
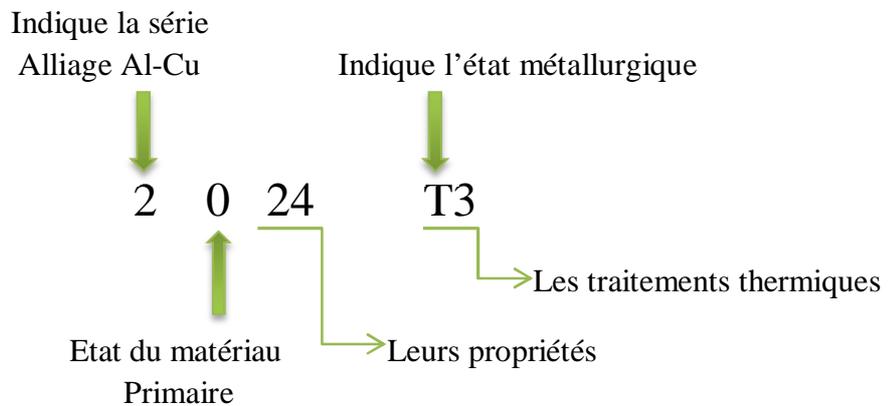


Figure III.1: Modèle géométrique de la plaque réparée.

Alliage d'aluminium 2024-T3

Signification d'alliage 2024-T3



Propriétés de l'alliage d'aluminium 2024T3

Alliage	Masse Volumique Kg/dm ³	Intervalle de fusion Approximatif en C°	Rm Min-max MPa	Module de Young MPa	Résistant Au cisaillement MPa	Capacité thermique massive J/Kg.C°	Résistive (à20°C) μΩcm
2024	2,77	500-638	340-475	69000	290	920	5,7

Tableau III.3 : les différentes propriétés de l'alliage d'aluminium 2024-T3.

L'analyse par éléments finis de la configuration de la plaque réparée (représentée sur la Figure III.2) se fait à l'aide du code de calcul ABAQUS. La structure des couches du stratifié (patch) est en fait une structure tridimensionnelle. Un modèle d'éléments finis en trois dimensions d'une telle structure comporte plusieurs degrés de complexité.

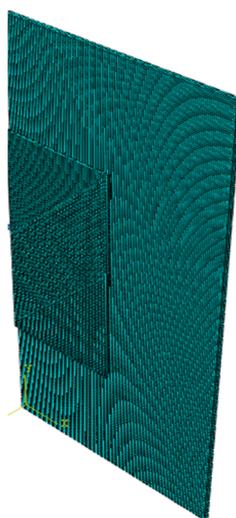


Figure III.2: Modèle géométrique et maillage de la structure (Plaque et patch).

L'adhésif est modélisé sous la forme d'une troisième couche. Dans le modèle d'éléments finis, les nœuds sont communs entre chaque structure tridimensionnelle de sorte qu'il y ait une continuité de la déformation et de la contrainte. Les éléments utilisés dans la modélisation de l'ensemble sont quadrilatérales standards de 8 nœuds iso paramétriques.

III-4. Discussions

L'objet de cette étude est d'analyser le comportement d'une fissure avec et sans le renforcement par un patch en composite d'une plaque en aluminium en mode I en utilisant la méthode des éléments finis. Le patch de réparation est le bore/époxy qui est utilisé avec beaucoup de succès par nombreux chercheurs, et de carbone/époxy pour une autre étude et faire une étude comparative entre les deux composites que ce soit pour la répartition des contraintes et celles pour l'intégrale J.

Les essais de traction effectués sur la plaque d'aluminium 2024-T3 et l'adhésif ADEKIT A140 ont permis d'avoir des courbes caractéristiques indiquées dans (Figure III.3).

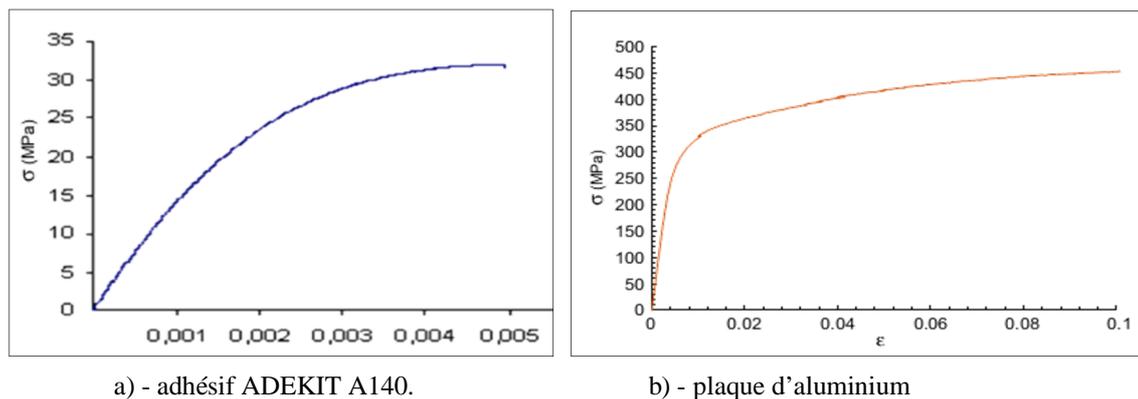


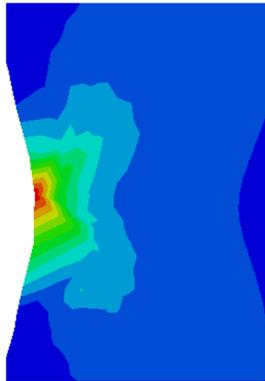
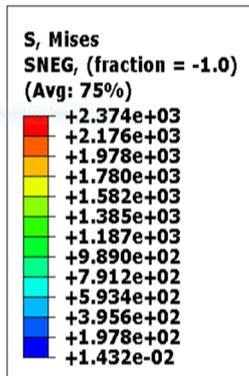
Figure III.3: Courbe Traction contrainte-déformation.

Quatre (04) séquences d'empilement ont été mises sur le composite proposé, à savoir bore/époxy et le carbone/époxy qui est répartie comme suit : **(0°/45°/60°/90°) (Orientation des fibres).**

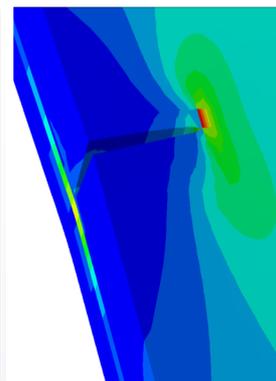
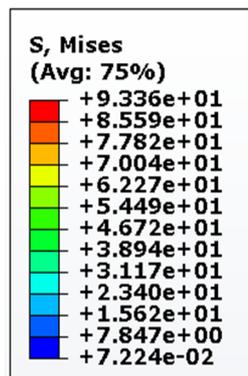
III-4.1. Les contraintes équivalentes de Von Mises

Dans cette partie de l'étude, on a présenté les contraintes induites dans la plaque qui est sollicitée en traction dans les deux directions différentes, et avec les conditions aux limites imposées, afin de faire une comparaison de la plaque non réparée avec cette même plaque réparée par patch en composite qui est le bore/époxy et voir l'effet de la réduction des intensités de contraintes sollicitées dans cette plaque.

« Chargement 20MPa »

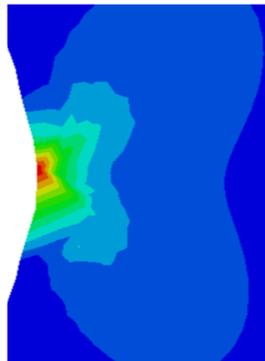
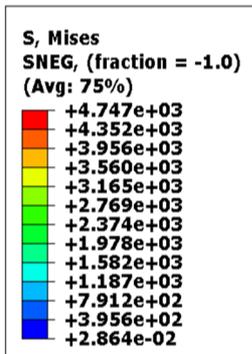


Plaque non réparée

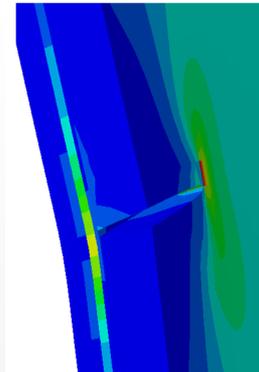
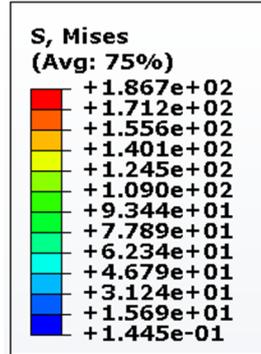


Plaque réparée

« Chargement 40MPa »

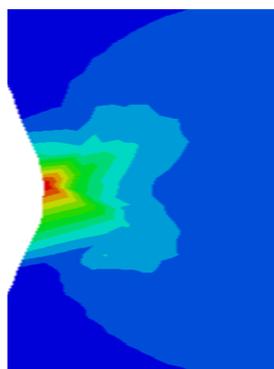
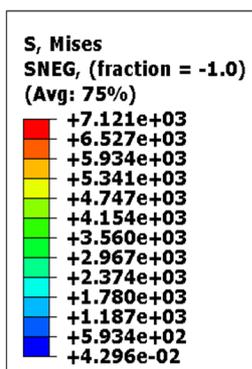


Plaque non réparée

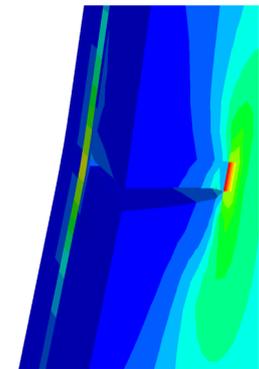
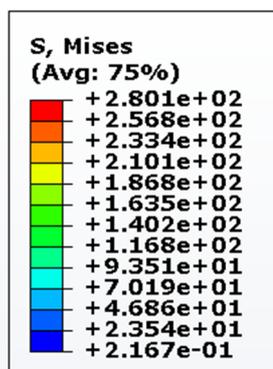


Plaque réparée

« Chargement 60MPa »



Plaque non réparée



Plaque réparée

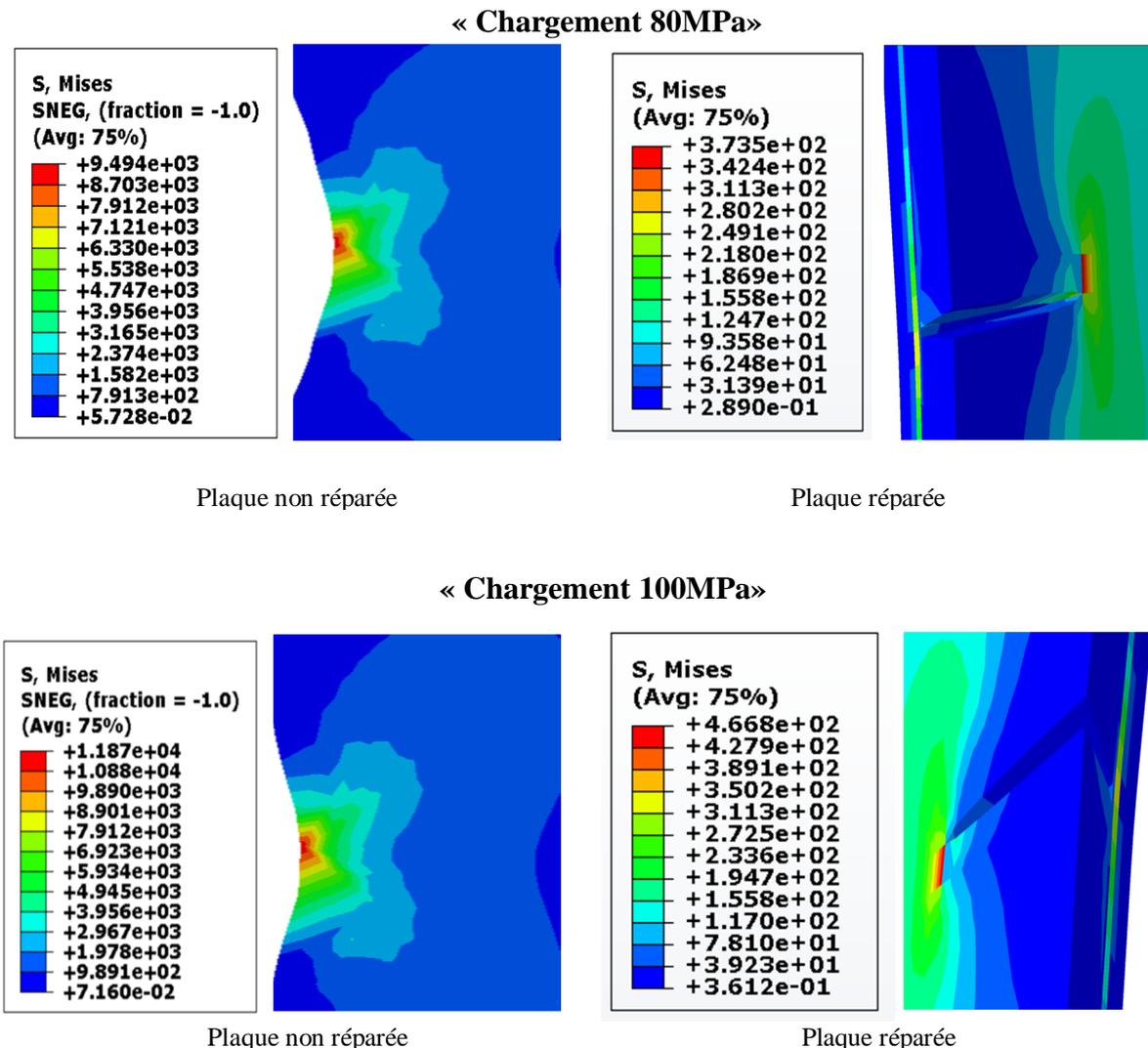


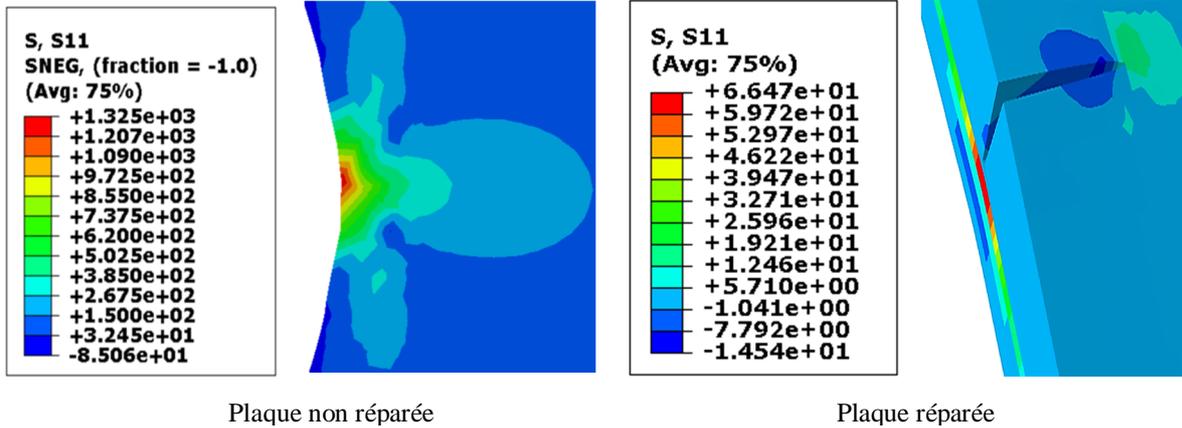
Figure III.4 : Distribution des contraintes équivalentes de Von Mises.

Les premières remarques tirées par ces distributions des contraintes nous mène à conclure que la plaque non réparée est sollicitée par des contraintes très importantes surtout en tête de fissure et la zone affectée est très large, à savoir cette zone plastique confinée, tandis que, en présence du composite qui est un élément très absorbant des contraintes, et après la réparation de cette plaque, ces contraintes équivalentes de Von mises connaissent une réduction très distincte en son intensité, d'où l'importance de cette réparation par ce composite bore/époxy, donc, il y a une relaxation des contraintes.

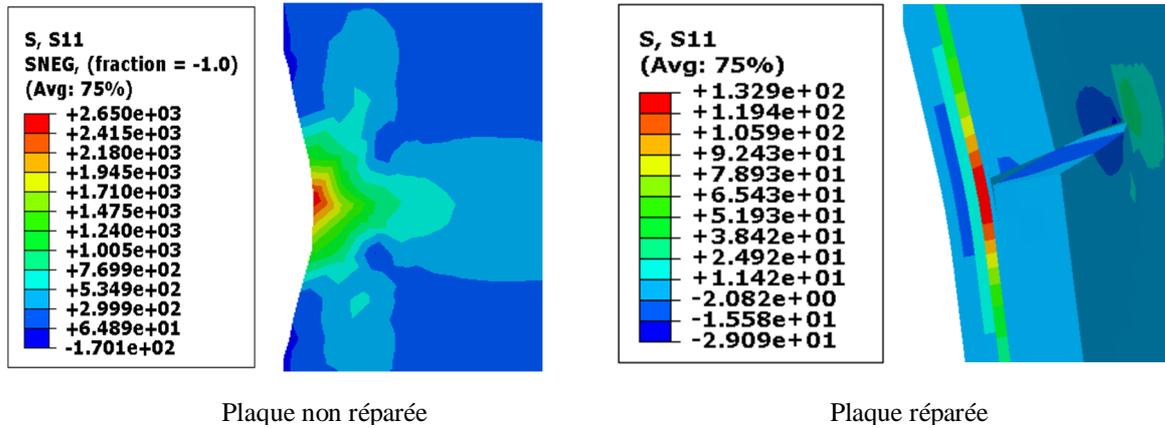
III-4.2. Contraintes normales σ_{xx}

Dans ce on va faire une comparaison directes pour les différentes contraintes normales σ_{xx} en vue de distinguer l'effet de la réparation par le patch en composite de la plaque présentant une fissure latérale sollicitée par des chargements de traction.

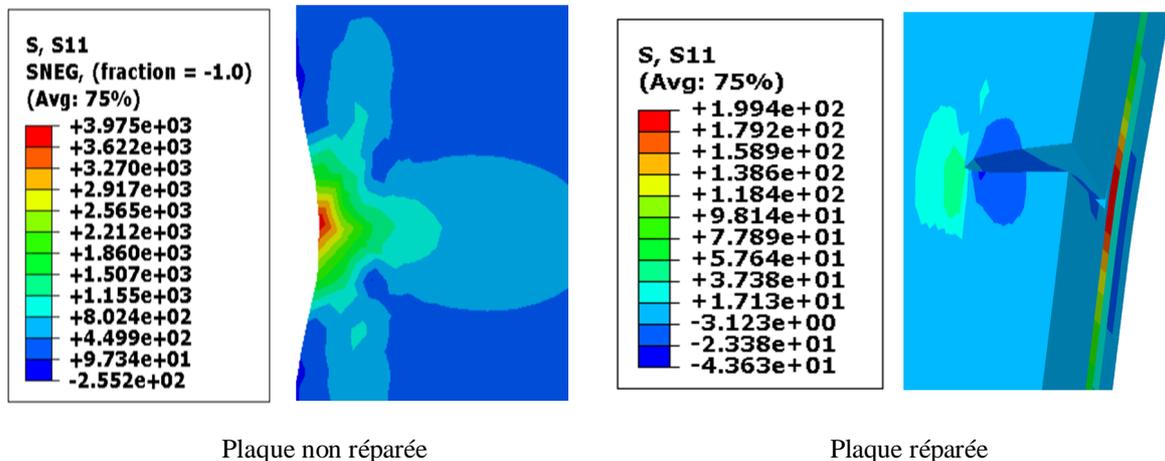
« Chargement 20MPa »



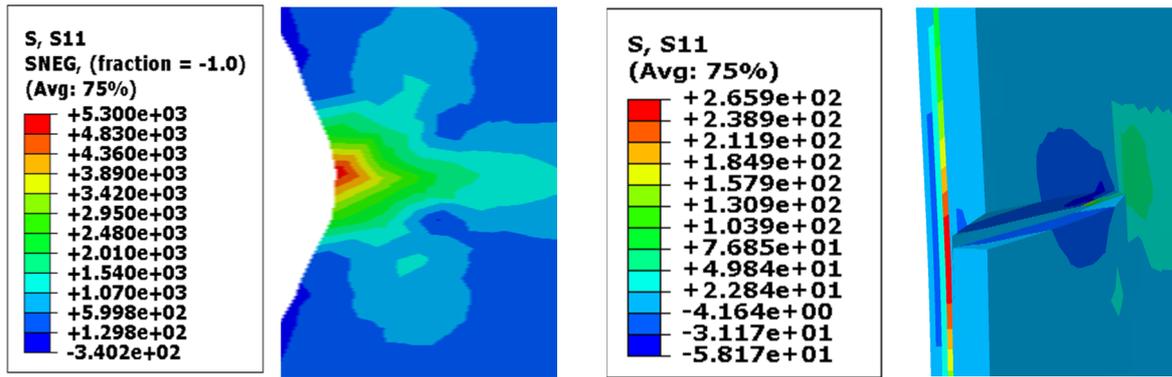
« Chargement 40MPa »



« Chargement 60MPa »



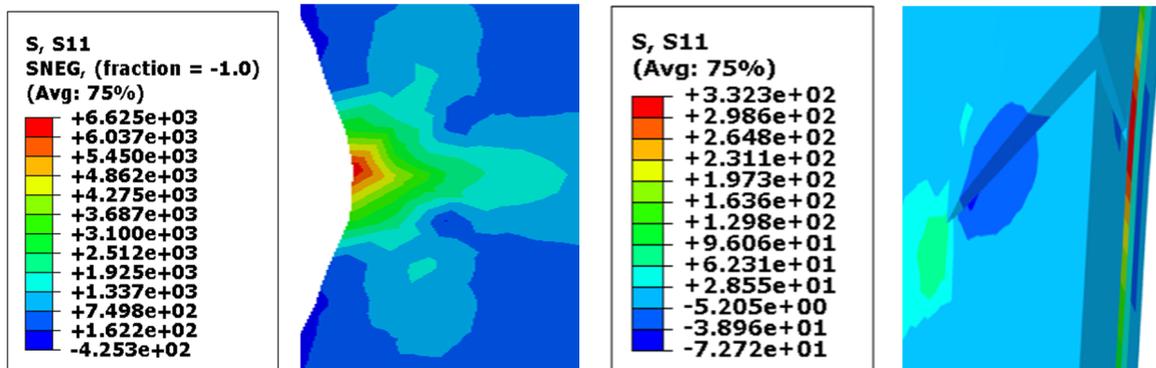
« Chargement 80MPa »



Plaque non réparée

Plaque réparée

« Chargement 100MPa »



Plaque non réparée

Plaque réparée

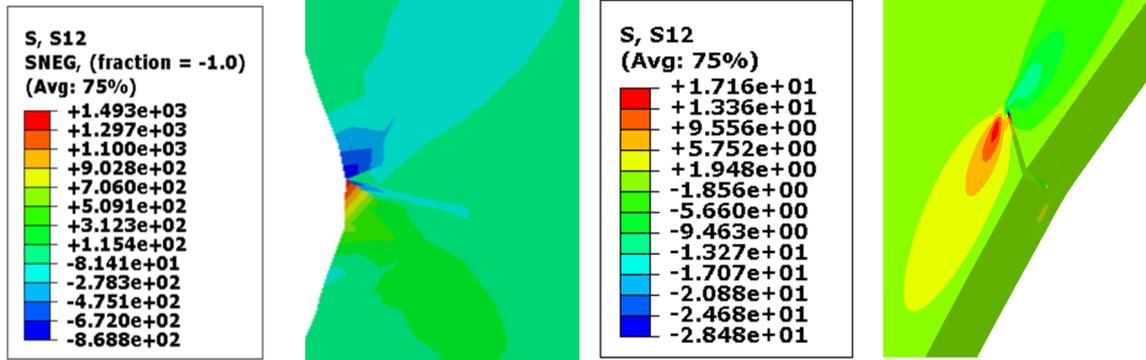
Figure III.5 : Distribution des contraintes normales σ_{xx} .

Concernant la distribution des contraintes normales σ_{xx} dans les deux cas, on constate que la zone de la plaque sans réparation est fortement affectée par des contraintes très importantes comparativement à celle réparée, et même pour les intensités de contraintes, on conclut qu'il y'a une réduction très remarquable pour cette plaque réparée, pour cela, et pour des chargements assez faibles, telles que 20MPa et 40MPa, leurs effets sur la plaque réparée est presque faible, d'où les contraintes normales σ_{xx} sont moins importantes que celles des contraintes équivalentes de Von Mises.

III-4.3. Contraintes tangentielles τ_{xy}

Pour les différentes charges, on compare les différentes contraintes tangentielles pour la plaque non réparée et après sa réparation par patch en composite qui est le bore/époxy et on a abouti aux résultats suivants :

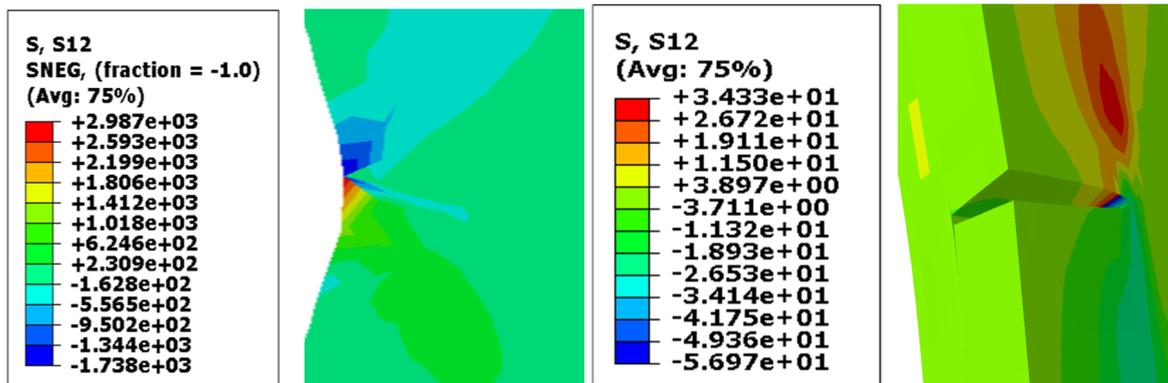
« Chargement 20MPa »



Plaque non réparée

Plaque réparée

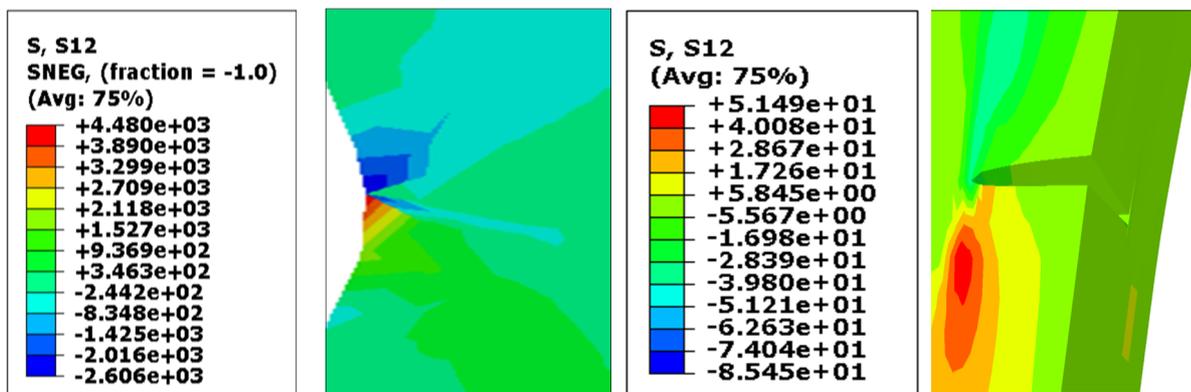
« Chargement 40MPa »



Plaque non réparée

Plaque réparée

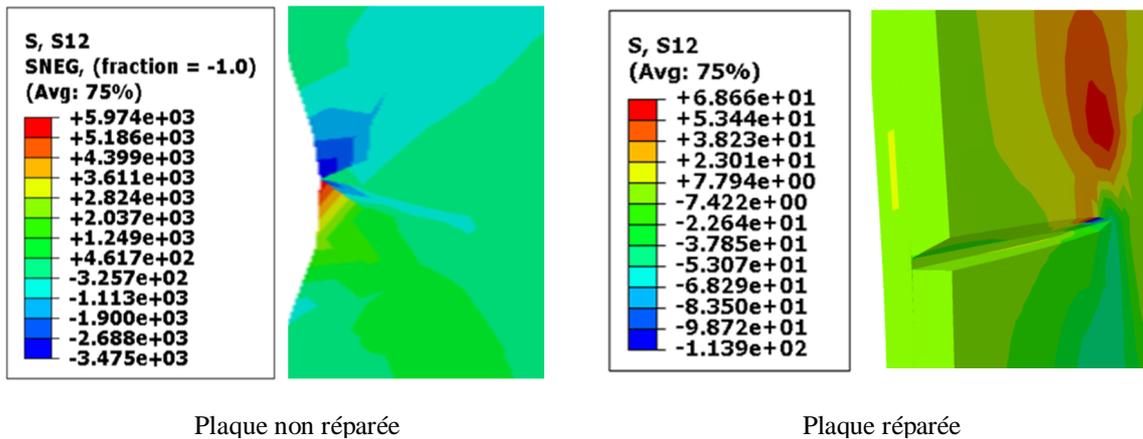
« Chargement 60MPa »



Plaque non réparée

Plaque réparée

« Chargement 80MPa »



« Chargement 100MPa »

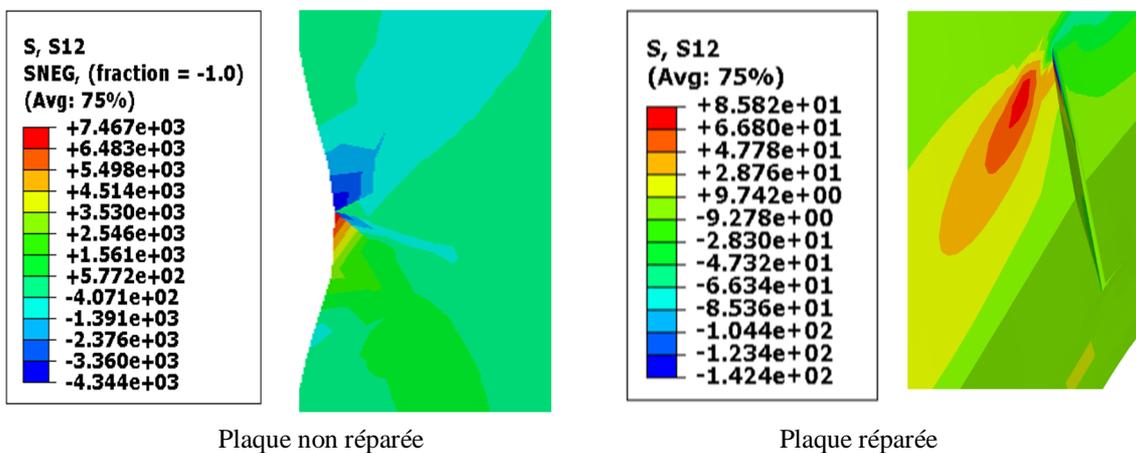


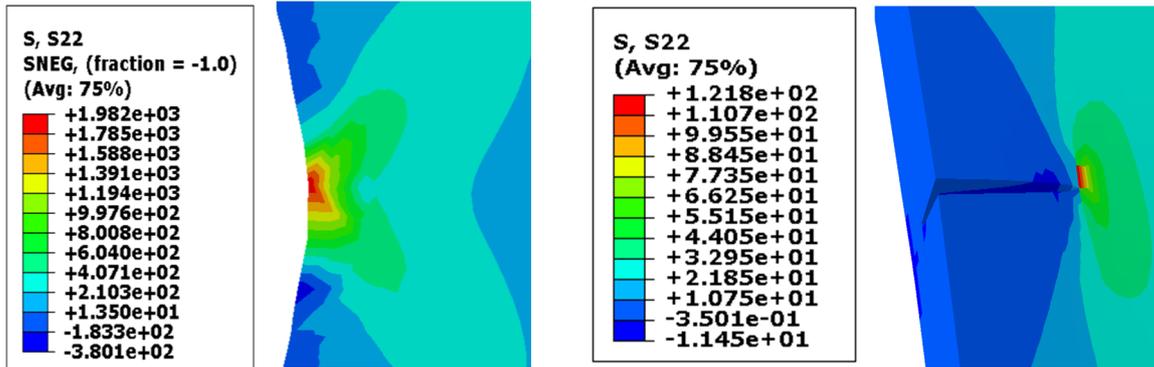
Figure III.6: Distribution des contraintes tangentielles maximales τ_{xy} .

Les premières constatations au niveau de la zone affectée au niveau de la tête de fissure, pour la plaque réparée est une zone rouge c'est-à-dire zone à champs de contraintes un peu élevées mais ça prouve une très grande réduction de ces contraintes tangentielles comparativement à celles induites dans la plaque elle-même avant d'être réparée , d'où l'effet de la réparation est important pour l'absorption et l'amortissement de toutes les contraintes induites dans ces types de plaques, surtout en aéronautique.

III-4.4. Contraintes normales σ_{yy}

Pour pouvoir faire la distinction et voir l'effet du patch sur une plaque fissurée latéralement sollicitée à des contraintes de traction de ses deux extrémités, c'est-à-dire, dans la (4)direction de l'ouverture des lèvres de la fissure, on expose ces contraintes normales σ_{yy} pour les deux cas.

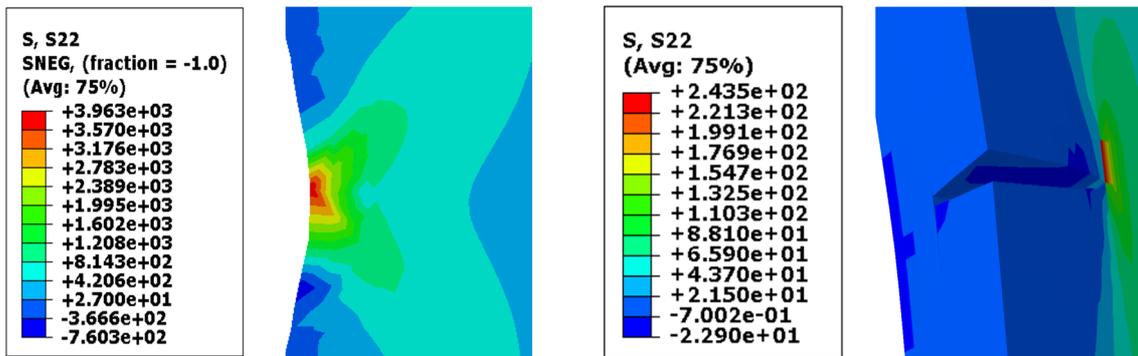
« Chargement 20MPa »



Plaque non réparée

Plaque réparée

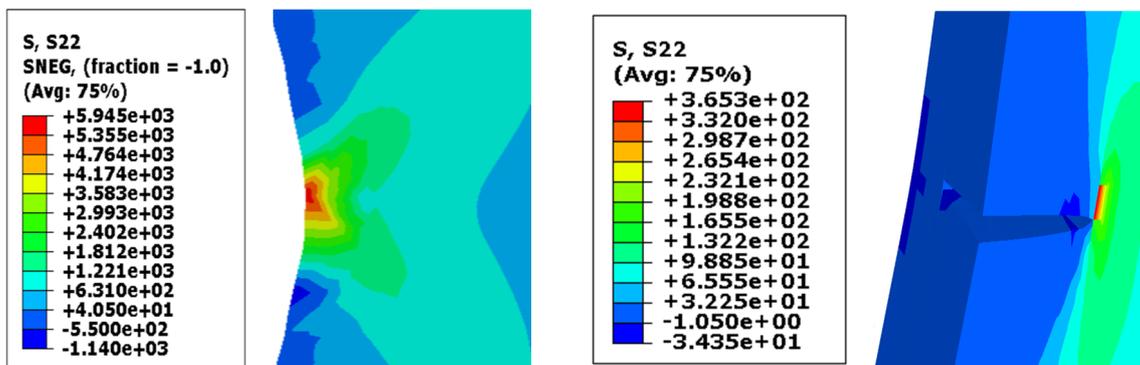
« Chargement 40MPa »



Plaque non réparée

Plaque réparée

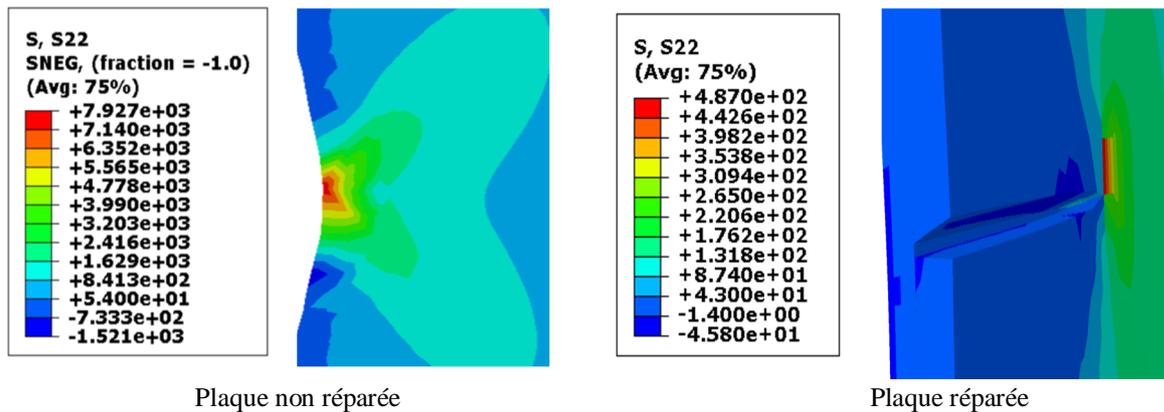
« Chargement 60 MPa »



Plaque non réparée

Plaque réparée

« Chargement 80 MPa »



« Chargement 100 MPa »

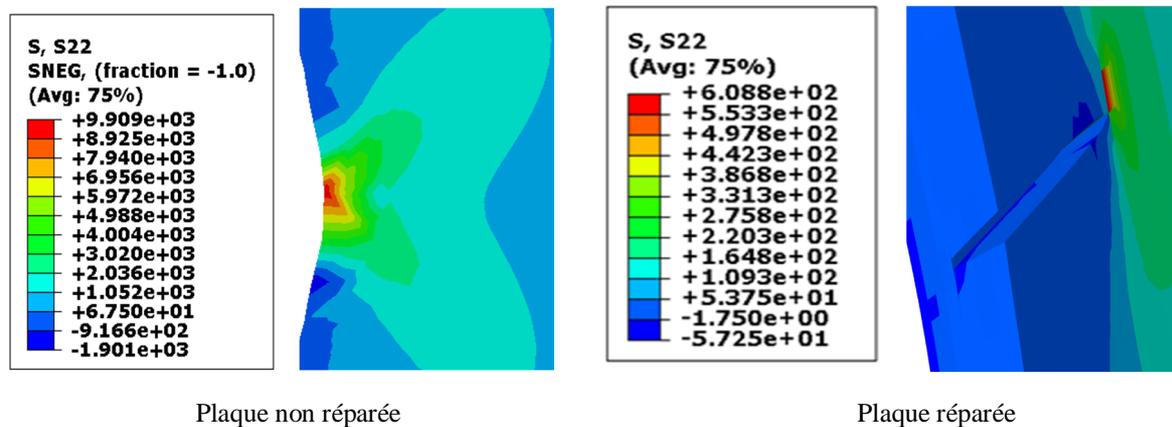


Figure III.7: Distribution des contraintes normales σ_{yy} .

Le gain de l'effet des contraintes normales σ_{yy} est très remarquable , vu cette propagation libre de fissure non réparée qui induit des contraintes très importantes en tête de fissure qui fait appel à un champs de contraintes important, dans l'autre cas, qui est la phase de réparation, ces contraintes diminuent graduellement le champs de contraintes au voisinage de la tête de fissure diminue lui aussi, par effet d'absorption des contraintes par , premièrement la couche d'adhésif qui à son rôle est un absorbeur de contraintes, puis les quatre couches du composites qui, à leurs rôles amortissent les contraintes induites et transforme ce champs de contraintes élevées en un champs de contraintes faible et moins sollicitant.

III-5.Réparation par patch Carbone/époxy

Dans la deuxième partie du travail, on a changé le composite qui est le carbone/époxy avec les propriétés mécaniques citées ci-dessous afin de voir la différence de réparation de cette plaque fissurée et choisir le composite le plus performant.

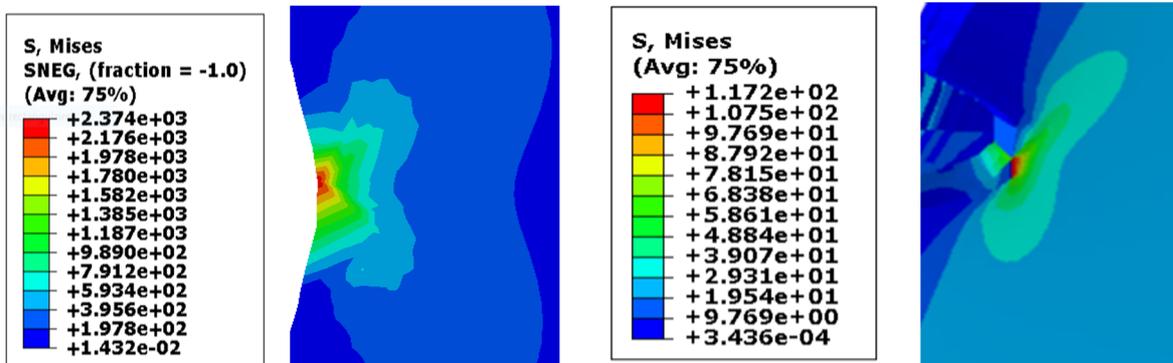
Matériau	E1	E2	E3	G12	G13	G23	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
Carbone/époxy	109,000	8,819	8,819	4,315	4,31	3,200	0,342	0,342	0,38

Tableau III.4: Propriétés mécaniques du composite Carbone/époxy.

III-5.1.Contraintes équivalentes de Von Mises

Dans cette partie de l'étude, on a présenté les contraintes induites dans la plaque qui est sollicitée en traction dans les deux directions différentes, et avec les conditions aux limites imposées, afin de faire une comparaison de la plaque non réparée avec cette même plaque réparée par patch en composite qui est le carbone/époxy et voir l'effet de la réduction des intensités de contraintes sollicitées dans cette plaque.

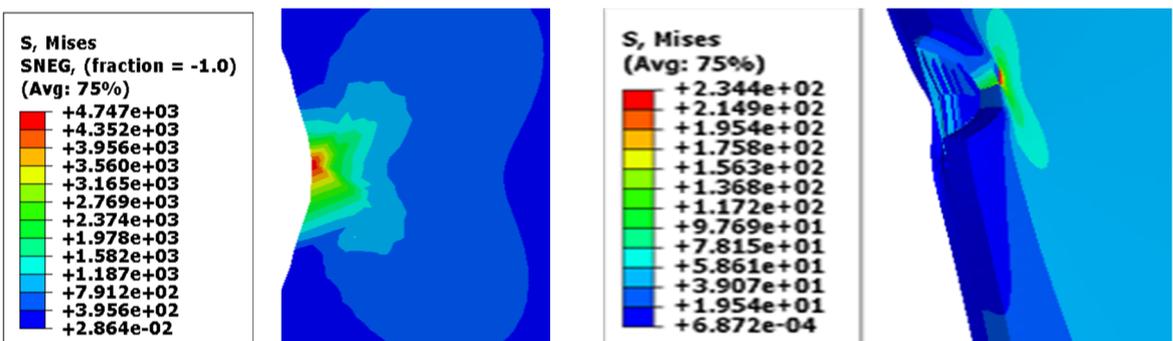
« Chargement 20MPa »



Plaque non réparée

Plaque réparée

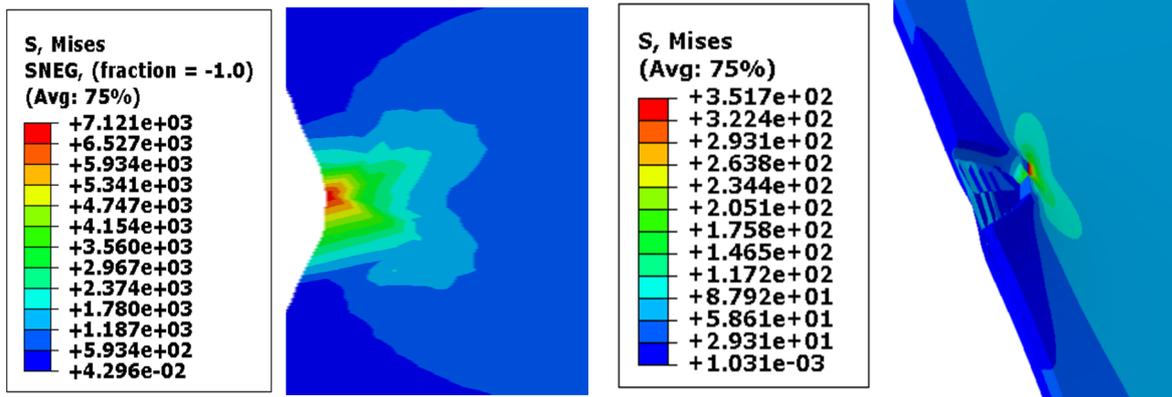
« Chargement 40MPa »



Plaque non réparée

Plaque réparée

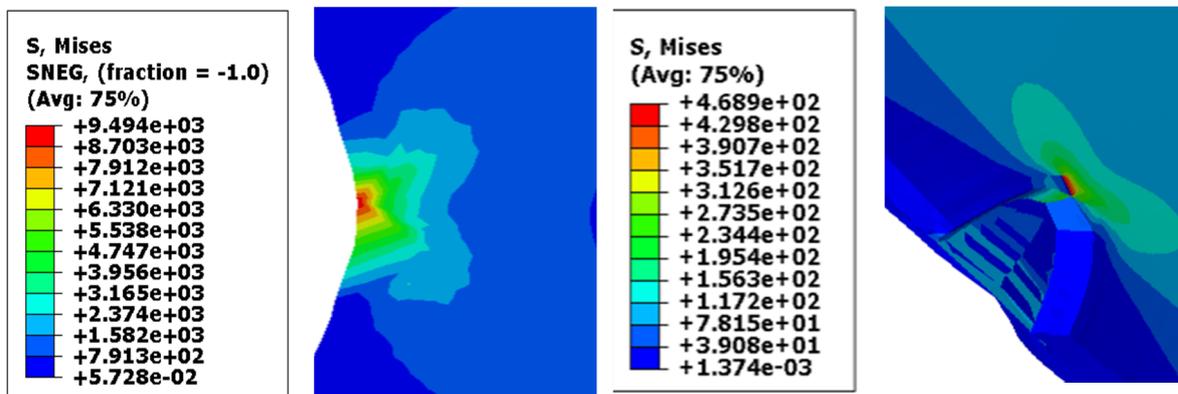
« Chargement 60MPa »



Plaque non réparée

Plaque réparée

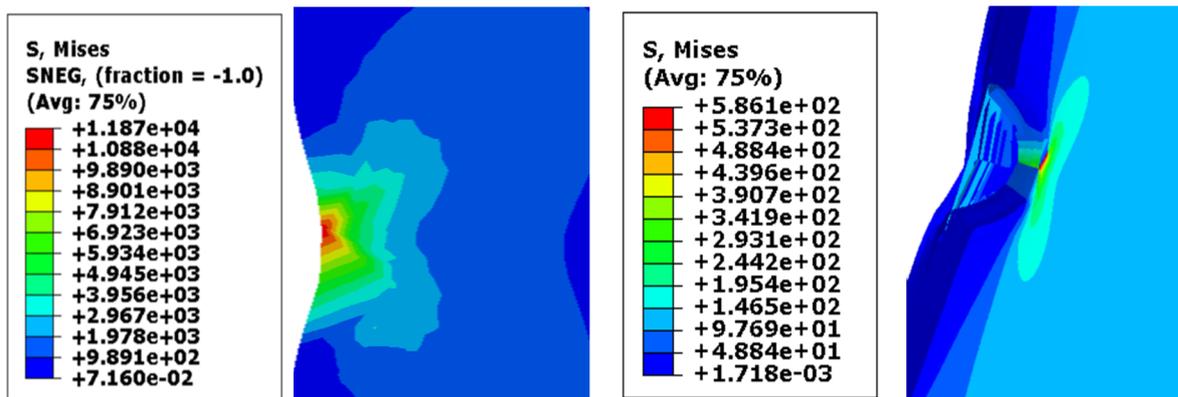
« Chargement 80MPa »



Plaque non réparée

Plaque réparée

« Chargement 100MPa »



Plaque non réparée

Plaque réparée

Figure III.8 : Distribution des contraintes équivalentes de Von Mises.

La réduction des intensités des contraintes en cas de réparation est très remarquable relativement à la plaque non réparée pour les contraintes équivalentes maximales de Von Mises, cela prouve que le patch en composite absorbe et amortit en même temps toutes les contraintes induites au voisinage de la tête de fissure en faisant ralentir la propagation de fissure et rendre le champs des contraintes qui sollicitent la plaque fissurée moins élevé, d'où il y'a un gain très important en contraintes.

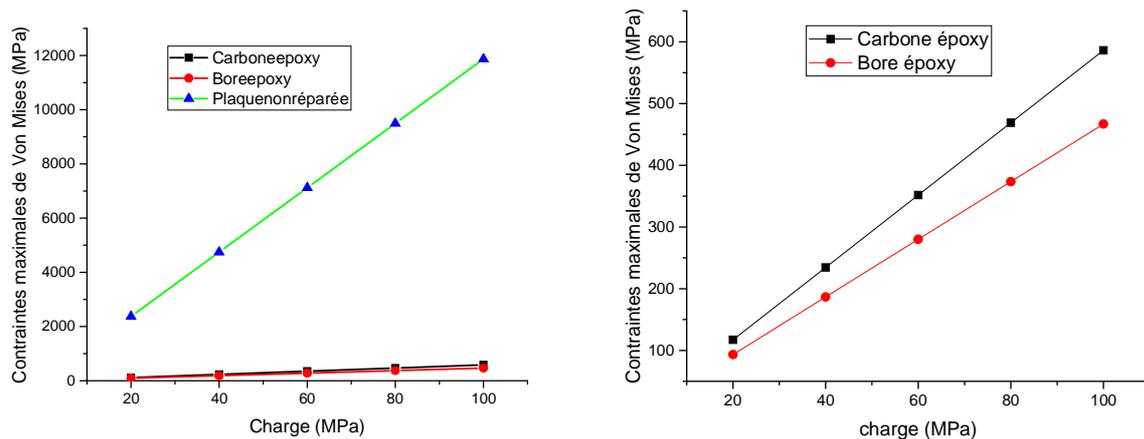


Figure III.9: Variation des contraintes équivalentes maximales de Von Mises en fonction des différents chargements.

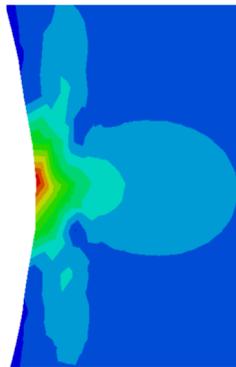
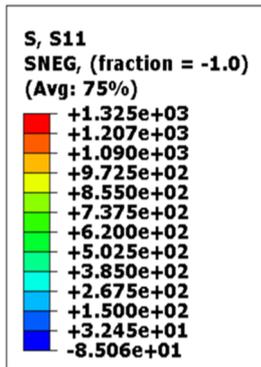
Pour ces deux courbes représentant la variation des contraintes équivalentes maximales de Von Mises en fonction des différents chargements pour les trois études à savoir ; fissure non réparée, fissure réparée par le patch bore/époxy et fissure réparée par le patch carbone/époxy, et faire une comparaison correspondante d'où nous concluons que :

Le composite le mieux efficace et le plus performant est le bore/époxy par ses propriétés mécaniques importantes telles les rigidités (E_{ij}) et de cisaillement (G_{ij}) qui laisse toutes les contraintes à se réduire et d'être absorbée, puis le deuxième composite qui est le carbone/époxy qui à son tour présente des propriétés intéressantes et laisse les contraintes à être réduites, mais pour ces deux composites, le bore/époxy est le plus performant comparativement au carbone/époxy.

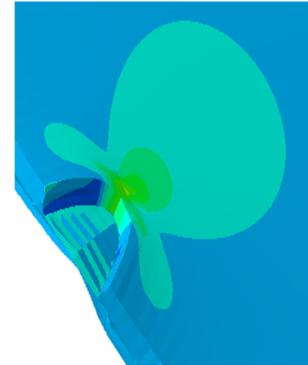
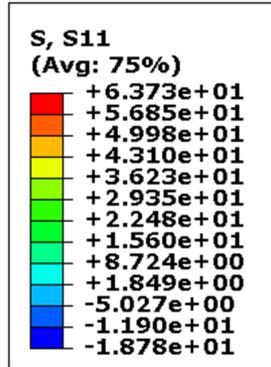
III-5.2. Contrainte normale de σ_{xx}

Dans ce on va faire une comparaison directes pour les différentes contraintes normales σ_{xx} en vue de distinguer l'effet de la réparation par le patch en composite de la plaque présentant une fissure latérale sollicitée par des chargements de traction.

« Chargement 20MPa »

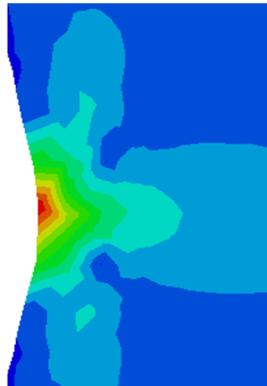
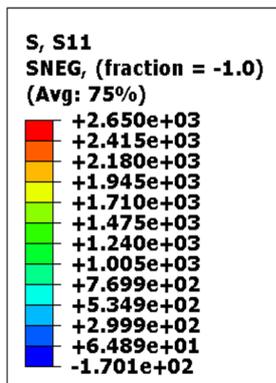


Plaque non réparée

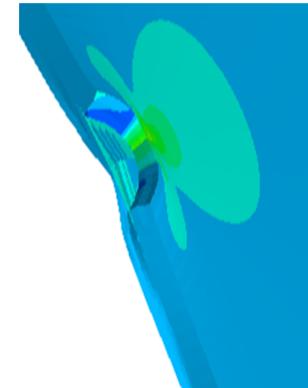
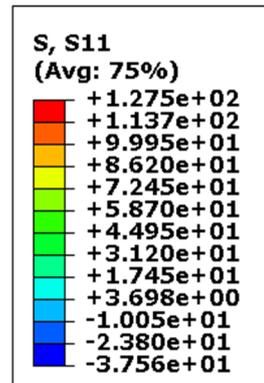


Plaque réparée

« Chargement 40MPa »

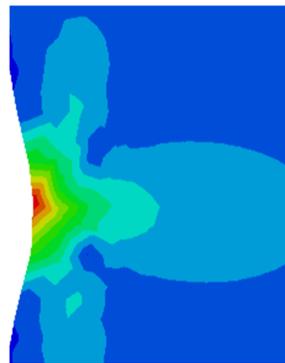
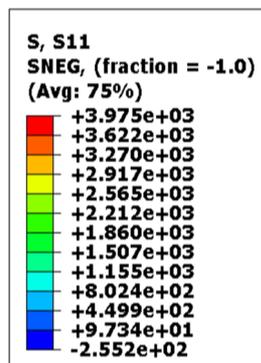


Plaque non réparée

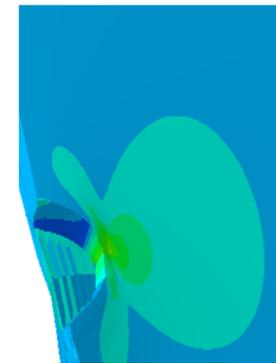
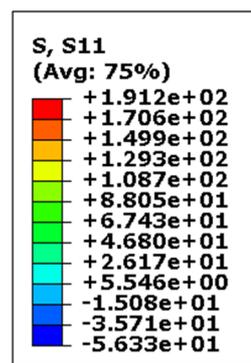


Plaque réparée

« Chargement 60MPa »

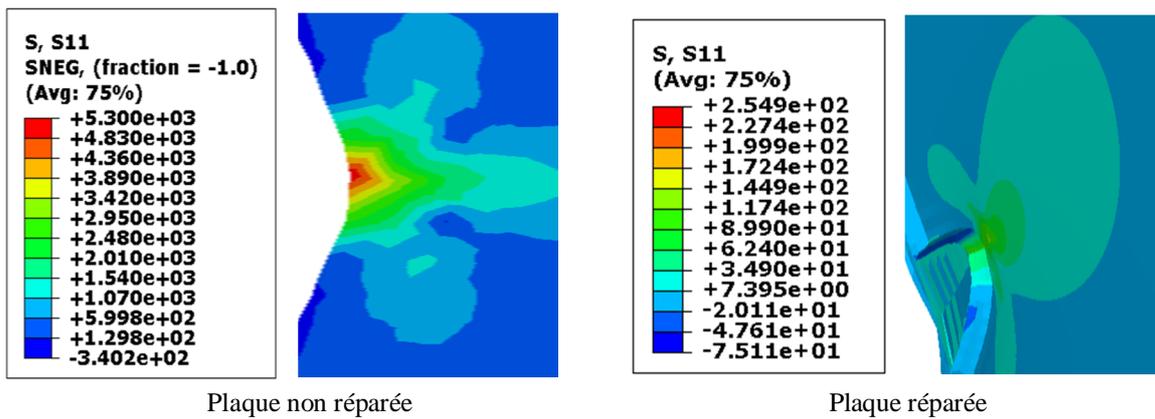


Plaque non réparée



Plaque réparée

« Chargement 80MPa »



« Chargement 100MPa »

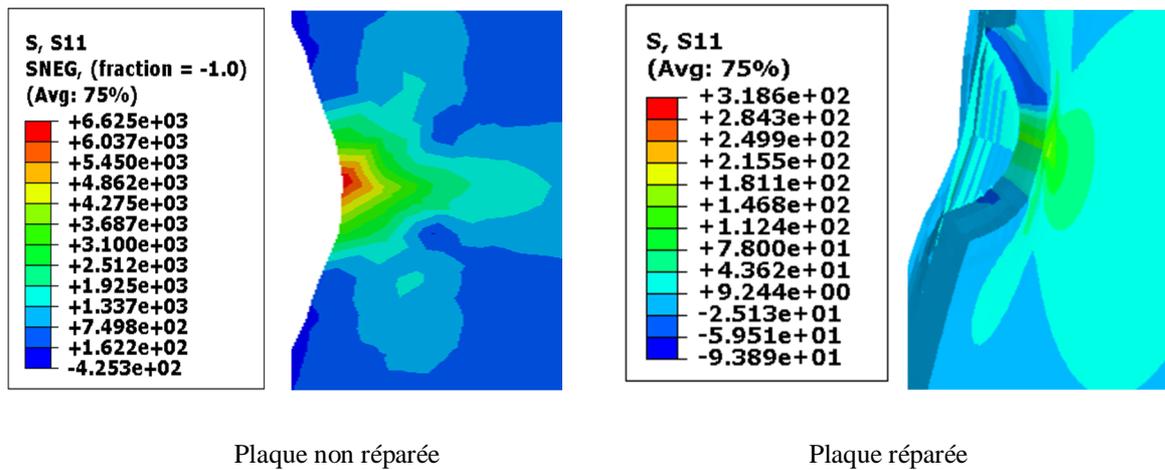


Figure III.10 : Distribution des contraintes normales σ_{xx} .

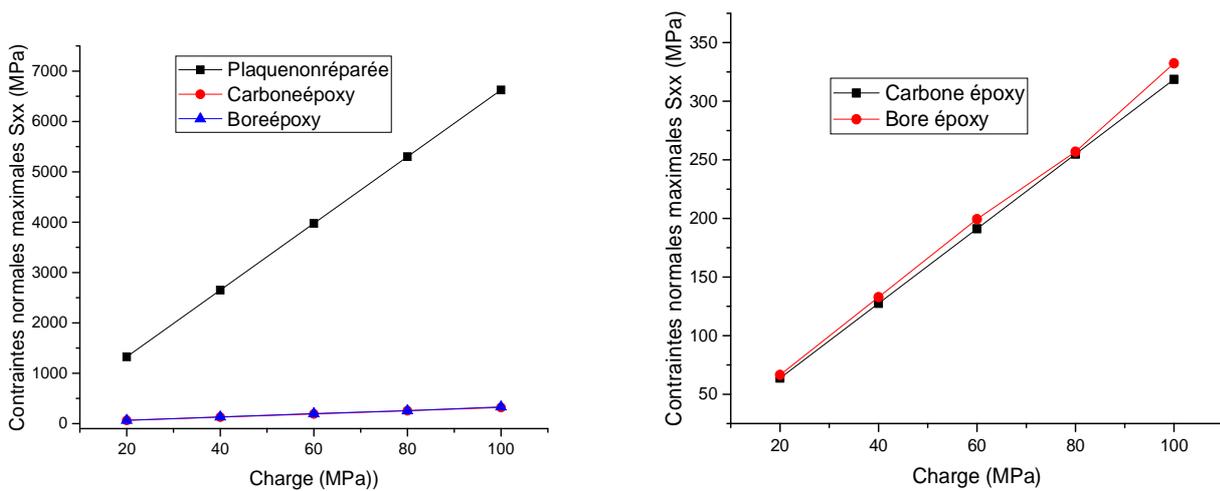


Figure III.11 : Variation des contraintes normales maximales σ_{xx} en fonction des différents chargements.

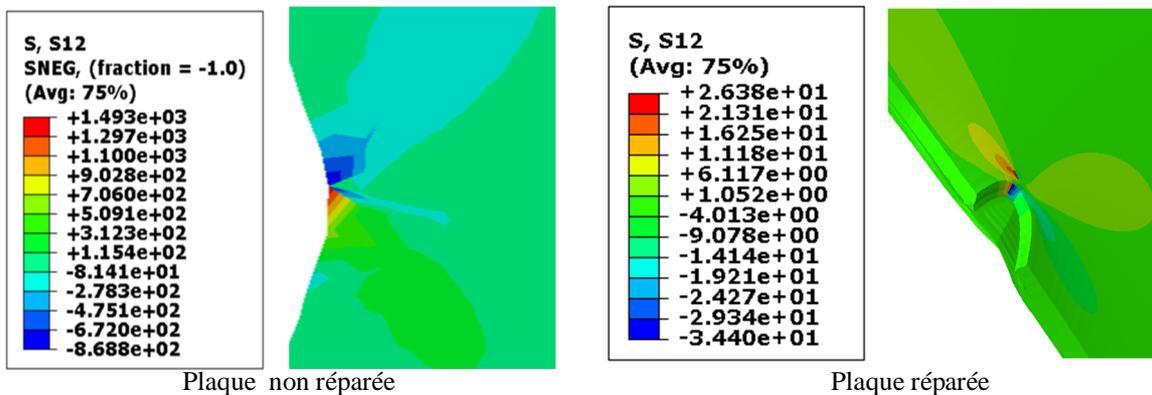
Pour la réparation de la plaque par le patch carbone/époxy, on remarque que la réduction des contraintes normales est moins importante contrairement au patch bore/époxy, vu qu’au voisinage de la tête de fissure, qui connaît une ouverture de ses lèvres, et crée un champ de contraintes au alentour de sa tête avec des contraintes inférieures à celles pour la plaque non réparée et prouve un gain assez important par cette réparation.

Pour la variation des contraintes maximales normales σ_{xx} en fonction des différents chargements, on constate que la réparation par patch en composite apporte un gain très important comparativement à la plaque non réparée et cela selon le type de patch correspondant, d’où l’efficacité de la réparation prolonge une durée de vie assez importante à une plaque fissurée qui avait reconnu un recouvrement par patch en composite qui absorbe en quelque sorte toutes les contraintes induites dans cette plaque en question.

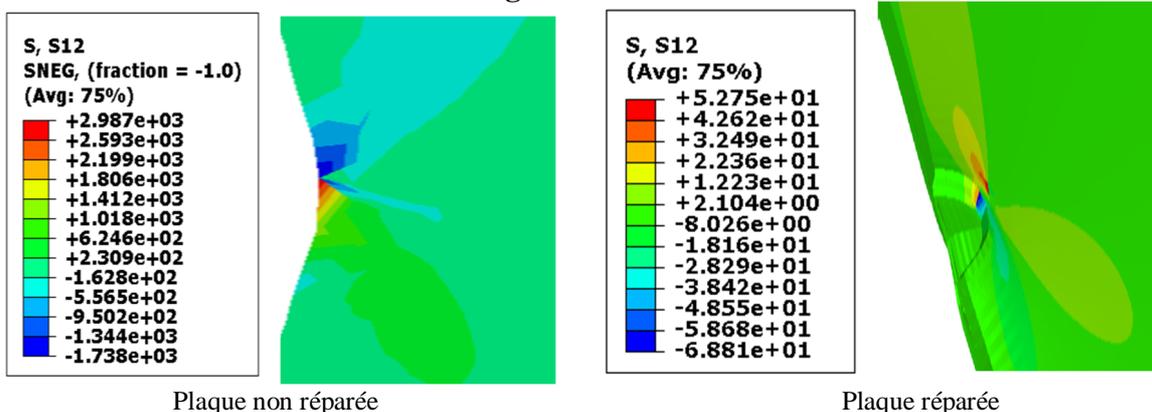
III-5.3. Contraintes tangentielles τ_{xy}

Pour les différentes charges, on compare les différentes contraintes tangentielles pour la plaque non réparée et après sa réparation par patch en composite qui est le carbone/époxy et on a abouti aux résultats suivants :

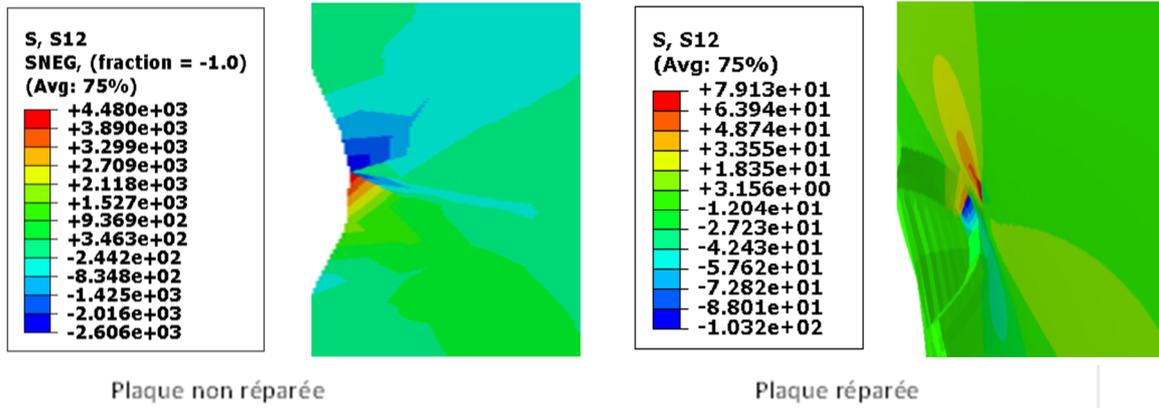
« Chargement 20MPa »



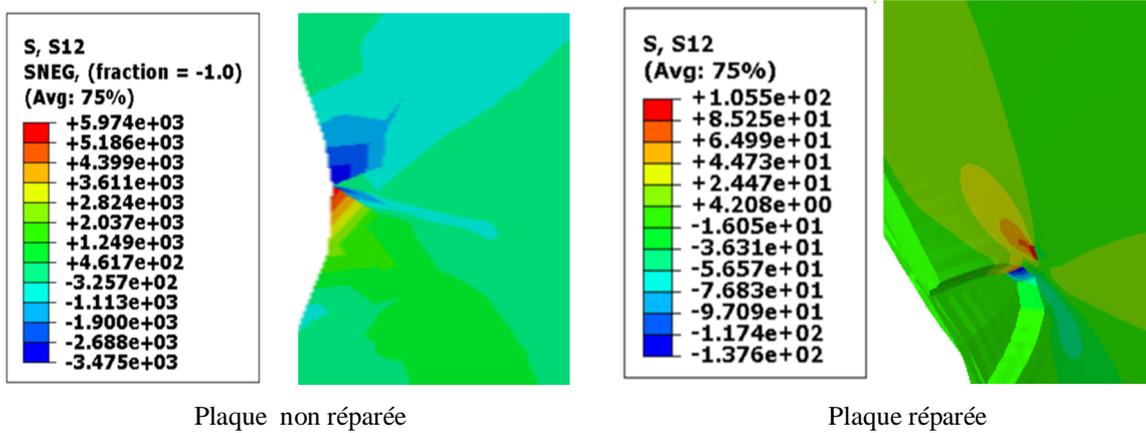
« Chargement 40MPa »



« Chargement 60MPa »



« Chargement 80MPa »



« Chargement 100MPa »

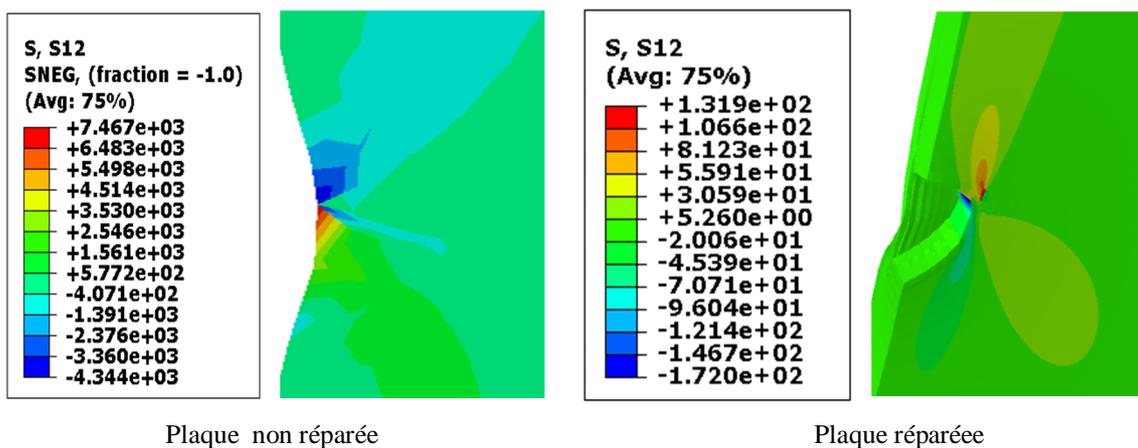


Figure III.12 : Distribution des contraintes tangentielles τ_{xy} .

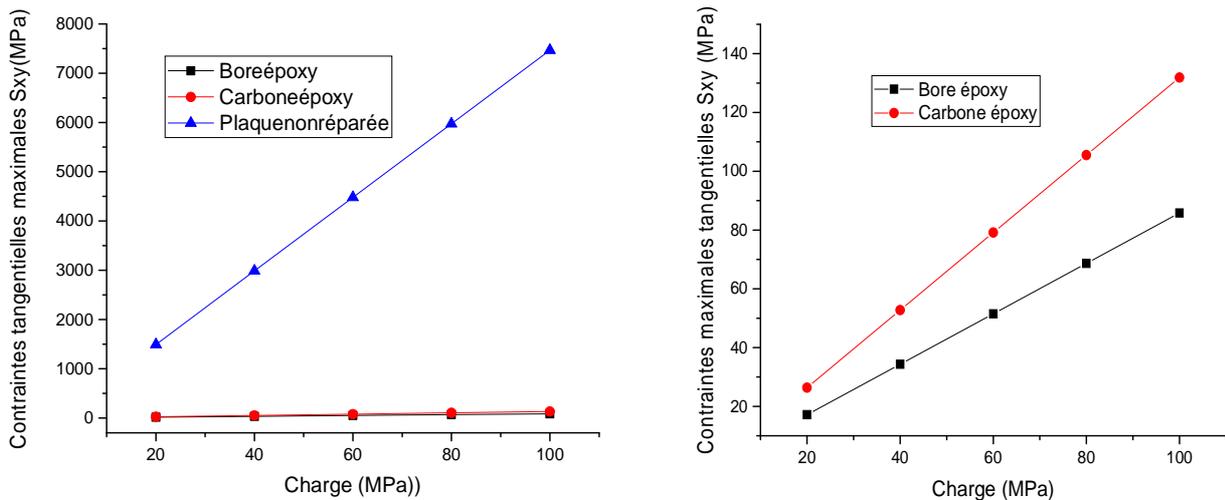


Figure III.13 : Variation des contraintes tangentielles maximales τ_{xy} en fonction des différents chargements.

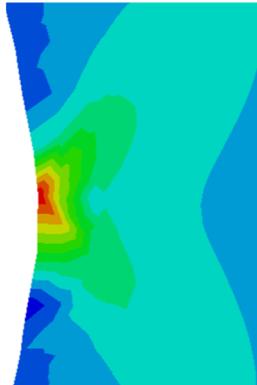
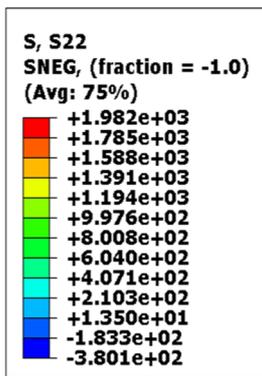
La réduction des contraintes tangentielles est très remarquable lors de la réparation de la plaque pour les différents chargement, ce qui reflète l'efficacité du patch en composite pour la réduction des contraintes induites dans la zone plastique confinée au voisinage de la tête de fissure et réduire la taille de la zone plastique provoquant une diminution de la taille et de la forme du champ de contraintes qui sollicite cette plaque fissurée.

Pour les allures des courbes représentant la variation des contraintes tangentielles maximales τ_{xy} en fonction des différents chargements, le gain en contraintes en allant progressivement de la plaque non réparée vers la plaque réparée par le patch carbone/époxy, jusqu'à la plaque réparée par le composite bore/époxy qui est le plus efficace, pour la réparation et qui est le plus utilisé dans les équipements aéronautiques.

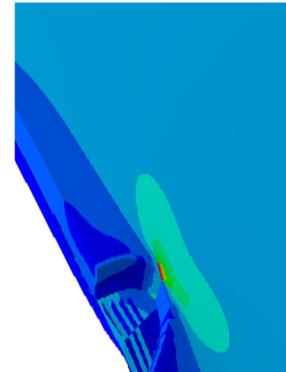
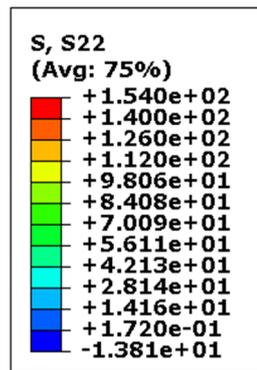
III-5.4. Contrainte normale σ_{yy}

Pour les différentes charges, on compare les différentes contraintes tangentielles pour la plaque non réparée et après sa réparation par patch en composite qui est le carbone/époxy et on a abouti aux résultats suivants :

« Chargement 20MPa »

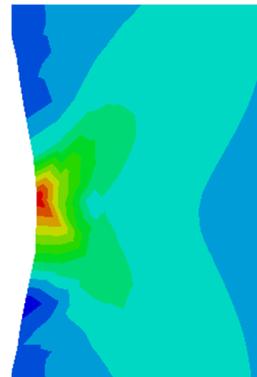
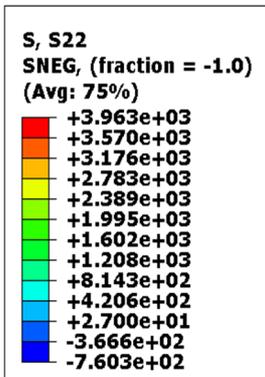


Plaque non réparée

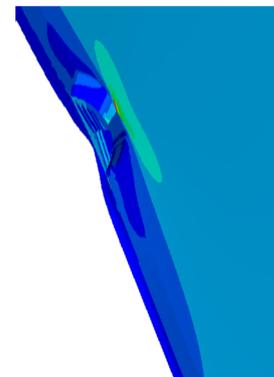
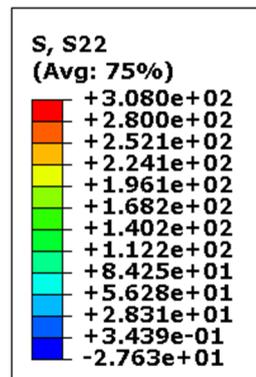


Plaque réparée

« Chargement 40MPa »

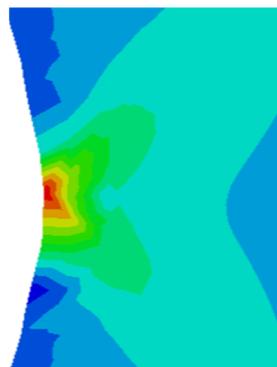
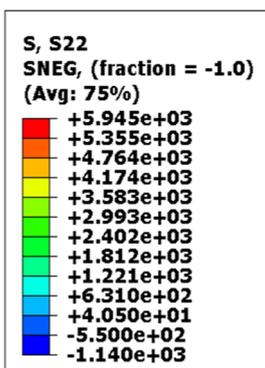


Plaque non réparée

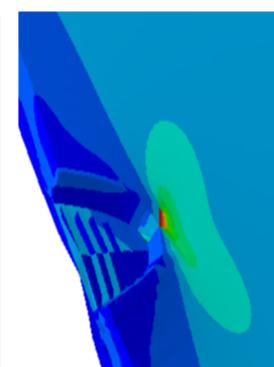
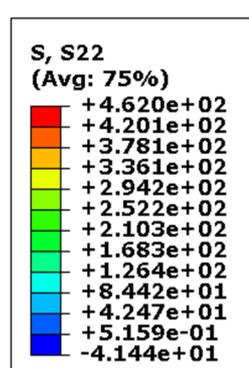


Plaque réparée

« Chargement 60MPa »

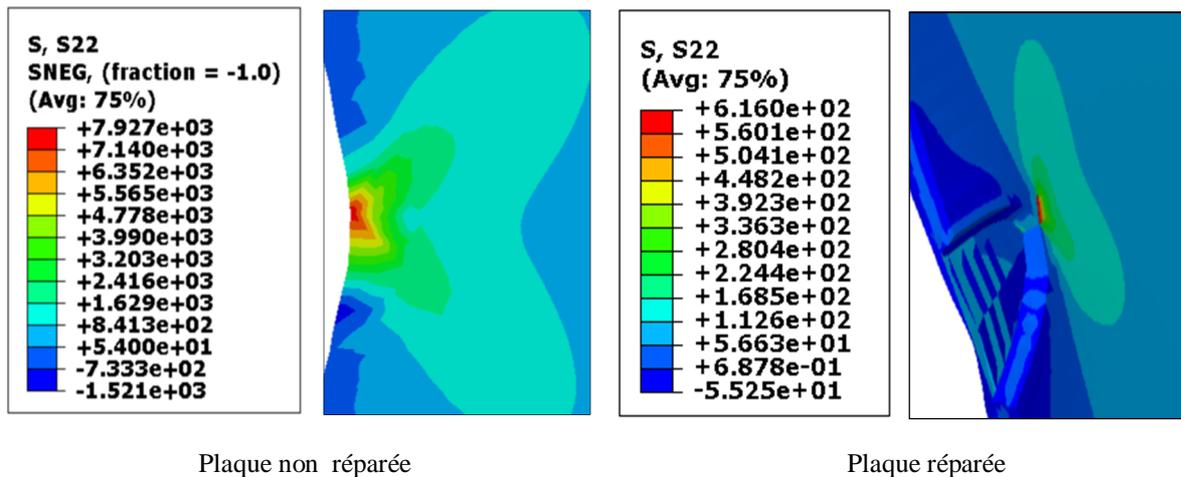


Plaque non réparée



Plaque réparée

« Chargement 80MPa »



« Chargement 100MPa »

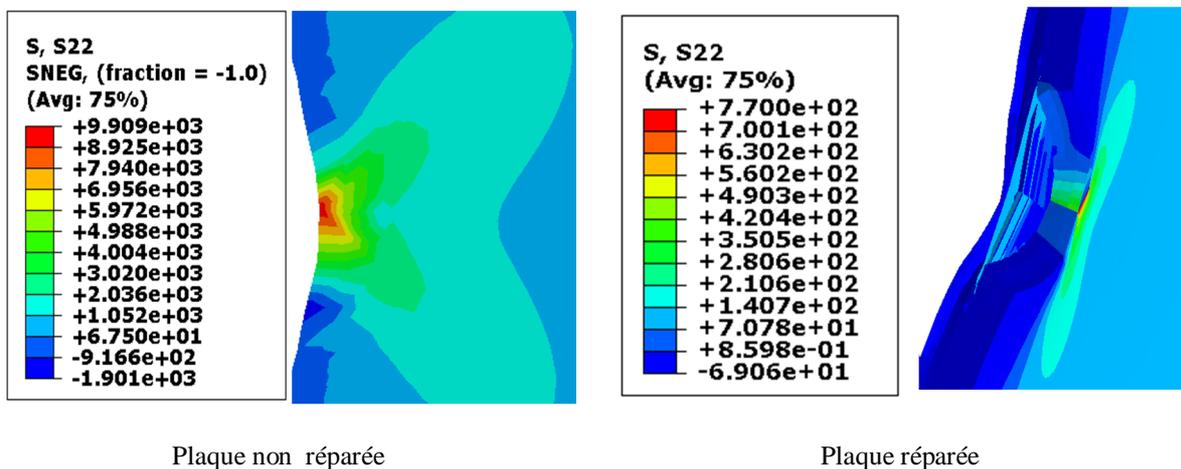


Figure III.14 : Distribution des contraintes normales σ_{yy} .

Pour la répartition des contraintes normales σ_{yy} en fonction des différents chargements, on peut conclure que l'effet de réparation par patch en composite est très distinct, vu les intensités de contraintes qui décroissent pour chaque réparation correspondante à la plaque non réparée, donc, le patch en composite amortit le champ de contraintes induites en fond de fissure et provoque une réduction des contraintes et cela représente une efficacité du phénomène de la réparation par patch en composite.

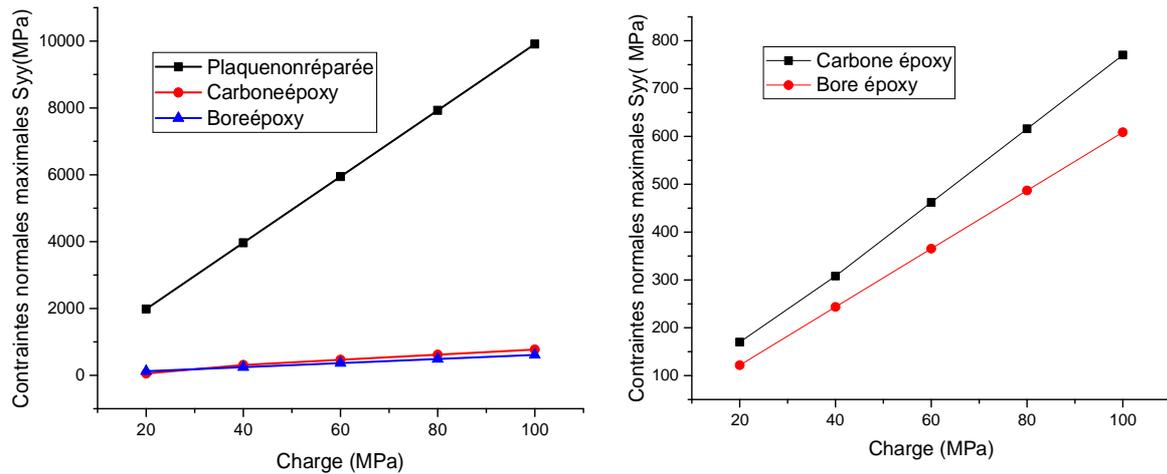


Figure III.15 : Variation des contraintes normales maximales σ_{yy} en fonction des différents chargements.

Tandis que pour la variation des contraintes normales maximales σ_{yy} en fonction des différents chargements des tois composants de notre modele, montre que l’effet de la réparation par patch en composite est très distinct, vu le gain des contraintes qui ont connu des valeurs assez basses relativement à celles trouvées pour la plque fissurée sans réparation, donc le patch en composite est un amortisseur ou un absorbeur de contraintes.

III-6.Intégrale J

Avant de démontrer tous les effets du composite mis en œuvre dans notre étude, et après l’étude des contraintes induites dans cette structure, on est tenté de prouver notre étude par la détermination de l’intégrale J pour le cinquième (05) contour de la zone plastique, et on est arrivé aux résultats suivants :

- **Carbone/époxy**

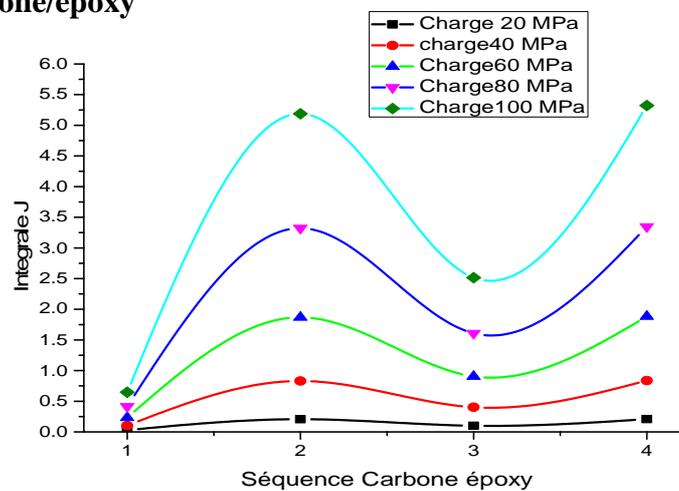


Figure III.16 : Représentation de l’intégrale (J) pour différents chargements.

Cette Figure (III.16) nous montre la variation de l'intégrale J en fonction de chaque séquence (Plie) pour différents chargement pour la plaque réparée par patch en composite qui est (carbone/époxy), on remarque qu'au fur et à mesure que la charge augmente, l'intégrale j correspondante augmente aussi, et que cette intégrale atteint son maximale à la séquence n°2, c'est-à-dire pour l'orientation des fibres à 45°, et cette valeur maximale est de l'ordre 5.3mj/mm².

- **Bore/époxy**

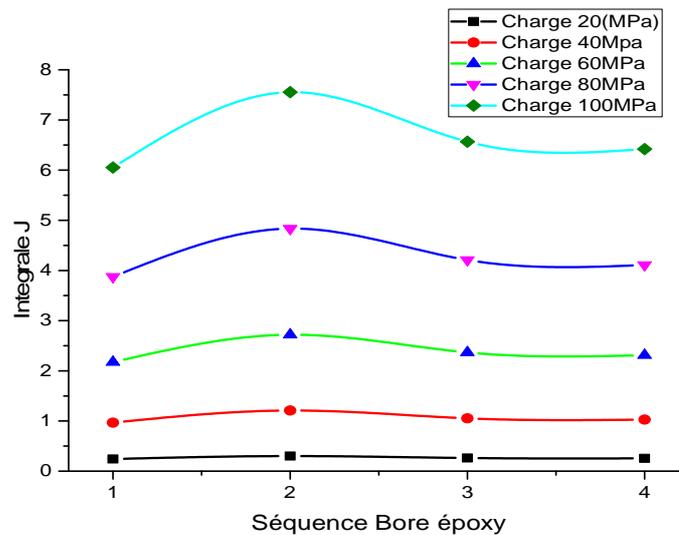


Figure III.17 : Représentation de l'intégrale (J) pour différents chargements.

La variation de l'intégrale J pour des différentes charges pour les quatre séquences d'empilement est presque proportionnelle au chargement, puisque pour des faibles charges telles pour 20MPa et 40MPa, cette intégrale ne dépasse pas les 2.7mj/mm², et atteint son pic qui est de l'ordre de 7.5mj/mm² pour la même séquence avec l'orientation des fibres de 0°, qui correspond à la deuxième plie du composite bore/époxy.

III-7.Conclusion

Pour la répartition des contraintes en fonction des différents chargements, on peut conclure que l'effet de réparation par patch en composite est très distinct, vu les intensités de contraintes qui décroissent pour chaque réparation correspondante à la plaque non réparée, donc, le patch en composite amortit le champ de contraintes induites en fond de fissure et provoque

une réduction des contraintes et cel représente une efficacité du phénomène de la réparation par patch en composite.

la zone affectée au niveau de la tête de fissure, pour la plaque réparée est une zone rouge c'est-à-dire zone à champs de contraintes un peu élevées mais ça prouve une très grande réduction de ces contraintes tangentielles comparativement à celles induites dans la plaque elle-même avant d'être réparée , d'où l'effet de la réparation est important pour l'absorption et l'amortissement de toutes les contraintes induites dans ces types de plaques, surtout en aéronautique.

La réparation par le patch en composite bore/époxy présente plus d'efficacité que le patch carbone/époxy, cela est dû aux propriétés mécaniques et les différentes caractéristiques propres au bore/époxy qui donne des résultats très signifiantes et très performantes pour la réparation.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objet de cette étude est analyser le comportement d'une fissure avec et sans le renforcement par un patch en composite d'une plaque en aluminium en mode I en utilisant la méthode des éléments finis. Le patch de réparation est le Bore/époxy et le Carbone/époxy qui sont utilisés avec beaucoup de succès par de nombreux chercheurs. Les différentes chargements ont été sollicitées sur cette plaque, les différentes contraintes ont été tirées après simulation et faire une comparaison entre contraintes induites dans la plaque non réparée et plaque réparée, ensuite, l'intégrale J a été mis en évidence pour les deux réparations.

D'après cette simulation, on peut tirer les conclusions suivantes :

Pour la répartition des contraintes en fonction des différents chargements, on peut conclure que l'effet de réparation par patch en composite est très distinct, vu les intensités de contraintes qui décroient pour chaque réparation correspondante à la plaque non réparée, donc le patch en composite amortit le champ de contraintes induites en fond de fissure et provoque une réduction des contraintes et celle représente une efficacité du phénomène de la réparation par patch en composite.

La réparation par le patch en composite Bore/époxy présente plus d'efficacité que le patch Carbone/époxy, cela est dû aux propriétés mécaniques et les différentes caractéristiques propres au Bore/époxy qui donne des résultats très significantes et très performantes pour la réparation.

La variation de l'intégrale J pour des différentes charges pour les quatre séquences d'empilement est presque proportionnelle au chargement, puisque pour des faibles charges telles pour 20MPa et 40MPa, cette intégrale ne dépasse pas les 2.7mj/mm^2 , et atteint son pic qui est de l'ordre de 7.5mj/mm^2 pour la même séquence avec l'orientation des fibres de 45° .

Références
bibliographique

Références bibliographiques

- [1]-Thèse **Frédéric Simon**, Endommagement et rupture des joints colles sollicités en traction ou cisaillement application au collage du bois (2001).
- [2]-**Céline GROS**, Durabilité de joints adhésifs silicone sous conditions environnementales sévères : application au packaging en électronique de puissance(2006).
- [3]-**Shiuh-Chuan Her**. L'analyse des contraintes de joint adhésif à simple recouvrement, Structures Composite 47 (1999) 673–678.
- [4]-Thèse Romain **LEGER**. Contribution à l'étude de la durabilité des structures collées soumises à des efforts mécaniques après vieillissement humide (2010).
- [5]-**Petit J, Baziard Y, Nassiet V & Hassone-Rhabbour, B.** (2006). Durabilité des assemblages collés : Approche prédictive. Techniques de l'ingénieur, BM 7 667.
- [6]-**Volkersen O.** (1938). Die nietkraftverteilung in zugbeanspruchten mit konstanten laschenquerschnitten. Luftfahrtforschung, 15, 41-47.
- [7]-**Goland M., & Reissner E.** (1944). The stresses in cemented joints. J. appl. mech., A17-A26.
- [8]-**Ferlund, G., & Spelt, J.** (1994). Mixed-Mode Energy Release Rates for Adhesively Bonded 218 Beam Specimens. J. Comp. Tech. Res., 16 (3), 234-243.
- [9]-**Outwater J & Gerry D.** (1969). On the Fracture Energy, peeling Velocity and Refracture Energy of Cast Epoxy Resin. J. Adhésion, 1 (4), 290-298.
- [10]-**Kies J., & Clark, B.** (1969). Dans P. Pratt, Fracture (p. 483). London: Chapman and Hall.
- [10]-**J.P.M. Gonçalves, M.F.S.F. de Moura, P.M.S.T. de Castro**, Un modèle d'élément fini tridimensionnel pour l'analyse des contraintes des joints adhésifs, Journal international d'adhérence et d'adhésifs 22 (2002) 357–365.
- [11]-**Cho K & Gent, A.** (1985). An improved torsional method for determining the fracture toughness of stiff materials and of adhesive joints. Int. J. Frac., 28 (4), 239_244.
- [12]-**Zanni-Deffarges M, Shanahan M.** (1993). Evaluation of adhesive shear modulus in a torsional joint: influence of ageing. Int. J. Adhesion Adhesives, 13 (1), 41-45.
- [13]-**Kendall K.** (1971). The adhesion and surface energy of elastic solids. J. Phys. D: Appl. Phys., 4 (8), 1186.
- [14]-**Kendall K.** (1973). The Shapes of Peeling Solid Films . J. Adhesion, 5 (2), 105-117.
- [15]-**Chai H.** (1988). Shear fracture. Int. J. Frac., 37 (2), 137-159.
- [16]-**Cognard J.** (2000). Science et Technologies du Collage. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- [17]-**Costa Mattos H. Sampaio E & Monteiro E.** (2010). Static failure analysis of axially

Références bibliographiques

loaded aluminium–epoxy butt joints. *Int. J. Adhesion Adhesives*, 30 (8), 774-780.

[18]-**Adam A, Kinloch A, Digby R & Shaw, S.** (1999). Dans *Durability of Organosilane Pretreated Adhesive Joints* (pp. 205-210). Cambridge

[19]-**Z. Chen a, R.D. Adams, Lucas F.M. da Silva,** La prévision du déclenchement et de la propagation crack de joint à simple recouvrement avec un critère d'échec d'énergie, *Mécanique de rupture de technologie* 78 (2011) 990–1007.

[20]-**B. Kilic, E. Madenci, D.R. Ambur,** L'influence de l'adhésif se répandent dans le joint à simple recouvrement, *Energie Mécanique de rupture de technologie* 73 (2006) 1472–1490.

[21]-thèse **Shixiang Ma** .Propagation de fissure en mode mixte dans un milieu élasto-plastique avec prise en compte des contraintes résiduelles. *Mechanics* .Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2005. French.

[22]-livre **Jean-louis chaboche.** *Mécanique des matériaux solides.* Dunod , Paris ,2001.2004.Pour la nouvelle présentation, dunod, Paris ,1996.Bordas,1988.

[23]-**Sébastien GRANGE –jean-loup PRENCIER** la mécanique de la rupture et la mesure de la ténacité (20/04/2007).

[24]-thèse **Dahaoui Mourad.** Effet des préformations sur le comportement en fatigue des alliages d'aluminium A durcissement structural. Université Aboubekr belkaid-telemcen.2012.2013.

[25]-**Jean-marie berthelot** *Mécanique des matériaux et structures composites* le Mans France.

Résumé :

L'objet de cette étude est analyser le comportement d'une fissure avec et sans le renforcement par un patch en composite d'une plaque en aluminium en mode I en utilisant la méthode des éléments finis. Le patch de réparation est le Bore/époxy et le Carbone/époxy qui sont utilisés avec beaucoup de succès par de nombreux chercheurs .Les différentes chargements ont été sollicitées sur cette plaque, les différentes contraintes ont été tirées après simulation et faire une comparaison entre contraintes induites dans la plaque non réparée et plaque réparée, ensuite, l'intégrale J a été mis en évidence pour les deux réparations.

Summary :

The purpose of this study is to analyze the behavior of a crack with and without the reinforcement by a composite patch of an aluminum plate in mode I using the finite element method. The patch of repair is Bore/epoxy and Carbon/epoxy, which are used with a lot of success by many researchers. The different loadings were solicited on this plate, the various stresses were drawn after simulation and make a comparison between constraints induced in the unrepaired plate and repaired plate, then the integral J was highlighted for both repairs.

الملخص:

الغرض من هذه الدراسة هو تحليل سلوك الشق مع وبدون التعزيز من خلال تصحيح مركب من لوحة الألومنيوم في الوضع I باستخدام طريقة العناصر المحددة. تصحيح الإصلاح هو البورون / الايبوكسي والكربون / الايبوكسي الذي يستخدم بنجاح كبير من قبل العديد من الباحثين ، وقد تم التماس التحميلات المختلفة على هذه اللوحة ، وتم رسم القيود المختلفة بعد المحاكاة وإجراء مقارنة بين القيود. المستحث في الصفيحة غير المعالجة واللوحة التي تم إصلاحها ، ثم تم تسليط الضوء على التكامل J لكل من الإصلاحات.