



République Algérienne Démocratique et Populaire
Université Ibn Khaldoun de Tiaret



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique

MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electromécanique

Parcours : Master

Spécialité : Maintenance Industrielle

Thème

**Analyse du comportement d'une fissure
central avec et sans renforcement par un
patch en composite d'une plaque en alliage
d'aluminium 70 75**

Préparé par :

Guessas kheira et Oujdi Housseem

Soutenu publiquement le : 20 / 06 / 2024, devant le jury composé de :

M.MOULGADA ABED EL MADJID	Professeur (Univ. Ibn Khaldoun)	President
M.ZAGANE Mohamed SALEH	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M.BENARBIA DJAMILA	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. SAAD MOHAMED	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadreur

Année universitaire : 2023 - 2024

Remercîments

Nous remercions, en premier lieu, « ALLAH » le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous adonnées pour terminer ce projet

*Nous tenons à remercier sincèrement Monsieur **SAAD MOHAMED**, notre encadreur, pour toute son attention, sa disponibilité, ses conseils, et Pour ses encouragements pendant toute cette période de Réalisation de ce mémoire*

*Nous remercions également les membres du jury on remercie professeur **MOULGADA ABEDLMADJID** pour avoir accepté de présider le jury de notre mémoire*

*Nos sincères remerciements vont également à Messieurs **ZAGANE MOHAMED** et Messieurs **BENARBIA DJAMILA** qui nous ont fait l'honneur d'être examinateur de notre mémoire*

Remercier particulièrement tous nos collègues de Génie mécanique de l'Université Ibn Khaldoun, Tiaret

Dédicaces

Je dédie ce travail

À celle qui m'a arrosé de tendresse et d'espoirs, à la source d'amour incessible, à la mère des sentiments fragiles qui ma bénie par ces prières ma mère À mon support dans ma vie

Oujdi Housseem

Liste des Figures

Chapitre I

Figure I.1: schéma du matériau composite [1]	4
Figure I.2 : chînes et trame d'un tissu	9
Figure I.3 : Types d'armure utilisés pour le tissage	10
Figure I.4 : Les différentes fibres [7]	11
Figure I.5 : composites selon la forme du renfort	12
Figure I.6 : Amé en mousse [11]	16
Figure I.7 : Structure de sandwich [11].....	16
Figure I.8 : Structure stratifié [12].....	17
Figure I.9 : Désignation des stratifié [13].....	18
Figure I.10 : Orientation des fibres [13].....	18

Chapitre II

Figure II.1 : Rupture fragile [17].....	23
Figure II.2 : Rupture ductile [17]	23
Figure II.3 : la courbe contraint déformation pour matériau fragile et ductile [18]	24
Figure II.4 : défaut elliptique dans une plaque infinie [22].....	27
Figure II.5 : les différents modes de fissuration [24]	28
Figure II.6 : propagation d'une fissure dans une plaque pré-fissurée [23]	30
Figure II.7 : Schéma des lignes de chargements [26].....	31
Figure II.8 : Configuration équivalents d'entailles [27]	32
Figure II.9 : Schéma de principe du meulage [28]	32
Figure II.10 : réparation par soudage [29].....	33
Figure II.11 : réparation par rivetage [31]	34
Figure II.12 : patch riveté et collé [32]	35
Figure II.13 : type de collage [33].....	36

Chapitre III

Figure III.1 : présentation du maillage de la plaque	41
Figure III.2 : présentation de la fissure.....	42
Figure III.3 : l'évolution du FIC en fonction de a de plaque sans renforcement.....	42
Figure III.5 : l'évolution du FIC en fonction de a avec et sans patch pour un seul pli	43
Figure III.6 : l'évolution du FIC en fonction de a avec et sans patch pour 2 plis.....	44
Figure III.7 : l'évolution du FIC en fonction de a avec et sans patch pour 3 plis.....	44
Figure III. 8 : l'évolution du FIC sans patch et avec deux patch à un seul pli	45

Figure III.9 : l'évolution du FIC sans patch et avec deux patch à 2 plis	46
Figure III.10 : l'évolution du FIC sans patch et avec deux patch avec 3 plis	46
Figure III.11 : l'évolution du FIC avec deux patches et sans patch pour $e_a=0.2\text{mm}$	47
Figure III.12 : l'évolution du FIC avec deux patch et sans patch deux pour $e_a=0.3\text{mm}$	48
Figure III.13 : l'évolution du FIC avec deux patch et sans patch pour $e_a=0.4\text{mm}$	48
Figure III.14 : déformation de la plaque réparée avec un seul patch à un pli	49
Figure III.15 : déformation de la plaque réparé ave un patch à deux plis.....	49
Figure III.16 : déformation de la plaque réparée avec un patch à 3 plis.....	51
Figure III.17 : distribution des contraintes autour de la fissure	51
Figure III.18 : déformation de la plaque avec double recouvrement à un pli	51
Figure III.19 : déformation de la plaque avec double recouvrement à 2 plis	52
Figure III.20 : déformation de la plaque avec double recouvrement à 3 plis	53
Figure III.21 : décohésion du patch de la plaque.....	53
Figure III.22 : distribution des contraintes au tour de la fissure	53
Figure III.23 : déformation de la plaque réparée avec double recouvrement avec $e_a=0.2\text{mm}$	54
Figure III.24 : déformation de la plaque réparée avec double recouvrement avec $e_a=0.3\text{mm}$	54
Figure III.25 : déformation de la plaque réparée avec double recouvrement avec $e_a=0.4$	55

Liste des tableaux

Tableau I.1 : caractéristique des résines thermodurcissable [4].....	6
Tableau I.2 : caractéristiques des thermoplastiques [4]	7
Tableau I.3 : caractéristiques mécaniques des fibres [4].....	12
Tableau III.1 : caractéristiques mécaniques des matériaux	41

Table des matières

Liste des Figures	4
Liste des tableaux	6
Abréviation et symbole.....	9
Introduction générale.....	1
I.1 Introduction.....	4
I.2 Définition du matériau composite	4
I.3 Constituants d'un matériau composite	4
I.3.1 La matrice.....	4
1.3.1.1 Matrice métallique.....	5
1.3.1.2 Matrice céramique	5
1.3.1.3 Matrice organique (résine).....	5
I.3.2 Les charges et additif.....	7
I.3.3 Le renfort.....	7
I.3.3.1 Renfort à particule.....	8
I.3.3.2 Les fibres.....	8
I.4 Classification des composites	12
I.4.1 Classification selon la forme du renfort.....	13
I.4.1.1 Composites à particule.....	13
1.4.1.2 Composite flake	13
1.4.1.3 Composites à fibre	13
I.4.2 Classification selon la nature de la matrice.....	13
1.4.2.1 Composites à matrice métallique	13
I.4.2.2 Composites à matrices céramique	14
I.4.2.3 Composites Carbon- Carbon	14
I.4.2.4 Composites à matrice organique (polymère).....	14
I.5 Caractéristiques et propriétés des composites	14
I.5.1 Fraction massique et volumique	15
I.6 Architectures des composites.....	16
1.6.1 Composites sandwich :	16
1.6.2 Les stratifiés	17
I.6.2.1 Désignation des stratifiés.....	18
I.7 Conclusion	19

II.1 INTRODUCTION	21
II.2 Généralités sur mécanique de la rupture	22
II.2.1 Concept de la mécanique de rupture linéaire (MLR)	22
II.2.2 Mécanismes de rupture	24
II.3 Notion de la mécanique de la rupture linéaire élastique	24
II.3.1 Taux d'énergie disponible G	24
II.3.2 Facteur d'intensité des contraintes K	25
II.3.3 Concentration des contraintes près d'un défaut	26
II.4 Propagation de la fissure	27
II.4.1 Les différents modes de fissuration	28
II.4.2 Processus de fissuration	28
II.4.3 Amorçage des fissures	29
II.5 Les techniques de réparation	30
II.5.1 Méthode du perçage d'un trou	30
II.5.2 Technique de meulage	32
II.5.3 Réparation par soudage	32
II.5.4 Réparation par rivetage	33
II.5.5 La réparation par patch	34
II.5.5.1 Technique de Collage d'un patch	35
II.6 Conclusion	37
III.1 Introduction	39
III.2 Présentation du logiciel utilisé	Erreur ! Signet non défini.
III.3 Description géométrique de modèle	40
III.4 Résultats et discussions	41
III.4.1 Evolution du facteur d'intensité de contrainte	41
III.4.1.1 Model sans patch	41
III.4.1.2 Model avec un seul patch	42
III.4.1.2.1 Influence du nombre de plis et d'orientation des fibres	43
III.4.1.3 Model avec double patches	45
III.4.1.3.1 Influence du nombre de plis et d'orientation	45
III.4.1.3.2 Influence d'épaisseur de la couche d'adhésive	47
III.4.2 Etat de la plaque et distribution des contraintes	49
III.4.2.1 Influence d'un seul patch	49
III.4.2.2 Influence de deux patches	51
III.5 Conclusion	55
Conclusion générale	56

Abréviation et symbole

$T(f)$: température finale

ρ : la masse volumique

ε : allongement maximal

σ_c : résistance maximal de compression

σ_t : résistance maximal de traction

E : module de Young

P_f : la masse volumique de fibre

P_c : la masse volumique de composite

P_m : la masse volumique de matrice

V_m : volume massique de matrice

V_c : volume massique de composite

V_f : volume massique de fibre

G : la force d'extension de fissure

dp : énergie potentielle totale de la structure fissurée

dA : surface de fissure

F : force appliquée

∂C : rapport de proportionnalité entre le déplacement provoqué par la force F

K : facteur d'intensité de contraint en $\text{MPa}\sqrt{m}$

Y : coefficient de correction géométrique

a : la longueur de fissure

K_{IC} : la ténacité en $\text{MPa}\sqrt{m}$

σ_c : la contrainte critique applique

σ_y : la contrainte dans la direction y

σ_{\max} : la contrainte locale.

ϵ_{\max} : la déformation locale.

σ_N : la contrainte nominale.

ϵ_N : la déformation nominale.

TIG : Tungstène inert gaz

MIG : Métal inert gaz

Introduction générale

Introduction générale

Le contenu du présent travail s'inscrit dans un contexte technologique, en interaction avec plusieurs secteurs tels que, l'aéronautique, l'automobile et la construction. Nombreux défis liés aux défaillances des structures sont produits due aux plusieurs facteurs notamment les charges externes, les défauts internes des matériaux et l'environnement.

Les fissures, l'usure, la corrosion sont des défaillances majeures dans le domaine industriel, qui doivent être détecter et maintenir pour assurer la continuité des opérations. La fissure représente une discontinuité du matériau. Elles se défèrent selon le type de chargement exercé sur le matériau (fissure thermique, de corrosion, de contrainte et de fatigue...), résultantes souvent la fatigue, les conditions environnementales ou des contraintes successives. Les fissures peuvent être représenter par des géométries simples pour comprendre leur comportement mécanique et leur propagation.

Le problème rencontré arrêter la propagation des fissures et optimiser l'efficacité des structures mécaniques et assurer la capacité, la robustesse et la condition de travail, en particulier réduire l'énergie de rupture au point de fissure par réparation par patch composite, fiabilité des structures réparées par patchs composites dépendent essentiellement du comportement mécanique de la couche adhésive. La prévention des fissures revête une importance décisive pour minimiser le cout de maintenance et pour assurer la suret » de fonctionnement des équipements en propageons leur duré de vie. Une fois les structures sont endommagées elles doivent être réparées et renforcer afin d'empêcher la propagation des fissures qui en fonction des sollicitations thermiques et/ou mécaniques.

La réparation est une action de maintenance préventive et corrective au même temp, elle a pour fonction de remettre en état un équipement endommagé afin de lui rendre en fonctionnement normale.

Objective de notre travail est fournir aux hommes de maintenance un outil ou méthode d'aide pour réparer structures endommages et présente des résultats réels qui peuvent être utilisés comme plate formes,

Pour ce faire, cette mémoire, a été synthétisé en trois chapitres le premier chapitre est consacré d'une manière générale aux matériaux composites, matériaux constitutifs et leur classification. Le deuxième chapitre présente en premier lieu le concept de la mécanique de rupture et les notions de rupture, deuxième lieu les techniques de réparations, nous avons mentionné différentes et plusieurs méthodes de réparation sont recommandées pour les fissures, la réparation par soudage, rivetage, boulonnage ainsi que la réparation par patch. le patch riveté et collé . Chaque méthode doit être adapter à une situation spécifique. Enfin, le troisième chapitre est une étude de cas application la méthode de

réparation par patch composite, en prenant compte du matériau, nombre de pli et orientation des fibres avec variation de l'épaisseur de la couche d'adhésive et de la fissure ainsi que les sollicitations mécaniques et les conditions environnementale aux quelle la pièce est soumise. Pour les pièces métalliques, avec utilise logiciel Abaqus qui analyser le comportement mécanique d'une fissure centrale dans une plaque en aluminium réparée par patch en composite. Une analyse sur l'effet des paramètre géométrique et mécanique du patch en Carbone/Epoxy sur l'efficacité et la compatibilité de la réparation par patch en Carbone/Epoxy en concentrant sur l'évolution du facteur d'intensité de contrainte. A la fin une conclusion a été clôturer notre travail.

Chapitre I

Généralités sur les matériaux Composites

I.1 Introduction

Les matériaux composites ont apporté une révolution majeure dans le domaine de l'ingénierie moderne, ouvrant un vaste éventail de perspectives dans la conception et la production de produits novateurs. En associant les avantages de diverses phases constitutives, ces composites offrent la possibilité de créer des matériaux sur mesure, adaptés aux exigences spécifiques d'une multitude d'applications. Des secteurs aussi variés que l'aéronautique, l'aérospatiale, l'automobile et l'industrie en général ont bénéficié de ces avancées.

I.2 Définition du matériau composite

Un matériau composite est la combinaison de deux ou plusieurs matériaux de différentes natures. Il est constitué d'une phase continue qui s'appelle la **matrice** renforcée par une phase discontinue appelée **renfort** sous forme des particules des fibres ...Le matériaux renforçant est plus dure que la matrice

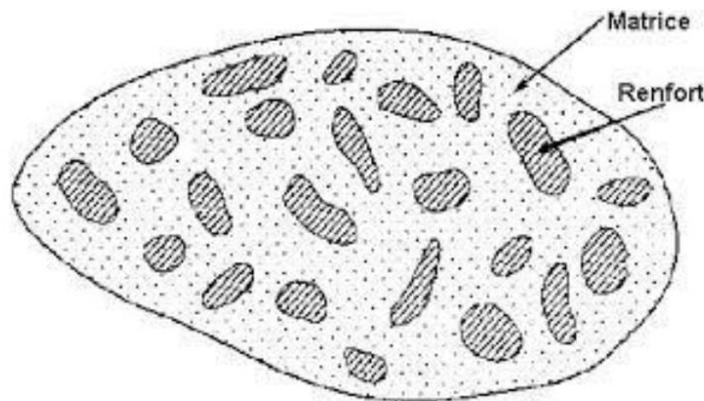


Figure I.1:schéma du matériau composite [1]

I.3 Constituants d'un matériau composite

I.3.1 La matrice

Le cadre continu dans lequel les renforts sont insérés est appelé « matrice », ce qui implique que n'importe quel point du matériau peut être relié par un chemin traversant. Alors elle doit être suffisamment déformable et assez compatibles avec le renfort. [2]

La matrice elle-même peut être un ensemble des matériaux qui se comporte comme un matériau homogène. Elle assure la protection du renfort de milieu extérieur et assure aussi la liaison des particule ou fibres du matériaux renforçant.

La matrice a comme fonctions essentielle le support des renforts des additif et des charges, et le transfert des charges mécaniques au renfort.

On a plusieurs types de matrice selon la nature du matériaux, matrice métallique, matrice céramique et matrice organique s'appelle aussi résine.

1.3.1.1 Matrice métallique

Les métaux et leurs alliages sont utilisés due au leur propriété mécanique. Ainsi, l'aluminium, le titane et le magnésium sont les métaux les plus couramment utilisés pour les matrices (Elaboration de composites à matrice métallique d'alliages d'aluminium par projection à froid)

1.3.1.2 Matrice céramique

Les composites à matrice céramique (CMC), grâce à leurs bonnes propriétés thermomécaniques à hautes températures (entre 400 et 3000°C) et à leur faible densité (entre 1.8 et 3.2), sont des matériaux de choix pour des applications structurales.[3]

1.3.1.3 Matrice organique (résine)

Les résines utilisées sont des polymères, modifiés par différents adjuvants et additifs (berthlot)

Il existe deux grandes familles de résines thermodurcissables et thermoplastique

✓ **Résine thermodurcissables (Berthelot)**

- Sont des polymères qui possède des propriété thermomécaniques et mécanique assez fort que les thermoplastiques, ne sont pas recyclable. Les résines thermodurcissables sont classées par ordre décroissant en tonnage :
- Les résines polyptères insaturé se sont les résines les plus utilisées due au faible cout de production, facilité de fabrication. Ces résines sont classées suivants leur module d'élasticité en : résines rigides, souple ; et semi-rigides. les polyptères rigides sont les plus utilisés.

Ils ont comme avantages : une bonne rigidité, un faible cout, la facilité de fabrication et de mise on ouvre, parmi ses inconvénients :la sensibilité à la fissuration, nécessiteux recouvrement du matériaux.

Les résine de condensation comportent les résines phénoliques (la bakélite), les résines aminoplastes et les résines furaniques.

Les résines phénoliques seront donc utilisées dans le cas des pièces nécessitants une tenue élevé de température ou une bonne résistance aux agents chimiques.

Les caractéristiques de résines aminoplastes sont voisines de celles de résines phénoliques. Aux avantages de ces résines, il faut ajouter :

1. La possibilité d'utilisation alimentaires
2. La possibilité de colorer les résines
3. Les résines furaniques sont assez peu utilisées en France à cause de leur coût [1]

✓ **Les résines époxydes :**

Les résines les plus utilisées après les résines polyesters insaturées sont les résines époxydes. Elle ne représente cependant que de l'ordre de 5% du marché composites, à cause de leurs prix élevés (de l'ordre de cinq fois plus que les résines polyesters)

Du fait de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, les résines époxydes, généralement utilisées sans charges, sont les matrices des composites à hautes performances (construction aéronautiques, espace, missiles, etc)

Parmi les avantages des résines époxydes, nous résumons :

- De bonnes propriétés mécaniques (en traction, flexion, compression, choc, fluage, etc) supérieures à celles des polyesters ;
- Une excellente résistance chimique
- Une excellente adhérence aux matériaux métalliques

Parmi les inconvénients :

- Un coût élevé Une sensibilité à la fissuration [4]

Tableau I.1 : caractéristiques des résines thermodurcissables [4]

Résines	T_f (°C)	ρ (kg/m ³)	ϵ^R (%)	σ_t (MPa)	σ_c (MPa)	E (GPa)
Polyesters	60 à 100	1140	2 à 5	50 à 85	90 à 200	2,8 à 3,6
Phénoliques	120	1200	2,5	40	250	3 à 5
Époxydes	290	1100 à 1500	2 à 5	60 à 80	250	3 à 5

✓ **Résine thermoplastique**

Thermoplastique c'est-à-dire plastique. leur faible coût due à la disponibilité de la matière première (le plastique), la facilité de fabrication et propriétés mécaniques et thermo mécaniques assez faibles.

Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont solides et nécessitent une transformation à très haute température. Les polychlorures de vinyle (PVC), les polyéthylènes, polypropylène, polystyrène, polycarbonate polyamide sont quelques exemples de ces résines thermoplastiques. Les résines thermoplastiques classiquement rencontrées sont PEEK, K3B [4]

Les divers thermoplastiques peuvent être renforcé par des fibres et font partie alors des matériaux composites. Cependant, dans le domaine des composites, les résines thermoplastiques ont un développement limité, du fait de la nécessité de faire appel à des transformation à hautes températures de produits solides.[4]

Tableau I.2 : caractéristiques des thermoplastiques [4]

Résines	T_f (°C)	ρ (kg/m ³)	s^R (%)	σ^R (MPa)	σ^R (MPa)	E (GPa)
Polyamide	65 à 100	1140		60 à 85		1,2 à 2,5
polypropylène	900	1200		20 à 35		1,1 à 1,4

I.3.2 Les charges et additif

Ce sont des produits ajoutés pour améliorer les propriétés la résine et aussi pour réduire le cout .la quantité de ce dernier ne dépasse pas 10% pour les charges et 1% pour les additifs.

Deux types de charge existante, les charge renforçant sert à améliorer les caractéristiques mécaniques de la matrice, et les charge non-renforçant sert à conserver les performances de la matrice ou améliorer certaine propriété

“Les additifs se trouvent en faible quantité (quelque % et moins) et intervient comme :

- Lubrifiant et agents de moulage.
- Pigments et colorants.
- Agents anti-retrait
- Agents anti-ultraviolets [1]

I.3.3 Le renfort

Le matériau renforçant dans un composite, l’ajout du renfort est pour assurer les hautes performances mécaniques du composite. Le choix du renfort fait selon leur origine (minérale végétal, synthétique ..., les propriétés recherchées pour la structure à réaliser et le cout.

Les caractéristiques recherchées pour les renforts : caractéristique mécanique élevées, masse volumique faible, bonne compatibilité avec la matrice, facilitée de mise en œuvre, faible cout [1]

- Il existe deux types de renfort à particule et fibre :

I.3.3.1 Renfort à particule

Le renfort à particule son sous forme plats dans la matrice Nous désignons par le terme de « particules » toutes les morphologies de renfort quasi isotropes (facteur l/d (longueur/diamètre) compris entre 0,2 et 1). Ces morphologies peuvent être de type sphérique ou aciculaire. Dans les composites à matrice aluminium, les renforts particuliers les plus utilisés sont le carbure de silicium et l'alumine, de type aciculaire.

Pour les renforts de particules, les fractions volumiques généralement employées varient entre 10 et 50 %. La taille moyenne des particules peut varier entre 5 et 50 μm , suivant les fournisseurs et les types d'application envisagés. Pratiquement, il y a toujours une dispersion de taille des particules autour d'une valeur moyenne, et les comparaisons entre les propriétés obtenues sur les composites doivent tenir compte de l'histogramme de distribution des tailles.

Les particules peuvent être directement associées au métal sous forme dispersée par mélanges, ou préparées en préformes et imprégnées ultérieurement par le métal [5]

I.3.3.2 Les fibres

La forme fibreuse est une forme de matière extraordinaire possédant une résistance à la rupture et un module d'élasticité plus élevé que du matériau sous forme massive.

Les renforts à fibre existant sous plusieurs formes :

- Forme linéique (fils, mèches)
- Tissu surfacique (les mats et tissus simple) et sou forme multidirectionnelle (tissus complexe, tresses)
-
- **Fibre linéique :**

Les fibres sont élaborées suivant un diamètre de quelque micromètre, et ne peuvent pas être utilisées sous forme unitaires, sont réunis en fils ou en mèches de formes différents .

Une seule fibre unitaire appelé filament élémentaire ou monofilament. les fils et les mèches sont constituées de plusieurs monofilaments réunis. les fils sont soit continus ou discontinus et sont caractérisés par le nombre de filaments et leur diamètre et la masse linéique du renfort.

- **Fibre tissus surfacique :**

il existe plusieurs types :

- Les mats Sont de nappes de fils déposés dans un plan, la déformabilité des mats due à leurs formes mats à fils continue permettent d'obtenir un allongement régulier dans toutes les directions par contre les mats à fils discontinus sont peu déformables. parmi les applications des mats le moulage.
- Les tissus et rubans Les rubans (tissus) sont un entrecroisement entre les fils de chaîne, ensemble de fils parallèles et réparties dans un plan avec des fils de trame. les tissus varient en fonction du type de fils utilisés et des modes d'entrecroisements des fils de chaînes.

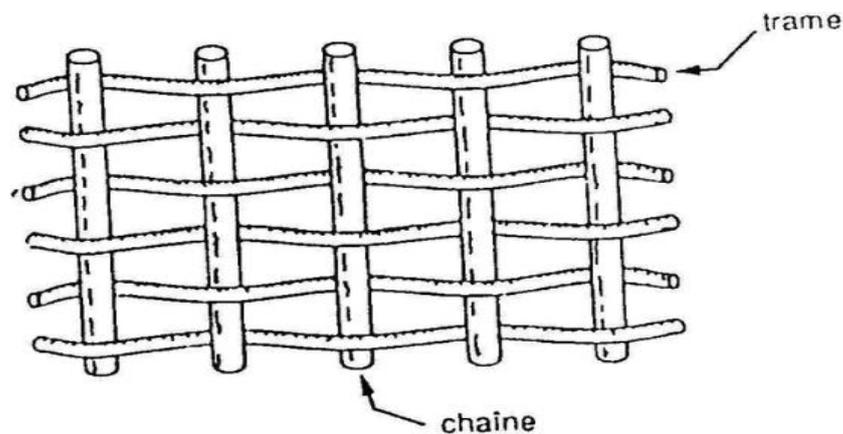


Figure I.2 : chaînes et trame d'un tissu

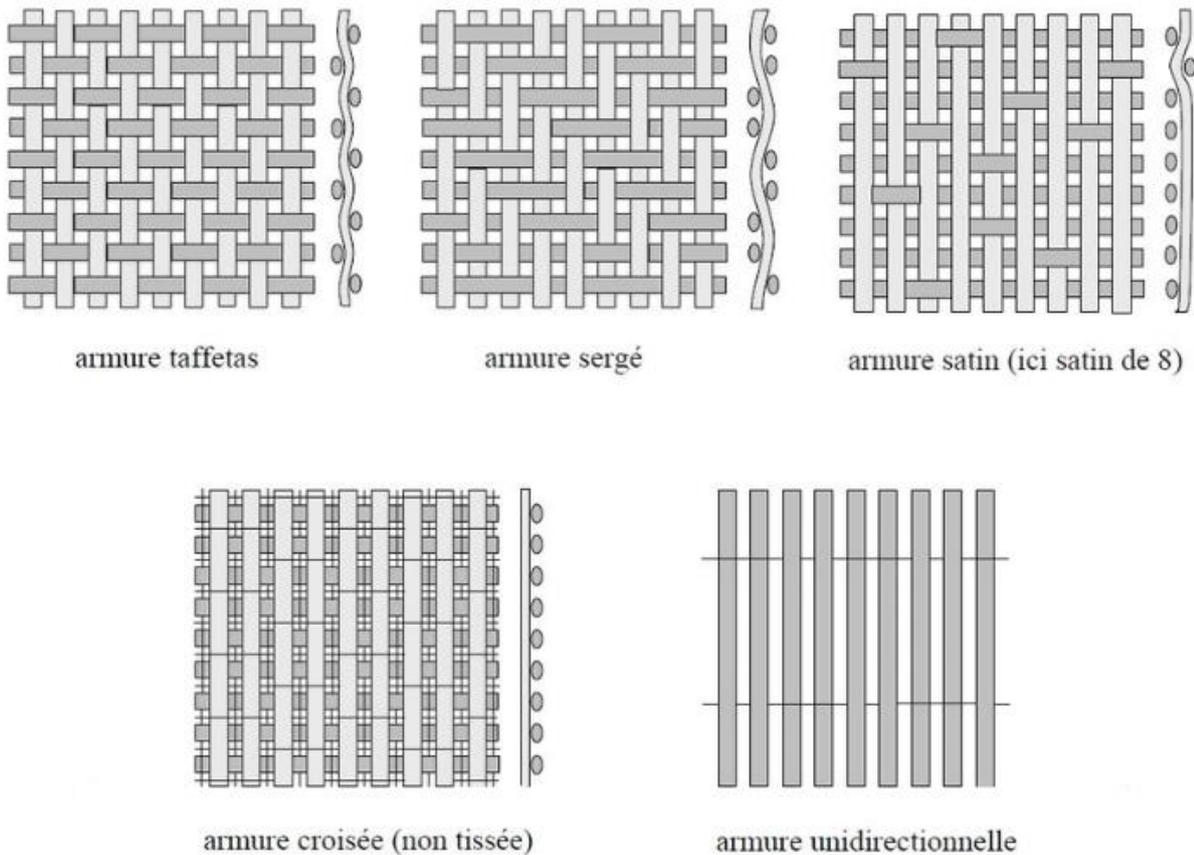


Figure I.3 : Types d'armure utilisés pour le tissage

- **Fibre multidirectionnelle :**

Offrent une résistance identique dans toutes les directions. Elles peuvent être tissés ou disposées de manière aléatoire pour maximiser la résistance. Deux structures existantes les tresse et performé sont réaliser par tissage cylindrique ou conique, et les tissus multidirectionnelle (tissage volumique caractériser par le nombre et la direction de tissage). Chaque type a ses avantages et ses limitations, et le choix dépendra des exigences spécifiques de l'application.

I.3.3.2.1 Principales fibres

- **Fibre de verre :**

Les fibres de verre ont un excellent rapport performance/prix qui les place au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composites. Elles constituent le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elles sont obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore).

On distingue trois types de fibres :

- E : pour les composites de grande diffusion et des applications courantes ;
- R : pour les composites hautes performances ;
- D : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).

- **Fibre de carbone :**

Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques et sont élaborées à partir d'un polymère de base, appelé précurseur. C'est la fibre la plus utilisées dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile). Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres :

- fibres haute résistance (HR) : pour une combustion de 1000 à 1500 °C ;
- fibres haut module (HM) : pour une température de combustion de 1800 à 2000 °C.

La qualité des fibres de carbonées finales dépend fortement des qualités du précurseur.

- **Fibre céramique :**

Les matériaux composites de type céramiques sont souvent constitués de renforts et de matrice en céramique. Les fibres sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Ces fibres sont rencontrées dans des applications où la température est très élevée entre 500°C et 2 000°C. Ces matériaux sont utilisés notamment dans les parties chaudes des moteurs d'avions. Quelques exemples de fibres céramiques :

- Fibres de Carbure de Silicium.
- Fibres de Bore.
- Fibres de Bore carbure de silicium. [6]



Fibre de verre



Fibre de carbone



Fibre végétale

Tableau I.3 : caractéristiques mécaniques des fibres [4]

I.3.3.2.: Caractéristique mécaniques des fibres

Il existe différents types de fibres. Elles peuvent être scindées en deux groupes, les fibres à haut module et les fibres à haute résistance. Les fibres à haut module ont une résistance faible et celles à forte résistance ont un module faible renforts ρ (Kg/m³) $\sigma_t R$ (MPa) [4]

Tableau I.4 : caractéristiques mécaniques des fibres [4]

Fibre	Densité	σ_t (MPa) en traction	Allongement à la rupture	E_L (MPa) longitudinale	Diamètre filament élémentaire μm
Verre E	2,54	3400	4,8	73000	3-30
Verre R	2,48	4400	5,4	86000	3-30
Aramide BM	1,45	3100	2	70000	12
Aramide HM	1,45	3100	1	130000	12
Kevlar	-	2900	2,3	130000	1,45
Aluminium	-	1380	0,7	380000	3,9
Carbone HT	1,78	2800	0,5	200000	8
Carbone HM	1,80	2200	-	400000	8
Bore	2,63	3500	0,8	400000	100-200

I.4 Classification des composites

Les composites sont classés selon :

- La formes des constituants en fonction de la forme géométrique des constituants (les renforts) on a composites à particules, flakes composites, et les composites à fibres

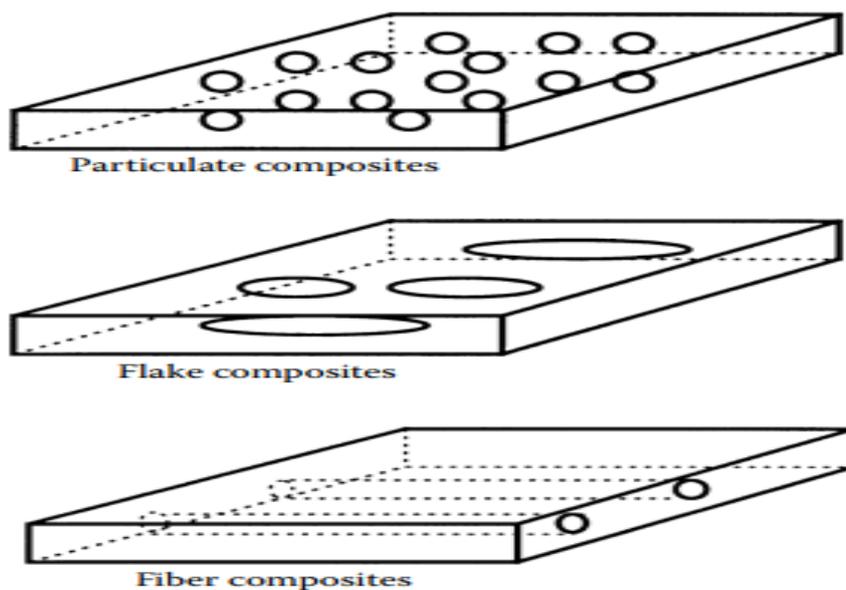


Figure I.4 : composites selon la forme du renfort

- La nature des constituants, suivants la nature de la matrice on distingue composites à matrice métallique ; à matrice minérale (céramique), à matrice organique et les composites Carbon-Carbon.

I.4.1 Classification selon la forme du renfort

I.4.1.1 Composites à particule

Le renfort émergé dans la matrice sous forme des particules ; les particules peuvent être de différentes formes et tailles. il existe plusieurs types de composite à particules, on note les composites renforcés par des particules, les composites à particules conductrices, les composites fluorescents.

1.4.1.2 Composite flake

Les composites en flocons sont constitués de renforts plats de matrices. Les matériaux typiques en flocons sont le verre, le mica, l'aluminium et l'argent. Les composites en flocons offrent des avantages tels qu'un module de flexion hors plan élevé.

Une résistance plus élevée et un faible coût. Cependant, les flocons ne peuvent pas être orientés facilement et seul un nombre limité de matériaux sont disponibles pour utilisation.[8]

1.4.1.3 Composites à fibre

Les composites à fibres sont des composites à matrice polymère renforcées par des fibres telle que les fibres de verre de Carbon et aramides.

1.4.2 Classification selon la nature de la matrice

1.4.2.1 Composites à matrice métallique

Les composites à matrice métallique (MMCs), comme leur nom l'indique, sont constitués d'une matrice métallique. Des exemples de métaux utilisés comme matrices dans de tels composites comprennent l'aluminium, le magnésium et le titane. Les fibres couramment utilisées sont le carbone et le carbure de silicium. L'objectif principal du renforcement des métaux est d'ajuster leurs propriétés pour répondre aux exigences de conception. Par exemple, l'ajout de fibres telles que le carbure de silicium permet d'augmenter la rigidité élastique et la résistance des métaux, tout en réduisant les coefficients de dilatation thermique ainsi que les conductivités thermique et électrique des métaux.

Les composites à matrice métallique sont principalement utilisés pour offrir des avantages par rapport aux métaux monolithiques tels que l'acier et l'aluminium. Ces avantages comprennent une résistance spécifique et un module plus élevé en renforçant des métaux de faible densité, tels que l'aluminium et le titane

I.4.2.2 Composites à matrices céramique

Les composites à matrice céramique (CMC) sont des matériaux composites où la matrice est constituée de céramique. Ces composites sont souvent renforcés par des fibres céramiques ou métalliques. Les CMC offrent une combinaison unique de propriétés telles que la résistance à haute température, la résistance à l'usure, la légèreté et la résistance aux contraintes thermiques. Ils sont largement utilisés où des performances élevées dans des environnements extrêmes sont nécessaires. Les CMC peuvent être fabriqués selon différentes méthodes, notamment le frittage, l'infiltration et le dépôt chimique en phase vapeur.

I.4.2.3 Composites Carbon- Carbon

Les composites carbon-carbon utilise le carbon comme matrice et aussi comme renfort. Ces composites offrent une combinaison exceptionnelle de légèreté, de rigidité, de résistance à la chaleur et de résistance mécanique. Ils sont largement utilisés dans des applications aérospatiales et de haute technologie, telles que les freins et les disques de frein pour les avions et les véhicules spatiaux, ainsi que dans les applications de haute performance nécessitant une stabilité thermique et une résistance structurelle élevées.

I.4.2.4 Composites à matrice organique (polymère)

Les composites avancés les plus répandus sont les composites à matrice polymère (PMC), constitués d'un polymère tel que l'époxy, le polyester ou l'uréthane, renforcés par des fibres de faible diamètre comme le graphite, les aramides ou le bore. Par exemple, les composites graphite/époxy sont environ cinq fois plus résistants que l'acier pour un poids équivalent, Les composites bore/époxy représentent une catégorie de composites avancés où une matrice d'époxy est renforcée par des fibres de bore. Ces matériaux offrent une combinaison unique de légèreté et de résistance exceptionnelle, les rendant attrayants pour une gamme d'applications allant de l'aérospatiale à l'industrie militaire.

1.5 Caractéristiques et propriétés des composites

Pour rechercher des matériaux plus performants, il est essentiel de bien comprendre le comportement des composites, ce qui implique de tenir compte à la fois de leurs propriétés et de caractéristiques.

Tout comme d'autres matériaux, les composites ont des propriétés qui sont liées aux caractéristiques de leurs constituants (matrice et renfort) simultanément. Les propriétés des matériaux composites font référence aux attributs intrinsèques du matériau qui définissent son comportements tel que :

A) La résistance mécanique :

- B) Module d'élasticité
- C) La masse volumique (densité)
- D) La conductivité thermique et électrique

Les caractéristiques des matériaux composites définissent le matériau mais qui peuvent ne pas être des propriétés mesurables ou quantifiables. Ces caractéristiques peuvent inclure des aspects tels que la couleur, la texture de surface, la facilité de fabrication, la durabilité, la biocompatibilité

I.5.1 Fraction massique et volumique

la proportion relative de matrice et de renfort est l'un des facteurs les plus importants qui décrit les caractéristiques mécaniques d'un matériaux composite ,elle est exprimer soit en fraction volumique soit en fraction massique .

a) Fraction massique :

Représente la masse d'un constituant (fibre et matrice) par rapport à la masse totales du matériaux, elle est exprimé en %, donc La fraction massique est utile pour comprendre la répartition des poids des différents composants dans le matériau composite.

$$P_f = \frac{p_f}{p_c} \dots\dots\dots (I.1)$$

$$P_m = \frac{p_m}{p_c} \dots\dots\dots (I.2)$$

b) Fraction volumique :

La fraction volumique d'un constituant dans un matériau composite représente le volume occupé par ce composant par rapport au volume total du matériau. une fraction volumique plus élevée de fibres de renfort peut entraîner une augmentation de la résistance et de la rigidité du composite, tandis qu'une fraction volumique plus élevée de matrice peut influencer la ténacité et la résistance à la corrosion.

$$V_m = \frac{v_m}{v_c} \dots\dots\dots(I.3)$$

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} \dots\dots\dots(I.4)$$

La fraction volumique et la fraction massique peuvent être considérées à la fois comme des propriétés et des caractéristiques des matériaux composites, selon la façon dont elles sont utilisées pour caractériser et décrire le matériau dans un contexte particulier.

1.6 Architectures des composites

1.6.1 Composites sandwich :

Une structure sandwich résulte de l'assemblage par collage -ou soudure- de deux revêtements ou peaux minces sur une âme ou coeur plus léger qui maintient leur écartement.[9])

Ce sont des matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou cœur) de forte épaisseur et de faible résistance . L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. L'assemblage des peaux avec l'âme se fait généralement par collage, par soudage ou par polymérisations dans les moules dans le cas des composites plastiques. Les âmes peuvent être pleines (bois, mousse, ...etc.) ou creuse (alliages métalliques léger, papier, ...etc.). Les peaux sont généralement des stratifiées ou des feuilles d'alliage légers. Les âmes les plus utilisées sont de type nid d'abeilles, âme ondulée ou mousse . Ces structures ont une grande rigidité en flexion et torsion. L'âme de la structure sandwich résiste principalement aux contraintes de cisaillement et de compression hors plan, les peaux inférieures et supérieures supportent quant à elles les efforts dans leur plan. [10]

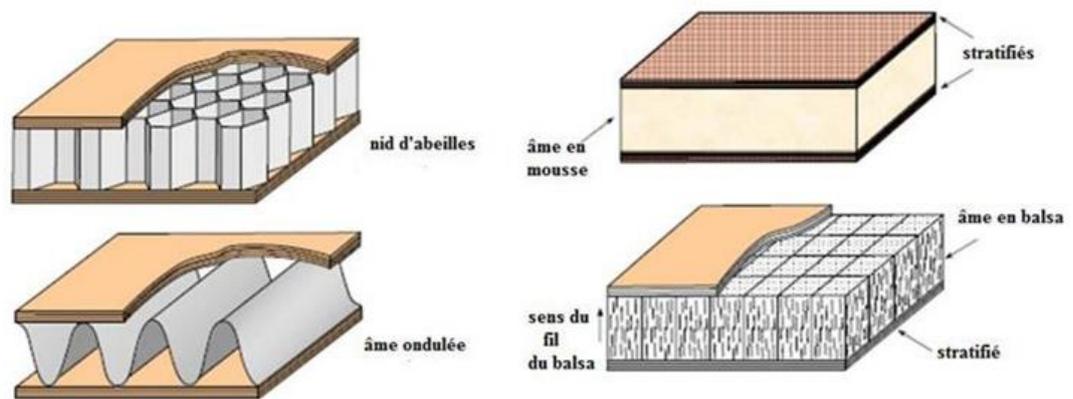


Figure I.5 : Amé en mousse [11]

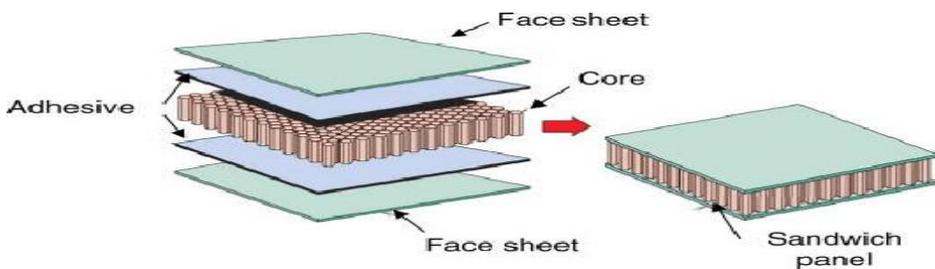


Figure I.6 : Structure de sandwich [11]

1.6.2 Les stratifiés

Le stratifié est un composite formé par l'empilement de plusieurs couche ou plis de renforts (fils, tissus, mats, ...) imprégnés de résine. ce qui résulte la superposition de ces couches avec des orientation propre à chaque plis.

Chaque pli (couche) représente l'élément de base du stratifié. Les différents types de couches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres continue, fibres courtes, fibres tissus et mat, et la nature de résine utilisé.

La diversité des renforts, des matrices et résines et et de processus de fabrication offrent une large gamme des stratifiés avec des caractéristiques spécifiques adaptées à une grande variété d'application.

Il existe différents types de stratifiés, la différence entre eux permet d'adapter les propriétés du matériaux composites aux besoin spécifiques de chaque application. Donc chaque type a ses propres avantages et limitations, et la sélection des stratifié dépend des exigences spécifiques des performances recherchées. Voici quelques-uns des stratifié courants

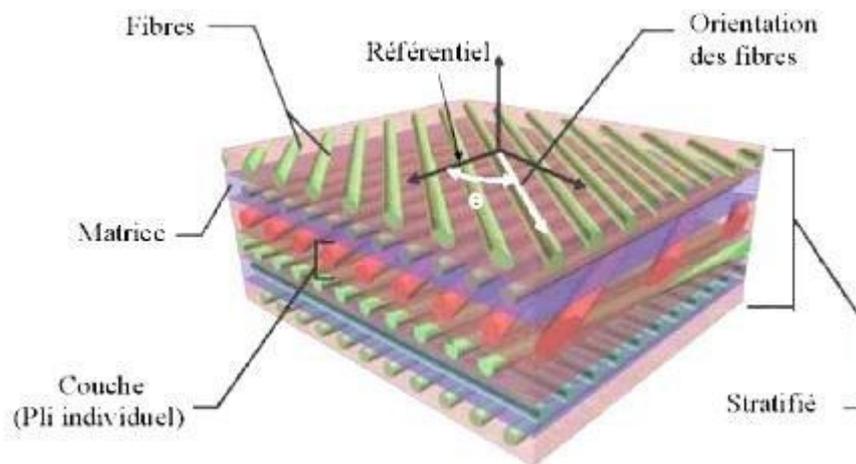


Figure I.7 : Structure stratifié [12]

- **Stratifié unidirectionnelle** Dans ce types les fibres sont orientées dans la même direction. il est souvent utilisé dans des applications où les charges sont principalement appliqué dans une seule direction (direction des fibre). Les stratifie uni directionnelles présentent une grande rigidité, permettant de draper de grande longueur c'est-à-dire transmission des effort est ainsi continue.

- Stratifié bidirectionnelles Les fibres sont orienté dans deux direction perpendiculaire l'un par rapport à l'autre (0° et 90°). ce type de stratifié offre une résistance dans deux directions
- Stratifiés tissé Les fibres sont disposées sous forme de tissu, ce type offre une rigidité et une résistance assez élevé dans les deux direction (langitudinales et transversale, il est utilisé dans des application nesisitant une répartition uniforme des charges.

I.6.2.1 Désignation des stratifiés

Les stratifiés sont désignés selon un code normalisé qui suit une convention précise : chaque pli est représenté par l'angle de l'orientation des fibres par rapport à un axe de référence. Les couches ayant des angles différents sont séparées par un "/" tandis que les couches ayant le même angle sont désignées par un indice numérique. Ce code est encadré entre deux crochets, et les couches sont nommées successivement de la base vers le sommet.

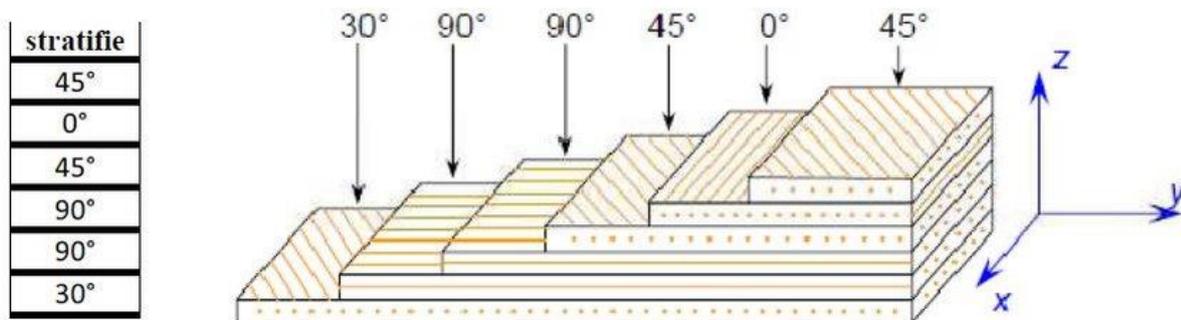


Figure I.8 : Désignation des stratifié [13]

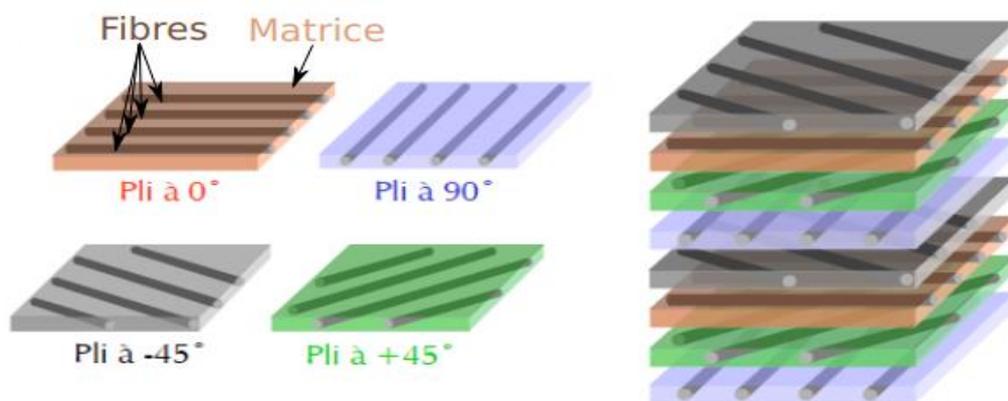


Figure I.9 : Orientation des fibres [13]

Voici quelque exemple de désignation :

- Stratifiés symétrique on dit une pièce stratifiée est symétrique lorsque les empilements des plis sont identiques dans les deux parts du plan moyen. Exemple : $[90/0_2/-45/45]$
- Stratifiés hybrides : Les stratifiés hybrides sont composés de plis de fibres de différentes natures. Chaque type de fibre est identifié par son symbole spécifique. Exemple

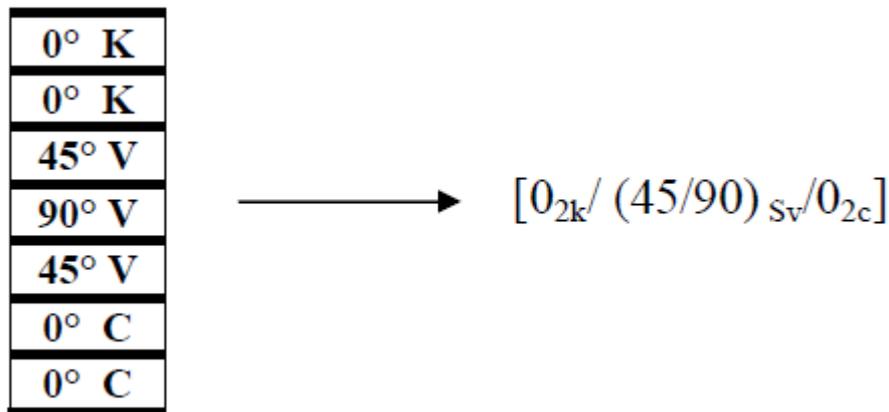


Figure I.10 : Désignation de stratifié hybrides [14]

I.7 Conclusion

Les matériaux composites sont une famille de matériaux qui ont connu un développement rapide et plus utilisée au sein des structures , et de bonnes caractéristiques mécanique, thermique, chimique les matériaux composite composée d'un matrice et renfort , la matrice est un résine polymère, tandis que le renfort peut être des fibres de carbone , de verre de nylon ou d'autres matériaux , les fibres telles que la résistance les charge à la traction et la compression

Chapitre II

Généralité sur mécanique de la rupture et réparation des fissures

II.1 INTRODUCTION

Tous les matériaux contiennent des porosités ou des fissures à différentes échelles, et de diverses origines : retassures et « criques » de refroidissement à la solidification, porosités résultant de l'élaboration, stries et rayures d'usinage en surface des pièces, microfissures en surface ou dans la masse dues à une déformation plastique préalable importante, etc. .

La mécanique de la rupture permet d'étudier le comportement d'une fissure dans un matériau ou une structure, et en particulier de mettre en place des critères de propagation, ou de non-propagation. Pour mettre en place ces critères de propagation, il est nécessaire d'introduire la notion de ténacité, et en particulier le taux de restitution d'énergie critique, caractérisant la capacité d'un matériau à résister à l'avancement d'une fissure. Cette notion de ténacité est fondamentale pour le dimensionnement des structures, et en particulier pour leur dimensionnement à la tolérance aux dommages, c'est-à-dire pour le dimensionnement d'une structure présentant déjà un dommage,

Les méthodes de réparation des fissures varient en fonction de facteurs tels que le type de matériau, l'emplacement de la fissure et l'ampleur des dommages. Certaines techniques couramment utilisées comprennent l'injection, l'application de tissu de renfort, le masticage et le ponçage, ainsi que l'utilisation de pièces préfabriquées pour renforcer la zone endommagée.

Il est essentiel que les réparations soient effectuées avec précision et selon les normes spécifiques à chaque application afin d'assurer la sécurité et la performance à long terme des composants composites. En outre, la surveillance régulière des zones réparées est recommandée pour détecter tout signe de dégradation et prendre des mesures préventives si nécessaire.

Les plaques fissurées peuvent être réparées de différentes manières en fonction de la nature et de la gravité de la fissure. Les méthodes de réparation peuvent être classées en trois catégories : esthétique, non structurale et structurale. Les réparations esthétiques sont utilisées pour améliorer l'apparence de la surface fissurée, tandis que les réparations non structurales sont utilisées pour rétablir l'étanchéité et la continuité de la surface fissurée. Les réparations structurales sont utilisées pour renforcer la structure et rétablir sa capacité portante. [15].

Les méthodes de réparation dépendent des caractéristiques de la fissuration, telles que l'ouverture, la profondeur, l'activité, le tracé, la géométrie et l'exposition aux intempéries [16]

II.2 Généralités sur mécanique de la rupture

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

Le mode de rupture peut être fragile, la rupture se produisant alors souvent sans déformation plastique, ou ductile, en présence d'une déformation plastique important

Objectif de la mécanique de la rupture est de caractériser le comportement à la fissuration des structures à l'aide de paramètres quantifiables au sens de l'ingénieur, notamment le champ de contraintes, la taille de la fissure et la résistance à la fissuration du matériau.

La mécanique de la rupture repose sur plusieurs branches principales : la mécanique de la rupture élasto-plastique, la propagation de fissures par fatigue, et la mécanique de la rupture élastique linéaire, qui est le concept principal de notre étude.

II.2.1 Concept de la mécanique de rupture linéaire (MLR)

La mécanique linéaire de la rupture (MLR) pour les matériaux dont le comportement est essentiellement linéaire élastique, tels les alliages d'aluminium durcissant.

L'approche de la mécanique linéaire de la rupture concerne les matériaux dont le comportement est élastique linéaire. Compte tenu de cette linéarité, les calculs sont relativement simples à réaliser. Dans le cadre des travaux portant sur les matériaux à comportement fragiles

L'approche basée sur la mécanique linéaire de la rupture est à trois variables, la Contrainte appliquée, la ténacité K_{IC} qui remplace la limite d'élasticité et une variable additionnelle qui est la taille du défaut. Il y a cependant deux approches alternatives de la Mécanique de la rupture, l'une utilisant le concept d'intensité des contraintes critique (ténacité K_{IC} du matériau) et l'autre un critère d'énergie. Ces deux approches sont équivalentes dans Certaines conditions.

Dans le cas de la rupture fragile d'un matériau, on observe généralement un site d'amorçage unique sur un défaut à partir duquel se propage une fissure principale par clivage jusqu'à sa rupture (fig.II.1). Lors d'une rupture fragile, le comportement macroscopique du métal reste élastique.

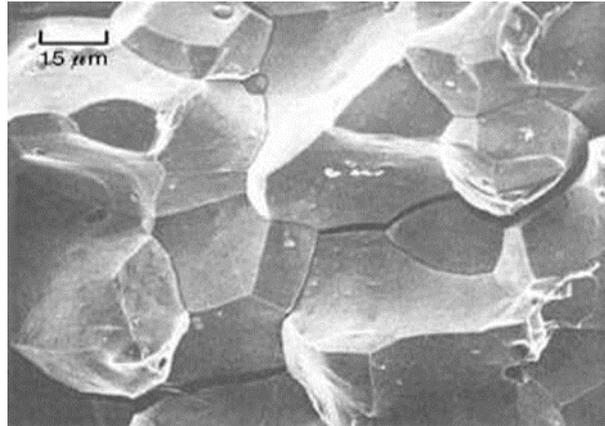


Figure II.1 : Rupture fragile [17]

La rupture fragile. C'est d'abord un mécanisme qui se produit lorsque le métal est macroscopiquement en plasticité. De nombreuses cavités se développent de par l'hétérogénéité de la microstructure, ensuite, du fait de la déformation plastique, ces cavités grossissent puis coalescent (fig. II.2)

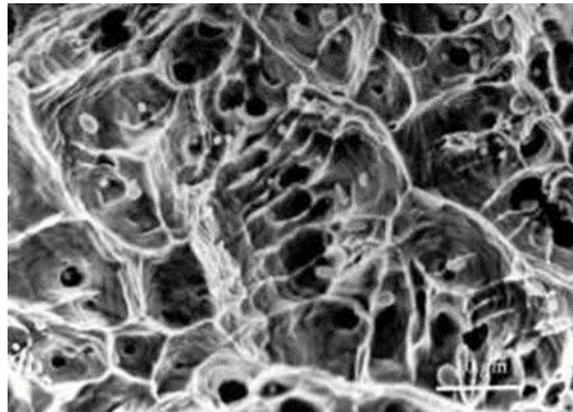


Figure II.2 : Rupture ductile [17]

La rupture ductile est presque toujours un moindre mal, contrairement à la rupture fragile qui a un caractère soudain et brutal et a des effets imprévus en raison de la propagation spontanée et rapide de la fissure. En revanche, la présence d'une déformation plastique signale l'imminence d'une rupture et rend donc possible l'application de mesures préventives [17].

Une rupture ductile nécessite une plus grande énergie de déformation,

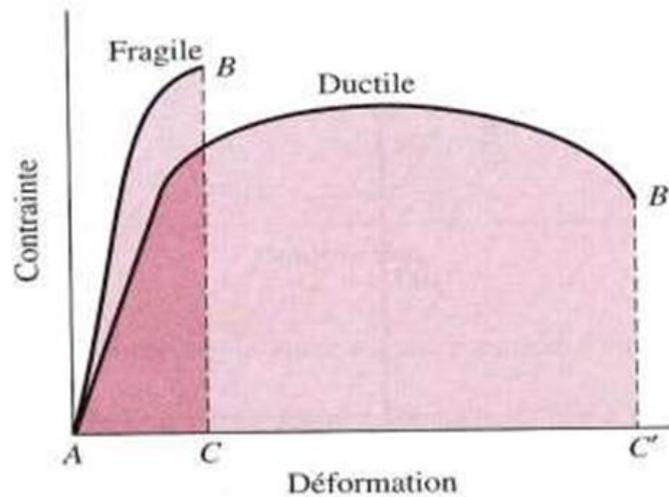


Figure II.3: la courbe contrainte déformation pour matériau fragile et ductile [18]

II.2.2 Mécanismes de rupture

Le mécanisme de rupture c'est le processus par lequel un matériaux subit une défaillance sous l'effet de contraint ou des charges ? la variétés des mécanisme due au plusieurs facteur tel que les conditions de contrit et de chargement, de microstructure du matériaux et de condition spécifique de déformation.

La connaissances de ces type aide prévenir à les défaillance avant qu'elle devient critique, et à planifier des plans de maintenance afin d'améliorer la fiabilité et la sécurité.

- Rupture fragile
- Rupture ductile
- Rupture par fatigue
- Rupteur par corrosion
- Rupture intergranilaire
- Rupture transgranilaire

II.3 Notion de la mécanique de la rupture linéaire élastique

II.3.1 Taux d'énergie disponible G

Le lien quantitatif entre la rupture et la taille de défaut a été proposé par Griffith en 1920.

Le modèle de Griffith, basé sur un critère énergétique, a prédit correctement la relation entre la résistance du corps élastique - fragile et la taille du défaut. Irwin a ensuite développé cette approche énergétique en introduisant le concept de taux de restitution d'énergie G [19].

On Montre que l'équilibre thermodynamique d'une structure élastique, contenant une fissure de surface A, et chargée par des forces, vis-à-vis de l'extension de cette fissure, est réalisé si ce que l'on appelle le taux d'énergie disponible G est égal à une valeur critique G_C [20]. G est défini par la

$$\text{formule : } G = \frac{dp}{dA} \dots \dots \dots (\text{II. 1})$$

Avec

P : énergie potentielle totale de la structure fissurée, c'est-à-dire somme de l'énergie potentielle des forces et de l'énergie élastique emmagasinée, G étant l'énergie qu'il faut dépenser pour que la fissure augmente sa surface d'une unité [21].

G : qui peut s'exprimer en J/ ou en N/m, s'appelle aussi la force d'extension de fissure. Si G devient supérieur à G_c , la propagation de la fissure se produit, le supplément d'énergie se transformant en

$$\text{énergie cinétique [20]. On démontre que : } G = \frac{1}{2} F^2 \frac{\partial C}{\partial A} \dots \dots \dots (\text{II. 2})$$

Avec F : force appliquée

C : complaisance de la structure fissurée, c'est-à-dire rapport de proportionnalité entre le déplacement provoqué par la force F et cette force F elle-même.

Une des hypothèses fondamentales de la mécanique de la rupture est que la ténacité G_c est indépendante de la géométrie et de la dimension du corps fissuré. La ténacité à la rupture Mesurée sur une éprouvette de laboratoire peut être appliquée à une autre structure [21]

II.3.2 Facteur d'intensité des contraintes K

Le facteur d'intensité de contrainte (FIC) est une grandeur clé en Mécanique de la Rupture (MLR). Il mesure l'intensité de contrainte au voisinage du point d'une fissure. Le facteur K est un outil essentiel pour prédire et analyser le comportement des fissures. Son unité est le $\text{MPa} \sqrt{m}$.

$$K_I = Y \sigma \sqrt{\pi a} \dots \dots \dots (\text{II.3})$$

K : facteur d'intensité de contrainte en $\text{MPa} \sqrt{m}$

Y : coefficient de correction géométrique

σ : la contrainte appliquée en MPa

a : la longueur de fissure en m

C'est la formule générale du K_{IC}, elle peut varier selon le type de la fissure, leur géométrie, leur emplacement et selon les conditions de chargement.

Le K_{IC} est utilisé pour étudier la propagation des fissures et déterminer la criticité des matériaux. Alors que les fissures ont trois modes (mode I, mode II et mode III) le facteur K varie en fonction du mode de fissuration. Les facteurs K_I, K_{II}, K_{III} représentent respectivement les facteurs d'intensité de contrainte pour les modes d'ouverture I, de cisaillement II, et de cisaillement anti-plan III.

Le coefficient de correction géométrique, Y, est un paramètre utilisé pour corriger la valeur de la contrainte appliquée. Ce coefficient dépend de la géométrie de la fissure et des conditions de chargement. Il est déterminé empiriquement ou calculé à partir de modèles théoriques.

Le facteur d'intensité de contrainte peut atteindre des valeurs critiques, ce que l'on appelle la ténacité. La ténacité, symbolisée par K_{IC}, est une propriété des matériaux, tout comme la limite élastique et d'autres propriétés mécaniques, qui mesure la résistance à la propagation des fissures. Elle représente l'énergie nécessaire pour faire avancer une fissure dans un matériau. Une ténacité élevée indique une meilleure résistance à la fissuration.

$$K_{IC} = Y \cdot \sigma_c \sqrt{\pi a_c}$$

K_{IC} : la ténacité en MPa√m

Y : coefficient de géométrie

σ_c : la contrainte critique appliquée en MPa

a_c : la longueur critique de fissure en m

II.3.3 Concentration des contraintes près d'un défaut

Si on considère un défaut de forme elliptique de longueur 2a et de rayon à fond d'entaille ρ (figure II.4), la contrainte locale à l'extrémité a est :

$$\sigma_y = \sigma \left(1 + 2 \frac{a}{\rho} \right) = \sigma \left(1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right) \dots \dots \dots \text{(II. 4)}$$

Dans le cas d'une entaille très aiguë, ρ ≪ a et on a alors :

$$\sigma_y \approx 2\sigma \sqrt{\frac{a}{\rho}} \dots \dots \dots \text{(II. 5)}$$

La fonction $2 \sqrt{\frac{a}{\rho}}$ est appelée facteur de concentration de contrainte

Où σ_y , σ sont respectivement la contrainte dans la direction y, la contrainte uniforme de traction appliquée dans le plan de la plaque.

a et b sont les demi-axes du trou elliptique et ρ est le rayon de courbure au sommet du trou.

Dans le cas d'une plaque de largeur infinie et comportant un trou circulaire, la relation II.11

s'écrit : $\sigma_y = 3\sigma$ ($K_T=3$)(II.6)

Lorsque le rapport b/a tend vers zéro, le trou prend la forme d'une fissure, σ_y tend vers l'infini [22]

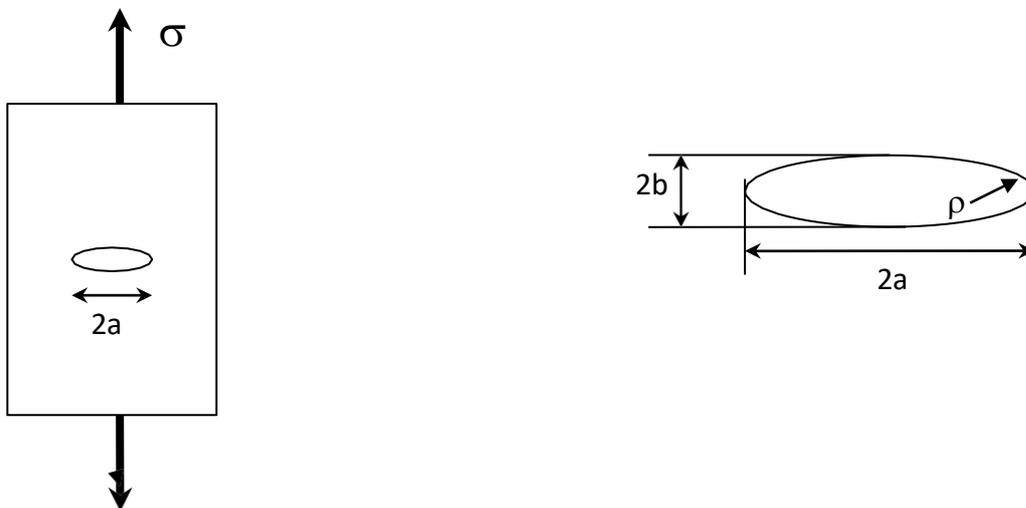


Figure II.4: défaut elliptique dans une plaque infinie [22]

II.4 Propagation de la fissure

Ce qu'on appelle problème est très souvent la présence d'une fissure, une discontinuité géométrique présente dans les zones critiques de la structure, et qui tend à se propager au gré des sollicitations appliquées. Celle-ci peut conduire à la ruine de la structure. Nous ferons ici appel à la mécanique de la rupture pour caractériser la propagation de ce type de défaut. Il est bien entendu que la présence de ce défaut constitue une source de non-linéarité géométrique. Mais la mécanique de la rupture suppose la présence d'un défaut initial, à partir duquel la fissure va pouvoir s'amorcer. Ce défaut peut être un trou, une inclusion dans le matériau, une imperfection due au procédé de fabrication, qui engendre des sur-contraintes locales. A ce stade, la propagation pourra être :

- Soit rapide et brutale

- Soit lente et progressive

Dans le premier cas, la rupture fait appel à la notion de ténacité, caractéristique intrinsèque du matériau. La rupture peut alors apparaître dès la mise en service du matériel. Cela traduit une conception erronée et déphasée avec le choix du matériau et du type d'assemblage utilisé (cas des navires de la liberté).

Dans le second cas, la fissuration progressive est difficilement décelable. Elle est responsable de nombreux accidents, de ruptures de pièces de machines (arbres de transmissions, cuves de réacteurs ...) ou de structures (aéronautiques, navales, automobiles ...) [23]

II.4.1 Les différents modes de fissuration

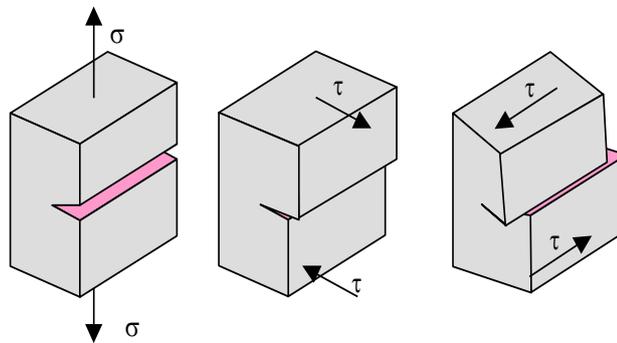


Figure II.5 : les différents modes de fissuration [24]

Mode I : mode d'ouverture de la fissure, où les déplacements aux lèvres de la Fissure sont perpendiculaires à la direction de propagation.

Mode II : mode de cisaillement dans le plan, où les déplacements aux lèvres de la Fissure sont parallèles à la direction de propagation.

Mode III : mode de cisaillement hors du plan, où les déplacements aux lèvres de la Fissure sont parallèles au fond de la fissure.

Pour chacun des modes, on déterminera le comportement à la fissuration de Chaque solide en calculant l'état des champs de déplacements, déformations et Contraintes au voisinage de la fissure.[25]

II.4.2 Processus de fissuration

Il est généralement admis que la fissuration se produit dans un matériau Suivant quatre étapes

La première étape est la plastification locale au voisinage des défauts et Singularités géométriques ou matérielles. Le degré de la singularité a une influence Primordiale sur l'ampleur de la zone plastique ainsi que sur la concentration de la Contrainte.

La deuxième étape est la formation des fissures. Cette étape peut se réaliser à partir des traitements de surface, des traitements ou chargement thermique Générant des contraintes résiduelles dépassant largement le seuil plastique. On peut également avoir des formations de fissures à partir d'un chargement mécanique statique ou variable, ces fissures nous intéressent particulièrement dans cet ouvrage.

La troisième étape est la propagation des fissures réelles naissantes. Cette propagation peut être brutale ou successive. Souvent on assiste à une propagation successive faisant augmenter la taille de la fissure jusqu'à atteindre une taille critique (correspondant à la résistance intrinsèque du matériau à la fissuration) entraînant une propagation brutale [25]

II.4.3 Amorçage des fissures

Les fissures peuvent s'amorcer en surface du matériau ou des interfaces, puis se propager de manière stable avant une rupture finale instantanée

Distinguer quatre types de propagation des fissure

Type I : une fissuration brutale provoquant une rupture fragile où la loi de comportement du matériau reste dans le domaine élastique linéaire. On ne parlera pas de vitesse de propagation dans ce type sinon d'une vitesse de l'ordre de la vitesse du son.

Type II : une fissuration brutale provoquant une rupture ductile où la loi de comportement du matériau est généralement élasto-plastique à grandes déformations. On ne parlera que sommairement de ce type de propagation du fait de la difficulté que présente sa modélisation des champs mécaniques et de la rareté de ce type dans le domaine industriel.

Type III : une fissuration successive fragile, la loi de comportement considérée est élastique linéaire, la vitesse de fissuration est lente (10^{-7} à 10^{-4} mm/cycle de chargement). Cette fissuration est constatée sous charge répétée. On parlera de la fatigue à grand nombre de cycles.

Type IV: une fissuration successive ductile. La loi de considérée est élasto-plastique à petites déformations ; la vitesse de fissuration est relativement rapide. Cette fissuration provoquée sous charge répétée . On parlera de la fatigue à petit nombre de cycles appelée oligocyclique.[25]

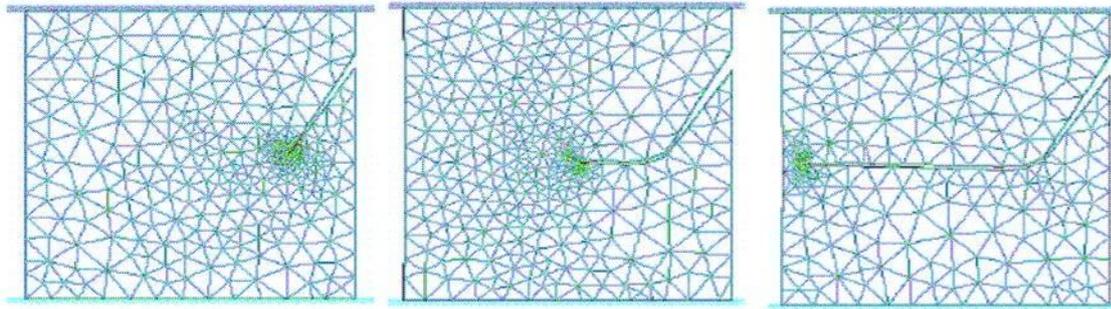


Figure II.6 : propagation d'une fissure dans une plaque pré-fissurée [23]

II.5 Les techniques de réparation

L'apparition de fissures et de fractures dans les composants des structures métalliques nécessite des réparations, qui sont une action essentielle de la maintenance. La maintenance, qui englobe à la fois la prévention et la correction, vise à garantir la sécurité, la durabilité et les performances des équipements et des installations industrielles.

La réparation des structures métalliques revêt une importance cruciale dans différents secteurs industriels, avec pour objectif principal d'assurer la sécurité des individus et des biens, tout en maintenant la continuité des opérations.

Après la détection de fissures, différentes méthodes sont utilisées pour arrêter leur propagation. Le choix de la technique de réparation dépend de plusieurs facteurs tels que la nature de la fissure, sa localisation, son orientation, sa taille et son accessibilité. D'autres considérations incluent l'application du composant, le degré de précision requis pour la réparation, la disponibilité des outils, le type de métal, la géométrie du composant, ainsi que les coûts associés.

Bien qu'il existe plusieurs types de réparations possibles, cet ouvrage se concentrera sur quelques méthodes. Telle que la réparation par ajout de matière, comprenant des techniques telles que le soudage, le boulonnage, le rivetage et le collage. Nous explorerons également la réparation par modification de la géométrie, qui peut impliquer des processus tels que le perçage d'un trou

II.5.1 Méthode du perçage d'un trou

Cette approche repose sur une altération géométrique du fond de la fissure. Le forage d'un trou à l'extrémité d'une fissure permet de stopper temporairement ou définitivement la propagation de la fissure. Cette technique repose sur la modification géométrique du fond de la fissure, visant à accroître le rayon à cet endroit, ce qui entraîne une diminution du coefficient local de concentration de contrainte

K_t [26]. Dans le domaine élastique, les contraintes et les déformations locales peuvent être calculées à partir du coefficient de concentration de contrainte K_t , tel que défini par :

$$k_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_N} = \frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_N} \dots \dots \text{(II. 7)}$$

σ_{\max} et ε_{\max} sont les contraintes et les déformations locales.

σ_N et ε_N sont les contraintes et les déformations nominales.

Les concentrations de contraintes dues aux discontinuités géométriques réduisent les résistances statiques et cycliques des structures.

Présence des zones de concentration de contraintes dans des pièces entaillées. Si on considère une pièce non entaillée soumise à des efforts de traction, pour un chargement uniforme, les lignes de chargement sont parallèles et uniformément espacées les unes des autres (figure 20.a). Dans le cas d'une pièce entaillée, les lignes de chargement doivent contourner le défaut. Au fond de l'entaille, les lignes sont plus rapprochées dans **une surface moindre** (figure 20.b), ceci conduit à

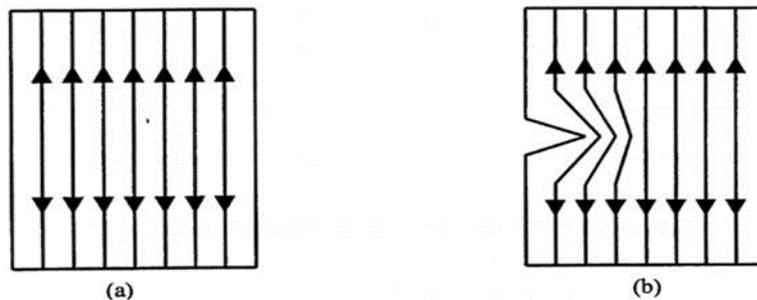


Figure II.7 : Schéma des lignes de chargements [26]

une augmentation de la contrainte dans cette zone : c'est le phénomène de concentration des contraintes locales.

Cette approche présente divers avantages : elle est aisée à mettre en œuvre, reproductible, et adaptée aux structures inaccessibles d'un seul côté. Elle maintient la structure opérationnelle en attendant une éventuelle substitution de la pièce défectueuse.

D'autres chercheurs ont proposé cinq configurations de réparations de fissure par perçage (figure) : (a) trou débouchant, (b) trou en fond d'entaille, (c) trou avec entaille à faces inclinées symétriques, (d) trou avec entaille à faces inclinées asymétriques, (e) trou et entaille inclinée [27]

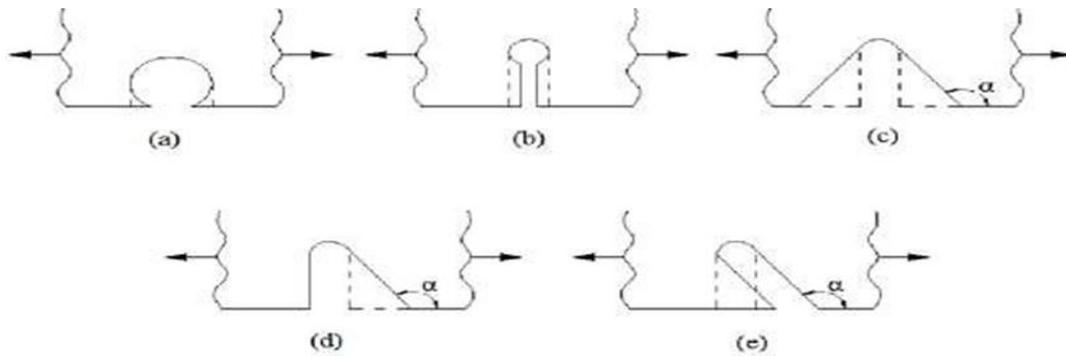


Figure II.8 : Configuration équivalents d'entailles [27]

II.5.2 Technique de meulage

Le meulage est basé sur le principe d'élimination des fissures par enlèvement de matière. Ainsi la singularité créée par le front de la fissure est éliminée. C'est une technique économique. Ce type de réparation peut engendrer de bons résultats en termes de durée de vie moyennant quelques précautions élémentaires au niveau de sa mise en œuvre. Le meulage peut cependant fragiliser la structure du fait de la diminution localisée de la section. Ce qui nécessitera une vérification par les calculs de la tenue mécanique de telles structures après traitement. Rodriguez et al ont étudié la réparation de fissures par le meulage, ils ont trouvé que la durée de vie d'une pièce fissurée après meulage est associée à la profondeur de la réparation, ce qui leur a permis dans une autre étude de considérer que la géométrie de la réparation est fonction respectivement de la I profondeur d'entaille (a) et du rayon d'entaille (R).

Les résultats de leurs travaux montrent que, pour une profondeur fixée, le facteur de concentration de contrainte diminue avec l'augmentation du rayon,[28]

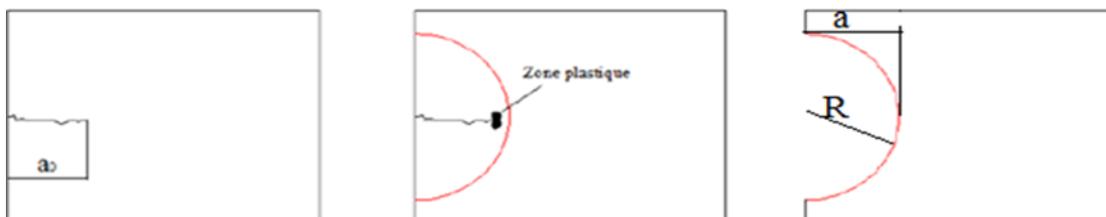


Figure II.9 : Schéma de principe du meulage [28]

II.5.3 Réparation par soudage

Le soudage est le moyen le plus flexible et efficace pour réparer une structure métallique. Cette méthode implique la fusion locale de deux pièces afin d'assurer leur continuité métallique. Toutefois, avant d'entreprendre toute réparation par soudure, il est impératif de bien connaître le matériau

concerné, notamment sa composition chimique, ainsi que les sollicitations et charges qui lui sont appliquées. Ces sollicitations peuvent inclure la fatigue, les chargements thermiques, la corrosion, entre autres. Une compréhension approfondie de ces facteurs est essentielle pour garantir la qualité et la durabilité de la réparation réalisée.

Le soudage nécessite une préparation minutieuse comprenant le choix du procédé approprié (soudage à l'arc, TIG, MIG, etc.), la préparation des pièces à souder (nettoyage des surfaces pour éliminer les contaminants), ainsi que l'utilisation des équipements adéquats (machine de soudage, fil d'apport, gaz de protection, etc.). Le respect des consignes de sécurité et des étapes de soudage garantit une opération efficace et de haute qualité

Pour que on utilise l'aluminium comme étude de cas de cet ouvrage, la soudure de l'aluminium est un peut délicat en raison de sa propriété particulière, leur conductivité thermique élevé qui nécessite un contrôle précis de la chaleur cela nécessite une attention particulière aux conditions et aux choix de paramètre de soudage.



FigureII.10 : réparation par soudage [29]

II.5.4 Réparation par rivetage

Un rivet est un élément d'assemblage définitif. Il se présente sous la forme d'une tige cylindrique, généralement métallique, pleine, qui est munie à l'une de ses extrémités d'une «tête» c'est-à-dire une partie de section plus grande. L'autre extrémité sera forgée à chaud, de

Façon à former une tête seconde pour solidariser les éléments à assembler. Cette opération est désignée sous le terme de rivetage. [30]

Le rivetage a constitué le principal mode d'assemblage de pièces métalliques jusqu'au développement de la soudure, qui, avec la technique du boulon à haute résistance, l'ont progressivement remplacé dans les années 1960. Aujourd'hui, cette technique est réservée aux ouvrages métalliques anciens rivés. [30]

Ce type de réparation consiste à placer une plaque métallique ou composite sur un zone endommagée et de riveter ou boulonner cette plaque à la structure à la structure

Bien sur la réparation par rivetage présente le type de défaut que nous cherchons à éliminer à savoir la concentration de contrainte et développement de fissure autour du trou.



Figure II.11 : réparation par rivetage [31]

II.5.5 La réparation par patch

Réparation par patch est une méthode récente utilisée pour traiter les fissures ou les zones endommagées dans les pièces métalliques. Elle implique l'application d'un matériau de renfort, comme une plaque métallique ou une pièce composite, sur la zone affectée afin de renforcer la structure et d'empêcher la propagation de la fissure.

L'application d'un patch sur une pièce endommagée nécessite en effet un assemblage solide afin de garantir la compatibilité des pièces assemblées. Il est essentiel de choisir la méthode

d'assemblage appropriée en tenant compte au type de métal, de contrainte appliquée et au cout La réparation des structures par l'assemblage des pièces endommagé sont classées en deux catégories : mécanique (boulonnage, rivetage) et physico-chimique (collage)

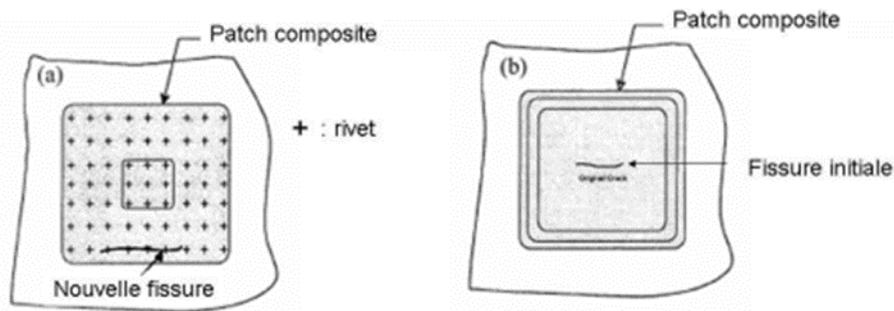


Figure II.12 : patch riveté et collé [32]

II.5.5.1 Technique de Collage d'un patch

Le procédé de réparation par collage est une technique prometteuse puisqu'elle a pris une grande part dans diverses industries où elle présente de nombreux avantages, par rapport aux procédés classiques ; comme la réduction du poids, une bonne résistance à la fatigue, l'atténuation du choc et la facilité pour rassembler les formes les plus complexes.

Le concept d'utilisation des matériaux collés en tant que moyen à maintenir le vieillissement des structures aéronautiques a été institué en Australie il y a approximativement trente ans.[33]

Les patches composites sont largement utilisés pour réparer les structures métalliques endommagées. Ces patches permettent de retarder la propagation des fissures et par conséquent d'augmenter la durée de vie des structures ainsi réparées. Les propriétés mécaniques de ces structures réparées ont été étudiées dans de nombreux articles.

L'influence de plusieurs paramètres sur le comportement de la propagation de la fissure a été soigneusement étudiée dans la plupart des études. Par exemple, l'influence de la taille du patch composite, du nombre de plis, de la dissymétrie de la structure réparée, de la mise en tension du composant avant collage du patch composite, de la plasticité, du collage imparfait du patch composite ou des contraintes résiduelles a été examinée dans la littérature récente[34]

La réparation par collage du patch en matériau composite offre plusieurs autres avantages par rapport aux matériaux conventionnels, une résistance améliorée, une rigidité, une densité faible, une résistance à la fatigue et aux chocs, une conductivité thermique, une résistance à la corrosion [24]

Cette technique apparaît alors comme une alternative avantageuse par rapport aux techniques plus conventionnelles de réparation, par rivetage ou soudure de structures métalliques. Tout d'abord, les composites sont des matériaux légers aux caractéristiques mécaniques intéressantes qui peuvent aisément être assemblés sur des surfaces à géométrie complexe comme des ailes d'avions. Ensuite le choix du collage permet d'éliminer les zones de concentration de contraintes dues aux rivets.

Néanmoins la qualité de ce type de réparations est fortement liée aux procédures de réalisation du collage, chaque écart par rapport au protocole de collage peut provoquer une dégradation inattendue des performances de la réparation [35]

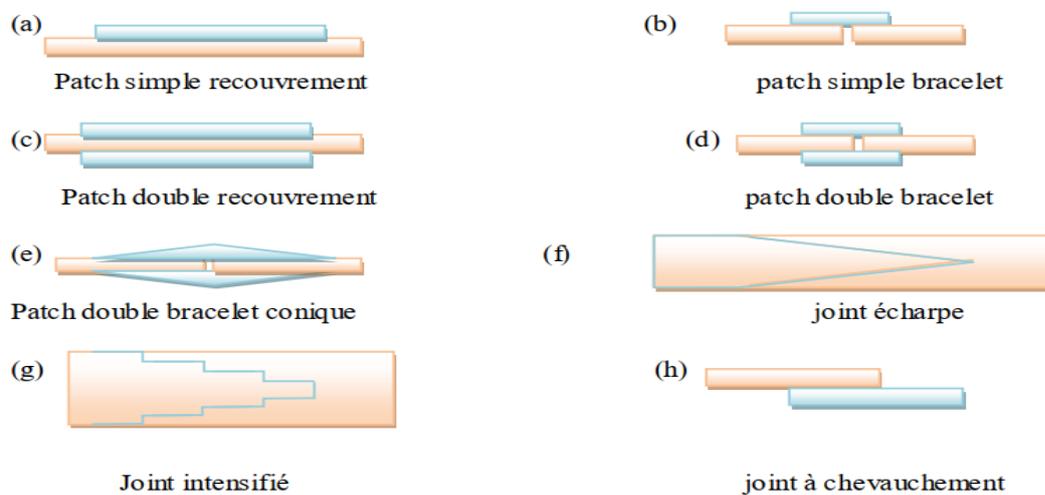


Figure II.13 : type de collage [33]

Le patch collé présente de nombreux avantages par rapport aux patches rivetés [21] :

- les patches collés n'entraînent pas de concentrations de contraintes, contrairement aux patches rivetés ;
- il est plus facile de contrôler les propagations de fissures avec un patch collé qu'avec un patch riveté ;
- il existe moins de risque de corrosion avec des patches collés ;
- la propagation des fissures est plus importante près des bords avec des patches rivetés ;
- le renforcement créé est plus efficace avec un patch collé

Au vu de ces résultats, l'utilisation de patches collés a été préféré a l'utilisation de patch rivetés. [30]

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre passé en revue l'essentiel et les bases de mécanique de rupture pour reconnaître et comprendre l'endommagement subis par les structures et les pièces métalliques, les conséquences qui modifient le comportement, la mécanique de la rupture qui étudie comment les matériaux se comportent lorsqu'ils sont soumis à des fissures , la domaine de recherche qui identifié peut être décrit par bilan énergétique le taux d'énergie G et le facteur d'intensité des contraintes K quantifie l'intensité des contraintes en point de fissure

La prorogation de la fissure est un phénomène complexe qui peut avoir des conséquences graves, les fissures peuvent se former à la surface du matériau ou à ses interfaces, qui puis se propager de manière stable avant une rupture finale instantanée

La réparation des structures métallique est partie essentielle de la maintenance pour garantir la sécurité, durabilité et performances des équipements

Chapitre III

Etude de cas

III.1 Introduction

Afin de réparer et renforcer des différentes structures, il est intéressant de connaître précisément l'état de contrainte en tout point de la structure lors d'une sollicitation. Ce qui permettra par la suite et plus encore d'avoir la possibilité d'agir localement sur la géométrie ou sur le matériau pour augmenter sa durée de vie en service tout en diminuant le pic de surcontrainte, retarder la rupture et la propagation de la fissure.

Récemment, de nombreuses techniques expérimentales ont été proposées par des industriels ou des laboratoires de recherche afin de déterminer la résistance d'un assemblage collé sous différents types de sollicitations mécanique et/ou thermique. Il est donc important avant d'établir une analyse de dimensionnement ou d'optimisation de réaliser des essais sur des structures complètes. Aussi, il est très courant d'étudier des échantillons de petites tailles afin de dégager les principales propriétés qui pourront être appliquées aux grandes structures. Mais la question est de savoir si les résultats obtenus sur échantillons de laboratoire sont représentatifs du comportement réel d'une structure industrielle particulièrement complexe [34].

Les méthodes analytiques et numériques se sont alors rapidement révélées être un outil indispensable pour aider au dépouillement des essais expérimentaux, mais aussi pour permettre d'en limiter le nombre. On peut, en effet, pour un moindre coût réaliser un grand nombre de calculs pour évaluer les points sensibles d'une structure et ainsi proposer des corrections en modifiant certains paramètres. On peut également réaliser des études paramétriques pour évaluer l'impact des variations de géométrie et/ou des propriétés des matériaux sur l'état de contraintes dans l'assemblage et ainsi limiter le nombre d'essais mécaniques à réaliser pour caractériser la structure [35]

Dans ce chapitre, une analyse numérique par la méthode des éléments finis tridimensionnels d'une plaque fissurée réparée par patch en composite collé est présentée, cette modélisation est effectuée avec les codes de calcul ABAQUS. Ce chapitre a pour objectifs d'étudier l'effet d'orientation des fibres et d'épaisseur de la couche adhésive sur l'évolution du FIC.

véritable système d'ingénierie. En d'autres termes, l'analyse doit être basée sur un modèle mathématique précis d'un prototype physique. Le modèle numérique se compose des nœuds, des éléments, des propriétés des matériaux, de véritables constantes, des conditions aux limites, et d'autres caractéristiques utilisées pour représenter le système physique. [33]

III.3 Description géométrique de modèle

Dans cette modélisation, on considère en premier lieu une plaque rectangulaire mince en aluminium ayant les dimensions suivantes : longueur $H = 200\text{mm}$, largeur $W = 20\text{mm}$ et l'épaisseur $e_c = 1\text{mm}$.

On suppose l'existence d'une fissure située au milieu de la plaque et perpendiculaire au plan de sollicitation. La plaque considérée est sollicitée en traction uni-axiale dans la direction verticale "y" sous la contrainte appliquée d'amplitude $\sigma = 100\text{MPa}$. La fissure est réparée par un patch carré en matériau composite en carbone/époxy dont les dimensions sont: hauteur $h = 20\text{mm}$, largeur $w = 20\text{mm}$, et l'épaisseur e_p collé avec une couche d'adhésive de même dimension que le patch avec une épaisseur e_a

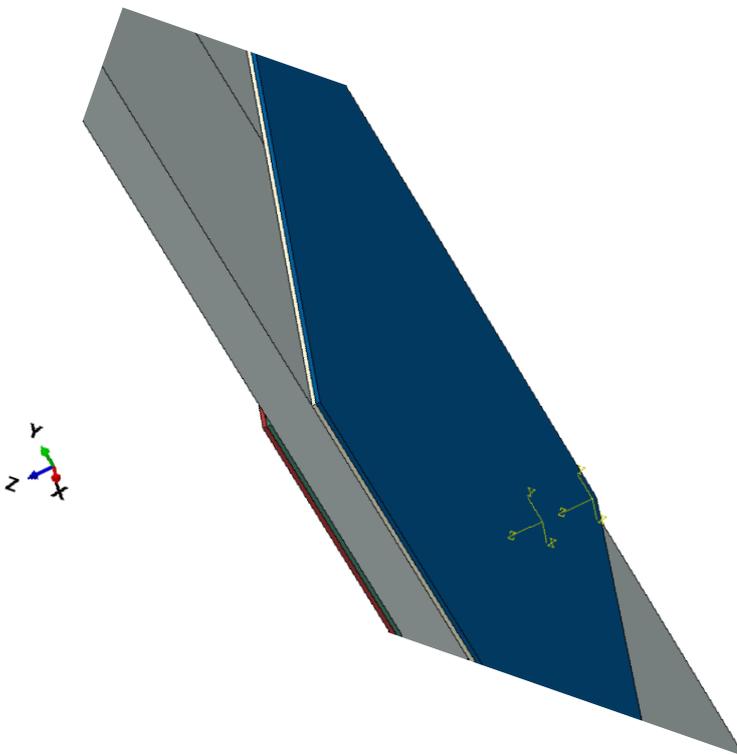


Figure III.1 : Présentation du modelé géométrique

Les propriétés mécaniques des matériaux utilisé dans l'assemblage (plaque-colle-patch) sont illustrés dans le tableau 1.

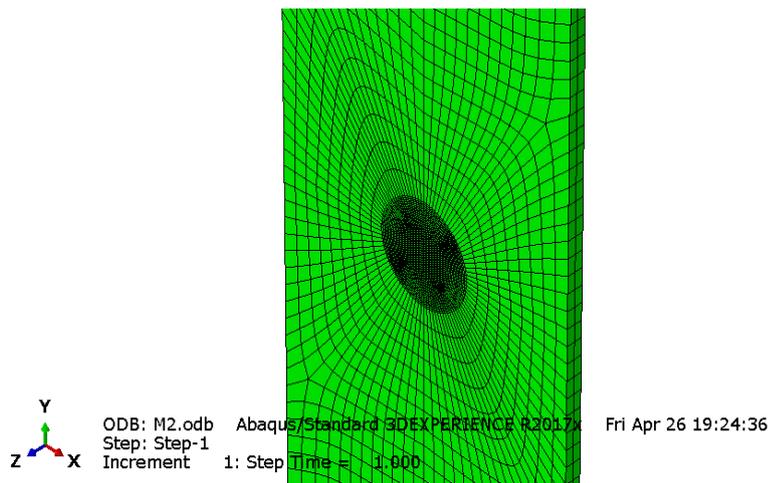
Tableau III.5 : caractéristiques mécaniques des matériaux

Propriétés		Aluminium 7075	Carbon/Epoxy	Adhésif
Module d'élasticité (MPa)	E ₁₁	72000	121000	
	E ₂₂		8600	
	E ₃₃		8600	
Module de cisaillement	G ₁₂		4700	965
	G ₁₃		4700	
	G ₂₃		3100	
Coefficient de poisson	v ₁₂	0.33	0.27	0.32
	v ₁₃		0.27	
	v ₂₃		0.4	

III.4 Résultats et discussions

III.4.1 Evolution du facteur d'intensité de contrainte

Dans le calcul on a employé le code commercial des éléments finis ABAQUS V 2017. Nous avons utilisé pour la plaque un maillage hexaédrique quadrilatère et nœuds de type C8D8RH et en présence de la fissure centrale le nombre des éléments quadrilatères augmente en augmentant la taille de la fissure avec un maillage raffiné au voisinage de cette fissure, comme le montre la Fig. 1.

**Figure III.2** : présentation du maillage de la plaque

III.4.1.1 Model sans patch

On a réalisé une plaque fissurée par simulation. La figure représente une fissure de longueur $a=6\text{mm}$

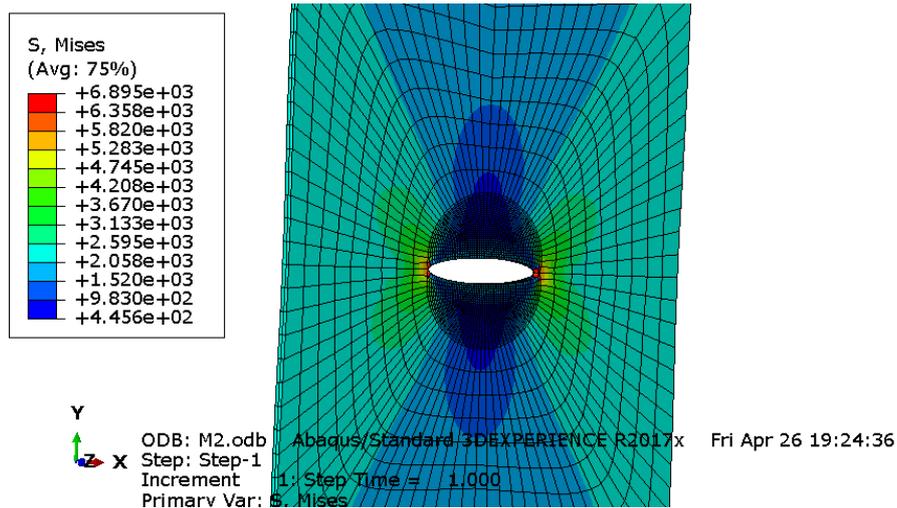


Figure III.3 : présentation de la fissure

Pour analyser l'évolution du FIC on a réalisé une plaque fissurée avec différentes longueurs de fissure ($a=2\text{mm}, 3\text{mm}, 4\text{mm}$ et 6mm). la figure illustre l'évolution du FIC pour la plaque fissurée sans renforcement

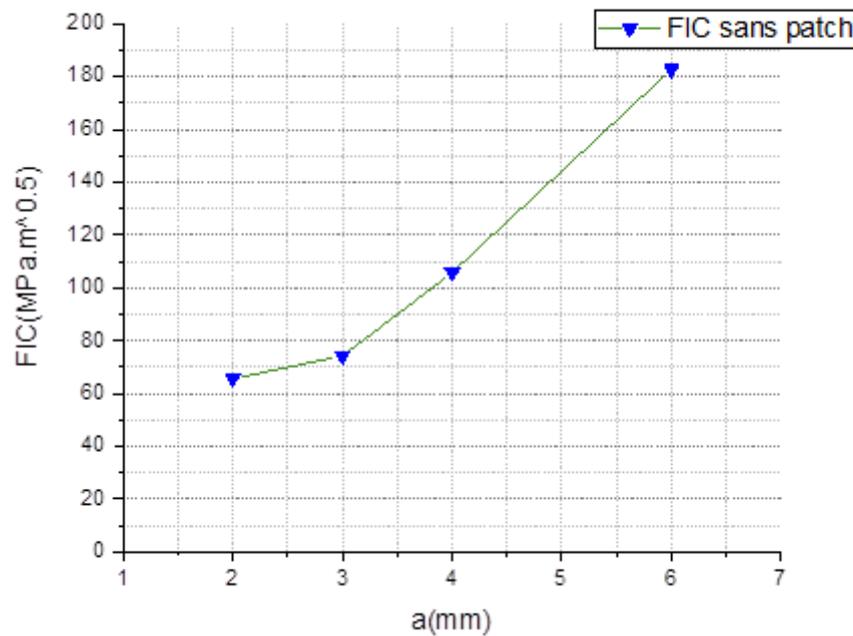


Figure III.4 : l'évolution du FIC en fonction de a de plaque sans renforcement

III.4.1.2 Model avec un seul patch

Afin d'étudier l'influence du patch composite carbone/époxy sur la propagation de la fissure on a réalisé un modèle d'une plaque renforcée avec un seul patch puis on a varié le nombre de plis, en

utilisant model avec 1pli,2plis et avec 3plis et pour chaque cas on a varié l'orientation des fibres($\theta = 0^\circ$, $\theta = 45^\circ$, $\theta = 90^\circ$).

III.4.1.2.1 Influence du nombre de plis et d'orientation des fibres

L'analyse consiste à faire varier la longueur de la fissure réparée tout en conservant les mêmes caractéristiques mécaniques de la plaque en aluminium et du patch. L'évolution de la réduction du FIC de la fissure avec et sans patch par rapport à la longueur de la fissure pour différents nombres de plis et des différentes orientations des fibres, est représentée sur la Fig

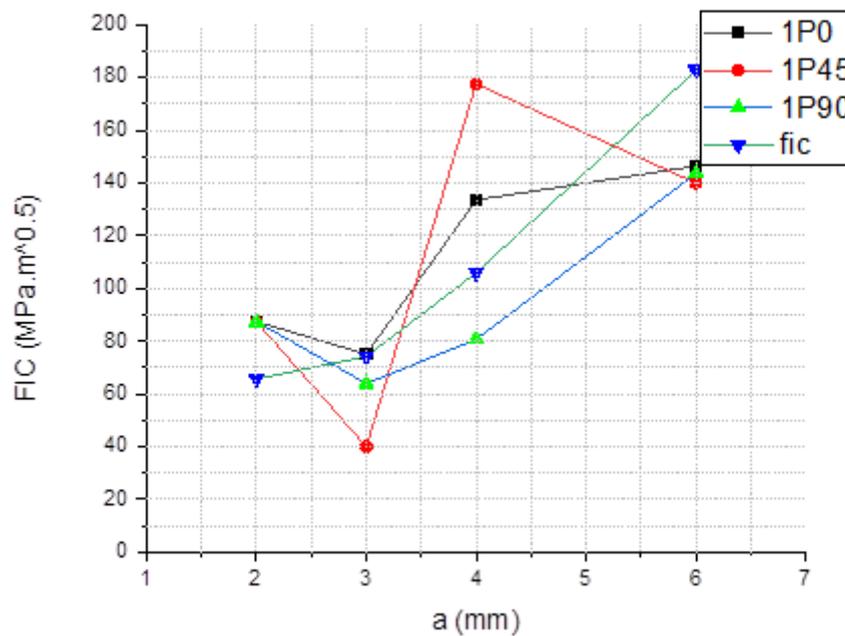


Figure III.5 : l'évolution du FIC en fonction de a avec et sans patch pour un seul pli

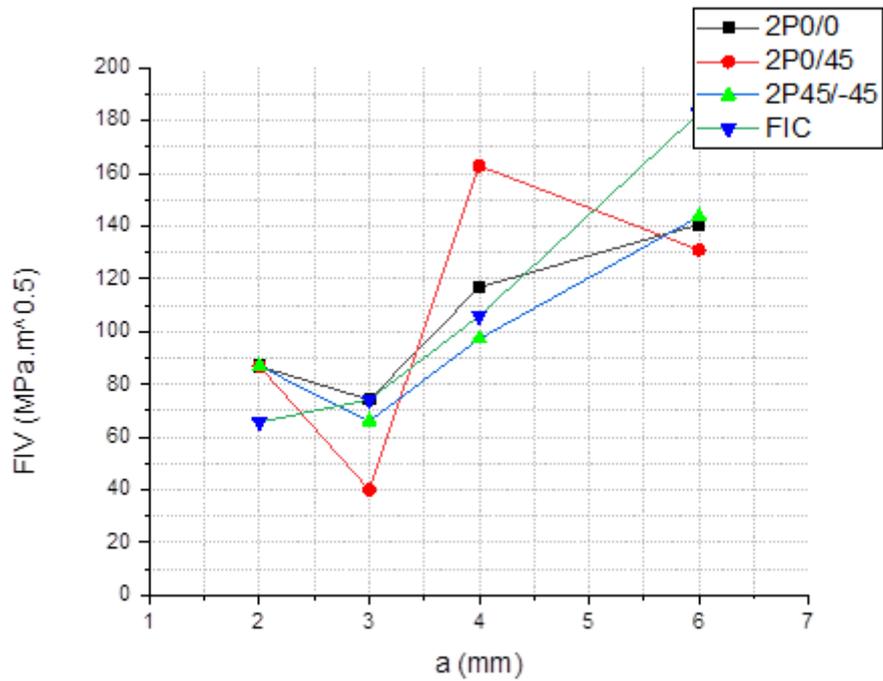


Figure III.6 : l'évolution du FIC en fonction de a avec et sans patch pour 2 plis

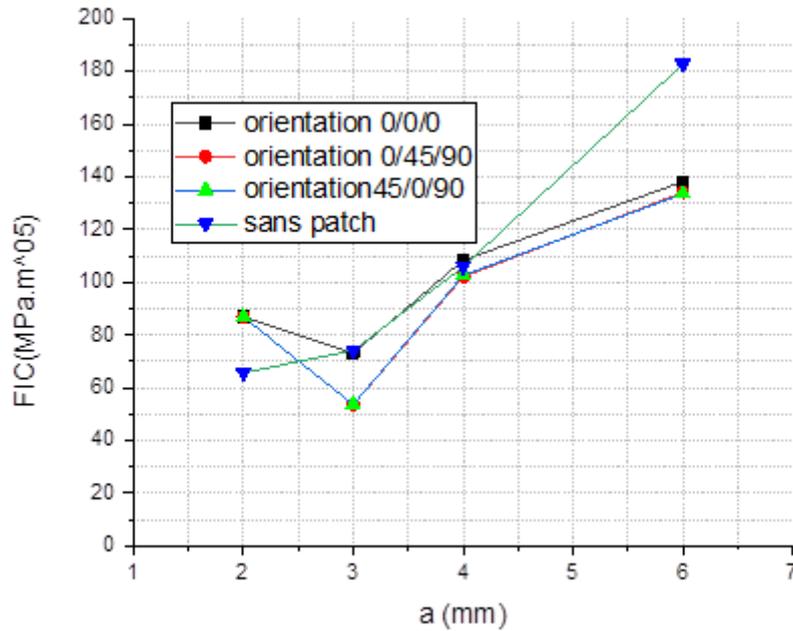


Figure III.7 : l'évolution du FIC en fonction de a avec et sans patch pour 3 plis

Nous remarquons d'après la figure 2 que la réduction du FIC croit proportionnellement avec l'augmentation de la taille de la fissure mais sans différences entre la plaque sans et avec réparation.

Pour cette raison constatée on a pensé à renforcer notre plaque par deux patchs similaires des deux côtés de la plaque.

III.4.1.3 Model avec double patchs

Dans ce qui suit on va présenter l'effet de deux patch similaires des deux coté avec une variation de nombre de plis(1pli,2plis,3plis), d'orientation des fibre ($\theta=0^\circ$, $\theta=-45^\circ$, $\theta=90^\circ$)et aussi l'épaisseur de la couche d'adhésive ($e_a=0.2\text{mm}$, $e_a=0.3\text{mm}$, $e_a=0.4\text{mm}$).

III.4.1.3.1 Influence du nombre de plis et d'orientation

Dans ce que suit on a présenté 3 courbes pour les 3 cas (nombre de plis) chaque graphe présente l'évolution du fic avec différentes orientation et sans patch pour comparer les résultats.

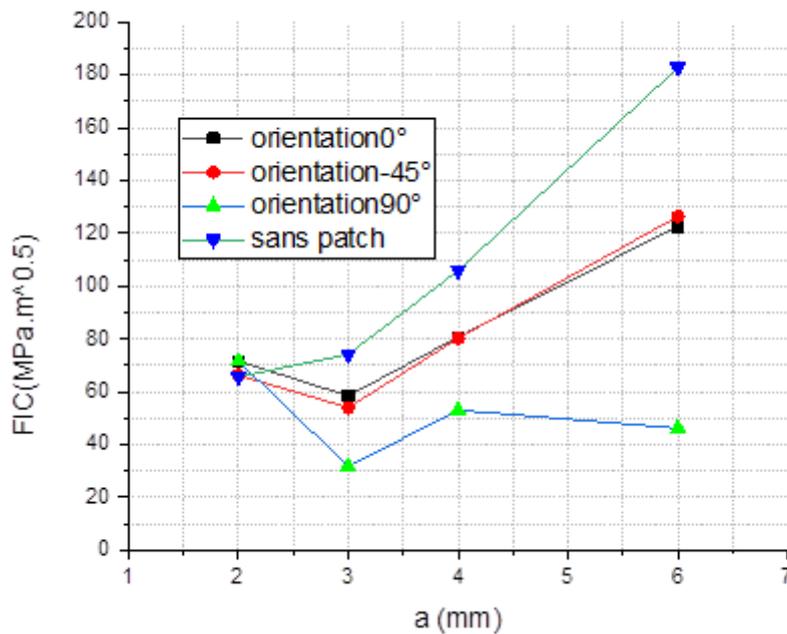


Figure III.8: l'évolution du FIC sans patch et avec deux patchs à un seul pli

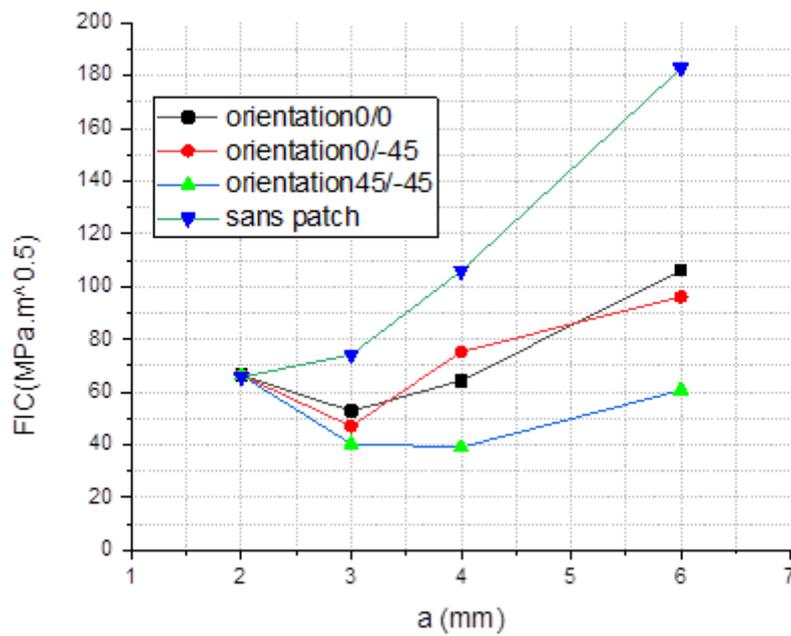


Figure III.9: l'évolution du FIC sans patch et avec deux patches à 2 plies

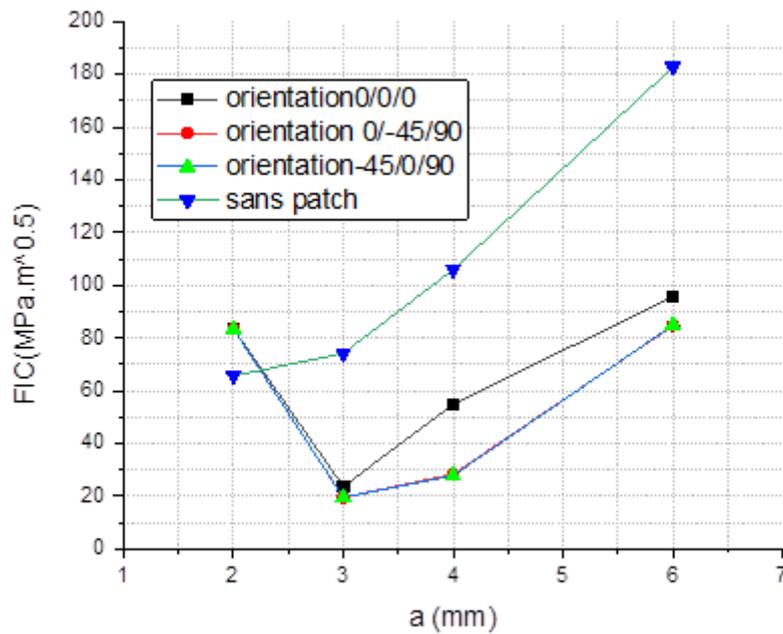


Figure III.10: l'évolution du FIC sans patch et avec deux patches avec 3 plis

D'après les figures on constate que Lorsque le patch de renforcement à 1 pli, 2 plis et 3 plis la réduction du FIC augmente linéairement avec l'augmentation de la longueur de la fissure. La réduction maximale

est obtenue pour un patch composite 2plis dont les fibres sont orientées à 45° par rapport la charge appliquée. En augmentant le nombre de plis du patch, nous remarquons que la réduction maximale du FIC décroît proportionnellement avec l'augmentation de la taille de la fissure.

III.4.1.3.2 Influence d'épaisseur de la couche d'adhésive

La variation de l'épaisseur de la couche adhésive a un effet sur la qualité de renforcement, on a fixé le nombre de plis pour comparer les résultats , et cela présenté dans ci-dessus

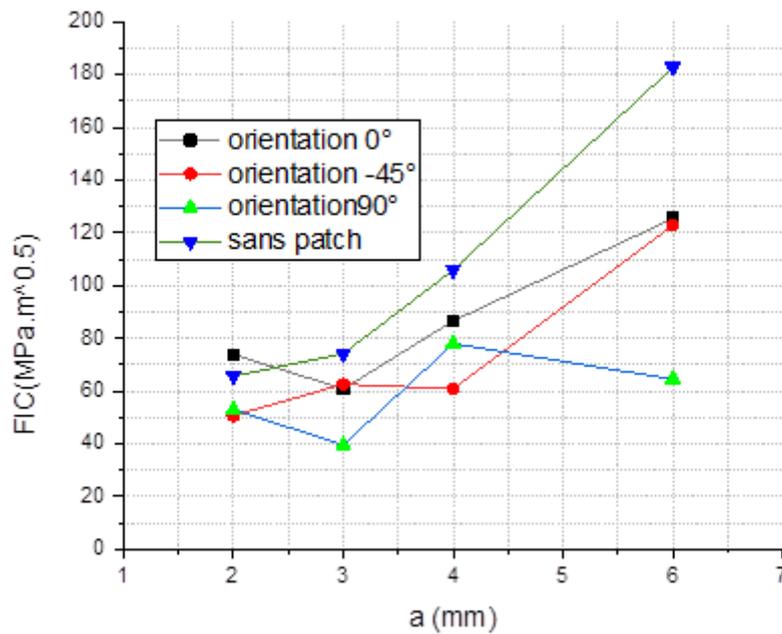


Figure III.11: l'évolution du FIC avec deux patchs et sans patch pour $e_a=0.2\text{mm}$

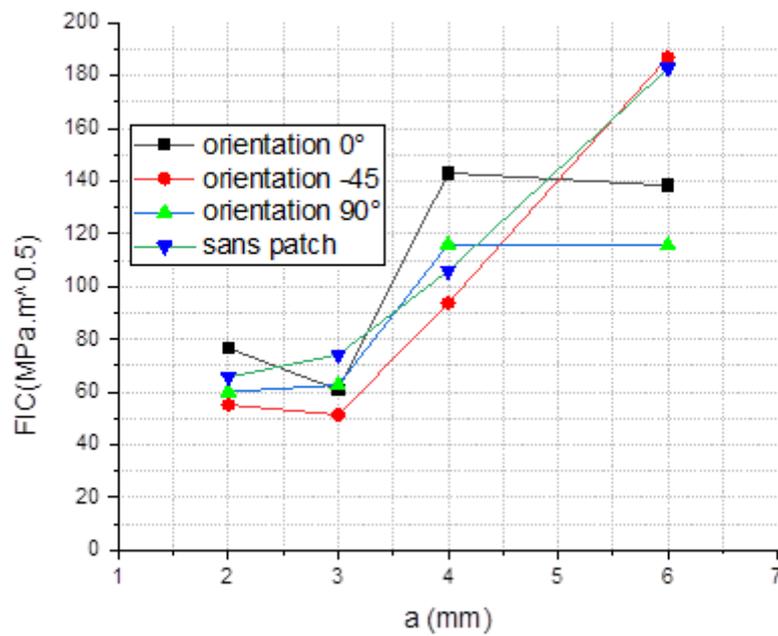


Figure III.12: l'évolution du FIC avec deux patchs et sans patch deux pour e_a=0.3mm

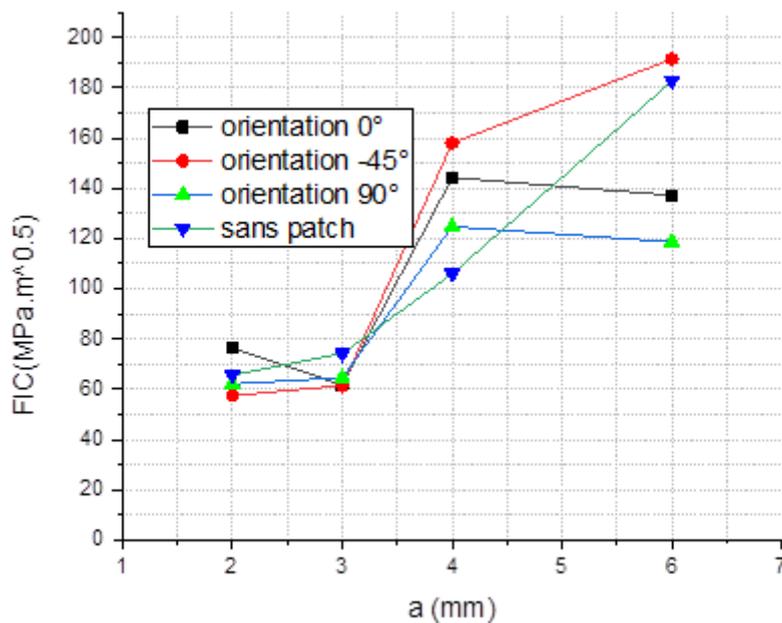


Figure III.13: l'évolution du FIC avec deux patch et sans patch pour e_a=0.4mm

III.4.2 Etat de la plaque et distribution des contraintes

Afin de bien comprendre le comportement mécanique de la fissure ,l'état de la plaque et la distribution des contraintes sont présentés dans ce qui suit selon le type de recouvrement(un seul patch, deux patches),et l'épaisseur de la couche d'adhésive

III.4.2.1Influence d'un seul patch

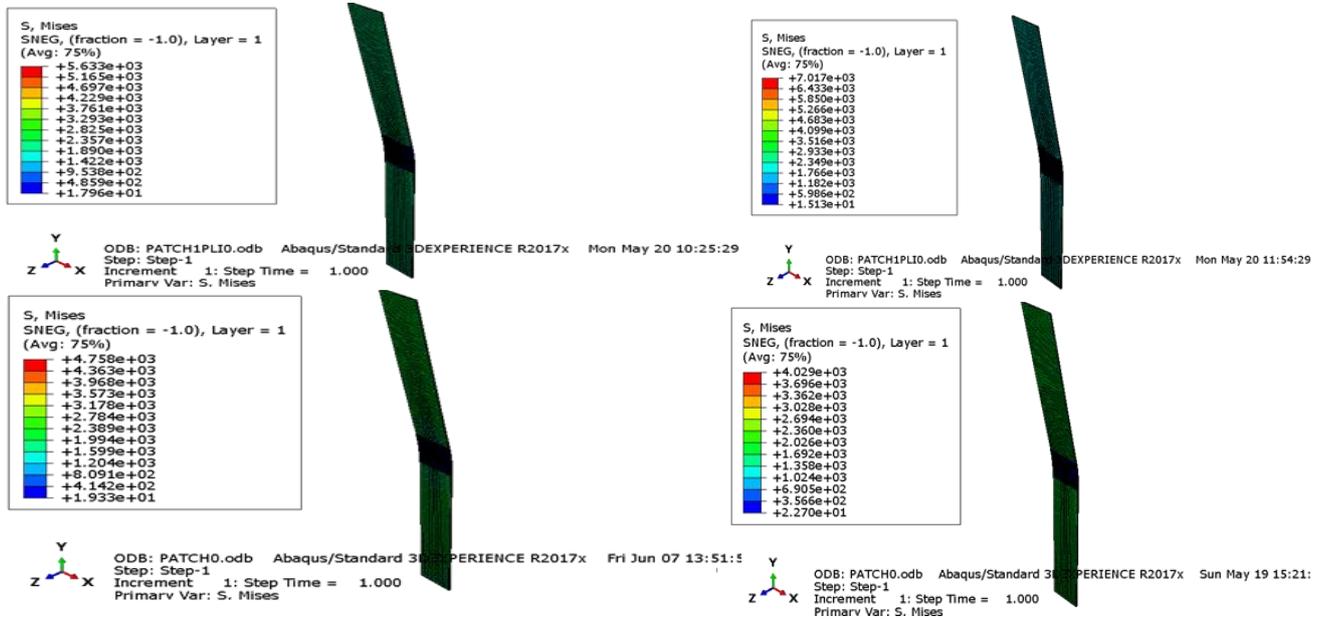


Figure III.14: déformation de la plaque réparée avec un seul patch à un pli

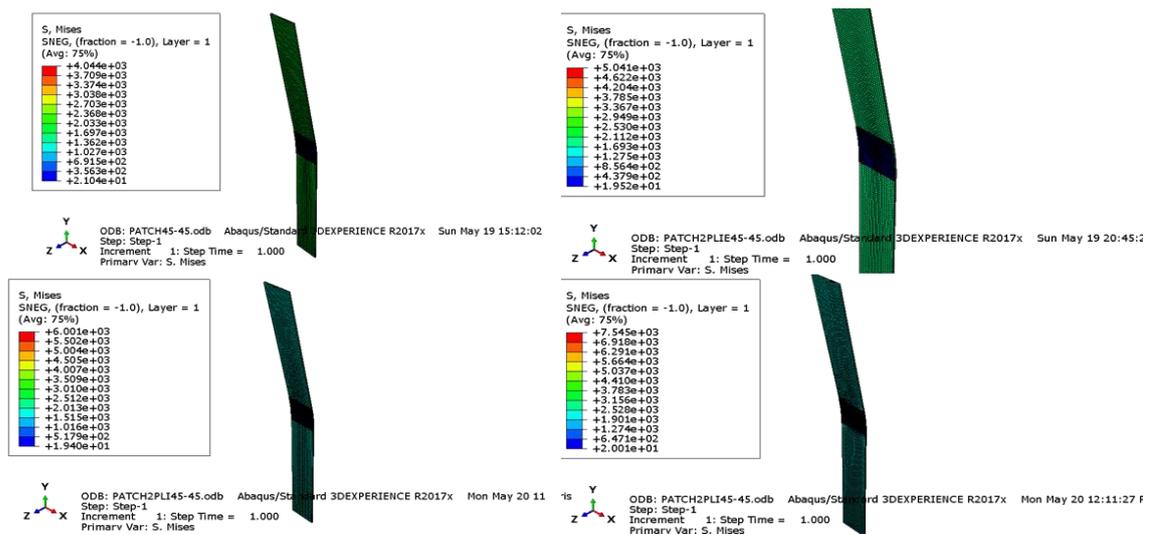


Figure III.15: déformation de la plaque réparé avec un patch à deux plis

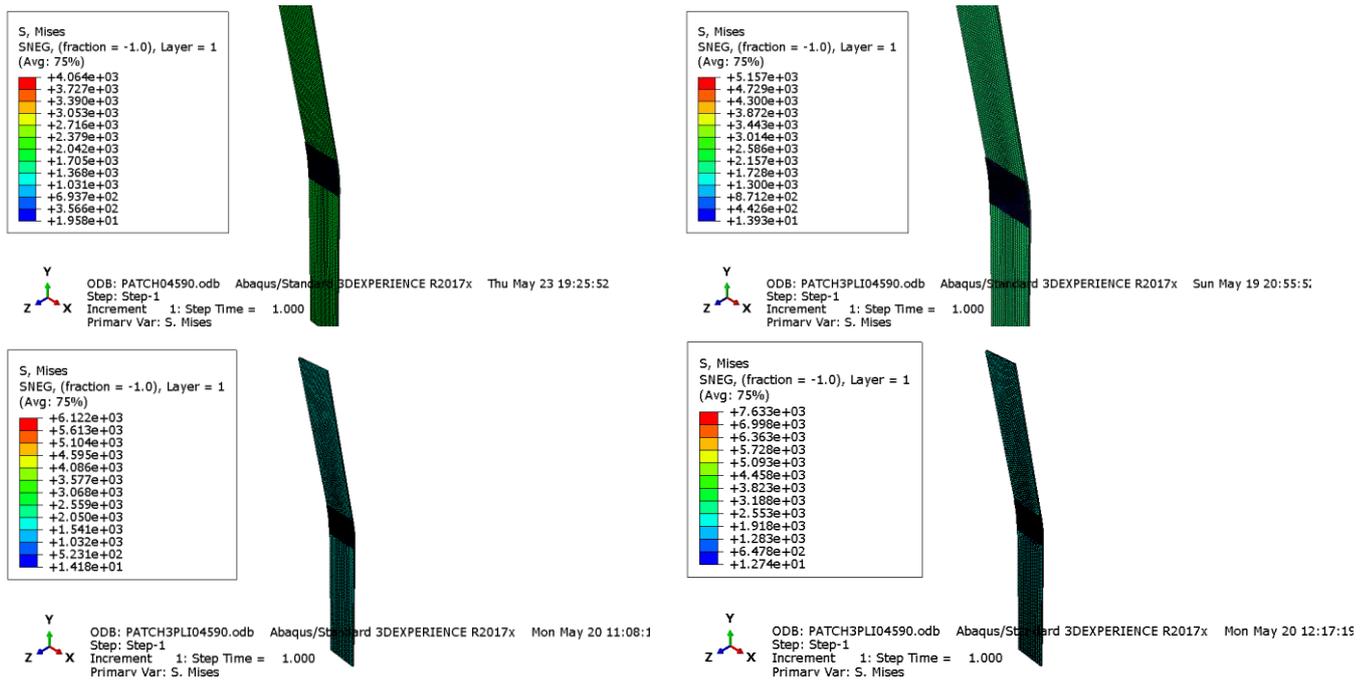


Figure III.16: déformation de la plaque réparée avec un patch à 3 plis

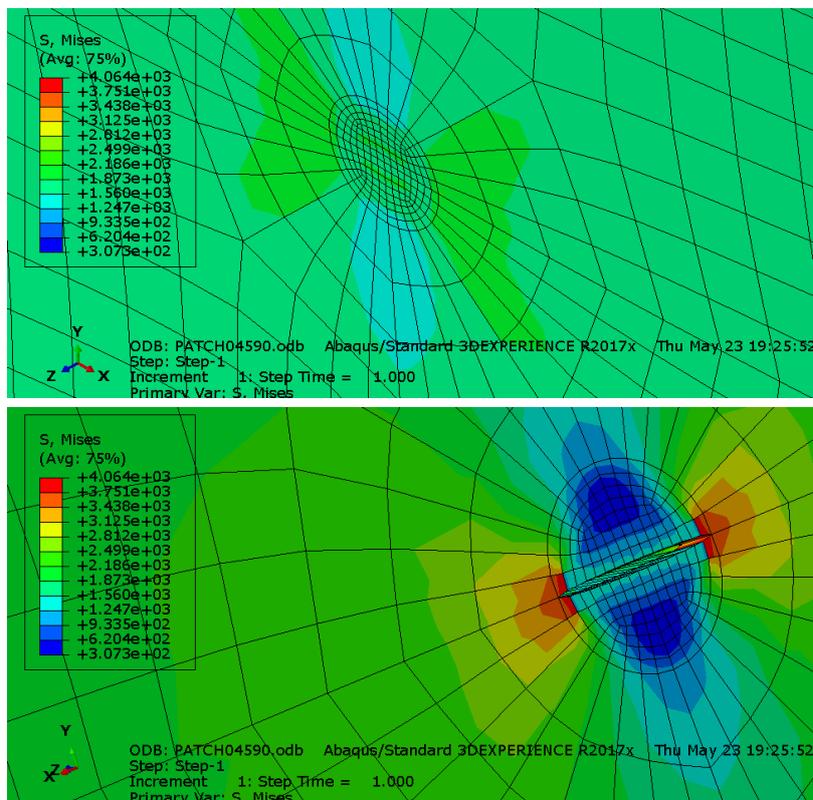


Figure III.17 : distribution des contraintes autour de la fissure

III.4.2.2 Influence de deux patches

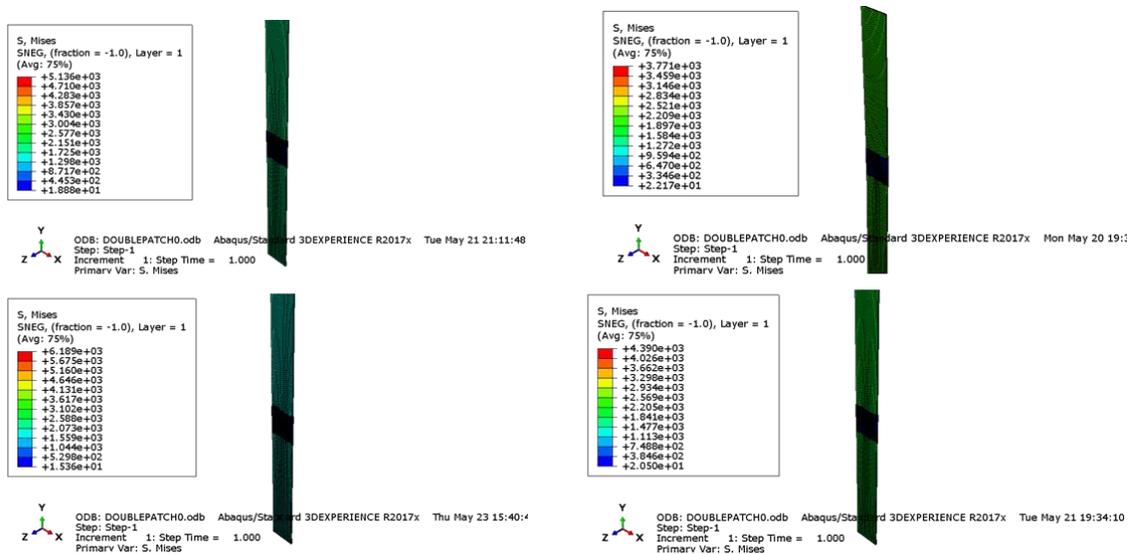


Figure III.18 : déformation de la plaque avec double recouvrement à un pli

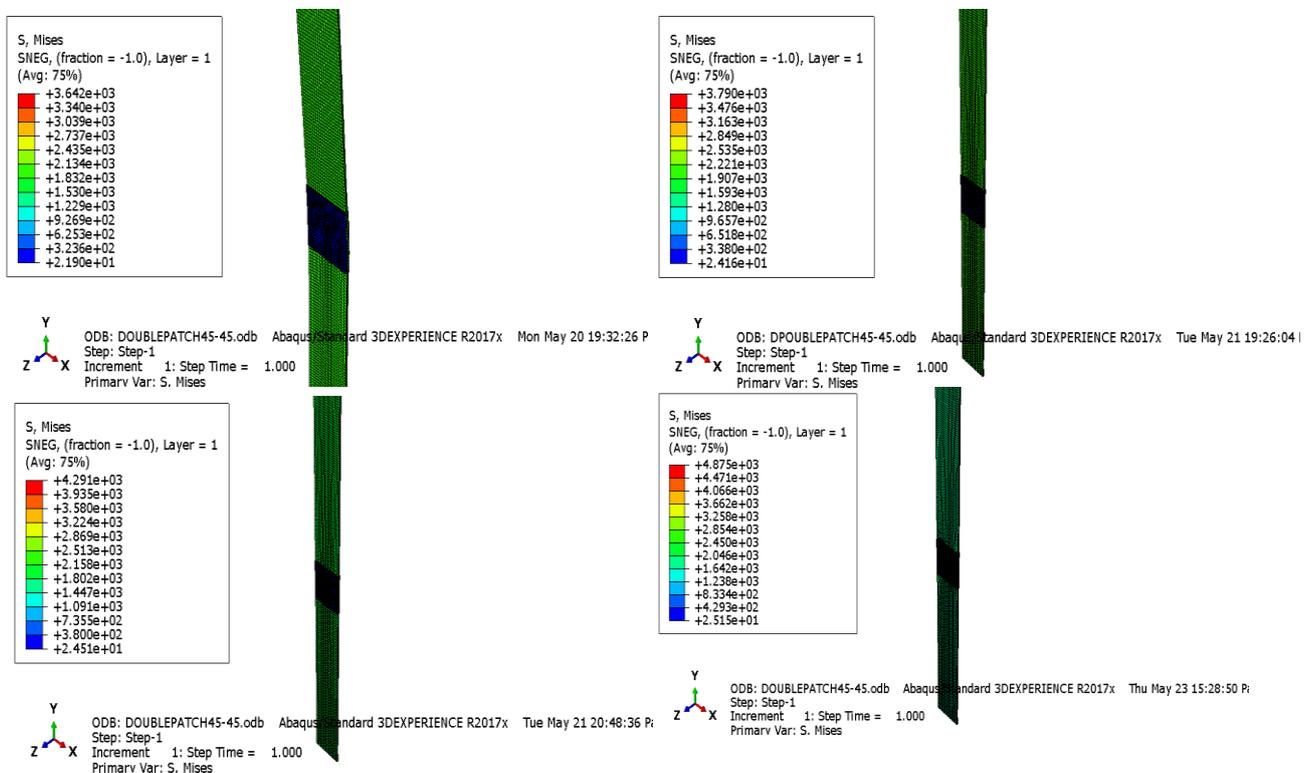


Figure III.19 : déformation de la plaque avec double recouvrement à 2 plis

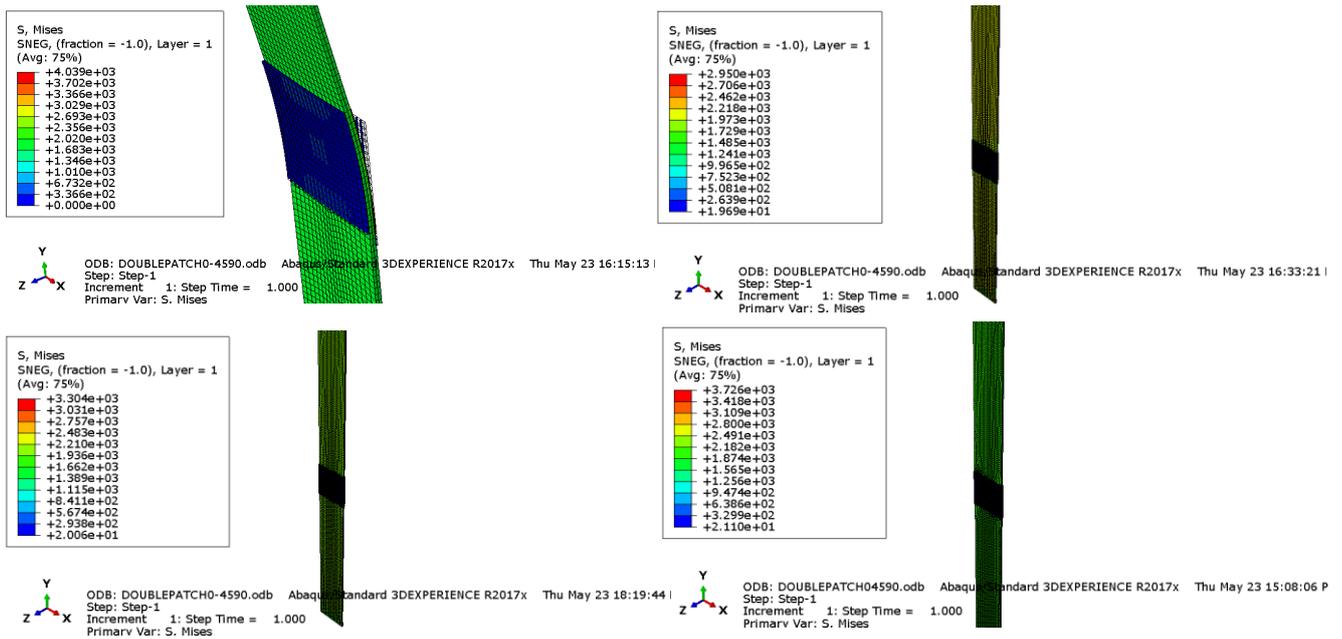


Figure III.20 : déformation de la plaque avec double recouvrement à 3 plis

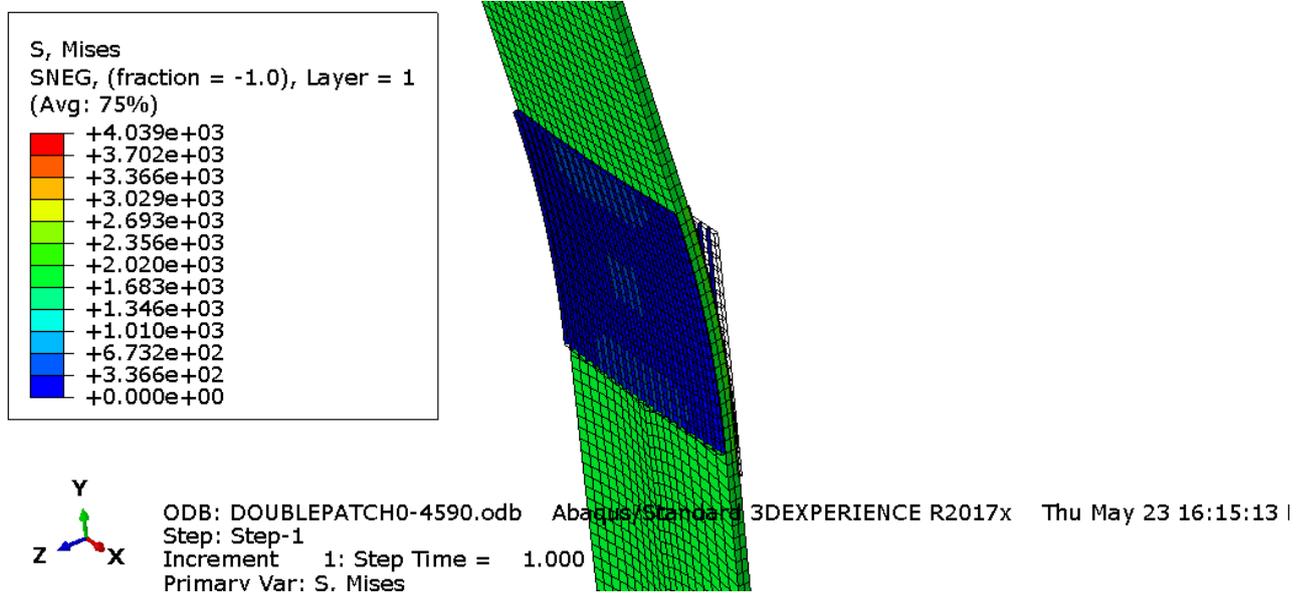


Figure III.21 : décohesion du patch de la plaque

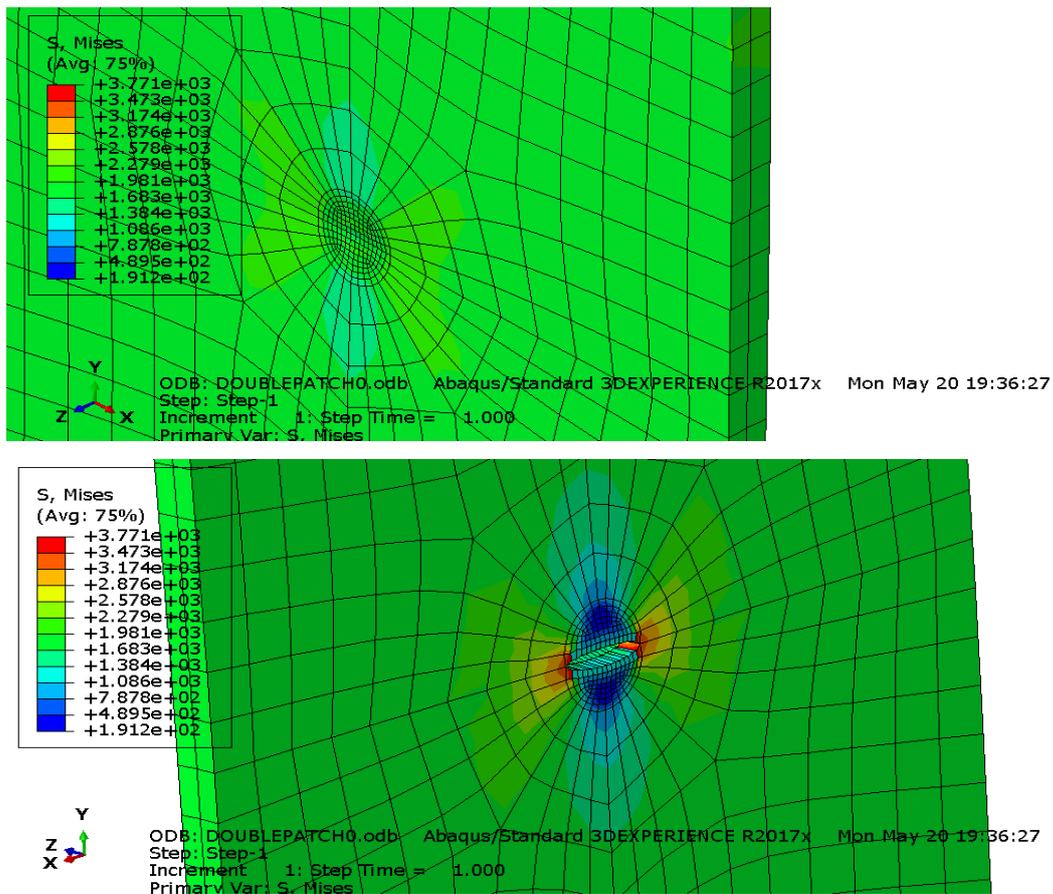


Figure III.22 : distribution des contraintes au tour de la fissure

Dans ce cas les contraintes de Von Mises et le FIC sont bien réduites dans la majorité des cas étudiés mais ne sont pas compatibles à 100%.

Pour le cas du patch à deux plis orientés [45/-45] de la plaque avec une fissure de longueur $a=2\text{mm}$ se déforme et cela provoque une décohésion du patch

Pour le cas du patch à 3plis [0/-45/90] pour une longueur de fissure $a=2\text{mm}$, une déformation de la plaque et une décohésion bien claire du patch sont produites.

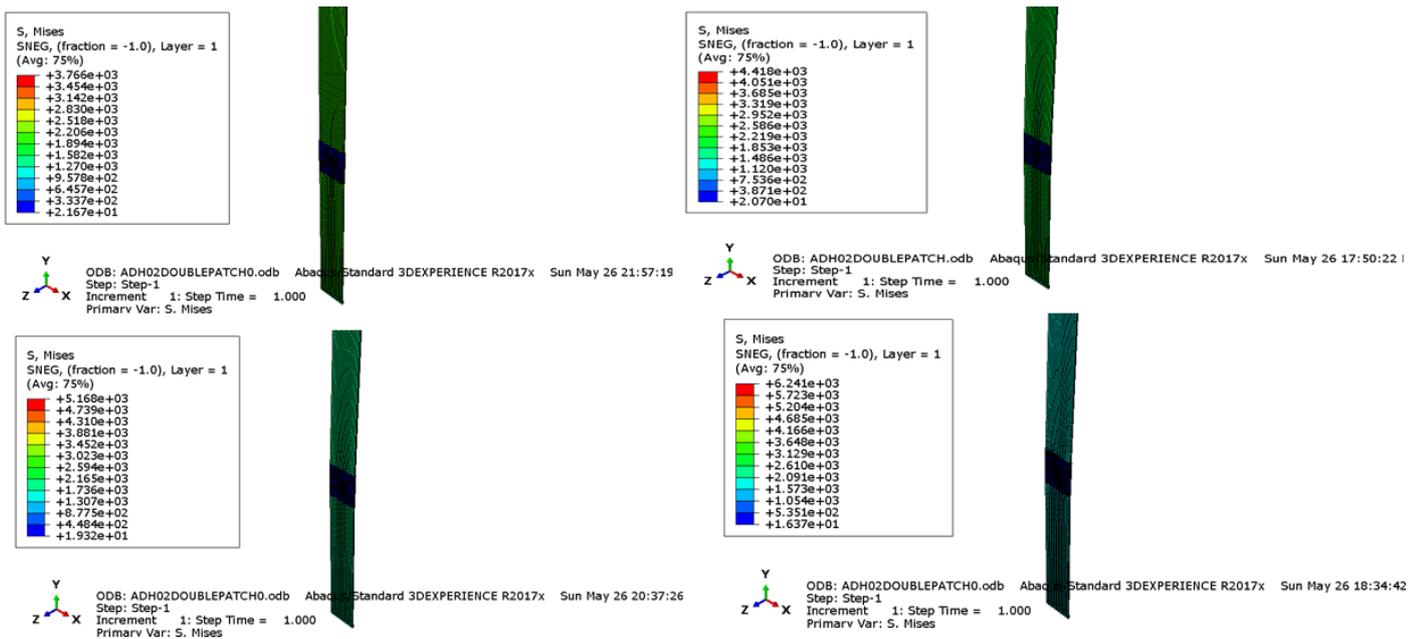


Figure III.23 : déformation de la plaque réparée avec double recouvrement avec ea=0.2mm

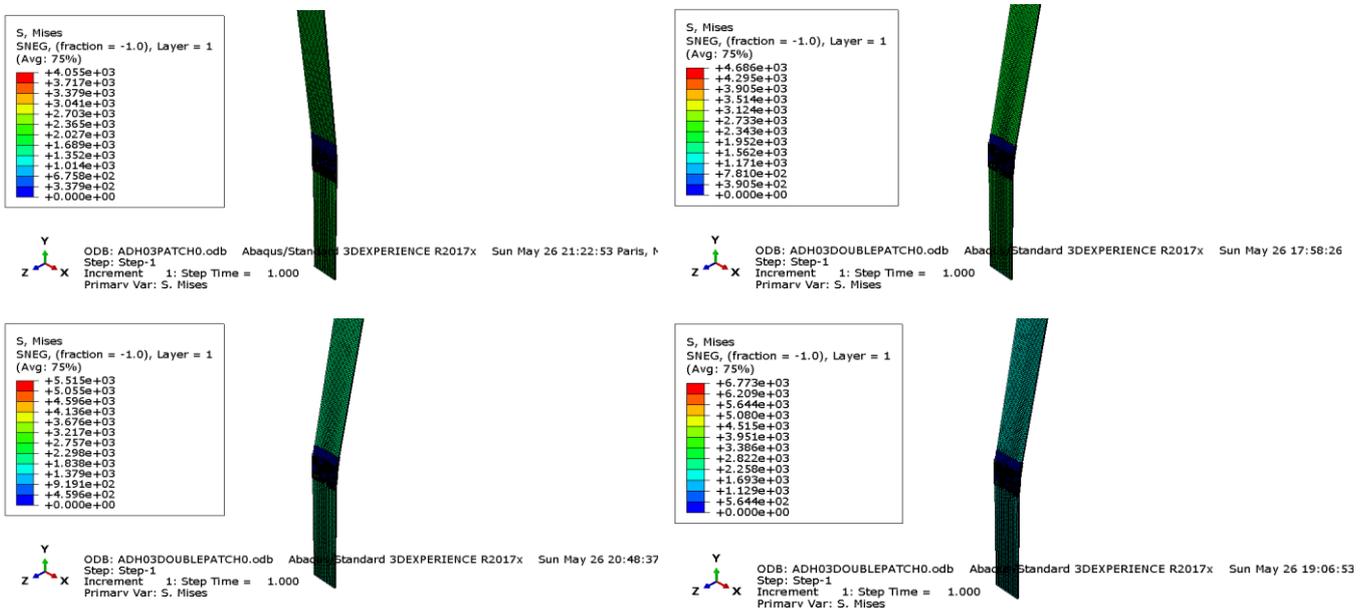


Figure III.24: déformation de la plaque réparée avec double recouvrement avec ea=0.3mm

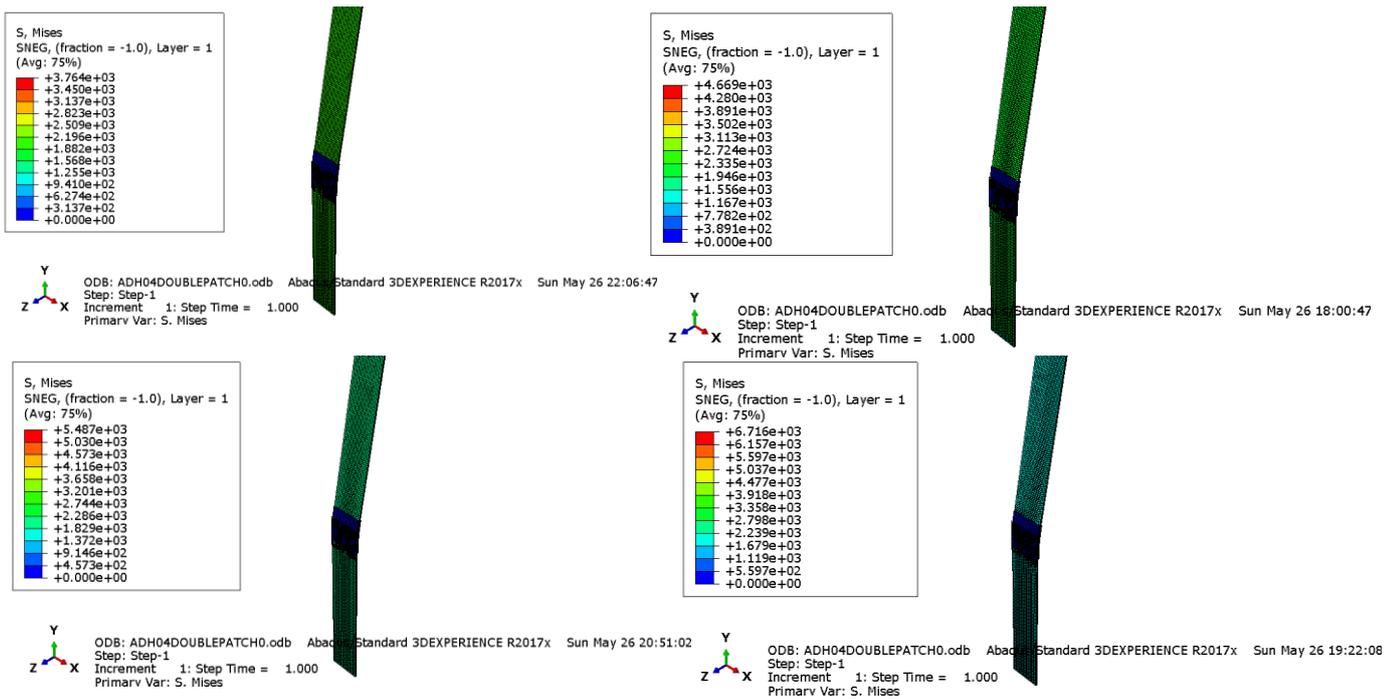


Figure III.25 : déformation de la plaque réparée avec double recouvrement avec $e_a=0.4$

Les meilleurs résultats sont obtenus par la couche d'adhésive avec $e_a=0.2\text{mm}$.

Pour $e_a=0.3$ et $e_a=0.4$ une déformation claire de la plaque est produite.

III.5 Conclusion

D'après les résultats obtenus la réparation de la plaque fissurée par deux patches avec un seul pli et avec une couche d'adhésive de $e_a=0.2\text{mm}$ a la meilleure réduction du FIC et des contraintes autour de la fissure.

Conclusion générale

L'industrie a connu une croissance significative grâce à des investissements et aux recherches scientifiques, cependant aux demandes croissantes de performance, durabilité et de faible coût. L'innovation continue et l'optimisation des composites deviennent ainsi impératives. L'évolution du domaine industriel a été accompagnée d'une évolution similaire de la maintenance avec une adaptation nécessaire pour répondre aux exigences spécifiques. La réparation par patch en composite est une solution moderne et efficace pour les structures fissurées.

Après les résultats obtenus dans notre travail. On arrive à une réduction du FIC afin d'arrêter la propagation des fissures, l'utilisation de deux patches avec un seul pli et avec une couche d'adhésive d'épaisseur e_a donne le meilleur résultat.

La réduction du FIC et des contraintes autour de la fissure n'est pas suffisante pour l'adaptation de ce patch. Il faut prendre en considération l'état de déformation de la plaque. Dans la majorité des cas étudiés la plaque se déforme, et cela est trop loin de l'objectif que nous souhaitons atteindre.

D'après l'étude, ce que nous avons fait, le patch en Carbone/Epoxy ne peut pas être adapté pour tous les matériaux et en tous cas, en effet sa compatibilité dépend de la taille de la fissure et du type de matériaux à réparer. En résulte que le Carbon/Epoxy est plus dur que l'aluminium, donc le patch qu'on a choisi n'est pas le choix optimal pour réparer une plaque en aluminium.

En conclusion, l'évaluation de l'efficacité et la compatibilité du patch en Carbone/Epoxy à travers cette analyse nous mène à savoir les limites de cette approche.

Cependant, pour une compréhension approfondie des endommagements et leur réparation, il reste des questions ouvertes qui nécessitent une continuité des recherches.

Références Bibliographique

Bibliographie

- [1] BERTHELOT (matériaux composites comportement mécanique et analyse des structure
- [2] Sumit Pramanik, Jayesh Cherusseriavajit Singh Baban,L. Sowntharya, and Kamal K. Kar Metal MatrixComposites: Theory,Techniques, and Applications 11
- [3] Etude du comportement mécanique des matériaux composites à matrice céramique de faible épaisseur Soutenue le 26 Novembre 2013)
- [4](Laurent Gornet. Généralités sur les matériaux composites. Engineering school. 2008. ffccl-00470296v1)
- [5] Salim DERMARKAR (Matériaux composites à matrice métallique - Date de publication : 10 juil. 1990 thequnique de l'ingénieur)
- [6] Taqiyeddine MOUMENE (Filière : Chimie alité: Master I Chimie des Matériaux
- [7] <https://ssl.gstatic.com/ui/v1/icons/mail/images/cleardot.gif>
- [8] AUTAR K. KAW mécanique of composite materials – second Edition 2006
- [9] Daniel Gay (matériaux composites - 5ème édition révisée
- [10] Deghboudj Samir (See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.n> Matériaux Composite Book · November 2021 CITATION 2 authors, Université de Tébessa 62 PUBLICATIONS 114 CITATION)
- [11] Advisor: Golam Newaz (Mechanical And Electro-Chemical Investigation Of Carbon Farbric/epoxy And Aluminum Foam Sandwich Composite Beams January 2013- DOI:10.13140/RG.2.2.33666.71365 - Thesis for: Masters (Mechanical Engineering)
- [12]https://www.researchgate.net/figure/Constituants-dun-materiau-composite-stratifie_fig49_318579972) 01/03/2024 16h:02
- [13] T. Chantrait. Approche multi'échelle en espace et en temps pour la prévision des endommagements dans les structures composites soumises `a un impact de faible 'energie.. Materials. INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON, 2014. French. <tel-01188058>
- [14] Thesis for : DoctoratAdvisor : BOUKHOULDA Farouk Benallel, NOUARI Mohammed Authors -Contribution à l'étude de l'optimisation du contrôle des vibrations d'une poutre exposée à un champ thermiqueJuly 2021 DOI:10.13140/RG.2.2.31043.94246
- [15]https://telum.umc.edu.dz/pluginfile.php/81338/mod_resource/content/1/Chapitre_5.pdf 14/04/2024 18h:39

Bibliographie

- [16] PDF- THÈSE - DSpace Djillali Liabes University of Sidi Bel Abbes univ-sba
- [17] J.Benard, A.Michel, J.Philibert, and J.Talbot. Métallurgie générale. Masson, 1984. 2^e édition.
- [18] Bekkar Baghdad, Etat de l'art sur le comportement en fissuration par fatigue des alliages d'aluminium a durcissement structural. Université Aboubekr Tlemcen, (Algérie), 2014
- [19]- J. Capelle, I. Dmytrakh, J. Gilgert, P. Jodin, G. Pluvinage. « A comparison of experimental results and computations for cracked tubes subjected to internal pressures » Materiali in Tehnologije, 40(6), 233-237, 2006
- [20]- Direction de Distribution-Sous-direction des Techniques de Distributions du gaz «Spécifications techniques des postes de détente gaz » Sonelgaz, . XDG, 2000
- [21]- R.Khelif, K.Chaoui et À. Châteauneuf « Evaluation de la durée de vie des tubes en polyéthylène basée sur la fiabilité ». 16-ième congrès de maîtrise de sureté de fonctionnement, Avignon. 6-10, 2008.5)
- [22] thèse présente par Mr Sadi Mohamed Said – caractérisation et étude de la propagation de fissure d'un polyéthylène - 2013
- [23] Thèse Présentée par David LEBAILLIF Ingénieur de l'Ecole Centrale de Lille DEA de Mécanique pour obtenir le grade de Docteur - Fissuration en fatigue des structures mécano-soudées soumises à un environnement mécanique complexe de l'Université (Spécialité : Génie Mécanique) par David LEBAILLIF Ingénieur de l'Ecole - Université Lille 1-
- [24] thèse présentée par Deghoul Nadjia – étude du comportement en fatigue des panneaux réparés par des plaques en composite – Université des Sciences de la Technologie D'oran – Mohamed Boudiaf
- [25] livre- Rupture par fissuration des structures - Naman Recho – Editions Hermes
- [26] A.BAUS, H.P.LIEURADE, G. SANZ et M.TRUCHON. Etude de l'amorçage des fissures de fatigue sur des éprouvettes en acier à très haute résistance possédant des défauts de formes, et de dimensions différentes, Revue de Métallurgie ; 565- 584, Octobre 1977
- [27] J Rodriguez, J. E., F. P. Brennan, and W. D. Dover. "Minimization of stress concentration factors in fatigue crack repairs." International journal of fatigue 20.10 (1998): 719-725
- [28] thèse par - Hao WU, « Modélisation de l'extension de la durée de vie des structures fissurées après réparation par la technique de perçage », thèse de doctorat, Université de Lille1; 2009.
- [29] <https://www.soundlightup.com/archives/reportages/jsf-latelier-tout-faire.html>) 07/05/2024 20h :17
- [30] Guide n°1 [FAME] « Réparation et rénovation des structures métalliques »
- Une édition Figure : Propagation d'une fissure dans une plaque pré-fissurée [1]n du syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement de structures (strres) / décembre 2008
- [31] <https://gfix.fr/guides/definition-rivet-plein-ou-rivet-a-frapper> 28/05/2024 18h:24

Bibliographie

[32] Baker, A. Repair of cracked or defective metallic aircraft components with advanced fibre composites – an overview of australian work. Composite Structures 2 (1984), (153-181)

.

[33] Mémoire présent par- Halis Tayeb – Bennhar Elkhilil – Réparation d'une plaque métallique en présence d'une fissure émanant d'entaille par collage d'une patch en FGM

[34] thèse : marie-Laetitia pastor . contribution à l'étude en fatigue de structure en aluminium renforcées par patch composite . uviversité blaise pascal – clermont ferrand II 2007 – chapitre I – etat de l'art – réparation

[35] Toufik Achour - Etude des techniques de réparation des structures composites endommagées

[36].A. NACERI, et A. VAUTRIN, Caractérisation du comportement mécanique d'un composite (tissu de verre/résine époxyde) à différentes périodes de vieillissement hygrothermiques,

[37].Thèse, Julie BERTHO, Vieillissement hygrothermique d'un assemblage acier adhésif époxy : évolution de la tenue mécanique en fonction de l'état physico-chimique de l'adhésif. Le 02 jan 2012

.

ملخص

الألمنيوم وسبائكه يستخدمون عموماً في المجال الصناعي بفضل خفتهم، وخصائصهم الميكانيكية، ومقاومتهم للتآكل. التقنية الأكثر فعالية وفائدة لإصلاح الألواح الألومنيوم المتشققة هي تثبيت اللوح المتشقق برقعة من مادة مركبة. يتضمن عملنا دراسة تطور عامل شدة التوتر بالنسبة لطول الشق، مع مراعاة عوامل عدة مثل اتجاه الألياف، وعدد الطبقات، وسمك اللاصق باستخدام برنامج ABAQUS لمحاكاة النموذج قيد الدراسة.

الكلمات المفتاحية: رقعة, مادة مركبة , اتجاه الألياف, عدد الطبقات, سمك لاصق.

Résumé

L'aluminium et leurs alliages sont couramment utilisés dans le domaine industriel grâce à leur légèreté, propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion. La technique de réparation des plaques en aluminium fissuré la plus utile et efficace est le collage de la plaque fissurée avec un patch en composite, notre travail consiste à étudier l'évolution du facteur d'intensité de contrainte en fonction de la longueur de fissure en prenant compte de plusieurs facteurs, l'orientation des fibres, le nombre de plis et l'épaisseur de la colle, en utilisant l'logiciel ABAQUS pour la simulation du modèle étudié.

Mots-clés : patch en composite, l'orientation des fibres, nombre de plis, l'épaisseur de la colle.

Abstract

Aluminum and its alloys are commonly used in the industrial field due to their lightness, mechanical properties, and resistance to corrosion. The most useful and effective technique for repairing cracked aluminum plates is to bond the cracked plate with a composite patch. Our work involves studying the evolution of the stress intensity factor as a function of crack length, taking into account several factors such as fiber orientation, number of plies, and adhesive thickness, using ABAQUS software for simulating the studied model.

Key words : composite patch, fibre orientation, number of plies, adhesive thickness.