

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret  
Faculté des Sciences Appliquées  
Département de Génie Mécanique



## **PROJET DE FIN DE CYCLE**

### **MASTER**

**Domaine :** Sciences et Technologie

**Filière :** Electromécanique

**Parcours :** Master

**Spécialité :** Maintenance Industrielle

#### **Thème**

Réparation d'une plaque métallique en  
Présence d'une fissure émanant d'entaille  
parcollage d'un patch en FGM

Préparé par :

HALIS Tayeb

Bennhar Brahim Elkhalil

Soutenu publiquement le : 15/09/2022, devant le jury composé de :

BALTACH Abdelghani	Maître de Conférences «A"(Univ. Ibn Khaldoun)	Président
MOULGADA Abdelmajid	Maître de Conférences "A"(Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
ZAGANE M.E.S	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. HOUARI Amin	Maître Assistant "B" (Univ. Boumerdes UMBB)	Encadrant

Année universitaire : 2021 - 2022

# Remerciements

*Je remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.*

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mr, HOUARI Amine, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*

*Nous tenons à gratifier aussi les membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail*

*Nous remerciment s'adresse à Mr GUEMMOUR Mohamed pour son aide pratique et son soutien moral et ses encouragements.*

*Nous remerciment s'adresse également à tous nos professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.*

# *D*edicace

Je dédie ce modeste travail comme un témoignage d'affection, de respect et d'admiration :

**À mes parents,**

Pour tout l'amour dont vous m'avez entouré, pour tout ce que vous avez fait pour moi, je ferai de mon mieux pour rester un sujet de fierté à vos yeux avec l'espoir de ne jamais vous. Que ce modeste travail, soit l'exaucement de vos vœux tant formulés et de vos prières quotidiennes.

**À mes frères,**

Qu'ils puissent trouver dans ce modeste mémoire l'expression de mon attachement et de ma profonde reconnaissance.

**À tous mes chers amis,**

Qu'ils trouvent dans ce travail l'expression de mon profond respect et  
Reconnaissance.

Halis Tayeb

# Dédicace

Je dédie cet ouvrage

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

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

A mes frères, mes grands-parents et Ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont

Chaleureusement supporté et encouragé tous au long de mon parcours.

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

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

A tous ceux que j'aime.

**BENNHAR Brahim**

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Exemple de réparation sur un avion.....	7
<b>Figure. I.2</b> : Diffèrent technique de réparation.....	8
<b>Figure. I.3</b> : Réparation par soudage .....	9
<b>Figure. I.4</b> : Réparation par patch riveté sur fuselage de Boeing .....	11
<b>Figure. I.5</b> : Réparation par boulonnage.....	12
<b>Figure. I.6:</b> a)Modèle géométriques, b) Échantillons réparés par colle et non réparés .....	14
<b>Figure. I.7</b> : Défauts typiques présents dans un joint de colle.....	15
<b>Figure. I.8</b> : Domain d'utilisation la technique de réparation par patch composite .....	16
<b>Figure I.9</b> : Exemple de réparation sur un avion F 111 d'après.....	17
<b>Figure I.10</b> : Exemple de réparation sur un avion Mirage d'après.....	17
<b>Figure. I.11:</b> a) Procédé de renforcement par collage de tissus en fibres de carbone b) Exemple de connexion par adhérence sur pont mixte béton/acier, d'après .....	19
<b>Figure. I.12</b> : Les modes de sollicitation des assemblages collés .....	20
<b>Figure I.13</b> : Modèle unidimensionnel d'une structure renforcée par un patch composite.....	21
<b>Figure I.14</b> : Equilibre représentatif du patch composite.....	22
<b>Figure I.15</b> : Présentation schématique des modes de rupture des joints collés,.....	25
<b>Figure. II.1</b> : Assemblage par collage .....	27
<b>Figure. II.2:</b> Schéma des paramètres affectant le choix d'un adhésif .....	28
<b>Figure II.3.</b> Les modèles rhéologiques complexes, associant un comportement élastique (ressorts de module E), un comportement visqueux (amortisseur de viscosité $\eta$ ) et éventuellement une possibilité déformation plastique (patin avec contrainte critique $\sigma_y$ ) : Modèles de Bardenhagen (a), Hata (b), Bingham (c), et Chase-Goldsmith (d).....	32
<b>Figure. II.4</b> : Réparation des bordages en aluminium par patches composites.....	34
<b>Figure II.5</b> : FGM avec les fractions de volume des phases constitutives graduées dans une seule direction (verticale) .....	36
<b>Figure II.6</b> : Les principaux domaines d'application des FGM .....	37
<b>Figure II.7</b> : Les techniques de fabrication des FGMs .....	38
<b>Figure II.8</b> : Variation la fraction volumique à travers l'épaisseur d'une plaque FGM en fonction loi de puissance .....	39
<b>Figure II.9</b> : Variation la fraction volumique à travers l'épaisseur d'une plaque FGM en fonction loi sigmoïdale.....	40
<b>Figure II.10</b> : Variation le module de Young à travers l'épaisseur d'une plaque FGM en fonction loi exponentielle.....	41

<b>Figure II.11</b> : Influence de la rugosité des substrats sur l’ancrage mécanique .....	41
<b>Figure II.12</b> : Mécanisme d’un assemblage par collage.....	44
<b>Figure. II.13.</b> Illustration schématique des différents mécanismes pouvant intervenir dans l'action de l'adhésion dans un assemblage par collage : (a) pas ancrage mécanique, (b) ancrage mécanique efficace, (c) mauvais ancrage mécanique.....	45
<b>Figure III.1</b> : éléments utilisés pour la modélisation 3D.....	49
<b>Figure.III.2</b> : Représentation des différents types d’élément de maillage avec la méthode d’éléments finis3D .....	50
<b>Figure.III.3</b> : Une plaque trouée et réparé par un patch collée en FGM.....	52
<b>Figure III.4</b> : Courbe contrainte/déformation Plaque Aluminium 2024-T3 (courbe expérimentale).....	53
<b>Figure III.5</b> : Courbe contrainte-déformation de l'adhésif ADKEITA-140.....	54
<b>Figure III.6</b> : Variation de module de Young ( $z$ ) à travers l’épaisseur céramique-métal de FGM par le modèle de TTO.....	55
<b>Figure III.7</b> : Loi de traction-séparation en fonction du déplacement pour un assemblage collé .....	56
<b>Figure III.8</b> : Courbe de séparation de traction.....	57
<b>Figure.III.9</b> : La représentation élément équivalent de l’adhésive dans une plaque réparé par patch FGM.....	58
<b>Figure. III.10</b> : Représentation la densité des éléments dans l’ensemble (plaque-adhésif-patch) a) patch. b) maillage du l’ensemble (plaque-adhésif-patch) .....	63
<b>Figure III.11</b> : Représentation la densité des éléments finis de type HEX dans une plaque entaille en AL2024 T3. a) HEX 20000. b) HEX 40000 .c) HEX 70000 d) HEX 90000.....	63
<b>Figure III.12</b> : Variation des contraintes « Von mises » suivant la mi- largeur de la plaque entaille AL2024-T3 pour la différente densité de Maillages.....	64
<b>Figure III.13</b> : Représentation la densité des éléments finis de type HEX dans une plaque trouée et fissuré. a) HEX 20000. b) HEX 40000 .c) HEX 70000 d) HEX 90000.....	64
<b>Figure III.14</b> : Variation des contraintes « Von mises » suivant la mi- largeur de la plaque entaille et fissure AL2024-T3 pour les différentes densités de Maillages. ....	65
<b>Figure III.15</b> : Représentation la densité des éléments finis de type HEX dans une d’une plaque trouée et fissuré réparé par collage d’un patch en FGM. a) HEX 20000. b) HEX 40000 .c) HEX 70000 d) HEX 90000 .....	66

<b>Figure.III.16</b> : Variation des contraintes Von mises suivant la mi- largeur d'une plaque trouée et fissuré réparé par collage d'un patch en FGM .....	66
<b>Figure IV.1.</b> Chemin de contour $\Gamma$ pour l'évaluation de l'intégrale $J$ .....	70
Figure IV.2 : a) Conception de variation de module de Young, b) Variation de module de Young ( $z$ ) à travers l'épaisseur du patch FGM-1 (céramique-métal) pour $n=1.0$ .....	72
<b>Figure IV.3.</b> Variation de l'intégrale- $J$ en fonction de la longueur de la fissure dans la plaque endommagée et réparée par patch FGM-1 pour l'entaille $R=2.5$ mm.....	74
<b>Figure IV.4.</b> Variation de l'intégrale- $J$ en fonction de la longueur de la fissure dans la plaque endommagée et réparée par patch FGM-1 pour l'entaille $R=5.0$ mm.....	75
<b>Figure IV.5.</b> Variation de l'intégrale- $J$ en fonction de la longueur de la fissure dans la plaque endommagée et réparée par patch FGM-1 pour l'entaille $R=7.5$ mm.....	77
<b>Figure IV.6.</b> Variation de l'intégrale- $J$ en fonction de la longueur de la fissure dans la plaque endommagée et réparée par patch FGM-1 pour l'entaille $R=10$ mm.....	79
<b>Figure IV.7.</b> Variation de l'intégrale- $J$ en fonction de la longueur de la fissure dans la plaque endommagée et réparée par patch FGM-2 pour l'entaille $R=5$ mm.....	81
<b>Figure IV.8.</b> Variation de l'intégrale- $J$ en fonction de la longueur de la fissure dans la plaque endommagée et réparée par patch FGM-2 pour l'entaille $R=5$ mm.....	83
<b>Figure IV.9.</b> Variation de l'intégrale- $J$ en fonction de la longueur de la fissure dans la plaque endommagée et réparée par patch FGM-2 pour l'entaille $R=7.5$ mm.....	85
<b>Figure IV.10.</b> Variation de l'intégrale- $J$ en fonction de la longueur de la fissure dans la plaque endommagée et réparée par patch FGM-2 pour l'entaille $R=10$ mm.....	86
<b>Figure IV.11.</b> Comparaison la variation de l'intégrale- $J$ en fonction de la longueur de la fissure dans la plaque endommagée et réparée par deux configurations du patch FGM-1 et FGM-2 pour l'entaille $R=2.5$ mm.....	87
<b>Figure IV.12.</b> Comparaison la variation de l'intégrale- $J$ en fonction de la longueur de la fissure dans la plaque endommagée et réparée par deux configurations du patch FGM-1 et FGM-2 pour l'entaille $R=5$ mm.....	87
<b>Figure IV.13.</b> Comparaison la variation de l'intégrale- $J$ en fonction de la longueur de la fissure dans la plaque endommagée et réparée par deux configurations du patch FGM-1 et FGM-2 pour l'entaille $R=7.5$ mm.....	88
<b>Figure IV.14.</b> Comparaison la variation de l'intégrale- $J$ en fonction de la longueur de la fissure dans la plaque endommagée et réparée par deux configurations du patch FGM-1 et FGM-2 pour l'entaille $R=10$ mm.....	88

<b>Figure IV.15</b> : Variation de la contrainte de Von Messes $\sigma_{VM}$ en fonction de l'épaisseur du patch pour longueurs de fissure F=2.5 mm .....	88
<b>Figure IV.16</b> : Variation de la contrainte de Von Messes $\sigma_{VM}$ en fonction de l'épaisseur du patch pour longueurs de fissure F=5 mm .....	89
<b>Figure IV.17</b> : Variation de la contrainte de Von Messes $\sigma_{VM}$ en fonction de l'épaisseur du patch pour longueurs de fissure F=7.5 mm .....	89
<b>Figure IV.18</b> : Variation de la contrainte de Von Messes $\sigma_{VM}$ en fonction de l'épaisseur du patch pour longueurs de fissure F=10 mm .....	89
<b>Figure IV.19</b> : Variation de la contrainte de Von Messes $\sigma_{VM}$ en fonction de l'épaisseur du patch pour longueurs de fissure F=2.5 mm .....	90
<b>Figure IV.20</b> : Variation de la contrainte de Von Messes $\sigma_{VM}$ en fonction de l'épaisseur du patch pour longueurs de fissure F=5.0 mm .....	90
<b>Figure IV.21</b> : Variation de la contrainte de Von Messes $\sigma_{VM}$ en fonction de l'épaisseur du patch pour longueurs de fissure F=7.5 mm .....	90
<b>Figure IV.22</b> : Variation de la contrainte de Von Messes $\sigma_{VM}$ en fonction de l'épaisseur du patch pour longueurs de fissure F=10 mm .....	91
<b>Figure IV.23</b> : Variation de la contrainte de Von Messes $\sigma_{VM}$ en fonction de l'épaisseur du patch pour longueurs de fissure F=2.5 mm .....	91
<b>Figure IV.24</b> : Variation de la contrainte de Von Messes $\sigma_{VM}$ en fonction de l'épaisseur du patch pour longueurs de fissure F=5.0 mm .....	91
<b>Figure IV.25</b> : Variation de la contrainte de Von Misses $\sigma_{VM}$ en fonction de l'épaisseur du patch pour longueurs de fissure F=7.5 mm .....	92
<b>Figure IV.26</b> : Variation de la contrainte de Von Misses $\sigma_{VM}$ en fonction de l'épaisseur du patch pour longueurs de fissure F=10 mm .....	92



## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b> : Exemples de réparations par patches composites effectuées par la RAAF .....	16
<b>Tableau II.1</b> : Comparaison entre les propriétés de la céramique et du métal.....	36
<b>Tableau III.1</b> : Propriétés mécaniques de l'alliage d'Aluminium 2024-T3 .....	53
<b>Tableau III.2</b> : Propriétés mécanique de l'adhésif.....	54
<b>Tableau III.3</b> : Propriétés matériel.....	55

# Table de Matières

Remerciement.....	I
Dédicace.....	II
Liste Des Figures.....	IV
Liste Des Tableaux.....	VIII
Table De Matières... ..	IX
Liste des abréviations .....	XII
Introduction.....	1
Chapitre I.....	5
I.1 Introduction.....	6
I.2 Définition de la réparation.....	7
I.3 Diffèrent technique de réparation.....	7
I.3.1.Réparation par soudage .....	8
I.3.1.1 Les avantages .....	9
I.3.1.2. Les inconvénients.....	9
I.3.2.Réparation par rivetage/boulonnage .....	10
I.3.2.1. Rivetage .....	10
I. 3.2.1.1.Les avantages .....	11
I.3.2.1.2.Les inconvénients.....	11
I.3.2.2.Boulonnage .....	12
I.3.2.2.1.Les avantage.....	12
I.3.2.2.2.Les inconvénients.....	13
I.3.3.Réparation par collage .....	13
I.3.3.3.1 Avantages de collage .....	14
I.3.3.3.2. Les défauts dans les assemblages collés .....	14
I.4.Domain d'utilisation la technique de réparation par patch collé .....	15
I.4.1.Réparation et le renforcement des structures aéronautiques.....	16
I.4.2.Réparation et le renforcement des pipelines .....	18
I.4.3.Réparation et le renforcement des structures génie civil .....	19
I.5.Mécanismes de réparation par patch collé .....	19
1.5.1. Les type de sollicitations des assemblages collé.....	19
I.5.2. Transfert d'effort substrat/patch par cisaillement de la colle.....	20
I.6.Rupture dans les assemblages collés.....	24
I.7.Conclusion.....	25
Chapitre II .....	26
II.1. Introduction .....	27

II.2 Adhésif .....	27
II.2.1.Différents types de l'adhésive .....	28
II.2.1.1.Les colles naturelles .....	30
II.2.1.2 Les colles synthétiques .....	30
II.2.1.2.1.Les colles thermoplastiques .....	30
II.2.1.2.2.Les colles thermodurcissables .....	31
II.2.2.Comportement des colles.....	32
II.3.Patch.....	33
II.3.1.Patches composites .....	34
II.3.2.Patches FGM.....	35
II.3.2.1.Les matériaux à gradient évalué FGM .....	35
II.3.2.2.Domaines d'applications des matériaux à gradient évalué .....	36
II.3.2.3.Méthodes d'élaboration des matériaux FGMs.....	37
II.3.2.4.Règle de mélange.....	38
II.3.2.4.1. Loi de mélange en puissance (P-FGM).....	38
II.3.2.4.2..Loi sigmoïdale (S-FGM).....	39
II.3.2.4.3 Loi de mélange exponentielle (E-FGM) .....	40
II.4 L'adhésion .....	41
II.4.1Théorie chimique .....	42
II.4.2.Théorie mécanique.....	42
II.4.5. Théorie physico-chimique.....	43
II.5.Substrat.....	43
II.5.1.Énergie de surface .....	44
II.5.2 Collage sur des surfaces rugueuses .....	45
II.5.3 Résistance à la rupture .....	45
II.7. Conclusion .....	46
Chapitre : III .....	47
III. 1 .Introduction .....	48
III.2.La méthode des éléments finis .....	49
III.2.1.Le maillage .....	49
III.2.2.Propriétés des matériaux .....	50
III.2.3.Conditions aux limites et de frontière .....	50
III.3.Présentation du logiciel de calcul utilisé .....	51
III .4Description géométrique de modèle.....	51
III.5 Présentation des Matériaux utilisés .....	52
III.5.1 Alliage d'aluminium 2024-T3.....	52
III.5.2. L'adhésif structural ADEKIT A140 .....	54
III.5.3.Patch en FGM.....	55
III.6. Modélisation numérique par éléments finis.....	56

III .6.1 Les modèles de zone cohésive.....	56
II.6.2. Implantation numérique de FGM .....	60
III.6.3. Choix de maillage et validation.....	62
III.6.3.1. Influence la densité des éléments d'une plaque entaille.....	63
III.6.3.2. Influence la densité des éléments d'une plaque trouée et fissuré.....	64
III.6.3.3. Influence la densité des éléments d'une plaque trouée et fissuré réparé par collage d'un patch en FGM.....	65
III.7. Conclusion.....	67
Chapitre IV.....	68
IV.1. Introduction :.....	69
IV .2. Evaluation du facteur d'intensité de contrainte.....	70
IV.2.1. Méthode de l'intégrale J.....	70
IV.3. Les conception de gradation du patch FGM.....	71
IV.4. Résultats :.....	73
IV .4.1. Analyse de la variation de l'intégrale-J dans la plaque :.....	73
IV.4.2. Comparaison entre les deux configurations FGM-1 et FGM-2 :.....	78
IV .4.3. Variation des contraintes de Von Misses dans le patch.....	80
IV .4.4. Distribution les contraintes dans patch :.....	87
IV.4.4.1. Cas d'entaille de rayon R=2.5 mm et réparé par patch.....	87
IV.4.4.2. Cas d'entaille de rayon R=5.0 mm et réparé par patch :.....	88
IV.4.4.3. Cas d'entaille de rayon R=7.5 mm et réparé par patch :.....	90
IV.4.4.4. Cas d'entaille de rayon R=10 mm et réparé par patch :.....	91
IV .5. Conclusion.....	93
Conclusion général .....	94
Références bibliographiques.....	96
Résumé	
Annexe	

## Liste des abréviations

FGM	Matériaux Fonctionnel à Gradient
MAXPS	Maximum Principal Stress
XFEM	Extended Finite Element Method
FEM	Force électromotrice
SMAW	Soudage à l'Arc à l'électrode enrobée
Al	Aluminium
Cu	Cuivre
HR	Des boulons à haute limite élastique comportant une Rondelle incorporée.
RAAF	Royal Australien Air Force
AMRL	Aeronautical and Maritime Research Laboratory
2D	Deux dimensions
3D	Tridimensionnelle
PVC	Polychlorure de Vinyle
GLARE	Glass Laminate Aluminum Reinforced Epoxy
ARALL	Auvergne Rhône - Alpes - Livre et Lecture
CVD	Dépôt Chimique en phase Vapeur
PVD	Dépôt Physique par phase Vapeur
P-FGM	Puissance – FGM
S-FGM	Sigmoïde – FGM
E-FGM	Exponentielle - FGM
PSA	Antigène Prostatique Spécifique
Tpan	Test Positive Aware Networ
Mpa	Méga pascal
Ti	Titane
TiB	Titane mono Borde
TTO	Théâtre de la Toison d'Or 396
UMM	Utilisation Méthode de Maillage
UMAT	Utilisation des Mines et Technologies
COH3D8	Cohésive élément type 3
CZM	L'aéroport International de Cozumel

USDFLD      ABAQUS User Subroutines Référence Manuel  
AL2024 T3    Aluminum2024-T3

# Introduction

## Introduction

---

Dans le domaine industriel, la majorité des structures contiennent des discontinuités géométriques nommées entaille. Ces discontinuités géométriques et sous chargement mécaniques et ou thermiques engendrent des concentrations locales de contraintes et déformations. Cette l'entaille, au sens strict du terme, n'est pas la seule particularité morphologique susceptible de créer une concentration de contraintes. Les épaulements, les trous et, en règle générale, toutes les discontinuités de forme provoquent le même phénomène. Ces défauts géométriques amplifient la valeur de la contrainte qui peut dépasser souvent, et pour de petites charges appliquées, la valeur de la limite élastique de la structure et même la valeur maximale de leur résistance à la traction. Ces concentrateurs de contraintes peuvent sévèrement réduire la durée de vie du composant. Une fois l'endommagement détecté dans le matériau, selon sa taille critique ou non, les ingénieurs doivent décider de réparer ou non la structure. La nucléation de fissures dans une structure métallique dans n'importe quel domaine, comme par exemple, les structures aéronautiques et maritimes, est une fois le composant est endommagé, il doit être renforcée ou réparés afin de retarder la vitesse de propagation des fissures qui en fonction des sollicitations mécaniques et ou thermiques conduit à des dégâts matériels. Afin à améliorer la tenue mécanique en traction et en fatigue des structures préalablement endommagées

La réparation des défauts géométriques exige une technique de réparation, notamment la technique de réparation par patch collé en composite ou métallique qui présente des propriétés mécaniques élevées par rapport à la plaque endommagée afin de réduire au maximum la concentration de contraintes dans la plaque et assurer une longue durée de vie de son service.

Le procédé de réparation par collage d'un patch composite est la technique la plus répandue dans la plupart des domaines industriels et dont son utilisation prend de plus en plus une large utilisation. Ce procédé de collage présente de nombreux avantages par rapport aux procédés classiques à savoir soudage ou rivetage ; comme la réduction du poids, la possibilité d'unir différentes natures de matériaux et de formes complexes, une bonne résistance à la fatigue, l'atténuation du choc et surtout élimination de concentrateur de contraintes. Cette technique consiste à coller un patch composite sur la zone endommagée au moyen d'un adhésif convenable.

Le choix de la méthode de réparation est en fonction de la nature du matériau à réparer, de l'ampleur du dommage et de son utilisation. En effet, les matériaux composites permettent



## Introduction

---

d'obtenir de bonnes propriétés mécaniques avec un poids réduit et présentent une bonne résistance à la fatigue et à la corrosion.

Préface Actuellement, l'utilisation des plaques en composites, pour le renforcement des structures non homogène, est une des méthodes récentes pour la réhabilitation des structures qui présentent un vieillissement, des défauts de forme ou de chargement. Actuellement, on cherche à développer un patch en FGM capable de transférer au maximum les contraintes de la zone endommagée par optimisation de ses propriétés mécaniques, sa forme ses dimensions et surtout la nature et fraction volumique de la fibre, afin d'apporter une grande résistance aux structures endommagées en tenant compte de tous les paramètres influençant (charge mécanique, humidité, température,...etc.). Le problème majeur est le délaminage de la plaque de renfort du a une forte concentration des contraintes provenant de l'effet de bord. Le but vise par ce travail est de présenter un modèle numérique calculant les contraintes d'interface des structures métallique homogène renforcées par des plaques en FGM de type métal/céramique.

D'autre part, l'optimisation de la couche d'adhésive est plus importante que le patch en FGM puisque c'est le maillon faible de la structure vis ses propriétés mécaniques faibles devant celles de la plaque réparé et le patch en FGM. Pour cela, le choix d'un adhésif doit être convenable pour assembler le patch et la plaque. Son épaisseur doit être le minimum possible afin de transférer le maximum de contraintes de la plaque endommagée. Ce joint d'adhésif doit être caractérisé pour un bon usage dans la réparation. Dans la plupart des cas, cet adhésif contient des défauts géométriques tels bulles d'air ou des cavités issus d'un mauvais traitement de surface pendant la préparation du procédé. Pour cela il est important d'analyser l'effet de l'adhésif sur la technique de la réparation par patch collé.

Notre travail s'inscrit dans ce contexte, l'objectif est d'analyser le comportement mécanique d'une plaque endommagée et réparée par patch en FGM. Cette plaque contient une fissure émanant d'entaille. Une analyse sur l'effet des paramètres géométriques et mécaniques du patch en FGM sur l'efficacité et la performance de la réparation collé, en termes de réduction du facteur d'intensité de contrainte en têtes de fissures et de toutes les contraintes de cisaillement dans la couche adhésive.

# Introduction

---

Ce manuscrit est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur la réparation par patch. Il nous a paru utile de présenter un état de l'art sur la technique de réparation par patch, On a cité et définit quelque type de réparation par patch, en abordant successivement les domaines d'utilisation la technique de réparation par patch collé. Il nous a paru utile de présenter en détail la technique de collage qui présente l'objectif de notre étude. Nous décrirons ensuite les mécanismes de réparation par patch collé qui visent à prévoir le comportement à la rupture des assemblages collés.

Le second chapitre est dédié à la présentation les critères de choix des matériaux de réparation par patch collé en FGM, les propriétés de l'adhésif et des substrats métal et l'état de l'art sur type de matériaux de patch en FGM.

Dans le chapitre troisième, on a modélisé des réparations par patch collés à l'aide du logicielle éléments finis ABAQUS, dont le but de l'analyse par éléments finis et qui a pour objectif de mettre en évidence l'effet du type et nombre d'éléments de maillage sur la discrétisation de la plaque afin d'aboutir à une stabilité dans la détermination de la valeur de la contrainte dans la plaque endommagée. La répartition des contraintes dans la colle pour le cas de réparation par patch collé en FGM et de comparer les résultats de la sensibilité de maillage (choix élément, densité).

Le quatrième chapitre est basée sur l'analyse par la méthode des éléments finis du comportement mécanique d'une plaque en Aluminium 2024-T3 endommagée et réparée par un patch en FGM. L'analyse de la valeur de l'intégrale-J au niveau de la fissure dans la plaque d'une part, et la contrainte de Von mises pour le patch et l'adhésif d'autre part a été abordée.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur le procédé de la réparation**

## I.1.Introduction

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

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

La réparation des structures est intimement liée à l'histoire de l'aviation (figure. I.1) et aux matériaux qui les ont constitués, la démarche de réparation de ces structures correspond historiquement au développement de solutions pour l'aviation militaire. La fin des années 70 et le début des années 80 représentent le mieux ce déploiement d'efforts pour la réparation avec l'établissement des principales techniques de réparation[2]. Grace au développement constant de la chimie organique, l'assemblage par adhésion est devenu maintenant une technique fiable largement utilisée dans l'industrie mécanique.

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

Ce chapitre, a pour but de présenter dans un premier temps quelques définition de la réparation et différentes techniques de réparation. Dans un deuxième temps, une discussion sur les domaines d'utilisation et mécanismes de réparation par patch. Finalement, nous abordons les mécanismes de rupture dans les assemblages collés.



**Figure I.1** : Exemple de réparation sur un avion [3].

## **I.2.Définition de la réparation**

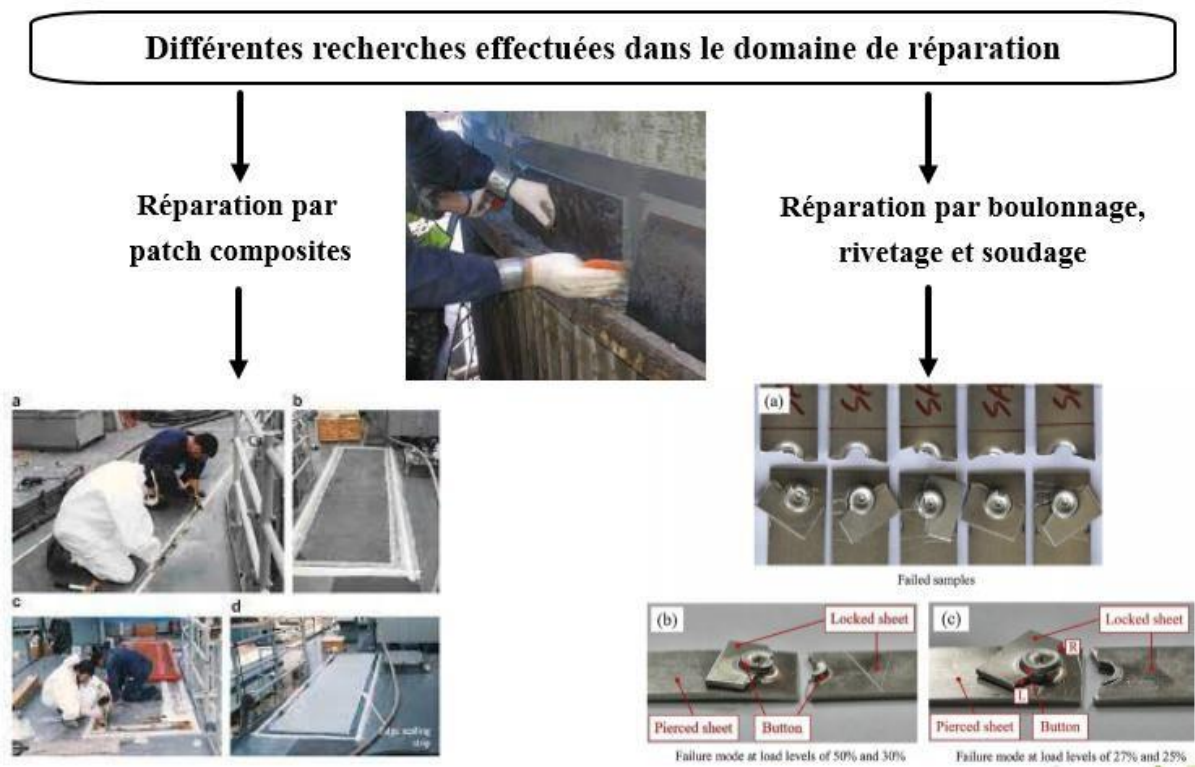
La réparation est une intervention définitive : cela signifie qu'on répond à un besoin après une panne ou une défaillance technique. L'équipement doit fonctionner dans les conditions identiques pour lesquelles il a été conçu [4].

La réparation des structures par le collage d'un patch est utilisée pour prolonger la vie des composants défectueux ou mal conçus à un coût raisonnable. Ces réparations ont généralement un des trois objectifs : L'amélioration de la résistance à la fatigue, augmenter la résistance au vieillissement et en minimiser les inspections répétées. La réparation d'une structure fissurée peut être effectuée, par le collage à la structure d'un patch externe, dans le but d'arrêter ou de ralentir la propagation de la fissure. Des dommages de corrosion sont éliminés par meulage des matériaux dans la partie endommagée et peuvent être renforcés avec le matériau de remblai et d'un patch collé afin de rétablir la capacité initial de charge. Il existe plusieurs méthodes de réparations de ces défauts géométriques, soit par soudage, rivetage trou d'expansion etc.

## **I.3.Diffèrent technique de réparation**

En somme, des différentes recherches effectuées dans le domaine de réparation comme réparation par patch ou par boulonnage, rivetage et soudage pour améliorer la durée de vie fonctionnement de la pièce (figure. I.2). Notre choix de la technique de la réparation est basé sur une nouvelle technologie de réparation afin d'éviter tout travail à chaud et les arrêts de la production, tout en améliorant la sécurité et en protégeant les équipements contre la corrosion à long terme.

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



**Figure. I.2 :** Diffèrent technique de réparation.

### I.3.1.Réparation par soudage

Le soudage est un procédé permettant la réalisation d'assemblages permanents en utilisant la chaleur ou la force mécanique (figure. I.3), ou les deux sources d'énergie. Dans la zone de liaison, le matériau est généralement fondu et/ou a subi une déformation plastique. Les différents procédés de soudage se sont souvent différenciés par l'activation d'énergie, les modes d'action ou les moyens de protection contre l'atmosphère. En réalité, les procédés de soudage peuvent également être classés soit par mode d'apport d'énergie nécessaire ou soit par mode de protection du métal chaud [5]. Les réparations et mises en état de soudures peuvent être primordiales pour prolonger la durée de vie des pièces d'usure dans diverses

machines rotatives. La durée de vie des machines peut ainsi être prolongée, ce qui limite les pertes de production.



**Figure. I.3** : Réparation par soudage.

#### **I.3.1.1. Les avantages**

- Forte productivité ;
- La durabilité maximale du soudage est son premier avantage, car ces deux parties n'en deviennent qu'une donc cette pièce pourra résister à un impact mécanique ;
- Taux de dépôt de métal important ;
- Le troisième avantage est la dimension et le poids des appareils qui deviennent de plus en plus petits et qui permet aux soudeurs de se déplacer plus facilement
- Le dernier avantage du soudage est que les objets fabriqués à partir de soudage sont plus légers, en effet le **soudage** réduit la consommation de matériaux [6].
- Efficaces et facilement adaptables aux circonstances du chantier
- Bonnes qualités de joint et bonnes

#### **I.3.1.2. Les inconvénients :**

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

### **I.3.2.Réparation d'assemblage par rivetage/boulonnage**

Aujourd'hui, la plupart des assemblages mécaniques aéronautiques sont constituées de boulons ou de rivets comportant une adhésive à l'interface (figure. I.4), pour assurer l'étanchéité et éviter les problèmes de corrosion [7]. Par ailleurs, les avionneurs cherchent à donner à l'adhésive un fonctionnement structural et ainsi réduire le nombre de fixations. Le dimensionnement de ce type d'assemblage mixte doit s'appuyer sur des modèles de comportement, qui permettent d'optimiser les paramètres de conception (dimensions, propriétés de l'adhésif, couple de serrage,...) optimaux en termes de résistance ou de raideur. La difficulté réside alors dans la détermination du taux de transfert de charge entre le boulon ou le rivet et le joint de colle. Cette réparation est très rapide, mais elle nécessite le perçage de trous. Cette opération peut introduire des endommagements ou/ et de fortes concentrations des contraintes. En outre, une masse supplémentaire est ajoutée à cause du recouvrement et du boulon ou du rivet. Cette méthode est donc utilisée comme une réparation temporaire.

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

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

#### **I.3.2.1. Rivetage**

La réparation par rivetage est le plus ancien procédé de solidarisation de pièces entre elles utilisée en construction métallique (figure4). Le viaduc de Gabarit et la tour Eiffel en sont de célèbres exemples. Le rivetage permet d'obtenir économiquement une liaison encastrement indémontable d'un ensemble de pièces par refoulement ou par expansion de matière d'un élément malléable (Al et ses alliages, Cu et laitons, aciers doux, aciers inoxydables).





**Figure. I.4** : Réparation par patch riveté sur fuselage de Boeing [7].

#### **I. 3.2.1.1. Les avantages :**

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

#### **I.3.2.1.2. Les inconvénients**

- Nécessité de percer le composite ;
- Le rivetage altère les substrats, du fait du perçage. Il y a concentration de contraintes au niveau du trou qui augmente les risques de fissures. Le repérage de ces fissures n'est possible qu'une fois que leur taille a dépassé la tête de vis ;
- Le rivetage ne permet pas d'obtenir des joints étanches. D'où la nécessité d'ajouter du mastic par exemple ;
- La non 'démontrabilité' du montage ;
- Relaxation/fluage des composites : tenue dans le temps de l'assemblage ;
- Concentration de contrainte du composite aux bords des trous ;

- Le rivetage permet d'obtenir des surfaces lisses, seulement dans le cas de l'utilisation de têtes fraisées ;
- La mise en œuvre du rivetage sur avion coûte cher du fait de la haute qualité d'ajustement et des traitements de surface à obtenir (contre les couples galvanique) ;

### I.3.2.2. Boulonnage

Les boulons HR sont des boulons à haute limite élastique comportant une rondelle incorporée. Lors du serrage ces boulons sont serrés fortement, et ainsi les efforts de glissement ne sont pas repris par cisaillement de la tige, mais adhérence entre la pièce à assembler (figure. I.5). Ces boulons ne travaillent donc qu'en traction (le cisaillement représente en fait une sécurité en cas de surcharge), les charges ne transitent pratiquement pas par les boulons. Les boulons sont ainsi soumis presque exclusivement à la contrainte initiale de précontrainte, et ne connaissent que de très faibles variations de contrainte au cours de la vie de l'ouvrage ;



**Figure. I.5** : Réparation par boulonnage.

#### I.3.2.2.1. Les avantages

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

### **I.3.2.2.2. Les inconvénients**

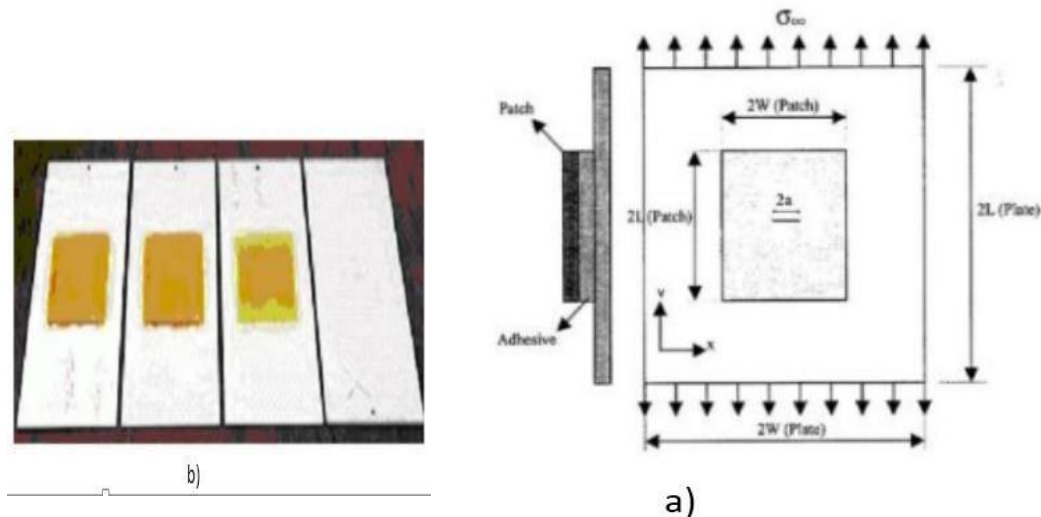
- On doit faire très attention aux surfaces de contact des pièces à assembler et aux traitements subis ;
- Grenailage projection à grande vitesse en atelier de petits gravillons ou grains de métal sur les produits sidérurgiques afin de les débarrasser de la rouille et de la calamine ;
- Sablage : décapage par projections sur chantier de grains abrasifs de dimensions déterminées (e.g. grains de sable aux arêtes vives) ;
- Cout élevé ;
- risque de fatigue ;
- Glissement alternés (ponts roulants, poutres de pont roulant) [8].

### **I.3.3. Réparation par collage**

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

Depuis ce temps, il a été appliqué avec succès dans de nombreuses situations exigeant de réparation. Ces applications n'ont pas été limitées en Australie. Le Canada, le Royaume-Unis, et la France ont également bénéficié de l'utilisation de cette technologie [9]. Plusieurs études numériques ont été effectuées sur des structures réparées afin d'analyser l'influence du patch composite sur la propagation de la fissure. Ces patchs viennent se coller sur la zone endommagée afin de ponter des fissures existantes.

Plusieurs recherches ont vu le jour ces dernières décennies traitant le problème d'endommagement des matériaux composites, et leurs modes de réparation. Abdullah Maleki [10] a étudié la défaillance des plaques d'aluminium fissurées réparées par des patchs composites verre/époxy unilatéraux sous la charge de fatigue (figure I.6) et la technique d'émission acoustique a été utilisée pour surveiller l'effet de la pièce de réparation sur la progression des dommages.



**Figure. I.6:**a)Modèle géométriques, b) Échantillons réparés par colle et non réparés [11].

### I.3.3.3.1 Avantages de collage :

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

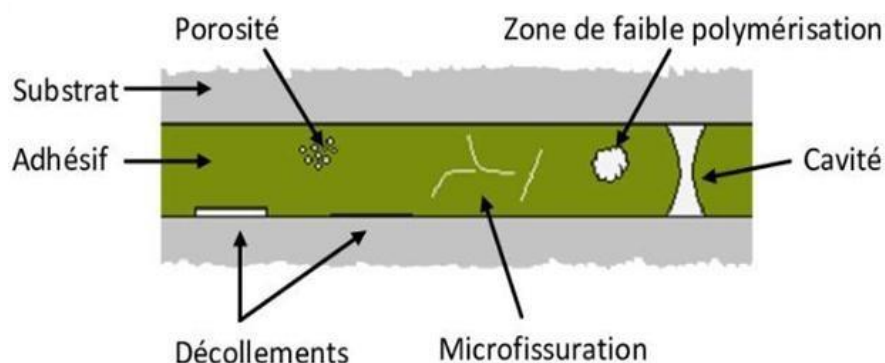
### I.3.3.3.2. Les défauts dans les assemblages collés :

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

de la réparation de l'état de contrainte en fonction des données géométriques de l'assemblage et de la loi de comportement de l'adhésif [12].

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

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



**Figure. I.7 :** Défauts typiques présents dans un joint de colle.

#### **I.4.Domain d'utilisation la technique de réparation par patch collé**

La réparation par patch est particulièrement utilisés dans devers domaine, tel que : aéronautique, aérospatiale, marine et en secteur de pipeline et trouvent également dans le demain construction (figure. I.8).



**Figure. I.8 :** Domain d'utilisation la technique de réparation par patch composite

#### **I.4.1.Réparation et le renforcement des structures aéronautiques**

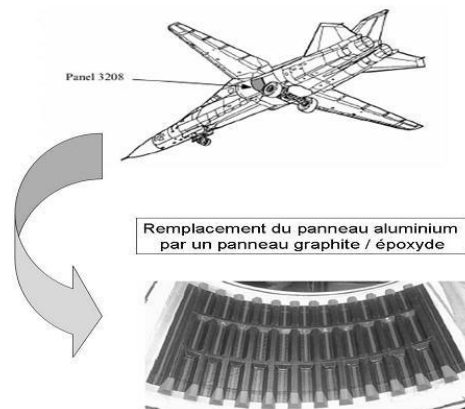
Dans les années 70, la RAAF (Royal Australien Air Force) a décidé de développer l'utilisation des matériaux composites afin de renforcer des structures aéronautiques. L'AMRL (Aeronautical and Maritime Research Laboratory) a utilisé avec succès des renforts composites bore/époxyde afin de parer des problèmes de corrosion et de fatigue. Le Tableau 1.1 résume les principaux travaux effectués.

<b>Avion</b>	<b>Type de dommages</b>	<b>Commentaires</b>
Hercules	Corrosion	Plus de 400 réparations depuis 1975
Macchi	Fatigue	Durée de vie au moins doublée
Mirage	Fatigue	Plus de 180 réparations depuis 1979
Nomad	Corrosion	Plus de 105 000 heures de vols simulées
F111	Corrosion	En service depuis 1980

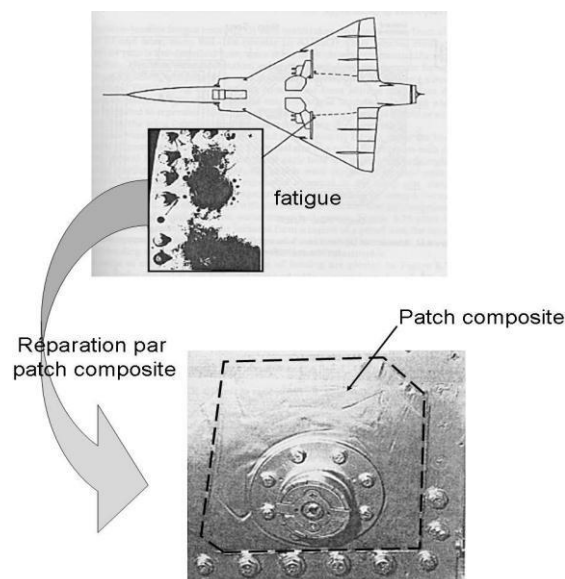
**Tableau I.1 :** Exemples de réparations par patches composites effectuées par la RAAF [13,14].

En Australie, l'utilisation de patches composites est devenue une opération classique afin de réparer des zones endommagées par la fatigue ou la corrosion. Sur la Figure. I.9, l'avion représenté est un F111. Le dommage est localisé sur un panneau situé sous l'une des ailes de l'avion. La particularité de cette réparation est qu'au lieu de venir renforcer la zone endommagée, la pièce a été directement substituée par une pièce composite graphite/époxyde. L'exemple qui suit est plus classique et concerne le Mirage III. Des fissures dues à la fatigue

apparaissent sur un accès au réservoir. La Figure I.10 représente les dommages ainsi que le patch composite utilisé. Cette solution a été validée par la RAAF et plus de 180 avions Mirage ont été réparés par cette procédure. L'utilisation de patches composites a été intégrée aux processus de réparation. Une fois cette intégration effectuée, cette nouvelle procédure n'utilisait qu'un seul ouvrier pendant une journée, d'où un gain important de temps et d'argent.



**Figure I.9 :** Exemple de réparation sur un avion F 111 d'après [13].



**Figure I.10 :** Exemple de réparation sur un avion Mirage d'après [13].

En Algérie, Les matériaux composite utilisé en réparation aéronautique dans les ateliers de maintenance d'Air Algérie afin de comparer l'efficacité des méthodes utilisées en réparation au niveau des fuselages d'avions en fonction des résultats obtenus dans les essais réalisés au

laboratoire, inspirés des méthodes de réparation métalliques puisque le métal est le matériau le plus anciennement utilisé en aéronautique, ces méthodes sont agréées et utilisées par les constructeurs d'avions. Cette réparation dépend de la nature et du degré du dommage causé généralement par un impact ou un choc[15], et si ce dernier n'a de conséquence que sur la résine la méthode d'infiltration de résine qui a été étudié par Hachette et al [16], s'avère la plus adaptée, et dépend de la viscosité de la résine.

#### **I.4.2.Réparation et le renforcement des pipelines**

Des matériaux sont employés dans le but de la réparation et le renforcement des pipelines de transport de gaz ; dans ces dix dernières années. Des compagnies d'exploitation de pipelines, des organisations pour la recherche, et des concepteurs ; ce sont des facteurs qui ont accompagné ce type de réparation menés par un choix illimité d'analyse et de programmes d'essais.

Pour réparer le phénomène de corrosion, les matériaux composites sont utilisés avec succès pour réparer des entailles, des courbures, des coudes et des canalisations offshore. Actuellement, la majorité des compagnies d'exploitation de pipelines ; emploient les matériaux composites dans le programmes de réhabilitation et de réparation. Cependant, l'origine de l'utilisation des matériaux composites était de pouvoir réparer les canalisations corrodées, dont le but de rétablir la force à la section endommagée de la canalisation.

Au cours des quinze dernières années, les matériaux composites en fibres de verre sont utilisés dans le renforcement des pipelines, la réparation des corrosions et des endommagements mécaniques des pipelines on shore où la charge primaire est la pression interne[17]. La maîtrise des techniques de réparation dans les pipes offshore telles que des canalisations verticales nécessite, dépression, une compréhension complète des profils complexes de charge, de tension, de recourbement, interne et externe significative.

« Développement des matériaux de fibres de verre pour le service de pipeline du gaz naturel » était le rapport final préparé par l'institut de technologie du gaz pour l'évaluation du système de réparation. La réalisation de ce document était durant la période de janvier 1987 à mars 1994 ; puis il a été élargi vers la réparation des dommages mécaniques. Le démarrage du système Armor Plate Pipe Rap était en 1997. [18-19]. Ce système utilise un matériau de fibres de verre imprégné amatrice d'époxyde pour pouvoir résister à des conditions



d'environnements particulières, y compris des applications sous-marines, des températures élevées et le temps froid.

### I.4.3.Réparation et le renforcement des structures génie civil

Dans le domaine du génie civil, la technique de collage est principalement utilisée pour la réparation ou le renforcement d'ouvrages en béton : des renforts externes rigides sont collés sur les structures déficientes de manière à restaurer ou à augmenter leurs capacités mécaniques. Ces renforts étaient initialement constitués de plaques d'acier dans les années 1970-80 [20] et ont ensuite été remplacées par des matériaux composites, bien plus légers et exempts de corrosion. Ainsi, le procédé de renforcement utilisant des tissus de fibres de carbone collés, développé par les Japonais au début des années 1990, connaît un succès croissant en France depuis une dizaine d'années (Figure I.11). Le parc d'ouvrages Français étant vieillissant, ces techniques apparaissent en effet comme un moyen efficace pour prolonger la durée de vie des structures déficientes à moindre coût.



**Figure. I.11:** a) Procédé de renforcement par collage de tissus en fibres de carbone b) Exemple de connexion par adhérence sur pont mixte béton/acier, d'après [21].

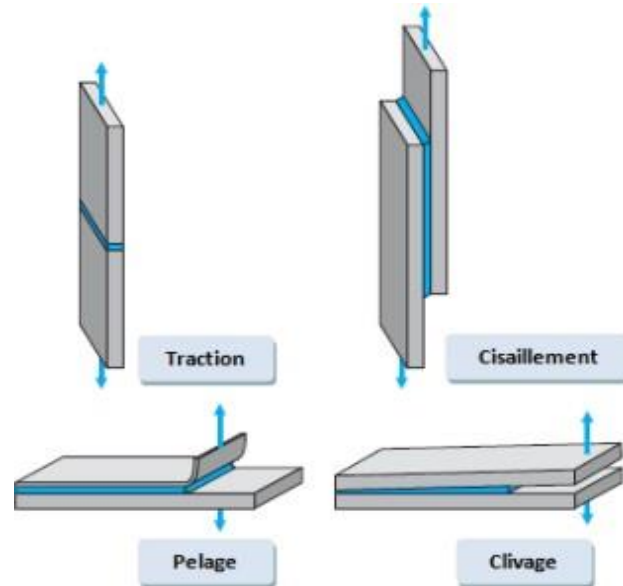
## I.5.Mécanismes de réparation par patch collé

### 1.5.1. Les type de sollicitations des assemblages collé

L'assemblage collé peut être sollicité de différentes façons. Or les propriétés d'adhérence dépendant de la sollicitation, il faut choisir l'essai représentatif de la sollicitation réelle subie par l'assemblage lorsqu'il est utilisé. Les principaux modes de sollicitation d'un assemblage collé sont (figure. I.12):

- La traction (contraintes perpendiculaires à l'interface)

- Le cisaillement (contraintes parallèles à l'interface)
- Le pelage (traction appliquée à un assemblage d'un matériau rigide et d'un matériau flexible)
- Le clivage (traction locale appliquée à un assemblage de deux matériaux déformés élastiquement)



**Figure. I.12** : Les modes de sollicitation des assemblages collés [22].

### I.5.2. Transfert d'effort substrat/patch par cisaillement de la colle

De nombreuses études ont été consacrées à l'étude théorique des contraintes dans le patch composite et dans la colle [23-24] car cette dernière est souvent le maillon faible dans une réparation. En effet, elle est souvent à l'origine des défaillances du patch composite [25] car c'est sa rupture ou sa décohésion qui provoque le détachement du renfort composite. L'étude classique d'une structure renforcée et soumise à un essai de traction. Dans la figure I.13 les notations suivantes sont utilisées :

- $l_x$  représente la longueur du patch composite.
- $e_p$ ,  $e_s$  et  $e_a$  représentent les épaisseurs du patch, du substrat et de la colle.
- $\sigma_{xx}^p$  et  $\sigma_{xx}^s$  représentent les contraintes longitudinales suivant  $x$  du patch composite et du substrat respectivement.
- $\sigma_{xz}^a$  représente la contrainte de cisaillement de la colle.
- $\sigma_{xx}^\infty$  représente la contrainte longitudinale appliquée au substrat.
- $E_x$  et  $E_s$  représentent les modules de Young du patch et du substrat.

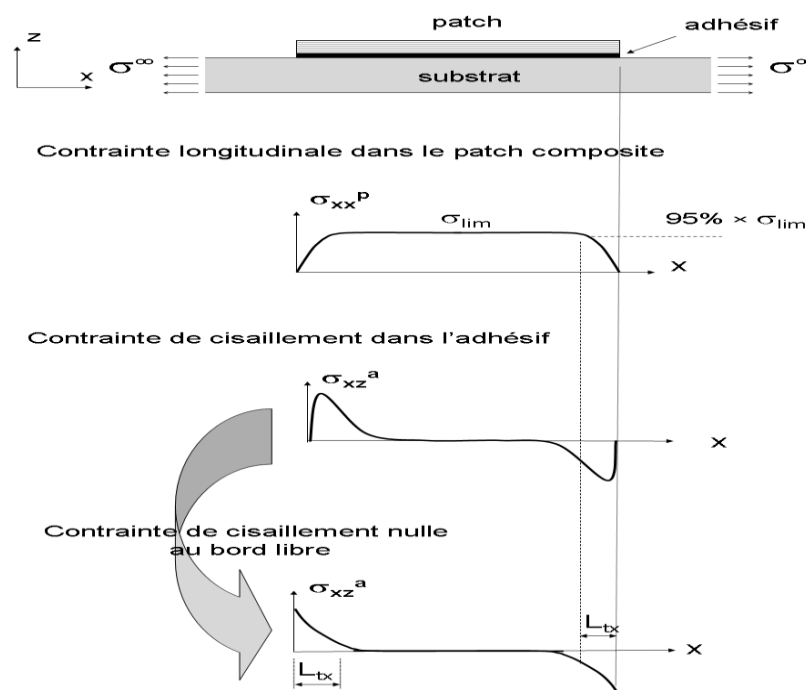
- $G_a$  représente le module de cisaillement de la colle.

Le comportement des trois matériaux est supposé linéaire élastique. Les contraintes des trois matériaux ne dépendent que de la direction  $x$ .

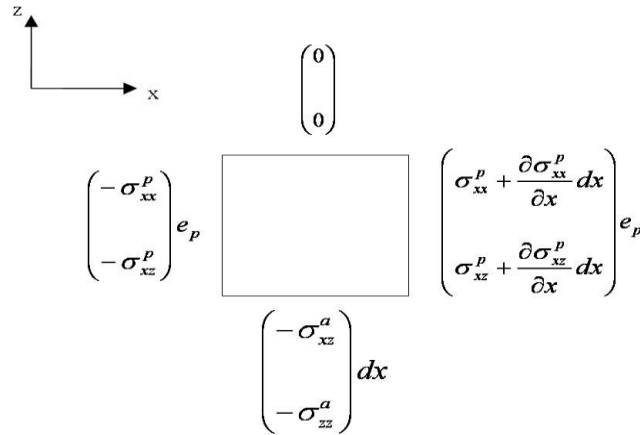
La Figure I.13 représente les principaux mécanismes qui entrent en jeu lors du renforcement d'une structure par matériaux composites. La contrainte longitudinale dans le patch  $\sigma_{xx}^p$  n'est pas maximale dès le bord libre. En effet, elle est égale à 0 sur les bords libres puis augmente progressivement jusqu'à atteindre une contrainte limite loin de ces derniers.

On parle alors de transfert d'effort. La contrainte de cisaillement dans la colle  $\sigma_{xz}^a$  présente quant à elle un pic de cisaillement près du bord libre. Elle est nulle sur ce dernier du fait des conditions aux limites. Afin de simplifier les calculs, une hypothèse souvent employée dans la littérature est de considérer que cette contrainte de cisaillement est maximale aux bords libres. Le calcul du transfert d'effort est un point qui a été souvent examiné dans la littérature [26,27]. Les principaux résultats de ces études sont rappelés ici.

Le modèle est développé suivant la direction ( $x$ ). La figure I.14 représente l'équilibre représentatif du patch composite.



**Figure I.13** : Modèle unidimensionnel d'une structure renforcée par un patch composite.



**Figure I.14 :** Equilibre représentatif du patch composite [3-4].

L'équation différentielle qui en résulte régit le comportement du renfort :

$$\frac{d^2 \sigma_{xx}^p}{dx^2} - \xi \sigma_{xx}^p = \chi \tag{I.1}$$

Avec :

$$\begin{cases} \xi = \frac{G_a}{e_a} \left( \frac{1}{e_p E_x} + \frac{1}{e_s E_s} \right) \\ \chi = -\frac{G_a}{e_a e_p E_s} \end{cases} \tag{I.2}$$

Les conditions aux limites s'écrivent :

$$\begin{cases} \sigma_{xx}^p(0) = 0 \\ \sigma_{xx}^p(l_x) = 0 \end{cases} \tag{I.3}$$

La solution de l'équation (I.1) peut s'écrire comme une combinaison de cosh et de Sinh :

$$\sigma_{xx}^p(x) = C_1 \cosh(\sqrt{\xi x}) + C_3 \sinh(\sqrt{\xi x}) - \frac{\chi}{\xi} \tag{I.4}$$

Avec les conditions aux limites précédentes,  $C_1$  et  $C_2$  peuvent être calculées.  $\sigma_{xx}^p$  s'écrit finalement:

$$\sigma_{xx}^p(x) = \frac{\chi}{\xi} \left[ \cosh(\sqrt{\xi}x) + \left( \frac{1 - \cosh(\sqrt{\xi}l_x)}{\sinh(\sqrt{\xi}l_x)} \right) \sinh(\sqrt{\xi}x) \right] - \frac{\chi}{\xi} \quad (I.5)$$

La contrainte est égale à 0 au bord libre puis augmente exponentiellement jusqu'à atteindre une valeur limite loin de ce dernier. La contrainte dans le patch composite atteint 95% de sa valeur limite au bout d'une longueur  $L_{tx}$  dite longueur de transfert qui est égale à :

$$L_{tx} \approx \frac{3}{\sqrt{\xi}} \quad (I.6)$$

La contrainte de cisaillement dans la colle  $\sigma_{xz}^a(x)$  est calculée avec l'Equation (I.7) :

$$\sigma_{xz}^a(x) = e_p \frac{d\sigma_{xx}^p}{dx} \quad (I.7)$$

Soit :

$$\sigma_{xz}^a(x) = e_p \frac{\chi}{\sqrt{\xi}} \left[ \sinh(\sqrt{\xi}x) + \left( \frac{1 - \cosh(\sqrt{\xi}l_x)}{\sinh(\sqrt{\xi}l_x)} \right) \cosh(\sqrt{\xi}x) \right] \quad (I.8)$$

L'expression de la contrainte de cisaillement  $\sigma^a(x)$  dans la colle constitue un point important lors de l'étude du renforcement par patches composites. La distribution du déplacement longitudinal du composite  $u^p(x)$  peut être aussi déduite de l'Equation (I.8):

$$u_x^p(x) = \frac{\chi}{\sqrt{\xi^3 E_x}} \left[ \sinh(\sqrt{\xi}x) + \left( \frac{1 - \cosh(\sqrt{\xi}l_x)}{\sinh(\sqrt{\xi}l_x)} \right) \cosh(\sqrt{\xi}x) \right] - \frac{\chi}{\xi E_x} x \quad (I.9)$$

Les principaux résultats théoriques constituent une base de réflexion importante afin d'appréhender les mécanismes liés au renforcement de structure par patches composites. Cette approche théorique repose toutefois sur des hypothèses simplificatrices qui permettent de calculer les distributions de contraintes dans le patch composite et dans la colle.

## I.6.Rupture dans les assemblages collés

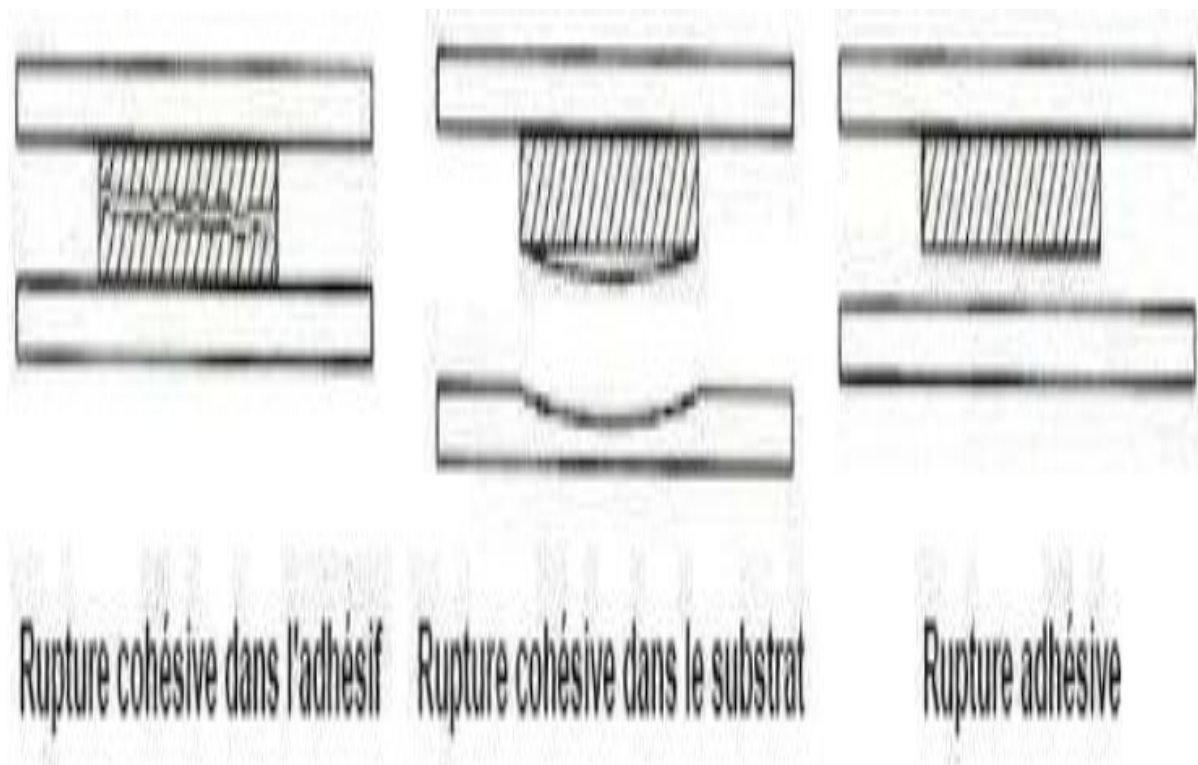
De manière générale, la rupture correspond à la séparation de deux corps initialement solidaires. La fissuration est le plus souvent amorcée à partir d'une entaille ou d'un défaut préexistant. Sa vitesse de propagation et son aspect dépendent des propriétés du (des) matériau(x), des contraintes internes au système et de celles exercées sur celui-ci par le milieu extérieur (température, forces appliquées...), de la géométrie du (des) solide(s). Selon IRWIN [28], les mouvements possibles des lèvres de la fissure sont des combinaisons de trois modes indépendants (Figure I.15) :

- ✓ le mode I, ou mode par ouverture, qui correspond à un écartement relatif des deux surfaces de la fissure par ouverture angulaire,
- ✓ le mode II, qui fait référence à un cisaillement plan,
- ✓ le mode III, ou mode de cisaillement anti-plan, qui correspond à un glissement transversal des deux surfaces de la fissure, en sens opposés, mais cette fois dans une direction parallèle au front de la fissure.

Le mode I est considéré comme le plus sévère en terme d'extension de la fissure ; cependant, une fois amorcée et pour des sollicitations mixtes ou des géométries complexes, la fissure a tendance à bifurquer, et reste donc rarement rectiligne (2D) ou plane (3D).

Dans le cas des assemblages collés, on peut également distinguer différents modes de rupture en fonction de l'endroit où intervient la fissuration (Figure I-14) :

- la rupture peut être confinée dans l'un des deux substrats ou dans l'adhésif, ce qui signifie que la cohésion d'un de ces matériaux est plus faible que l'adhésion entre constituants. On parle alors de rupture cohésive,
- la rupture peut intervenir à l'interface et on parle alors de rupture adhésive ou interrassiale. Cependant, la rupture se fait parfois non pas à l'interface stricto sensu, mais très proche de celle-ci. On parle de rupture dans l' « interphase » car la proximité d'une interface peut être synonyme de gradient de propriétés.
- la rupture peut également être mixte si elle est cohésive par endroit et adhésive à d'autres.



**Figure I.15** : Présentation schématique des modes de rupture des joints collés, [29].

### **I.7.Conclusion :**

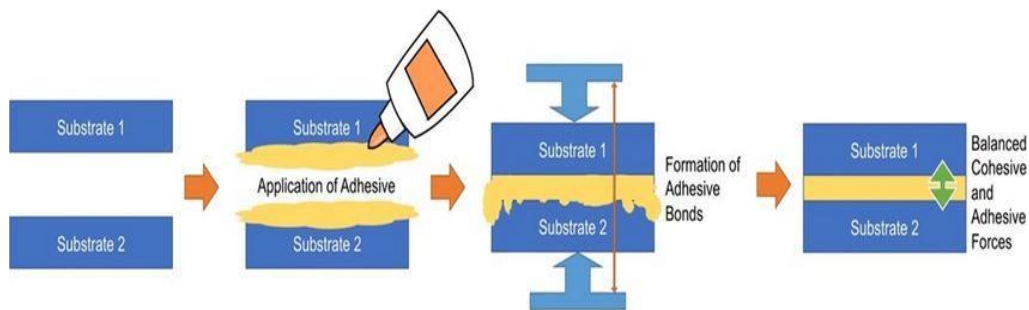
Ce chapitre nous a permis d'avoir un aperçu global sur le procédé de la réparation, leurs définition, leurs différents techniques, leurs avantages et leurs inconvénients, et la réparation par collages, les défauts dans les assemblages collés leurs domaines utilisation puis la réparation et les renforcements des structures aéronautiques, des pipelines, des structure en génie civil.

**Chapitre II :**  
**Critères de choix des matériaux de réparation  
par collage**



## II.1.Introduction :

une connaissance approfondie des matériaux endommagés et des réparations s'impose. Le collage est un procédé qui permet de maintenir solidement et durablement deux matériaux semblables ou différents en créant une adhésion et une cohésion entre les deux surfaces au moyen d'une substance (figure. II.1). Le film adhésif s'accroche solidement sur les matériaux à assembler. Dans ce chapitre, nous avons présenté les critères de choix des matériaux d'assemblage par collage, les différents types, ainsi que les différentes méthodes d'homogénéisation utilisées pour le calcul des propriétés mécaniques effectives pour les matériaux à gradient fonctionnel (FGM).



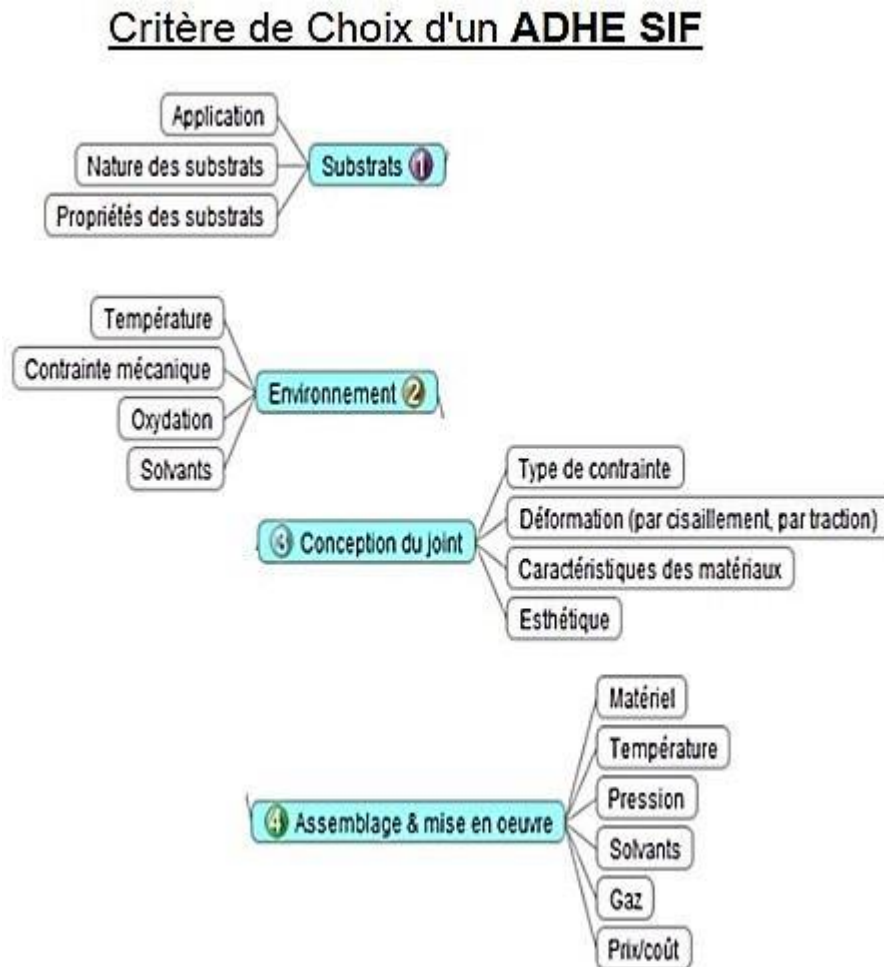
**Figure. II.1** : Assemblage par collage

## II.2.Adhésif :

Le choix du collage comme technologie d'assemblage nécessite la prise en compte d'un certain nombre de paramètres. En premier lieu le choix de l'adhésif est important et dépend des matériaux à assembler. C'est toujours l'élément le plus faible qui provoque la défaillance de l'assemblage collé, cet élément pouvant être l'adhésif ou l'une des deux interfaces avec les matériaux à assembler. Les conditions de sollicitations, notamment la température, l'environnement, le temps, le mode de sollicitation, etc., peuvent également avoir un impact sur la tenue de l'assemblage. Le choix de la colle dépend quant à lui en premier lieu du domaine d'application (figure. II.2) :

- Collage permanent (structural) ou démontable,
- Nature des matériaux à assembler (Préexistence de fonctions chimiques ou fonctions chimiques à créer par traitement de surface)
- Niveau de contrainte appliqué à l'assemblage (Colle structurale ou Utilisation de charges minérales pour augmenter le module et diminuer le coefficient de dilatation).

- Gamme de température d'emploi.
- Niveau de chargement mécanique.
- Niveau de contrainte cyclique ou constante.
- Mode de chargement : Pelage, cisaillement fatigue
- Environnement réactif vis-à-vis des surfaces (réactivité préférentielle) ou de l'adhésif (Dépolymérisation)



**Figure. II.2:** Schéma des paramètres affectant le choix d'un adhésif

### II.2.1. Différents types de l'adhésive

La technologie des adhésifs a subi un développement rapide au cours des 50 dernières années. Les adhésifs sont maintenant largement répandus sur les marchés tels que les accessoires des automobiles, aérospatiaux, de construction, d'emballage et pour différents usages. Les adhésifs peuvent être classés par catégories selon les classes suivantes : structurale, thermo fusibles à base d'eau ou sensible à la pression.

La notion d'adhésif structural est apparue lorsqu'on a commencé à réaliser des assemblages collés pouvant supporter des contraintes aussi importantes que les assemblages mécano-soudés. Ils peuvent être sollicités sans défaillance à un niveau élevé de résistance pendant une longue période sous des conditions hostiles (basses températures, chaleur, agents chimiques, ...). Les adhésifs structuraux les plus importants sont les époxydes, les acryliques modifiés, les polyuréthanes, les cyanoacrylates, les anaérobies, les composés phénoliques et les polyamides. Le traitement des anaérobies se fait en l'absence d'oxygène par polymérisation. Ils peuvent développer une excellente résistance au cisaillement mais une très faible résistance à la traction ; ils ne sont pas employés pour des réparations collées.

Les deux types d'adhésifs les plus utilisés avec succès pour les réparations collées sont les époxydes et les acryliques modifiés. Les époxydes sont caractérisés par des niveaux élevés de résistance aux contraintes d'arrachement en traction et en cisaillement qui les rendent aptes à réaliser des assemblages structuraux et à remplacer des assemblages mécaniques. Ils sont caractérisés aussi par de bonnes capacités à la température, de basses contraintes de retrait, une bonne tenue à la fatigue (104 cycles à 50 % de la charge maximale statique), ce qui permet leur utilisation efficace dans les domaines de l'aéronautique et de l'automobile [30]. Ces adhésifs remplissent l'intervalle du joint (jusqu'à quelques dixièmes de millimètres d'épaisseur) permettant d'assembler des pièces imparfaitement planes. Les inconvénients des adhésifs époxydes sont limités. Ils comportent une faible résistance au pelage sauf pour les formules spéciales, un risque de dermatose allergique (chez les sujets sensibles) et un prix relativement élevé [30].

L'utilisation des colles dans l'industrie est de plus en plus importante. Notamment pour des questions d'allègement des structures par le remplacement des assemblages traditionnels (rivetage, vissage, boulonnage), pour sa rapidité de mise en œuvre, son adaptabilité en fonction des matériaux, sa capacité d'absorption de vibrations, de diverses isolations (phonique, thermique, électrique).

De nos jours, d'importants progrès ont été réalisés sur les différentes familles de colles, et ont donné la diversité de colles que nous connaissons actuellement (cyanoacrylates, silicones, résines PVC, élastomères, époxydes, etc.).

### II.2.1.1. Les colles naturelles :

- Les colles fortes : Les colles d'os, les colles de nerfs, les colles de peaux, les colles de gélatines. Leur élément principal est le collagène. Il est insoluble à l'eau chaude, il se décompose et forme une matière visqueuse et en se refroidissant, il se gélifie. Cette gélatine, en séchant, pénètre dans les matériaux et les unifie.
- Les colles de peaux : Elles sont faites en grande partie avec des peaux de lapins. Découpées en lanières, elles sont nettoyées et dégraissées à l'acide puis bouillies dans les cuves de bois. Elles donnent des joints plus souples et moins cassants, elles sont souvent mélangées aux colles d'os ou de nerfs.
- Les colles de gélatines : Elles sont de très haute viscosité et très solides, mais restent employées plus délicates, car elles refroidissent plus vite. D'une manière générale, elles se présentent sous forme de pastilles ou de plaques. Elles sont réchauffées au bain-marie, grâce à un « pot-accolé ».
- Les colles de caséines : La caséine est tirée du lait résiduel lors de la fabrication du beurre ou du fromage. Elle est ensuite précipitée dans un acide organique, d'où son application de caséine lactique. Elles se présentent sous forme de poudre blanchâtre. C'est une colle à froid ou à chaud, que l'on mélange simplement à l'eau.

### II.2.1.2. Colles synthétiques :

#### II.2.1.2.1. Les colles thermoplastiques :

- **Les colles vinyliques** : Elles se présentent sous une forme laiteuse, de couleur blanche, d'où leur appellation de « colle blanche ». Les colles vinyliques sont des émulsions aqueuses, c'est-à-dire qu'elles ne contiennent pas ou peu de solvants. L'émulsion suppose une suspension forcée des particules obtenues par des produits qui ont tendance à gonfler dans l'eau, d'où une relative faiblesse des collages à l'humidité et à l'eau. On dit de ces colles à émulsions, qu'elles ont les caractéristiques de la réversibilité. On entend par là, qu'elles sont en état de décollage, face à la chaleur et à l'humidité. On fera donc attention à ne pas les employer dans ces milieux spécifiques. Cette colle craint le gel. Elles se présentent sous forme d'un liquide blanc et elles sont prêtes à l'emploi. Elles peuvent être réversibles, à base de durcisseur ou encore même, à base de solvant pour des ouvrages vernis. Elles ont la possibilité d'être teintées à l'aide de poudre ou de liquides colorants. On compte en règle générale 150 à 200 g/m<sup>2</sup>, mais cela peut aussi descendre à

80 voire 140 g/m<sup>2</sup> ci support propre. La pression idéale serait de 5 bars pendant 12 heures à 18°.

- **Colles Polychloroprène** : Les polychloroprènes sont des élastomères, présentés sous forme de « colle contact » et de mastic, principalement à base de solvant. La température souhaitée pour leur utilisation est de 15 à 18°. Les deux surfaces à réunir sont encollées, à raison de 100 à 200 g/m<sup>2</sup>. L'évaporation du solvant demande 10 à 20 minutes. Un marouflage sera nécessaire, afin de chasser l'air.
- **Les colles thermo-fusibles** : Ces colles, comme les colles de contact, effectuent leur prise presque instantanément, sous l'effet de la chaleur, qui nécessite une température de 200° à 230°, pour être en état d'adhésivité. On trouve les colles thermo-fusibles sous la forme de granulés durs pour les encolleuses mécanique de chants non préencollés et sous la forme d'une pellicule adhésive pour les chants déjà préencollés. Les colles thermo-fusibles ont un grammage, qui, en règle générale est déjà préétabli (encolleuse de chants). La pression peut être mécanique ou manuel (fer à repasser).

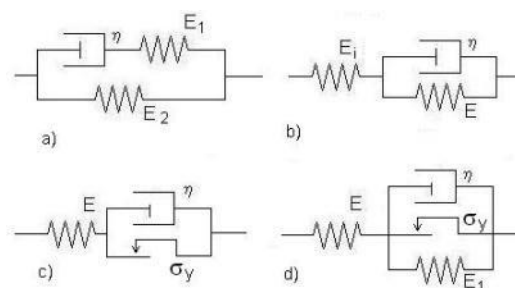
#### II.2.1.2.2. Les colles thermodurcissables [31]:

- Les colles époxydes : Pour des utilisations plus mécaniques, les colles époxydes sont les plus conseillées. Ils résistent aux hautes températures et peuvent supporter l'eau. Les colles époxydes sont toujours vendues en deux tubes distincts, le premier tube étant la résine et le second un durcisseur. Elles peuvent servir à coller les durites d'eau des voitures qui sont exposées à l'eau et à la chaleur du moteur par exemple.
- Les colles urée-formol : Elles se présentent sous forme de poudre ou de solutions aqueuses. Leur mise en œuvre nécessite de les mélanger dans l'eau avec un rajout de durcisseur. On compte, en règle générale de 120 à 150 g/m<sup>2</sup>. La température ambiante étant de 15°, la pression sera de 2 à 10 bars pour les bois tendre et de 5 à 15 bars pour les bois durs, cela pendant 3 heures.
- Les colles polyuréthanes : Il en existe plusieurs types dont les emplois sont variés.
- Les colles de contact prêtes à l'emploi, durcissant sans réaction chimique. Elles sont comparables aux colles de contact.
- Les colles à deux composants. Elles sont comparables aux colles résorcines.
- Les colles à un composant, durcissant par réaction avec l'humidité. Elles sont également comparables aux colles résorcines.
- Les colles mixtes époxy-polyuréthanes. Elles sont comparables aux colles époxydes.

### II.2.2. Comportement des colles

Des études ont montré que les propriétés des colles époxydes sont viscoélastiques. Cette performance viscoélastique dépend également de la température à laquelle la contrainte est appliquée.

En effet, lorsque la température augmente, la rigidité de la colle diminue. Ensuite, de nombreux modèles rhéologiques peuvent modéliser quantitativement le comportement viscoélastique linéaire observé. Ils sont obtenus en combinant les éléments ressort et amortisseur de différentes manières. La figure III.3 montre quelques modèles courants. Par conséquent, une description quantitative des phénomènes viscoélastiques observés sur les matériaux polymères obéissant au principe de superposition de Boltzmann peut donc être obtenue en combinant judicieusement ces éléments, par exemple en considérant un nombre approprié de branche en parallèle pour le modèle de Maxwell généralisé ou d'éléments en série pour le modèle de Kelvin généralisé. Cependant, des études sur les performances des adhésifs époxy ont montré que la non-linéarité des paramètres rhéologiques est en fonction du niveau de charge appliquée, le principe de superposition de Boltzmann ne convient plus au-delà d'un certain niveau de chargement. Cet effet est particulièrement visible lorsque le matériau est soumis à une charge cyclique. Une recherche bibliographique sur ce sujet montre qu'il manque en effet une méthode de calcul fiable bien reconnue et acceptée pour analyser les effets du temps, de la température, du niveau de charge, de l'humidité et du vieillissement sur la déformation de ces matériaux. Il existe de nombreux types de colles vendues sur le marché, et les conditions d'utilisation sont particulières, ce qui explique pourquoi cette méthode n'a pas été développée. Des modèles partiels existent toutefois pour des conditions spécifiques d'utilisation et sous certaines hypothèses. Ils sont représentés sur la figure II.3.



**Figure II.3.** Les modèles rhéologiques complexes, associant un comportement élastique (ressorts de module  $E$ ), un comportement visqueux (amortisseur de viscosité  $\eta$ ) et éventuellement une possibilité de déformation plastique (patin avec contrainte critique  $\sigma_y$ ) : Modèles de Bardenhagen (a), Hata (b), Bingham (c), et Chase-Goldsmith (d) [32].

### II.3.Patch

Plusieurs critères du choix des matériaux de réparation ont été mis au point. Voici un sommaire des principaux points se rapportant aux quatre matériaux de réparation et de renforcement couramment utilisés en aéronautique bore/époxy et graphite/époxy, le stratifié métal/composite, le GLARE et l'ARALL et les alliages de haute résistance typiques d'aluminium et de titane [30].

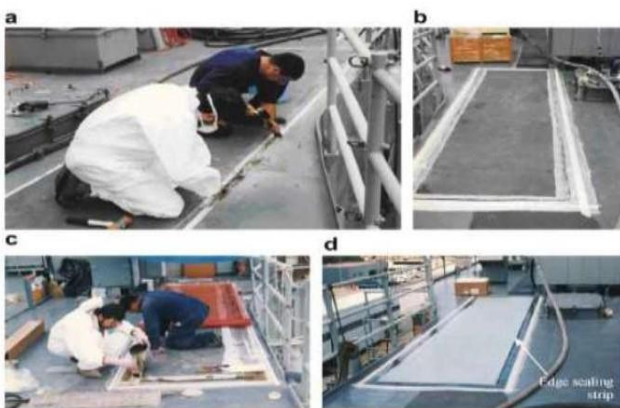
- **efficacités du patching** : Une rigidité élevée est exigée pour réduire au minimum l'intensité des contraintes et la propagation de la fissure. Les matières composites de fibre sont naturellement plus efficaces que les matériaux métalliques conventionnels ou stratifiés.
- **Température de fonctionnement** : Pour l'opération à hautes températures (plus de 150°C) un patch en titane est la meilleure solution. Les alliages d'aluminium conventionnels et les métaux stratifiés devraient être soigneusement étudiés car il existe une gamme de limites supérieures de la température selon l'alliage et le traitement thermique impliqué.
- **Contrainte résiduelle**: Si une réparation (traitée à une température élevée) est susceptible de résister aux basses températures (par exemple une réparation de fuselage d'un avion de transport) [33]. Le meilleur choix peut être un matériau métallique conventionnel ou stratifié dont le coefficient de dilatation thermique est adéquat à la structure. Dans une telle situation, la réparation en graphite/époxy est moins efficace à la réparation en bore/époxy caractérisée par une réduction des contraintes résiduelles thermiquement induites.
- **Coût** : Les matériaux métalliques conventionnels ont les plus bas coûts, suivis des métaux stratifiés alors que les composites de graphite et les composites de fibre au bore sont les plus chers. L'analyse des coûts de réparation doit être faite soigneusement. Souvent une réparation en matériaux composites s'avère moins onéreuse qu'une réparation métallique malgré leur prix élevé. Les patches composites sont caractérisés par une excellente formabilité, la facilité de découpage en formes complexes et d'autres avantages encore.
- **Inspections**: Après l'application du patch sur une zone endommagée, on prévoit toujours des inspections (contrôles) non destructives pour vérifier que la taille du défaut ne s'est pas développée sous le patch collé. Un composite en bore/époxy est considéré comme le

meilleur choix, en égard à l'utilisation des courants de Foucault qui détectent la présence des fissures sous le patch. La détection des défauts avec des courants de Foucault sous une réparation en graphite/époxy est très difficile au regard de la conductivité électrique des fibres de graphite. La détection des défauts sous des réparations métalliques par collage est impossible ; on utilise plutôt les rayons X ou les ultrasons.

- **Poids:** Si une réparation doit intervenir sur un composant de poids critique, les matériaux ayant les propriétés spécifiques les plus élevées sont souhaitables. Les matériaux composites permettront des réparations avec un poids considérablement réduit comparés aux matériaux métalliques. Un patch composite représente le tiers de l'épaisseur d'un patch en aluminium ; il fournit significativement moins de traînée.

### II.3.1.Patches composites :

L'utilisation des matériaux composites est en expansion dans plusieurs industries et particulièrement dans le domaine de l'aéronautique où on leur trouve de nombreuses applications mettant à profil leurs propriétés. En effet, les matériaux composites permettent d'obtenir de bonnes propriétés mécaniques avec un poids réduit et présentent une bonne résistance à la fatigue et à la corrosion. Ces patches composites permettent de retarder la propagation des fissures et par conséquent d'augmenter la durée de vie des structures ainsi réparées. L'influence des propriétés mécaniques du patch composite sur le comportement global des structures réparées a été étudiée dans de nombreux travaux [34]. Les patches composites sont largement utilisés, non seulement dans le domaine aéronautique mais aussi dans le domaine naval (figure. II.4), véhicule de sport bicycle, ski, etc...., pour réparer les structures endommagées par la fatigue. Ces patches peuvent retarder la propagation des fissures, prolongeant ainsi la durée de vie de la structure ainsi réparée.



**Figure. II.4 :**  
Réparation des bordages  
en aluminium par patches  
composites [35].



### **II.3.2.Patches FGM :**

Les matériaux à gradient de propriétés dits **FGM** sont des matériaux composites avancés récents, développés par un groupe de chercheurs japonais en 1980[36]. Ils sont utilisés comme barrière thermique et permettent l'élimination des contraintes résiduelles d'origine thermique. Les matériaux à gradient de propriétés disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils sont constitués généralement de deux matériaux : céramique et métal dont la fraction volumique de l'un varie suivant une ou plusieurs directions avec une loi bien déterminée (puissance, exponentielle, ...etc.).

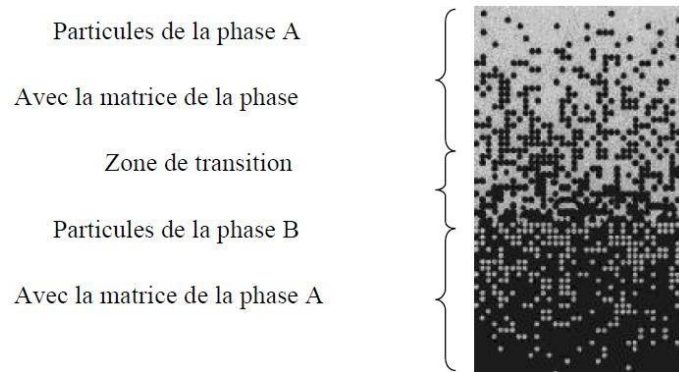
Ces matériaux possèdent de multiples avantages qui peuvent les rendre intéressants et attractifs du point de vue de leur potentiel d'application. Il peut s'agir de l'amélioration de la rigidité, de la tenue à la fatigue, de la résistance à la corrosion ou de la conductivité thermique en plus d'avoir une gradation des propriétés permettant ainsi d'augmenter ou de moduler des performances telles que la réduction des contraintes locales ou encore l'amélioration du transfert de chaleur [37]. Ce nouveau concept marque le commencement d'une révolution dans les domaines de la science et de la mécanique des matériaux. Les travaux sur la modélisation de la réponse d'une plaque aluminium réparée par patch collé en FGM sont presque rares.

Notre étude pour avoir une technique capable de réparer une structure métallique qui est utilisée dans divers domaines d'application avec un patch en FGM, notamment aérospatial pour éviter la rupture de la structure à cause des défauts (comme les fissures, entaille, délaminage, bulle d'air, cavité, trou) qui sont la cause de la diminution de la durée de vie de la structure au cours de son fonctionnement.

#### **II.3.2.1.Les matériaux à gradient évalué FGM :**

Un matériau à gradient évalué (FGM) est un matériau dans lequel la composition et la structure changent graduellement entraînant une modification correspondante dans les propriétés du matériau. Ce concept de FGM peut être appliqué à divers matériaux pour des utilisations structurelles et fonctionnelles. Il y a plusieurs années, ce concept a été évalué en premier lieu dans le développement de revêtement des barrières thermiques pour augmenter la résistance thermique des lames dans les moteurs de turbine à gaz pour diverses applications telles que les systèmes de protection thermique [36]. Généralement, les FGMs sont des matériaux constitués de plusieurs couches contenant des composants différents tels que les

céramiques et les métaux. Les vides sont également considérés comme une composante des matériaux FGM [38]. Ils sont donc des composites présentant des caractéristiques macroscopiquement inhomogènes. Un exemple d'un tel matériau est montré sur la figure II.5.



**Figure II.5 :** FGM avec les fractions de volume des phases constitutives graduées dans une seule direction (verticale) [36].

La plupart des FGMs sont constitués des céramiques et des métaux dont les propriétés mécaniques sont comparés dans le Tableau II.1.

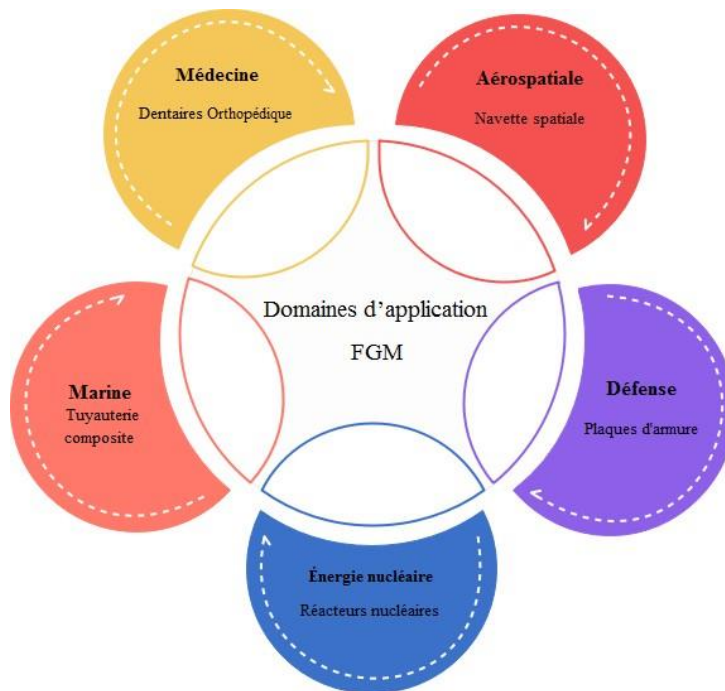
La face à haute température	céramique	-bonne résistance thermique -bonne résistance à l'oxydation -faible conductivité thermique
Continuité du matériau d'un point à l'autre « couche intermédiaires »	Céramique-métal	-élimination des problèmes de l'interface -relaxer les contraintes thermiques
La face à basse température	métal	-bonne résistance mécanique -conductivité thermique élevée -très bonne ténacité

**Tableau II.1 :** Comparaison entre les propriétés de la céramique et du métal.

### II.3.2.2. Domaines d'applications des matériaux à gradient évalué :

Le concept des matériaux à gradient évalué est applicable dans des nombreux domaines, comme il est illustré dans la figure II.6. Il a été initialement conçu pour l'industrie de l'aéronautique où les FGM ont fourni deux propriétés contradictoires telles que la conductivité thermique et d'isolation thermique dans un matériau. Actuellement elles permettent la production des matériaux légers, forts et durables, et elles sont applicables dans

un large intervalle des domaines tels que les matériaux de construction, matériaux de conversion d'énergie, nucléaire et semi-conducteurs.



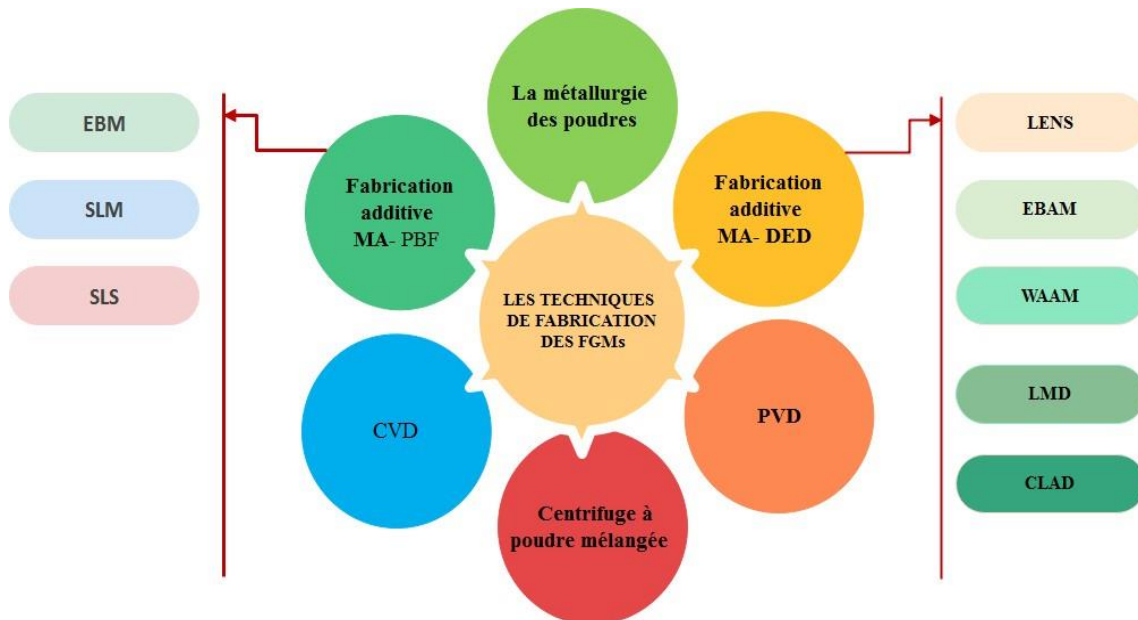
**Figure II.6 :** Les principaux domaines d'application des FGM [39].

### II.3.2.3. Méthodes d'élaboration des matériaux FGMs

L'utilité des matériaux à gradient de propriétés avec une structure à gradient a été identifiée dans les articles théoriques par. [Shen 2009] [40]. Cependant, leurs travaux n'ont qu'un effet limite, probablement en raison d'un manque de méthodes de production appropriées pour FGMs à ce moment-là. Cela a pris 15 ans supplémentaires jusqu'à ce que la recherche systématique sur des processus de fabrication pour les matériaux à gradient de propriétés ait été effectuée dans le cadre d'un programme de recherche national sur FGMs au Japon. Depuis lors, une partie de la recherche sur les FGM a été consacrée au traitement de ces matériaux et une grande variété de méthodes de production a été développée [Mortensen 1995] [41]. Le processus de fabrication d'un FGM peut habituellement être divisé en établissant la structure dans l'espace non homogène « gradation » et la transformation de cette structure en matériau en bloc « consolidation ». Des processus constitutifs sont basés sur un habillage par étapes de la structure graduée à partir des matériaux de précurseur ou des poudres. Les principaux procédés disponibles de nos jours pour la production des matériaux FGM (**Figure II.7**):

- Coulage séquentiel en barbotine (Slip Casting),

- Coulage en bande (Tape Casting),
- Projection thermique (plasma),
- Dépôt chimique et physique en phase vapeur (CVD et PVD).
- Frittage laser différentiel sont les plus importants.



**Figure II.7** : Les techniques de fabrication des FGMs [39].

La technique de métallurgie des poudres est la plus adoptée parmi les nombreuses techniques d'élaboration du FGM disponibles.

#### II.3.2.4.Règle de mélange

La plupart des articles de la littérature sur les FGMs utilisent la règle simple du mélange pour obtenir les propriétés matérielles efficaces. En ce qui concerne les fonctions de distribution de fraction volumique, les propriétés matérielles équivalentes des FGMs pourraient être déterminées par diverses fonctions sous forme de loi de puissance (P-FGM), sigmoïde (S-FGM) ou exponentielle (E-FGM) :

##### II.3.2.4.1.Loi de mélange en puissance (P-FGM)

La fraction volumique de la plaque P-FGM est considérée comme évoluant continuellement dans l'épaisseur de la plaque en fonction de la variation de la loi de puissance comme suit [40]:

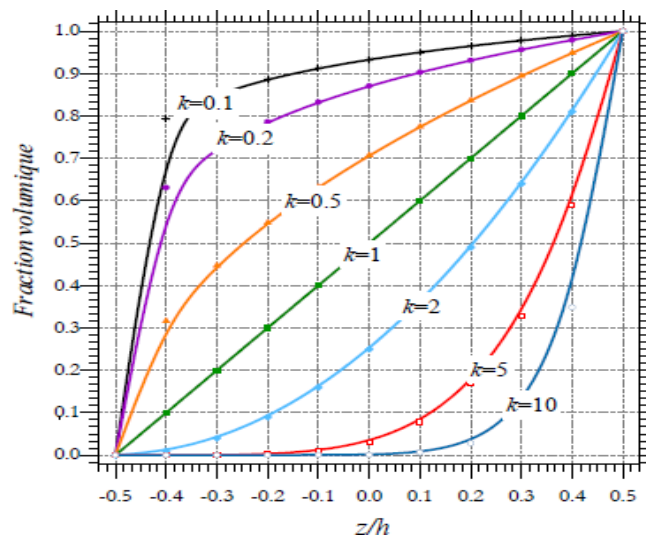
$$V(z) = \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2}\right)^n \quad (\text{II.1})$$

$$V_m(z) = 1 - V_c(z) \quad (\text{II.2})$$

Où  $n$  : exposant de la fraction volumique non négatif,  $h$  est l'épaisseur de la plaque. Une fois la fraction volumique ( $z$ ) a été définie, l'équation de la loi des mélanges écrit :

$$P(z) = (P_m - P_c) \cdot V_m(z) + P_c \quad (\text{II.3})$$

$P(z)$  : Représente les propriétés matérielle effective de FGM et  $V_m(z)$  est la fraction volumique du métal dans les plaques de FGM est représentée sur la figure. II.8, Ou les indices  $c$  et  $m$  représentent respectivement les phases céramique et métallique.



**Figure II.8 :** Variation la fraction volumique à travers l'épaisseur d'une plaque FGM en fonction loi de puissance.

#### II.3.2.4.2. Loi sigmoïdale (S-FGM)

**Chung et chi** [41], ont défini la fraction de volume de la plaque FGM en utilisant deux fonctions de loi de puissance pour assurer une bonne distribution des contraintes parmi toutes les interfaces. Les deux fonctions de loi de puissance sont définies par (Figure II.9) :

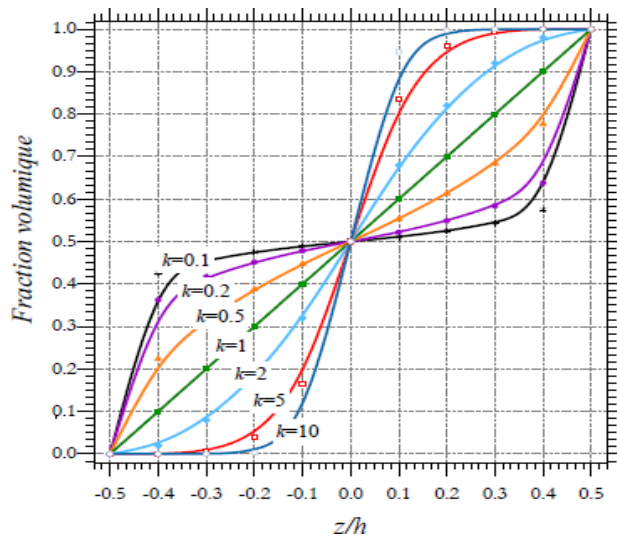
Pour :  $-\frac{h}{2} \leq z \leq 0$   $V_1(z) = \left(\frac{h+z}{\frac{h}{2}}\right)^n$  (II.4)

Pour :  $0 \leq z \leq \frac{h}{2}$   $V_2(z) = 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{\frac{h}{2}-z}{\frac{h}{2}}\right)^n$  (II.5)

L'équation de la loi des mélanges devient :

$$P(z) = (P_m - P_c) \cdot V_1(z) + P_c \quad (II.6)$$

$$P(z) = (P_m - P_c) \cdot V_2(z) + P_c \quad (II.7)$$



**Figure II.9 :** Variation la fraction volumique à travers l'épaisseur d'une plaque FGM en fonction loi sigmoïdale.

### II.3.2.4.3. Loi de mélange exponentielle (E-FGM)

On considère que la fraction volumique de la plaque E-FGM varie continuellement dans l'épaisseur de la plaque en fonction de la variation exponentielle [42], comme suit :

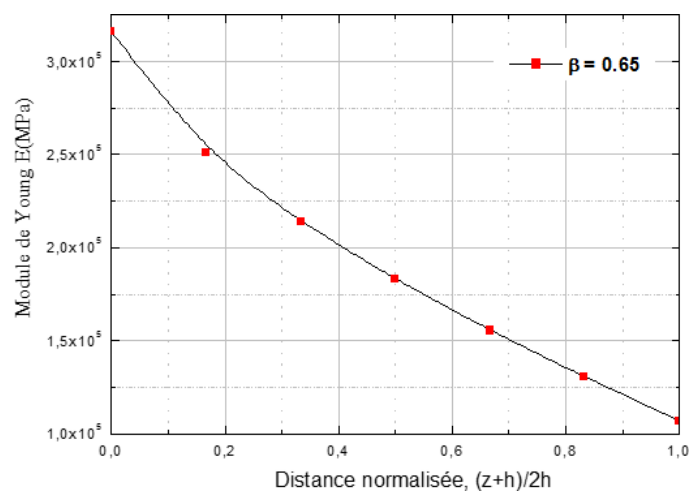
$$E(z) = E_c e^{(z+h/2)} \quad (II.8)$$

$$B = \frac{1}{h} \ln \left( \frac{E_m}{E_c} \right) \quad (II.9)$$

Où  $E(z)$  représentée le module de Young effective du FGM, la position de la surface inférieure de la plaque de module de Young est en céramique  $E_c$  ( $z = -h/2$ ) et la surface supérieure est en métal pur  $E_m$  ( $z = h/2$ ).

La variation du module de Young à travers l'épaisseur ( $h$ ) de la plaque E-FGM est représentée dans la figure III.5.

Les lois de mélange sont pratiques et simples à utiliser mais elles ne permettent pas de connaître la taille, la forme et la distribution des particules au niveau de la microstructure.



**Figure II.10 :** Variation le module de Young à travers l'épaisseur d'une plaque FGM en fonction loi exponentielle [37].

#### II.4.L'adhésion

L'adhésion est l'ensemble des phénomènes physico-chimiques qui se produit lorsque deux matériaux sont mis en contact intime. Les différentes théories de l'adhésion prévoient l'établissement de liaisons ou d'interactions spécifiques. L'adhérence est la force ou l'énergie nécessaire pour séparer deux matériaux réunis par une surface commune [43].

Les mécanismes d'adhésion ne peuvent être décrits par une théorie unique. Les principales théories expliquant ainsi les mécanismes d'adhésion sont :

- la théorie chimique,

- la théorie mécanique/ thermodynamique.
- la théorie physique
- la théorie physico-chimique

#### **II.4.1. Théorie chimique**

Cette théorie s'intéresse à la formation de liaisons chimiques faibles ou fortes entre la surface du substrat et le polymère. Il est parfois possible de créer à l'interface colle/substrat des liaisons covalentes ou ioniques lors de réactions chimiques. Ces liaisons seront autant de points d'ancrage qui assureront une grande résistance à la rupture et une bonne durabilité de l'assemblage. Ces liaisons chimiques peuvent être créées de deux manières :

- Par réaction directe entre l'adhésif et le substrat ; c'est par exemple le cas entre une résine époxyde et la couche d'oxyde superficielle d'un métal.
- Par l'intermédiaire d'un agent de couplage, c'est-à-dire d'une molécule compatible à la fois avec la colle et avec le substrat. C'est généralement la technique utilisée pour obtenir une bonne adhésion entre une matrice époxyde et des fibres de verre dans les matériaux composites. [43].

#### **II.4.2. Théorie mécanique**

Cette théorie proposée par Mac Bain (1925), qui considère que l'adhésion résulte essentiellement d'un ancrage mécanique des matériaux mis en contact. Le mécanisme mis en jeu est lié à la pénétration de la colle dans les porosités et les aspérités des substrats, ce qui permet de constituer de nombreux points d'amorçage après solidification de l'adhésif.

Si la liaison mécanique contribue à accroître l'adhésion par l'augmentation de l'aire de contact effective, et donc du nombre de liaisons interraciales, elle peut également être un handicap. En effet, il est nécessaire que la colle mouille parfaitement les surfaces afin de ne pas piéger de bulle d'air dans les porosités, ce qui induirait des concentrations de contraintes et fragiliserait le joint. Une rugosité trop importante peut elle aussi être source de bulles d'air. Il existe donc une rugosité optimale des substrats à assembler (Figure II.11). [43].



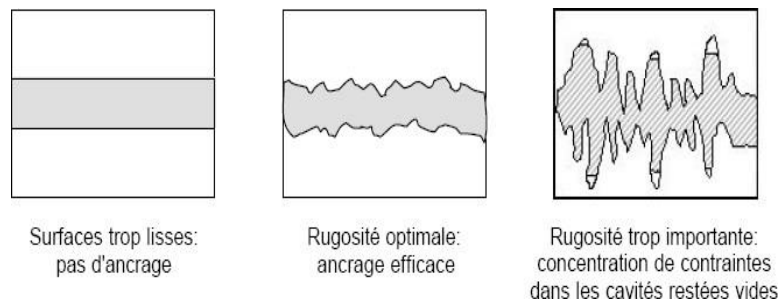


Figure II.11 : **Influence de la rugosité des substrats sur l'ancrage mécanique [43].**

#### II.4.5. Théorie physico-chimique

Le domaine de la physico-chimie a donné naissance au modèle de l'inter diffusion qui concerne tout particulièrement l'adhésion entre polymères. En fait, lorsque deux polymères sont mis en contact à une certaine température et sous une pression donnée, les chaînes de polymères s'interpénètrent, réalisant ainsi l'adhésion entre les deux milieux. Les mécanismes fondamentaux de diffusion des macromolécules ont été décrits et analysés par P.G. de Gennes dans les années 80, en utilisant le concept de la diffusion [43].

#### II.5.Substrat

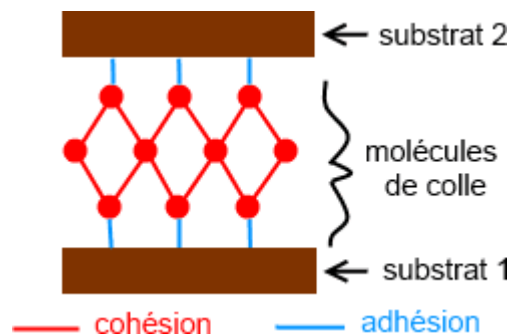
Lors de la conception d'un produit, les substrats sont choisis pour diverses raisons, notamment la performance, l'esthétique, le poids ou d'autres facteurs. La conception de la pièce tend également à dicter la géométrie du joint collé. Par conséquent, lors du choix d'un adhésif, il est important de comprendre comment la composition chimique de l'adhésif interagit avec la surface des substrats.

Les termes « substrat » et « surface » peuvent tous deux désigner le matériau à fixer pour créer un assemblage, tel que le bois ou le fer. Techniquement, le substrat comprend toutes les propriétés du matériau : des propriétés du substrat comme la flexibilité ou l'atténuation des vibrations, ainsi que les propriétés de surface comme la résistance à l'abrasion ou la texture. Dans la plupart des cas, les termes « substrat » et « surface » sont interchangeables dans le cadre du collage et font référence à la partie spécifique sur laquelle vous êtes en train de coller, là où l'adhésif est en contact.

Il est important de savoir que la surface d'un substrat peut se comporter de manière très différente de la matière d'un substrat. Prenez l'exemple du métal peint : la « surface » peinte a des propriétés très différentes, à la fois à l'échelle microscopique et macroscopique, que le « volume » du métal. Les adhésifs créent un collage qui assemble les deux matériaux.

Pour un bon assemblage, il est essentiel que l'adhésif puisse entrer en contact avec la surface de chaque matériau. Cela est différent des autres processus tels que la fixation mécanique dans laquelle la surface est perforée ou un processus de soudage dans lequel les matériaux sont fondus.

Pour effectuer une mise en contact avec une surface, un adhésif doit avoir des propriétés appropriées. Cela inclut sa composition chimique et sa viscosité (celles-ci sont détaillées dans d'autres articles), mais la surface doit également posséder les propriétés appropriées. Les trois propriétés énumérées ci-dessous (énergie de surface, propreté et rugosité) sont les facteurs les plus importants pour établir un contact optimal



**Figure II.12 :** Mécanisme d'un assemblage par collage

### II.5.1.Énergie de surface

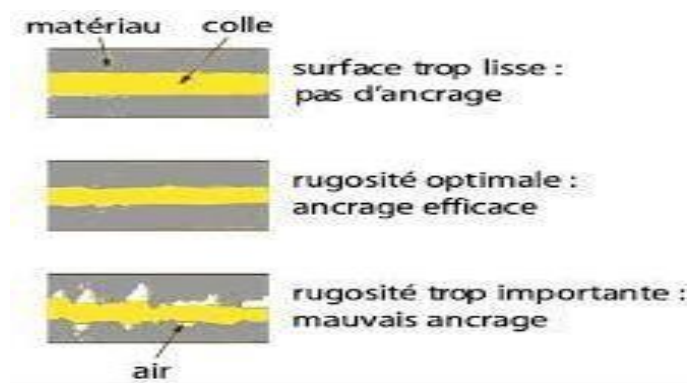
Il est important de déterminer les énergies de surface de tous les substrats lors de la sélection de l'adhésif approprié, ainsi que la capacité de mouillage de l'adhésif sur chacun d'entre eux. La propreté d'une surface détermine également la capacité d'adhésif à mouiller le substrat : certains adhésifs nécessitent un substrat extrêmement propre, tandis que d'autres peuvent s'appliquer sur des substrats moins propres.

Les matériaux à basse énergie de surface freinent le fluage de la colle, empêchant tout contact étroit. Les matériaux à haute énergie de surface facilite le fluage de la colle, favorisant un contact étroit. Vous pouvez faire correspondre la colle à l'énergie de surface du substrat, ou vous pouvez modifier l'énergie de surface du substrat en passant une couche de primaire, en abrasant ou en utilisant d'autres méthodes

### II.5.2. Collage sur des surfaces rugueuses

La rugosité peut augmenter la surface totale disponible pour un collage, permettant ainsi un assemblage plus fort. Cependant, une rugosité excessive peut empêcher le fluage de la colle sur la surface. L'adhésif peut être adapté à la rugosité de la surface en modifiant la surface ou en choisissant un adhésif plus approprié.

Pour former une liaison adhésive, l'adhésif doit être mis en contact étroit avec la surface de chaque substrat. Par conséquent, l'adhésif doit être choisi en fonction de l'énergie de surface et de la propreté des substrats. En outre, l'adhésif doit présenter une résistance à la rupture suffisante pour répondre aux besoins de l'application. Une fois que vous avez choisi les substrats de votre conception.



**Figure. II.13.** Illustration schématique des différents mécanismes pouvant intervenir dans l'action de l'adhésion dans un assemblage par collage : (a) pas ancrage mécanique, (b) ancrage mécanique efficace, (c) mauvais ancrage mécanique

La saleté, l'huile, la graisse ou la poussière peuvent former une couche empêchant l'adhésif d'entrer correctement en contact avec la surface réelle du matériau. La contamination de la surface peut être gérée de deux manières. La surface peut être nettoyée de tous les contaminants, ou l'on peut utiliser un adhésif formulé pour être compatible avec un certain niveau de contamination.

### II.5.3. Résistance à la rupture

La résistance à la rupture fait référence à la résistance interne l'adhésif, sa capacité à résister à la contrainte. Plus la résistance à la rupture est élevée et plus l'adhésif est solide. Il est important de tenir compte des types de contraintes spécifiques qui agiront sur l'assemblage collé. Les contraintes courantes comprennent le cisaillement, le clivage, le pelage et la traction.

La résistance à la rupture est déterminée par la composition chimique l'adhésif. Les résistances des l'adhésif sont très variées, qu'il s'agisse des rubans PSA, des colles époxy et acryliques structurales. Il est essentiel de connaître la magnitude et la fréquence des contraintes exercées sur votre application pour choisir l'adhésif présentant la résistance à la rupture la plus adaptée à la tâche en cours.

## **II.7 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons défini l'adhésif, ces différents types et les matériaux a gradient évalué FGM, leurs domaines d'application, leurs principales méthodes de fabrication, les différents lois de mélange ont été présentées et la variation spatiale et progressive des propriétés de ces matériaux permet de créer des structures innovantes.

La variation spatiale et progressive des propriétés des matériaux à gradients de propriétés permettent de créer des structures innovantes qui peuvent être exploitées dans de nombreux domaines d'application dans les structures spéciales en génie mécanique

## **Chapitre : III**

# **Optimisation des paramètres géométriques et convergence**

### III. 1. Introduction

Afin d'optimiser 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, on parle alors dans ce cas de dimensionnement et/ou d'optimisation des structures.

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 [44].

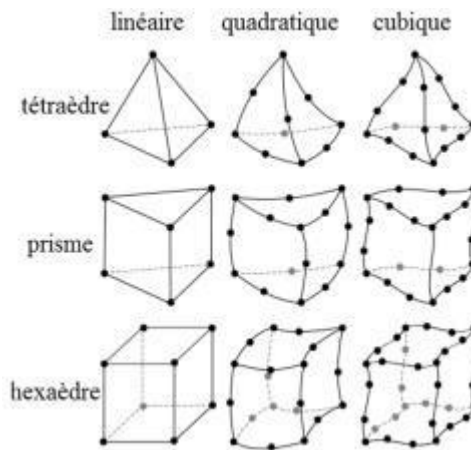
Les méthodes analytiques et numériques se sont alors rapidement révélées être un outil indispensable pour aider au dépouillement des essais expérimentaux, mais aussi pour permettre d'en limiter le nombre. On peut, en effet, pour un moindre coût réaliser un grand nombre de calculs pour évaluer les points 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 [45]. L'utilisation de la méthode des éléments finis sur un domaine donné pour déterminer une fonction inconnue (contrainte, déplacement.....) nécessite la description du domaine considéré en un nombre fini de sous-domaines appelés éléments finis, et le système continu sera remplacé par un système discrétisé équivalent.

Dans ce chapitre, une analyse numérique par la méthode des éléments finis tridimensionnels d'un patch collé à simple recouvrement est présentée, cette modélisation est effectuée avec les codes de calcul ABAQUS. Une description générale du modèle géométrique et du maillage de l'assemblage étudié est présentée avec les différentes conditions

aux limites et de chargement sont détaillées en soulignant la prise en compte de toutes les surfaces de contact liées à la spécificité de l'assemblage collé. Ce chapitre a pour objectif d'exploiter tous les types de maillage afin de voir leur influence sur la valeur de la contrainte dans la plaque non réparée et réparée. On a fixé le type de maillage linéaire pour trois type d'élément (Hexaédrique, Wedge, Tétraédrique).

### III. 2.La méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est une technique pour rapprocher les équations différentielles régissant pour un système avec un ensemble d'équations algébriques concernant un nombre limité de variables. Ces méthodes sont populaires parce qu'ils peuvent facilement être programmés. Les techniques des éléments finis ont été initialement développées pour des problèmes structurels, mais ils ont été étendus à de nombreux autres problèmes. Le solide est décomposé en éléments de forme géométrique simple ayant des côtés communs et dont les sommets ou nœuds sont les points d'articulation de plusieurs éléments entre eux (figure.III.0). Ces nœuds seront les points d'application des forces intérieures ou extérieures. L'opération de décomposition s'appelle le maillage.

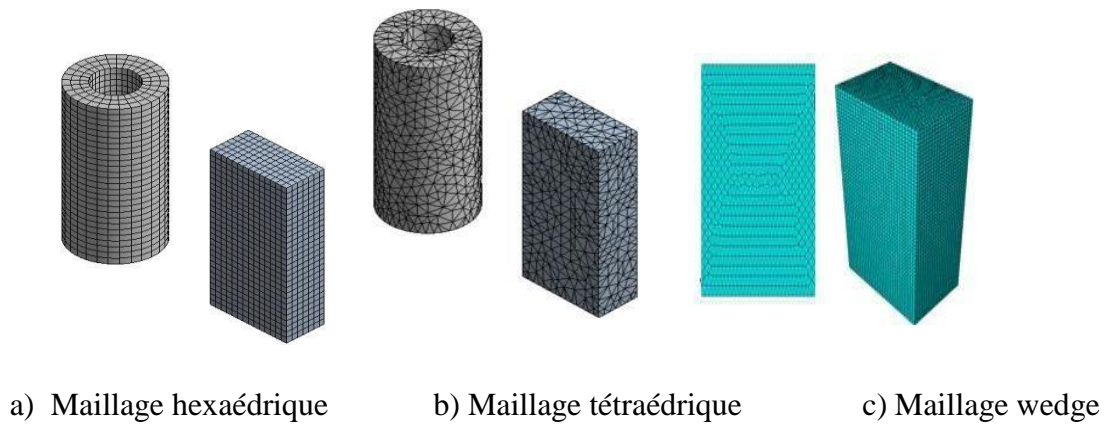


**Figure III.1** : éléments utilisés pour la modélisation 3D

#### III.2.1.Le maillage

Le maillage est exécuté pour discrétiser la géométrie créée dans de petits morceaux appelés des éléments finis. La solution pour qu'un problème peut être divisé en petits éléments finis utilisé un ensemble de grilles ou de nœuds. La génération de maillage est une tâche très importante du prétraitement. Le domaine doit être engrené correctement dans des éléments des

formes spécifiques telles que des triangles et des quadrilatères. Quelques exemples des maillages sont donnés sur la Figure III.1.



**Figure.III.2 :** Représentation des différents types d'élément de maillage avec la méthode d'éléments finis 3D

### III.2.2. Propriétés des matériaux

Beaucoup de systèmes de technologie se composent de plus d'un matériau. La propriété des matériaux peut être définie pour un groupe des éléments ou de chaque élément individuel, si nécessaire. Pour simuler différents phénomènes, différents ensembles de propriétés des matériaux sont exigés. Par exemple, le module de Young et le module de cisaillement sont exigés pour l'analyse des contraintes des solides et des structures, alors que le coefficient de conductivité thermique sera exigé pour une analyse thermique. Cependant, l'obtention de ces propriétés n'est pas toujours facile. Il y a les bases de données des matériaux qui sont disponibles, et habituellement des expériences sont exigées pour déterminer exactement la propriété des matériaux à employer dans le système utilisé.

### III.2.3. Conditions aux limites et de frontière

Les conditions aux limites et de frontière jouent un rôle décisif en résolvant la simulation. L'entrée de ces conditions est habituellement faite facilement par les préprocesseurs commerciaux, et elle est souvent connectée avec des graphiques. Les utilisateurs peuvent spécifier ces conditions aux identités géométriques (points, lignes ou courbes, surfaces, et solides) ou aux éléments finis ou aux grilles. Encore, pour simuler exactement ces conditions pour les systèmes de technologie réels exige l'expérience, la connaissance et les jugements appropriés de technologie. Les conditions aux limites et de frontière sont différentes du problème au problème [46].



### III.3. Présentation du logiciel de calcul utilisé

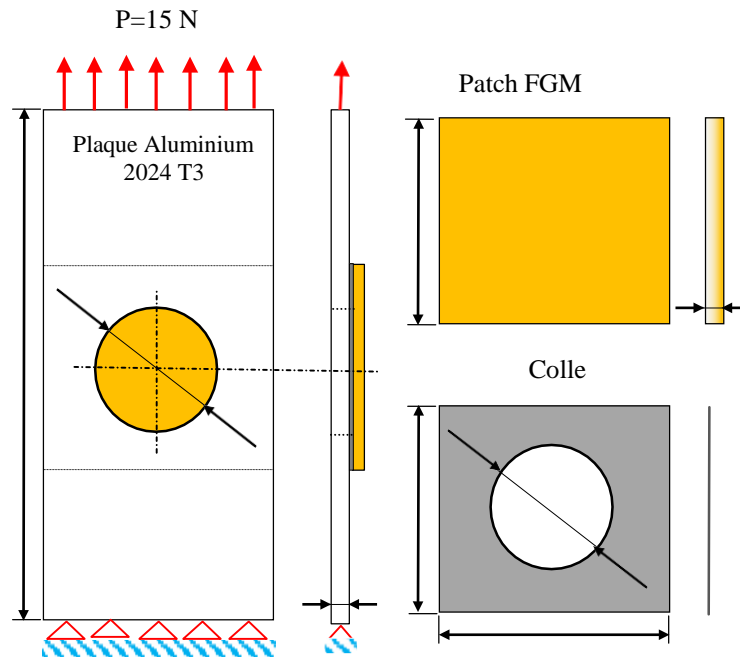
Actuellement, les logiciels de calcul basés sur la méthode des éléments finis sont largement utilisés et les résultats numériques obtenus s'avèrent très satisfaisants si des modèles numériques sont correctement établis. A cet effet, les performances du logiciel ABAQUS version 6.14 sont utilisées dans ce travail pour analyser la réponse des plaques métallique endommagées par fissuration et réparées par patch FGM. Toutes les applications destinées aux calculs par éléments finis nécessitent d'importantes connaissances dans le domaine des méthodes numériques, alors qu'ABAQUS est conçu pour être utilisé partout sans qu'il y ait besoin de formation préalable sur les éléments finis. Grâce à son interface intuitive, il permet une prise en main très rapide du logiciel avec l'option d'automatisation de la reconnaissance des zones de contact et la génération du maillage. Le programme ABAQUS a de nombreuses capacités d'analyse par éléments finis, allant d'une simple étude statique linéaire à une autre étude statique complexe non linéaire. La documentation de ce code de calcul donne les procédures à suivre pour effectuer des analyses correctes des différents domaines de l'ingénierie. Le but ultime d'une analyse par éléments finis est de recréer mathématiquement le comportement d'un 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.

### III. 4. Description géométrique de modèle

Dans notre étude, on a étudié différents modèles avec même dimensions de la plaque d'aluminium 2024 T3 pour 150 mm longueur, 50 mm de largeur et 2 mm d'épaisseur. Cette plaque présente divers taille de trou de diamètre en milieu. Une fissure émanant d'entaille sera considérée dans l'étude de longueur variable. La plaque endommagé doit être renforcée par un patch FGM de dimensions  $H_p = 50$  mm,  $W_p = 50$  mm et  $t_p = 2$  mm. Le patch étant collé à la plaque par un adhésif ADEKIT A140. Les conditions aux limites pour l'éprouvette en traction sont reproduites de la manière suivante (figure II.2) :

Encastrement de la face inférieure de la plaque :  $U_1=U_2=U_3=0$ ,  $UR_1=UR_2=UR_3=0$  et l'ensemble (plaque, patch et adhésif) est sollicité en traction uniaxial sous une contrainte de 50 MPa appliquée sur l'autre côté la section transversale de la plaque. Utilisation type de colle entre le patch FGM et la plaque d'aluminium 2024 T3 est donc considère comme une épaisseur

0.2 mm pour tous les modèles comme montre dans la figure normalisé (figure.III.2). La présence de patch en FGM a pour objectif de augmenté la dure vie de la plaque. Et de proposer deux concepts géométriques avec des différent variations de distribution les propriétés matérielles suivant l'épaisseur.



**Figure.III.3** : Une plaque trouée et réparé par un patch collée en FGM.

### III.5.Présentation des Matériaux utilisés

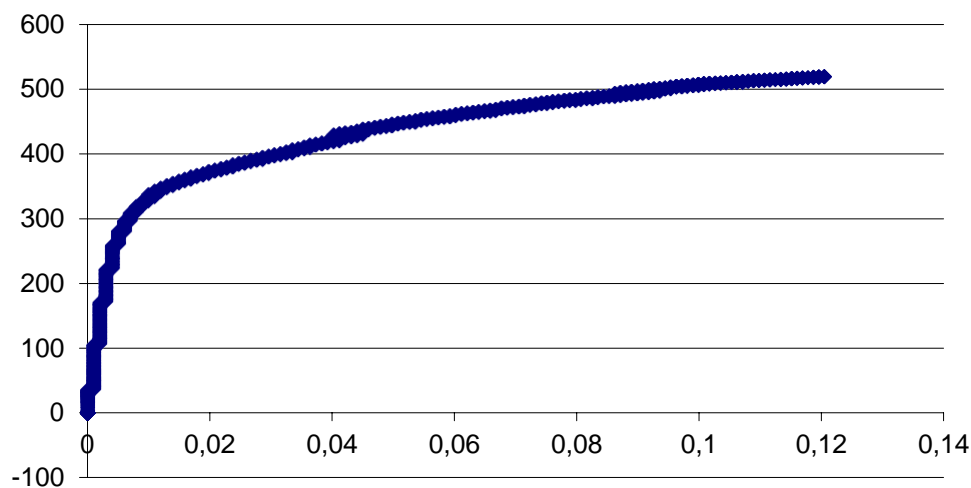
Nous prenons les mêmes propriétés et dimensions pour la plaque en aluminium dans toutes les modèles numériques et même pour le patch en FGM et l'adhésif, nous avons choisi deux types de conceptions et trois valeurs pour l'exposant de la fraction volumique de FGM. Afin déterminer les propriétés mécaniques effectifs de patch FGM.

#### III.5.1 Alliage d'aluminium 2024-T3

Aluminium a été découvert en 1825. C'est l'élément métallique le plus présent à la surface de la terre. En tonnage, la production d'aluminium ne représente que 2 % environ de celle des aciers. Cependant, ce métal (et ses alliages) arrive en seconde position lorsque l'on parle de l'utilisation des matériaux métalliques. L'aluminium doit cette place à un ensemble de propriétés qui en font un matériau remarquable. Sa masse volumique de 2,7 g.cm<sup>-3</sup> en fait un matériau léger et de ce fait très intéressant, notamment pour des applications dans le secteur de

l'aéronautique. Néanmoins, l'utilisation de l'aluminium pur reste limitée en raison de ses propriétés mécaniques médiocres. Le module d'Young calculé dans la partie linéaire de la courbe est de 74000 MPa, le coefficient de Poisson est égal à 0,33 selon la fiche technique du fournisseur.

Les propriétés mécaniques d'Aluminium sont généralement déterminées à partir des essais mécaniques essentiellement l'essai de traction. Le test de traction réalisé sur les plaques d'Aluminium permet d'avoir la courbe représentée dans la figure III.3. Pour introduire cette loi de comportement, le logiciel ABAQUS exige l'introduction en plus du module d'Young et coefficient de poisson, tous les points de la courbe dans la partie plastique (contrainte et déformations associées dans cette zone plastique).



**Figure III.4 :** Courbe contrainte/déformation Plaque Aluminium 2024-T3 (courbe expérimentale) [44]

D'après la courbe de traction, on peut déterminer quelques propriétés mécaniques qui seront d'une grande utilité pour l'analyse numérique et qui sont regroupés dans le tableau III.1.

Module de Young (E)	74000 MPa
Contrainte à la rupture Rm	510 MPa
Limite d'élasticité R0.2	255 MPa
Coefficient de poisson ( $\nu$ )	0.3
Module de cisaillement (G)	26500 MPa
Allongement (A%)	12

**Tableau III.1 :** Propriétés mécaniques de l'alliage d'Aluminium 2024-T3 [48].

### III.5.2.L'adhésif structural ADEKIT A140 [44]

L'adhésif utilisé est la colle époxydique bi-composant structural ADEKIT A140 de la société AXSON à base de résine époxyde modifiée, il est commercialisé en France par les sociétés AXSON et HEXCEL composite. Cet adhésif se présente sous la forme d'un liquide trop visqueux conditionné en cartouche 50ml et 400ml et nécessite l'emploi d'un pistolet manuel ou pneumatique pour son application. D'après les données du fournisseur, l'adhésif ADEKIT A-140 présente de bonnes performances mécaniques jusqu'à des températures de 180°C et peut supporter de courtes expositions à 215°C. Le mélange de la résine époxy deux composants s'effectue peu avant l'assemblage : la période entre la préparation de la colle et son application ne dépasse pas les 30 minutes [44].

#### ➤ Caractéristiques de l'adhésif :

- Adhésif époxy bi-composant haute performance durcissant à l'ambiante
- Produit pâteux applicable sur paroi verticale et permettant de combler des jeux d'assemblages importants
- Excellentes performances mécaniques et thermiques jusqu'à 100°C
- Excellente résistance aux charges dynamiques (vibrations et impacts)
- Produit résistant au vieillissement et aux milieux agressifs [45].

Matériaux	$K_{nn}$ (MP	$K_{tt}, K_s$	$\sigma_I$	$r_{II}, r_I$	$G_{IC}$	$G_{IIC}, G_{III}$	$\sigma_Y$ (MP	$\sigma_m$	A %
Adekit A-140	13000	8000	32	24	0.5	2.41	14.5	35	5

Tableau III.2 : Propriétés mécanique de l'adhésif [1].

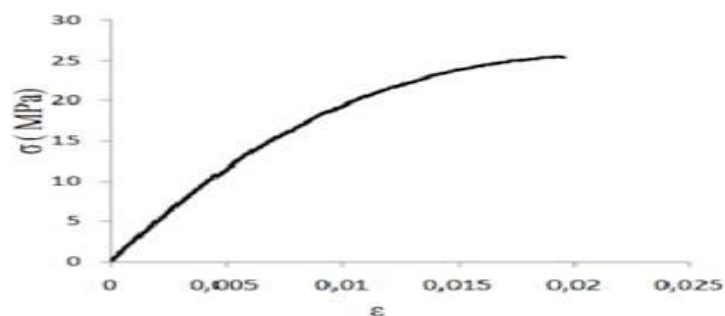


Figure III.5 : Courbe contrainte-déformation de l'adhésif ADEKIT A-140[48]

### III.5.3.Patch en FGM

Les FGMs de type métal/céramique deviennent de plus en plus importants en technologie moderne, ils sont utilisés afin de satisfaire à des exigences industrielles, parce qu'ils combinent entre les propriétés des métaux (la ductilité, la conductivité électrique et thermique élevée) et les propriétés de la céramique (la dureté élevée, la résistance à la corrosion et la température). En outre, la présence des fissures au sien du FGM constitue non seulement une discontinuité géométrique mais également une source de concentration de contraintes pouvant conduire à un endommagement du matériau à gradient de propriétés par rupture fragile ou ductile. Notre choix c'est porté sur un matériau FGM (Ti Titane / TiB Titane mono borde).Le patch en FGM est composée de deux matériaux ductile/fragile (Ti/TiB) leurs propriétés matériels sont définit dans le tableau III.3.

Propriété	Métal Ti	Céramique TiB
Module de Young E	107000 MPa	375000 MPa
Coefficient de Poisson $\nu$	0.34	0.14
Limite élastique $\sigma_Y$	450 MPa	-
Énergie de fracture $G_{Ic}$	24 KJ/m <sup>2</sup>	0.11 KJ/m <sup>2</sup>
Module d'érouissage H	10000 MPa	-
Rapport de transfert contrainte-déformation "q"	4500 MPa	

Tableau III.3 : Propriété matérielle [10].

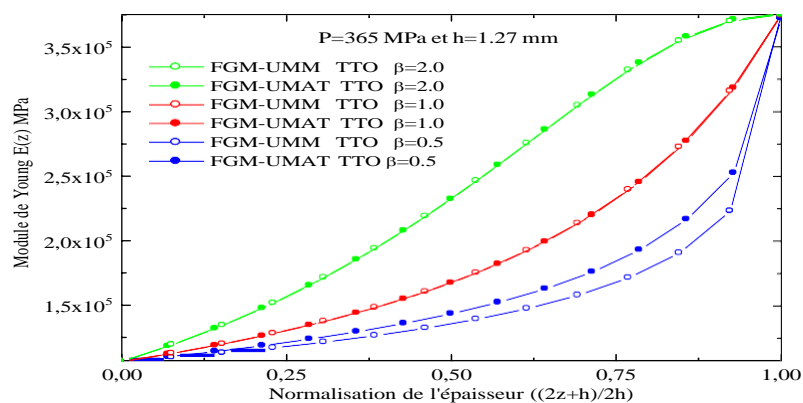


Figure III.6 : Variation de module de Young ( $z$ ) à travers l'épaisseur céramique-métal de FGM par le modèle de TTO [47] .

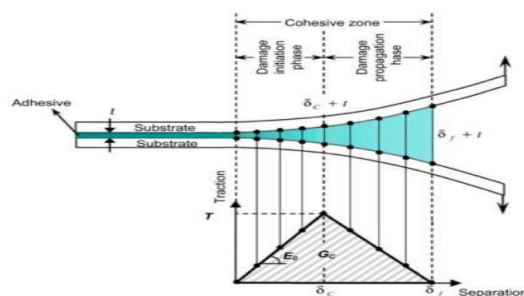
La figure III.5. Présente la gradation à travers l'épaisseur de module ( $z$ ) de FGM par le modèle de TTO comparé entre les deux technique UMM (Utilisation méthode de maillage) et UMAT.

### III.6. Modélisation numérique par éléments finis

Le modèle numérique tridimensionnel développé pour cette étude consiste en une plaque en aluminium Al 2024-T3 endommagée par fissuration et réparée par un patch en FGM de type céramique/métal. Un adhésif de type ADKEITA-140 est interposé entre la zone fissurée et le patch. La modélisation par éléments finis nécessite le maillage des assemblages patch/adhésif/plaque fissurée à analyser. Le choix du type et de la taille d'éléments à utiliser, notamment en pointe de fissure, dépendent des paramètres fondamentaux pour bien maîtriser les forts gradients de contraintes et de déformations au voisinage des fronts de fissuration. La première étape consiste à choisir le type d'élément le plus adapté au problème donné.

#### III.6.1. Les modèles de zone cohésive

Dans notre travail un type de modélisation est basé sur le principe de zone cohésive. Ces modèles de zone cohésive permettent de prendre en compte les phénomènes physiques intervenant entre les bords libres de la fissure, tels que le frottement, le cisaillement, la viscosité ou encore l'anisotropie. On peut alors décrire l'amorçage et la propagation des fissures, ainsi que l'évolution temporelle et l'évolution spatiale des fissures, tout en prenant en compte les phénomènes particuliers à l'interface. Les modèles de zone cohésive constituent des modèles de choix pour la prise en compte des effets physico-chimiques intervenant au sein du joint adhésif.



**Figure III.7 :** Loi de traction-séparation en fonction du déplacement pour un assemblage collé.

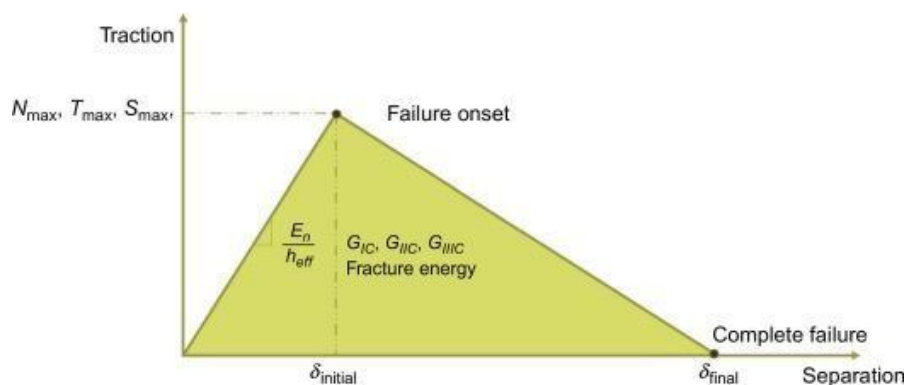
La figure 3 définit une réponse triangulaire de traction-séparation en mode mixte, et la zone sous la courbe est l'énergie de cohésion  $G_C$ , tandis que les indices  $c$  et  $f$  concernent les

Paramètres critiques et de rupture et les valeurs sont liées à  $i = I, II$  et  $III$  pour les modes purs de rupture.

L'avantage de modèle de zones cohésives permettent intermédiaires entre les critères initiation en termes des contraintes ou de taux de restitution d'énergie et la mécanique continue de l'endommagement. Les modèle de zones cohésives pouvoir modéliser le comportement d'un joint surfacique depuis son comportement linéaire, à l'amorçage et à la propagation de l'endommagement jusqu'à la rupture finale en une seule analyse.

Donc les éléments cohésifs sont contrôlés par une loi normalisée d'endommagements d'interface. Tel que le modèle de zones cohésives simule l'endommagement macroscopique le long des éléments cohésifs par l'application de la loi traction de séparation des nœuds (figure.III.2), donc la séparation totale des nœuds permet de simuler une dégradation des éléments.

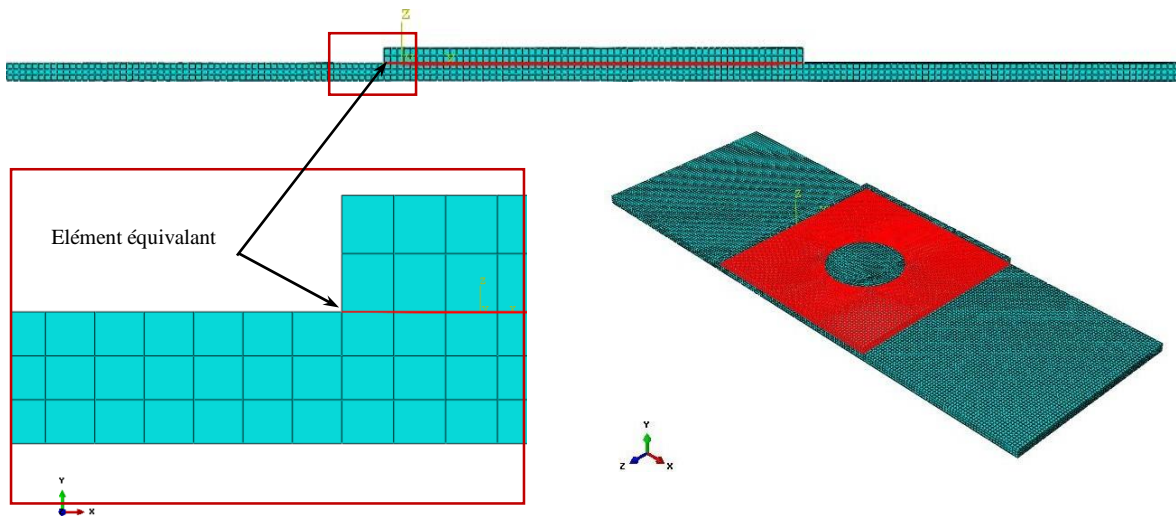
Un élément finis cohésifs de traction a une rigidité dans trois directions, la direction normale et deux directions de cisaillement. La rigidité est calculée à partir des données de matériau  $E, G_1, G_2$  et de l'épaisseur. L'épaisseur numérique de la couche n'a pas besoin d'être la même que l'épaisseur de la géométrie visuelle dans ABAQUS. Le moyen le plus simple d'obtenir la rigidité souhaitée est de choisir le paramètre par défaut pour l'épaisseur, ce qui lui donne l'épaisseur 1. Cela signifie que vous pouvez traiter  $E, G_1, G_2$  comme  $K_{nn}, K_{ss}, K_{tt}$ .



**Figure III.8:** Courbe de séparation de traction

Dans notre technique de maillage, on a créé une couche d'éléments solides qui sont commun aux faces des éléments sélectionnés d'un maillage existant, comme montré à la Figure.III.6. Cet outil est utile pour le maillage de partie de colle en forme de coque avec des éléments solides. L'avantage de notre technique de maillage qui permet les éléments sélectionnés peuvent provenir d'éléments solides avec une épaisseur nulle. Les éléments

cohésifs COH3D8 sont placés uniquement sur nœud communs définie une interface commun entre plaque et patch en FGM, vers lequel le découlement se propage comme montre la figure III.6. Dans notre technique de maillage avec le choix la réponse traction-séparation, l'épaisseur constitutive initiale des éléments cohésifs est supposée être nul est calculée sur la base des coordonnées nodales.



**Figure.III.9** : La représentation élément équivalent de l'adhésive dans une plaque réparé par patch en FGM.

On à modéliser un élément équivalent pour l'endommagement ductile à la rupture du surface d'assemblage. Un des problèmes majeurs de cette modèle est qu'il nous faut introduire une distance minimale entre la plaques et patch composite comme montré dans la figure (III.3), il faut donc minimiser cette distance afin de se rapprocher le plus possible du cas réel. En effet, les modèles actuellement employés reposent sur l'utilisation d'éléments finis cohésifs, on peut définir le critère d'initiation de l'endommagement par découlement adopté est de type traction séparation et est donné par la fonction quadratique des rapports entre la contrainte nominale et la contrainte maximale a été utilisée. Lorsque la somme atteint 1 qui signifie l'amorçage d'endommagement. Cette loi est appelée Quads est donné par :

$$\left(\frac{\sigma_n}{N}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{S}\right)^2 = 1$$

$\sigma_n, \sigma_t, \sigma_s$  sont respectivement les contraintes en traction dans la direction normale n et de cisaillement s et t et  $N, T, S$  sont leur valeurs critiques.



La loi d'évolution de l'endommagement décrit l'allure de la loi traction-séparation après initiation de l'endommagement. Avec une forme de l'évolution d'endommagement linéaire et déclenchement d'endommagement est entraîné par l'énergie. Les simulations étaient basées sur l'énergie et l'énergie de rupture,  $G_c$ , devait être donnée. L'énergie de rupture a été choisie car elle était supposée être obtenue à partir des essais expérimentaux.

La loi de puissance a été choisie dans les simulations pour identifier le mélange de modes. Les critères de la loi de puissance tiennent compte du fait que chaque direction a sa propre énergie de défaillance. Cette hypothèse a été faite que l'énergie de libération était égale dans toutes les directions. La façon dont les différentes directions dépendent les unes des autres peut être manipulée avec un facteur de puissance :

$$\left(\frac{G_n}{G_c}\right)^n + \left(\frac{G_t}{G_c}\right)^n + \left(\frac{G_s}{G_c}\right)^n = 1$$

Dans le cas le facteur de puissance égale 1 l'énergie de défaillance sera toujours la même indépendamment de la façon dont les modes de défaillance interagissent. Concerne la dégradation du matériau par rapport à d'autres paramètres dommageables que cohésifs. La dégradation maximale a été choisie dans les simulations. Les paramètres de cohésive introduite dans le code de calcul ABAQUS sont :

Material, name=Cohesive

- Elastic, type=TRACTION

13000, 8000., 8000.

- Damage Initiation, Criterion=QUADS

32, 24.1, 24.1

- Damage Evolution, Type=ENERGY, mixed mode behavior=POWER LAW,

Power=2.284

0.5, 2.41, 2.41

- Damage Stabilization

1e-05

Pour décollement en Mode mixte entre le métal et FGM. L'utilisation de la technique de maillage pour maille cohésive avec un mode simple de nul épaisseur a permis d'avantage d'avoir des solutions plus précises et plus stables tandis que les résultats des séparation l'éléments finis entre les substrat collé.

De plus, Nous allons maintenant détailler, la première étape de la démonstration de l'expression le comportement du métal est supposé élastoplastique avec écrouissage isotrope. La plaque est modélisée à l'aide du modèle de plasticité standard de Von Mises fourni par ABAQUS la loi de durcissement plastique de Os good est considérée.

### III .6.2.Implantation numérique de FGM

Pour la vérification de modeler analytique, la simulation numérique du même plat de FG a été effectuée en utilisant la méthode d'élément fini dans cette section.(C3D8R) les éléments évalués hexaèdres linéaires ont été employés dans le programme d'élément finis ABAQUS pour mettre en application une variation continue efficace des propriétés élastiques matérielles. Ce type d'élément est mis en application au moyen de propriétés directes de prélèvement aux points d'intégration (gauss) de l'élément. Le sous-programme USDFLD codée avec le Fortran ont été employés pour modeler du path du FGM avec les éléments pleins évalués dans le logiciel d'élément finis d'ABAQUS. Le module de Young (rigidité matérielle) et la densité du plat de FG comme propriété matérielle ont été définis en fonction de la longueur pour chaque point d'intégration dans toute la longueur (z) du patch. Le problème est alors modelé en utilisant la méthode d'élément finis employant l'élément plein évalué. Cet élément à la distribution respectivement dans l'espace évaluée de propriété (à différents points de gauss), qui est mis en application par les sous-programmes UMAT et USDFLD d'utilisateur pour l'analyse la plaque réparé.

Les propriétés de FGM sont varié continuellement dans leurs direction par rangé d'éléments suivant le modèle proposé dans ce travail qu'on a nommé modèle UMM et par coordonnée dans le modèle usuel de USDFLD et ce conformément à la loi de mélange [129], donnée par l'équation généralisée suivante:

$$P(z) = (P_m - P_c) \cdot V_m + P_c \quad (\text{III.1})$$

$P(z)$  : Représente les propriétés matérielle effective du FGM et  $V_m$  est la fraction volumique du métal dans les plaques de FGM est assurée par une loi de puissance suivant la direction de variation :

$$\text{Suivi l'épaisseur (z) : } V_m(z) = \left( \frac{z+h_{in}}{h_{ex}-h_{in}} \right)^n \quad (\text{III.2})$$

$$V_m = 1 - V_c \quad (\text{III.3})$$

Où  $n$  : exposant de la fraction volumique non négatif, les indices  $c$  et  $m$  représentent respectivement les phases céramique et métallique,  $h_{in}$  :le coordonnée verticale de la face inferieur, $h_{ex}$  :le coordonnée verticale de la face supérieure (figure II.2)

Lors de la déformation les grains de céramique dans les FGMs sont supposés avoir un comportement élastique, pour cette raison et pour un comportement élastique-plastique de FGM, notre analyse est basée sur l'utilisation du modèle de TTO.

Cette méthode d'homogénéisation traite le mélange de comportement élastique-plastique avec un écrouissage isotrope linéaire où les contraintes et déformation sont liées aux efforts constitutifs  $\sigma_m, \sigma_c$  et  $\varepsilon_m, \varepsilon_c$  par :

$$\sigma = \sigma_m V_m + \sigma_c V_c \quad (\text{III.4})$$

$$\varepsilon = \varepsilon_m V_m + \varepsilon_c V_c \quad (\text{III.5})$$

Le modèle TTO utilise  $q$  le paramètre de transfert de contrainte, également appelé rapport de transfert contrainte / déformation. La valeur de  $q$ , déterminée numériquement ou / et expérimentalement, dépend des propriétés des matériaux constitutifs ainsi que de l'interaction de microstructure dans le FGM :

$$q = [(\sigma_c - \sigma_m) / (\varepsilon_c - \varepsilon_m)] \quad (\text{III.6})$$

Dans le modèle de TTO les propriétés de FGM est basé principalement sur la partie plastique du constituant métallique déterminée par module d'élasticité  $E(r, z)$  de FGM, limite élastique  $\sigma_{Y_0}(r, z)$  et le module tangent  $H(r, z)$  qui sont décrits par les relations suivantes :

$$E(z) = \left[ \frac{q+E_c}{q+E_m} \cdot E_m V_m + E_c \cdot (1 - V_m) \right] / \left[ \frac{q+E_c}{q+E_m} \cdot V_m + (1 - V_m) \right] \quad (\text{III.7})$$

$$\sigma_{Y_0}(r, z) = \sigma_{Y_0m} \left[ \frac{q+E_m}{q+E_c} \frac{E_c}{E_m} \cdot (1 - V_m) + V_m \right] \quad (\text{III.8})$$

$$H(z) = \left[ \frac{q+E_c}{q+H_m} \cdot H_m V_m + E_c \cdot (1 - V_m) \right] / \left[ \frac{q+E_c}{q+H_m} \cdot V_m + (1 - V_m) \right] \quad (\text{III.9})$$

Où,  $\sigma_{Y_0m}$  limite d'élasticité du métal,  $H_m$  module tangent du métal, le coefficient de poisson  $\nu(z)$  de la plaque FGM peut être calculé en utilisant les expressions suivantes :

$$v(z) = v_m V_m + v_c V_c \quad (\text{III.10})$$

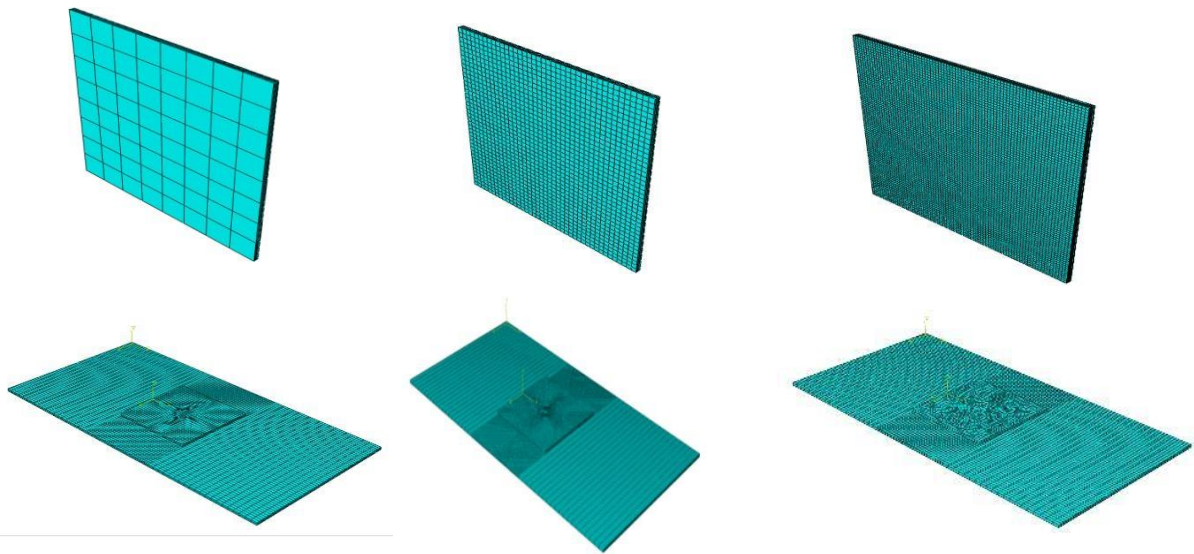
Ces formulations d'homogénéisation sont utilisées dans nos deux méthodes d'analyse (méthodes basées sur les USDFLD et la méthode UMM). Dans la première méthode, on a introduit un sous-programme USDFLD dans le code de calcul ABAQUS sous forme d'un algorithme numérique. Par contre, dans la deuxième méthode UMM, les propriétés de FGM sont introduites directement valeur par valeur après calcul, en utilisant la programmation MATLAB, et qui seront introduites par la suite dans la structure par rangé d'éléments isotrope orienté dans le sens de la variation matérielle. Ces rangés des éléments spéciaux sont parfaitement liés entre eux, ce qui donne l'avantage de distribuer les propriétés de la structure FGM suivant les différents sens présentés dans l'équation (II.1). Le comportement global de FGM pour les deux techniques USDFLD et UMM sont données suivant leur variation matérielle par des équations selon le sens de distribution.

### III.6.3. Choix de maillage et validation

La structure est modélisée par des éléments finis de solide à huit nœuds (élément C3D8R) pour la plaque d'aluminium 2024 T3 et même type d'élément pour le patch FGM. Aucune interaction n'a été introduite entre les surfaces de modèle.

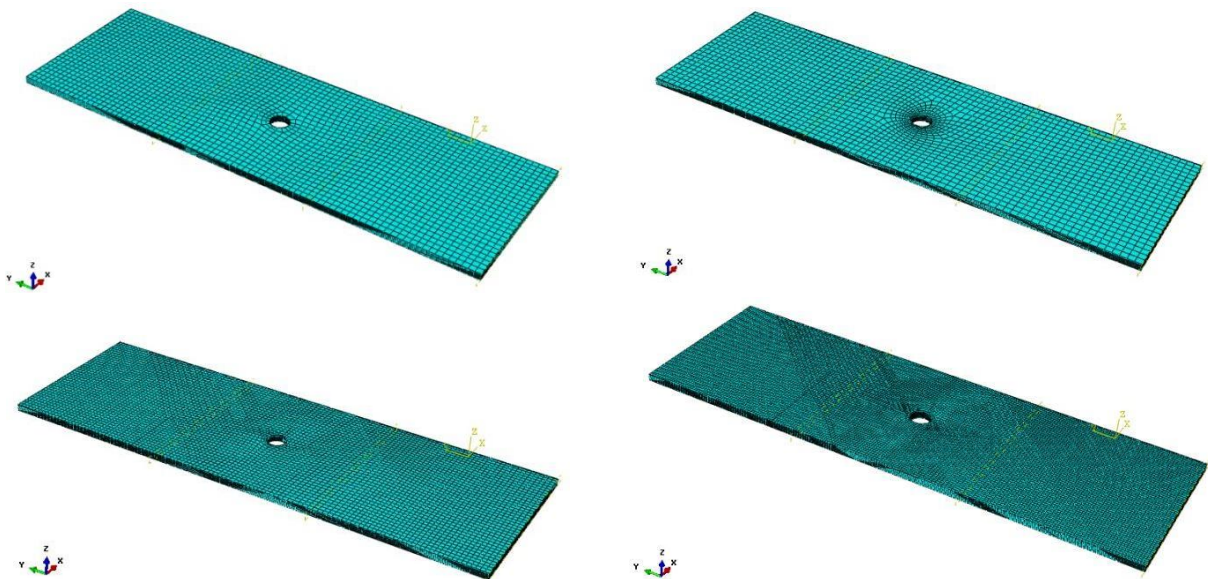
Donc, l'adhésif a été modélisé comme une interface (épaisseur nulle) avec des éléments typiques COH3D8 et un nombre qui dépasse 4273 éléments finis selon la forme de l'entaille. La décohésion a été simulée dans le modèle éléments finis en maintenant les mêmes nœuds sur les deux faces adjacentes de la zone de réparation aluminium/FGM (figure.III.6).

Afin de voir l'influence du nombre d'éléments sur la distribution des contraintes, on a fixé le type de maillage linéaire hexaédrique structural et on a essayé d'augmenter le nombre des éléments afin de raffiner la structure de plus en plus. Dans cette partie d'étude on a fixé le diamètre de l'entaille 5 mm et on a fait varier la densité des éléments finis.

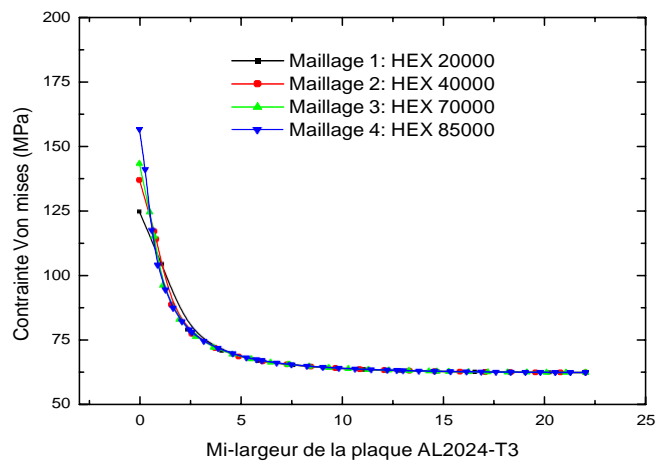


**Figure. III.10 :** Représentation la densité des éléments dans l'ensemble (plaque-adhésif-patch)  
a) patch. b) maillage du l'ensemble (plaque-adhésif-patch)

### III.6.3.1. Influence la densité des éléments d'une plaque entaille



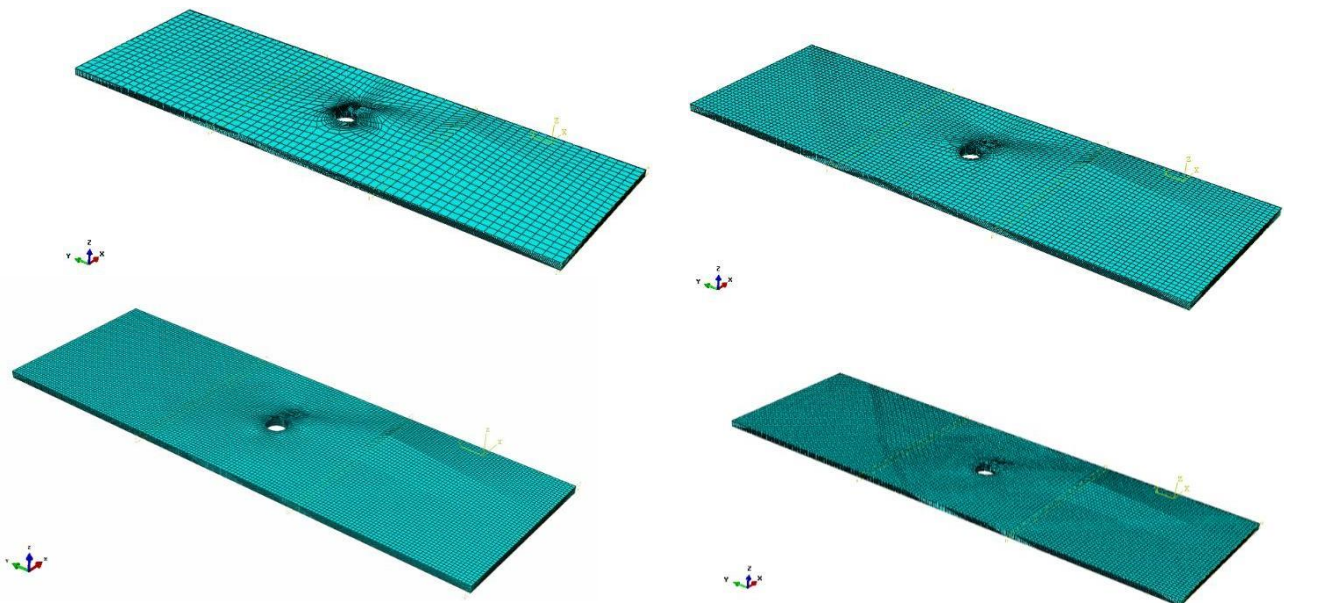
**Figure III.11 :** Représentation la densité des éléments fins de type HEX dans une plaque entaille en AL2024 T3. a) HEX 20000. b) HEX 40000 .c) HEX 70000 d) HEX 90000



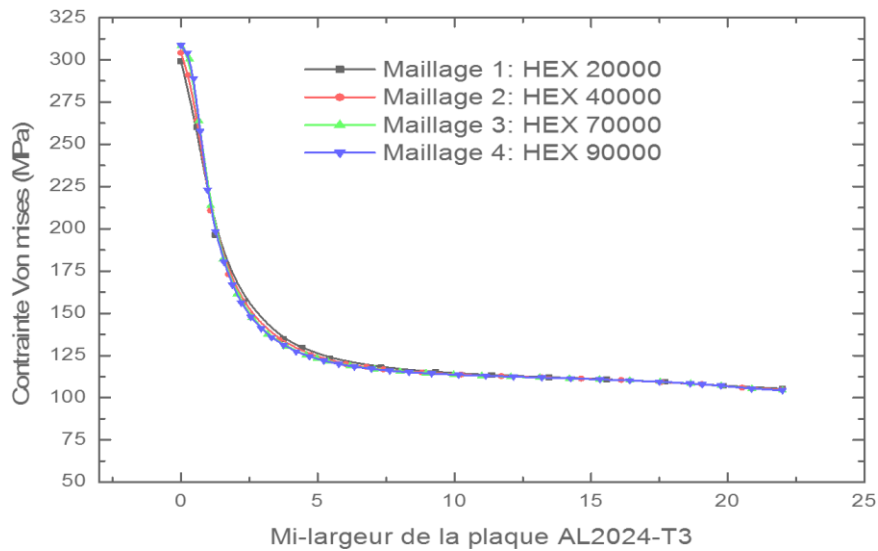
**Figure III.12 :** Variation des contraintes « Von mises » suivant la mi- largeur de la plaque entaille AL2024-T3 pour la différente densité de Maillages.

Les figures III.11 représente la distribution de la contrainte de Von Mises suivant la demi-largeur de la plaque trouée pour un type de maillage linéaire HEX, On remarque que la densité de maillage a une grande influence sur la valeur de la contrainte maximale dans la plaque. La valeur de la contrainte est différente au niveau de l'entaille et même loin de l'entaille.

### III.6.3.2. Influence la densité des éléments d'une plaque trouée et fissuré Phénomène Réflexion                      Contrainte Ven Misses



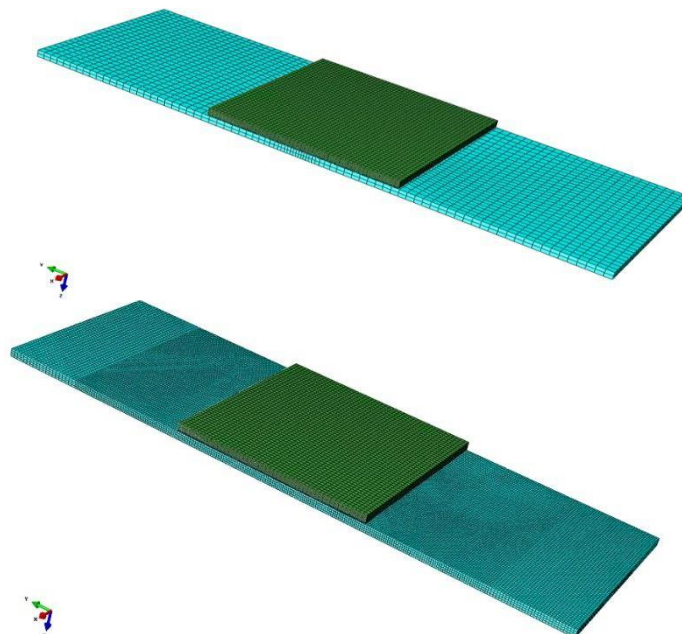
**Figure III.13 :** Représentation la densité des éléments finis de type HEX dans une plaque trouée et fissuré. a) HEX 20000. b) HEX 40000 .c) HEX 70000 d) HEX 90000

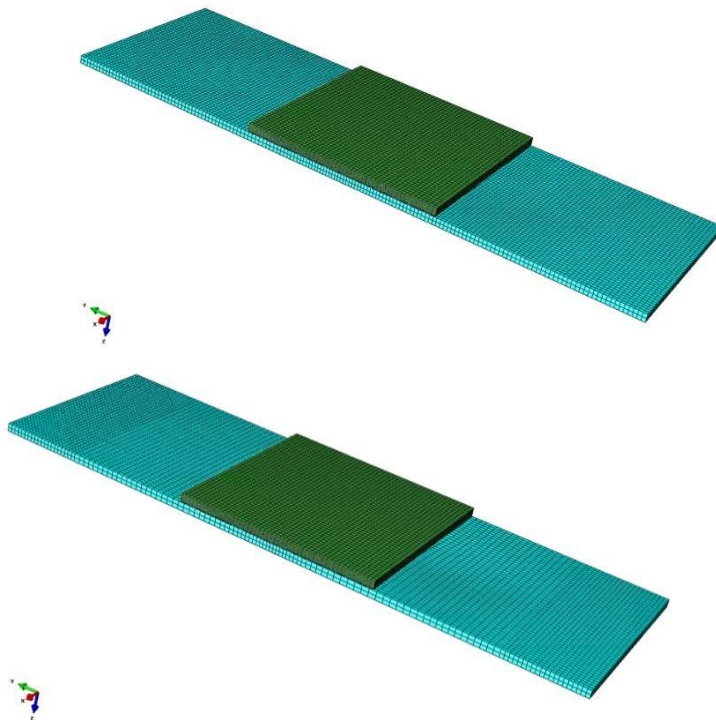


**Figure III.14 :** Variation des contraintes « Von mises » suivant la mi- largeur de la plaque entaille et fissure AL2024-T3 pour les différentes densités de Maillages.

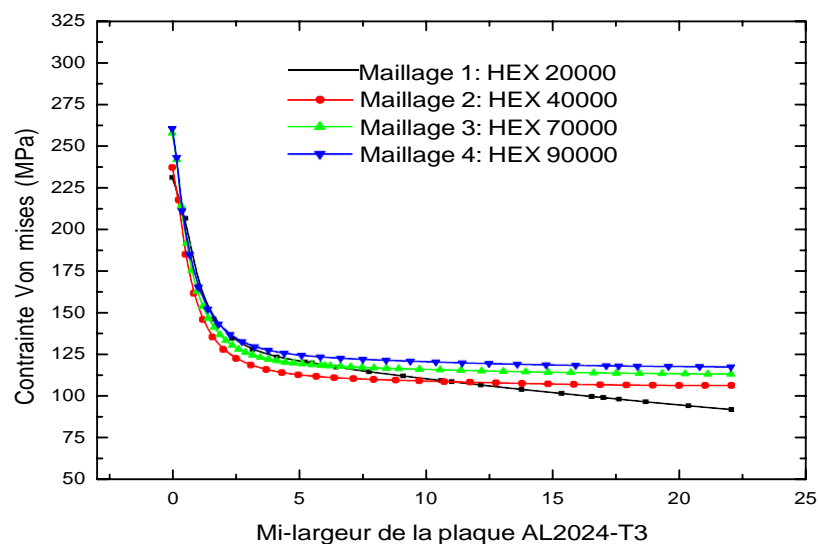
Les figures III.11 représente la distribution de la contrainte de Von Mises suivant la demi-largeur de la plaque trouée fissure pour un type de maillage linéaire HEX, On remarque que l'augmentation du nombre d'élément finis dans la structure donne une structure plus raffiné surtout à niveau des points sensible à savoir l'entaille. Donc la densité de maillage a une grande influence sur la valeur de la contrainte de Von Mises dans la plaque endommagée.

### III.6.3.3. Influence la densité des éléments d'une plaque trouée et fissuré réparé par collage d'un patch en FGM.





**Figure III.15 :** Représentation la densité des éléments finis de type HEX dans une d'une plaque trouée et fissurée réparé par collage d'un patch en FGM. a) HEX 20000. b) HEX 40000 .c) HEX 70000 d) HEX 90000



**Figure III.16 :** Variation des contraintes Von mises suivant la mi- largeur d'une plaque trouée et fissurée réparée par collage d'un patch en FGM.



**III.7.Conclusion :**

Avec la naissance d'un nouveau matériau composite FGM et son utilisation, ce chapitre dédié à présenter l'optimisation des paramètres géométriques et convergence .nous avons défini la méthode des éléments finis, le maillage, leurs propriétés, condition au limites et de frontières. Nous avons présenté du logiciel de calcul utilise ABAQUS, la description géométrique de model avec une présentation des matériaux utilises.

# **Chapitre IV**

## **Résultats et analyse**

**IV.1.Introduction :**

Pendant leur durée de service, généralement les structures aéronautiques sont exposées à des sollicitations mécaniques diverses. En présence d'une discontinuité géométrique telle que fissure ou entaille, ces chargements mécaniques peuvent provoquer une forte concentration de contrainte qui peut dans la plupart des cas entraîner la rupture totale de la structure. Actuellement, on assiste à un développement spectaculaire, avec l'utilisation des matériaux FGM, dans la réparation des défauts géométriques afin d'assurer une longue durée de vie en service des structures endommagées. Cette technique consiste à appliquer un FGM sur la zone I endommagée à travers un adhésif convenable. La distribution des propriétés matérielles suivant une direction de ce patch FGM est d'une importance considérable dans la réduction des contraintes.

Dans ce travail, est présentée une analyse numérique de l'effet de la réparation d'une plaque en aluminium 2024-T3 contient une fissure émanant d'une entaille par un patch en FGM de type céramique/métal collé à travers un adhésif de type A140 sur la réponse globale de la structure soumise à un chargement de traction. Cette modélisation est effectuée avec les codes de calcul ABAQUS. Une description générale du modèle géométrique et du maillage de l'assemblage étudié est présentée avec les différentes conditions aux limites et de chargement sont détaillées en soulignant la prise en compte de toutes les surfaces de contact liées à la spécificité de l'assemblage collé. Afin de déterminer l'intégrale J de la plaque AL2024T3 endommagée réparée par patch collée en FGM.

Pour la plaque sans réparation on s'est contenté sur la détermination de la valeur de la contrainte normale maximale, cependant pour la plaque réparée, en plus de la contrainte normale dans la plaque, on a déterminé la contrainte de cisaillement dans la couche adhésive et la contrainte de pelage dans le patch composite.

Après l'étude de sensibilité de maillage on a fixé le type et le nombre d'éléments par structure pour déterminer la variation de l'intégrale J et les contraintes dans la plaque endommagée et réparée par patch en FGM. Analyse de l'effet de la longueur de la fissure sur la structure en aluminium 2024-T3 renforcée par patch FGM. En utilisant un sous-programme USDFLD pour introduire les propriétés effectives du FGM implanté dans ABAQUS. Les variables scalaires de module Young sont définies en fonction d'une variable de champ (SDV1) programmée dans le sous-programme USDFLD.

## IV .2.Evaluation du facteur d'intensité de contrainte

La mécanique de la rupture par fissuration suppose l'existence des fissures initiales créées lors de l'élaboration du matériau, ou lors de la mise en forme ; en pointe de ces fissures, la méthode des éléments finis utilise des éléments dans lesquels les fonctions de formes sont compatibles avec la singularité du champ de déplacement. Après la modélisation de la singularité au front de fissure, et la formulation de la méthode des éléments finis en déplacement nodaux, le facteur d'intensité de contrainte a été évalué à partir de la méthode de l'intégrale J

### IV.2.1.Méthode de l'intégrale J

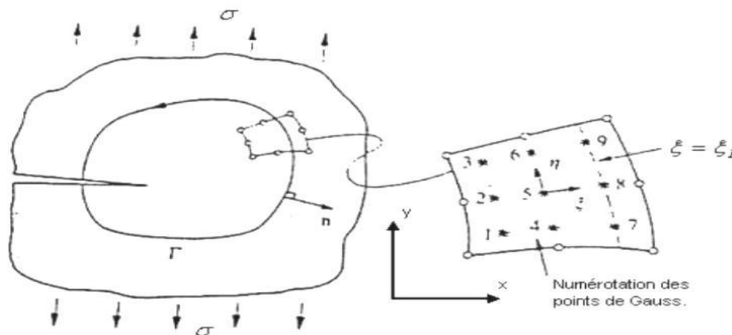
Cette méthode est considérée comme une approche d'évaluation directe de l'énergie libérée, elle ne nécessite qu'un seul calcul. Cette forme intégrale connue sous le nom de l'intégrale  $J$  se présente sous la forme suivante :

$$J = \int_{\Gamma} W dy - T_i^d \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \quad (\text{IV.1})$$

Elle peut être exprimée en fonction du facteur d'intensité de contraintes par la relation suivante :

$$J = \frac{(K+1)}{8\mu} K_I^2 \quad (\text{IV.2})$$

Pour calculer cette intégrale, considérons  $\Gamma$ , reliant les points de Gauss de coordonnées locales  $\xi = \xi_p$  des éléments entourant la pointe de fissure, figure II.4.



**Figure IV.1. Chemin de contour  $\Gamma$  pour l'évaluation de l'intégrale J [49]**

Pour évaluer numériquement l'intégrale  $J$ , chaque terme de l'équation IV.6 doit être décomposé de la manière suivante :

Soit :

$$ds = \sqrt{dx^2 + dy^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \xi}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \eta}\right)^2} d\eta \quad (\text{IV.3})$$

$$dy = \frac{\partial y}{\partial \eta} d\eta \quad (\text{IV.4})$$

Pour un problème plan l'énergie de déformation est donnée par :

$$W = \frac{1}{2} (\sigma_x \varepsilon_x + 2r_{xy} \gamma_{xy} + \sigma_y \varepsilon_y) \quad (\text{IV.5})$$

De même vecteur des forces de traction est donné par :

$$T = \begin{bmatrix} \sigma_x n_1 + \tau_{xy} n_2 \\ \tau_{xy} n_1 + \sigma_y n_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.6})$$

Alors :

$$T \frac{\partial u}{\partial x} = [(\sigma_x n_1 + r_{xy} n_2) \frac{\partial u}{\partial x} + (r_{xy} n_1 + \sigma_y n_2) \frac{\partial v}{\partial x}] \quad (\text{IV.7})$$

Finalement en substituant les équations VI.8, VI.9, et VI.10 dans l'équation IV.6 on obtient :

$$J = \int_{-1}^{+1} \left\{ \frac{1}{2} \left[ \sigma_x \frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{xy} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \sigma_y \frac{\partial v}{\partial y} \right] - \left[ (\sigma_x n_1 + \tau_{xy} n_2) \frac{\partial u}{\partial x} + (\tau_{xy} n_1 + \sigma_y n_2) \frac{\partial v}{\partial x} \right] \sqrt{\frac{\partial x^2}{\partial \eta^2} + \frac{\partial y^2}{\partial \eta^2}} \right\} d\eta = \int_{-1}^{+1} I d\eta \quad (\text{IV.8})$$

Après intégration numérique par la méthode de Gauss, cette intégrale se transforme en une somme donnée par :

$$J = \sum_{q=1}^n I(\xi_p, \eta_p) W_q \quad (\text{IV.9})$$

où :

n : est le nombre de degrés de liberté.

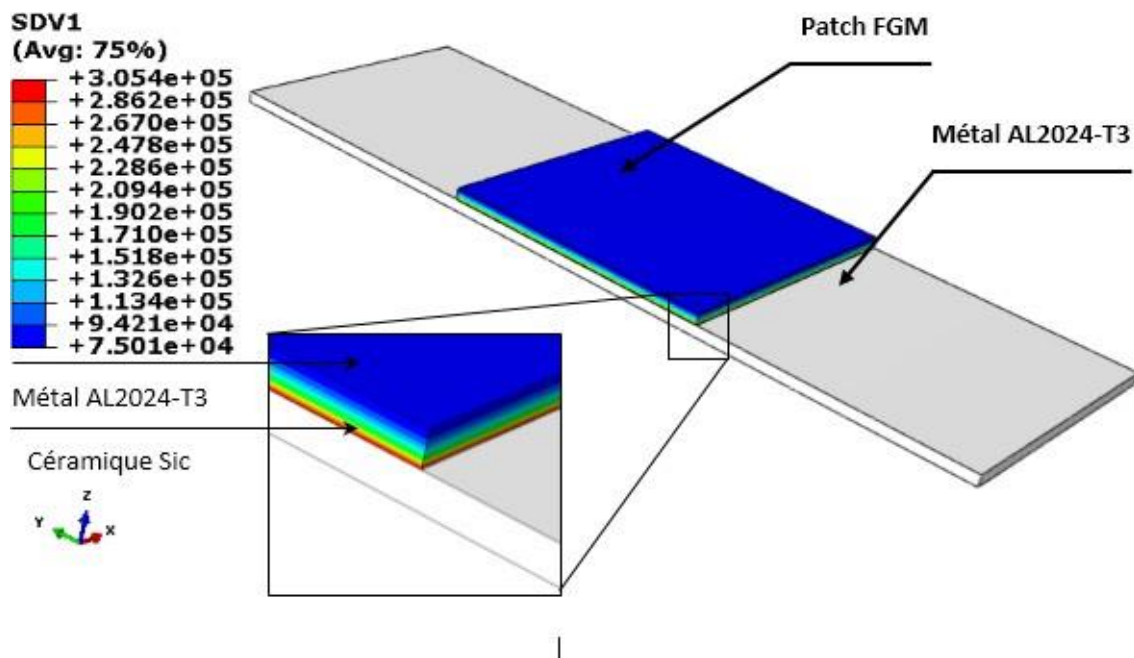
$W_q$  : Points de Gauss.

Après avoir déterminé l'intégrale numériquement, on calcule la valeur du facteur d'intensité de contraintes à partir de l'équation VI.7 on aura :

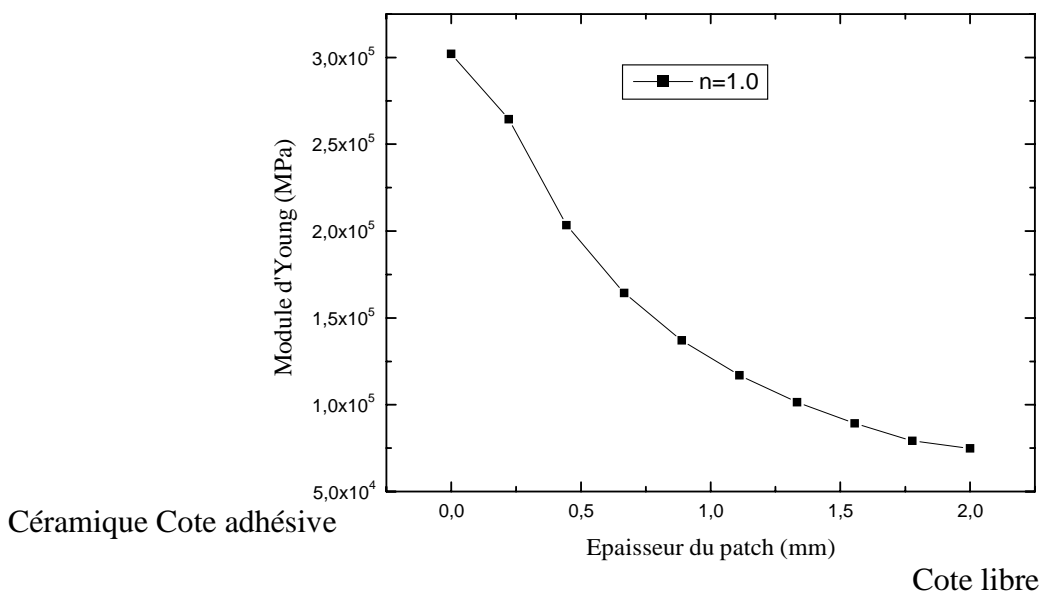
$$K_I = \left( \frac{8\mu J}{1+K} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{VI.10})$$

### IV.3. Les conception de gradation du patch FGM

Pour notre étude, le patch en FGM est composée de deux matériaux ductile/fragile (AL2024-T3/ SiC) leurs propriétés matériels ont été définis dans le troisième chapitre. Dans la représentation du modèle d'élément finis (Figure IV.2), les zones riches en céramique SiC sont rouges et les zones riches en métal AL2024-T3 sont en couleur bleue.



a) FGM -1



**Figure IV.2 :** a) Conception de variation de module de Young, b) Variation de module de Young (z) à travers l'épaisseur du patch FGM-1 (céramique-métal) pour n=1.0

On remarque clairement que le module d'Young du patch composite varie exponentiellement suivant son épaisseur.

#### IV.4.Résultats :

Après l'étude de sensibilité d'éléments de maillage, on a fixé le type et le nombre d'éléments pour la structure afin de déterminer la variation de l'intégrale J et les contraintes dans la plaque endommagée et réparée par patch en FGM. L'effet de la longueur de la fissure sur le comportement de la structure en aluminium 2024-T3 renforcé par patch FGM a été analysé en utilisant une nouvelle technique de couplage entre la méthode Intégrale J avec la technique CZM dans la méthode USDFLD.

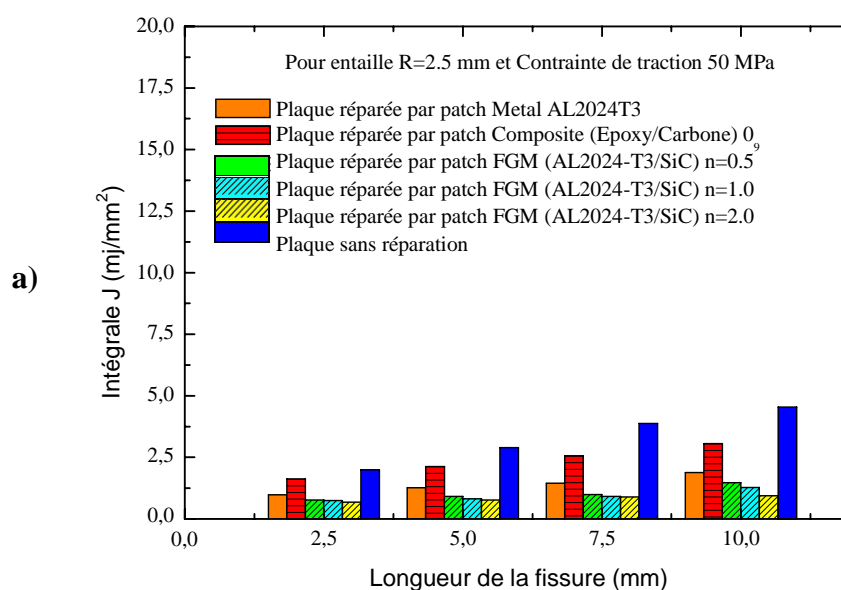
On a entamé à partir des résultats d'analyse numérique les courbes de la variation de l'intégrale et les contraintes dans la plaque endommagée et réparée par patch. Le patch FGM en été proposé avec deux conceptions de gradation proposées. Dans ce chapitre nous avons présenté l'évaluation de l'intégrale J ; les conceptions de gradation du patch FGM et ces résultats et la variation des contraintes de Von Mises dans le patch.

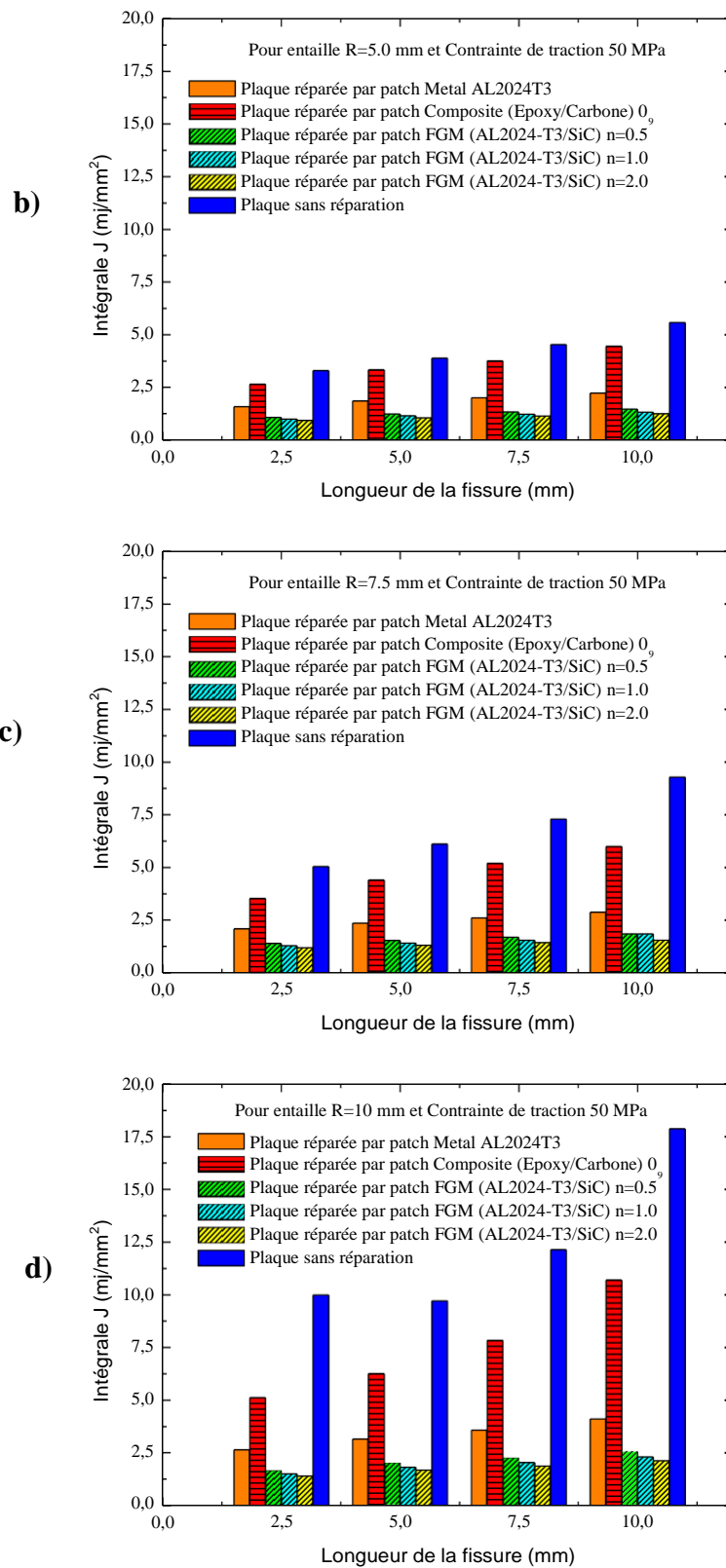
#### IV .4.1. Analyse de la variation de l'intégrale-J dans la plaque :

Pour notre premier cas, on a essayé de voir l'effet du diamètre de l'entaille dans la plaque sur la valeur de l'intégrale-J pour différentes longueurs de la fissure. En tenant compte de la nature du patch, on a considéré une réparation par patch métallique, patch composite et un patch en FGM tout en considérant une conception de gradation du céramique vers le métal (FGM-1) suivant l'épaisseur avec un contact du patch avec la colle sur la face en aluminium alors que la cote céramique est vers l'extérieur.

Les résultats de la variation de l'intégrale-J est présentés dans la figure. VI.3 en fonction de la longueur de la fissure pour différente nature du patch de réparation.

- Pour une Conception de gradation du patch céramique vers le métal suivant l'épaisseur FGM-1





**Figure IV.3 :** Variation de l'intégrale-J en fonction de la longueur de la fissure dans la plaque endommagée et réparée par patch **FGM-1** pour l'entaille avec a) R=2.5 b) R=5.0 mm, c)R=7.5 mm et d) R=10 mm

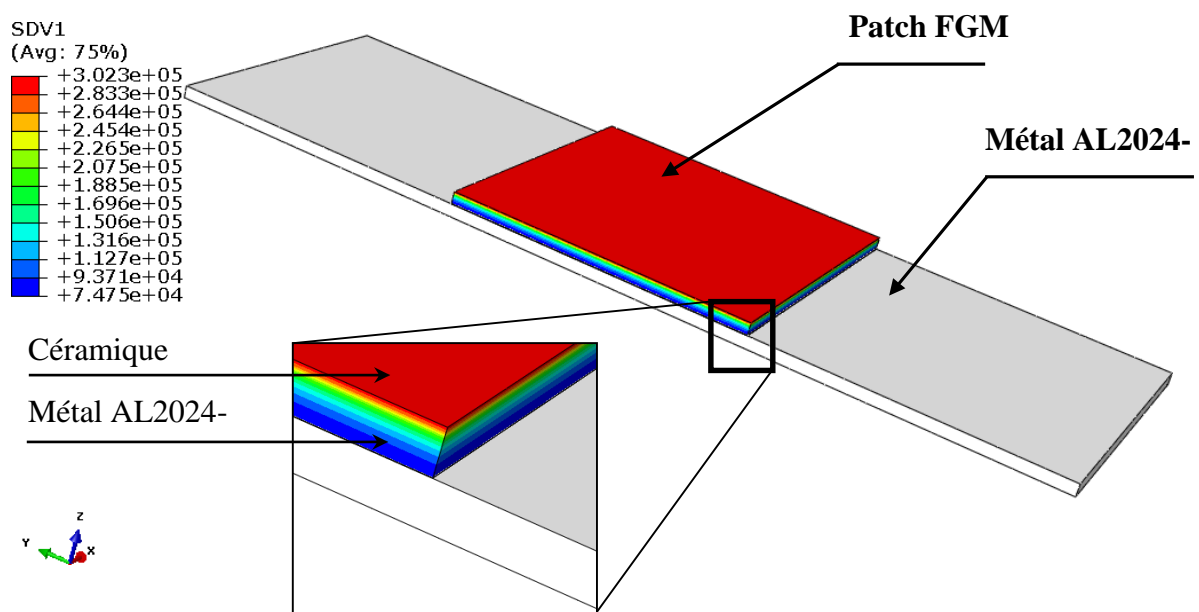


La figure. **IV.3** montrent la présence de l'entaille a pour but d'augmenter la concentration de contrainte. Quatre différentes dimensions du rayon de l'entaille ont été mis en considération à savoir 2.5mm, 5mm 7.5mm et 10mm.

La valeur de l'intégrale-J augmente avec l'augmentation de la longueur de la fissure et le diamètre de l'entaille. La valeur de l'intégrale-J est maximale pour une plaque en présence d'un diamètre important d'entaille et une longueur de fissure importante.

La présence du patch composite réduit considérablement la valeur de l'intégrale-J et ce quel que soit sa nature. La plaque réparée par patch FGM présente les plus faibles valeurs de l'intégrale-J essentiellement si ce patch est riche en céramique avec un coefficient de gradation  $n=2$ .

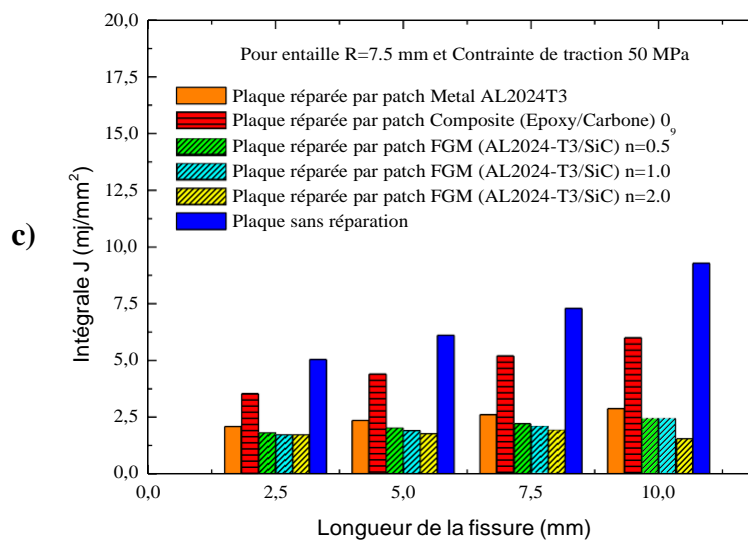
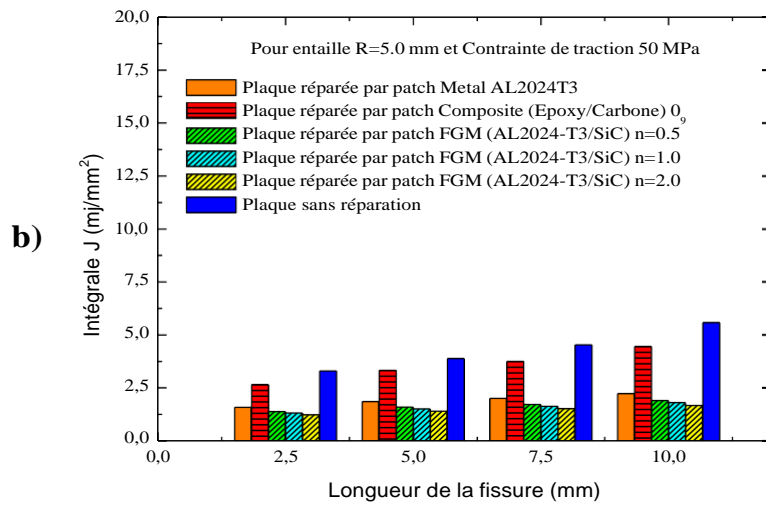
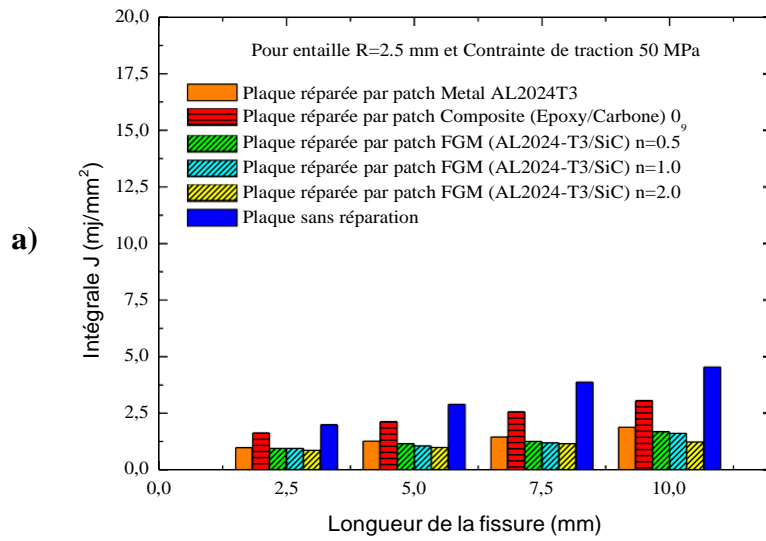
- **Pour** une Conception de gradation du patch métal vers la céramique suivant l'épaisseur FGM-2. le contact du patch avec la colle est sur la face céramique alors que la face riche en aluminium est à l'extérieur (figure. **VI.4**).

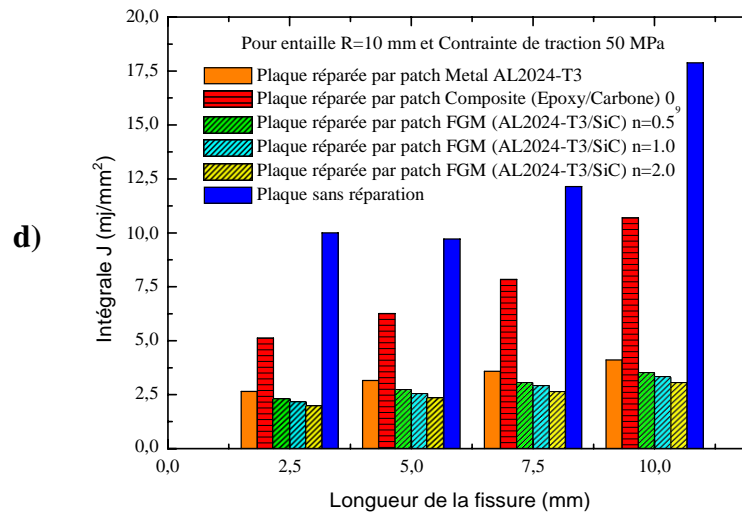


**Figure IV.4** : a) Conception de variation de module de Young, b) Variation de module de Young ( $z$ ) à travers l'épaisseur du patch FGM-2 (céramique-métal) pour  $n=1.0$

On remarque clairement que le module d'Young du patch composite varie contrairement que pour le premier cas de conception et suivant son épaisseur.

La variation de la valeur de l'intégrale-J pour les différents diamètres de l'entaille en fonction de la longueur de la fissure et la nature du patch est présentée dans la figure. .5.





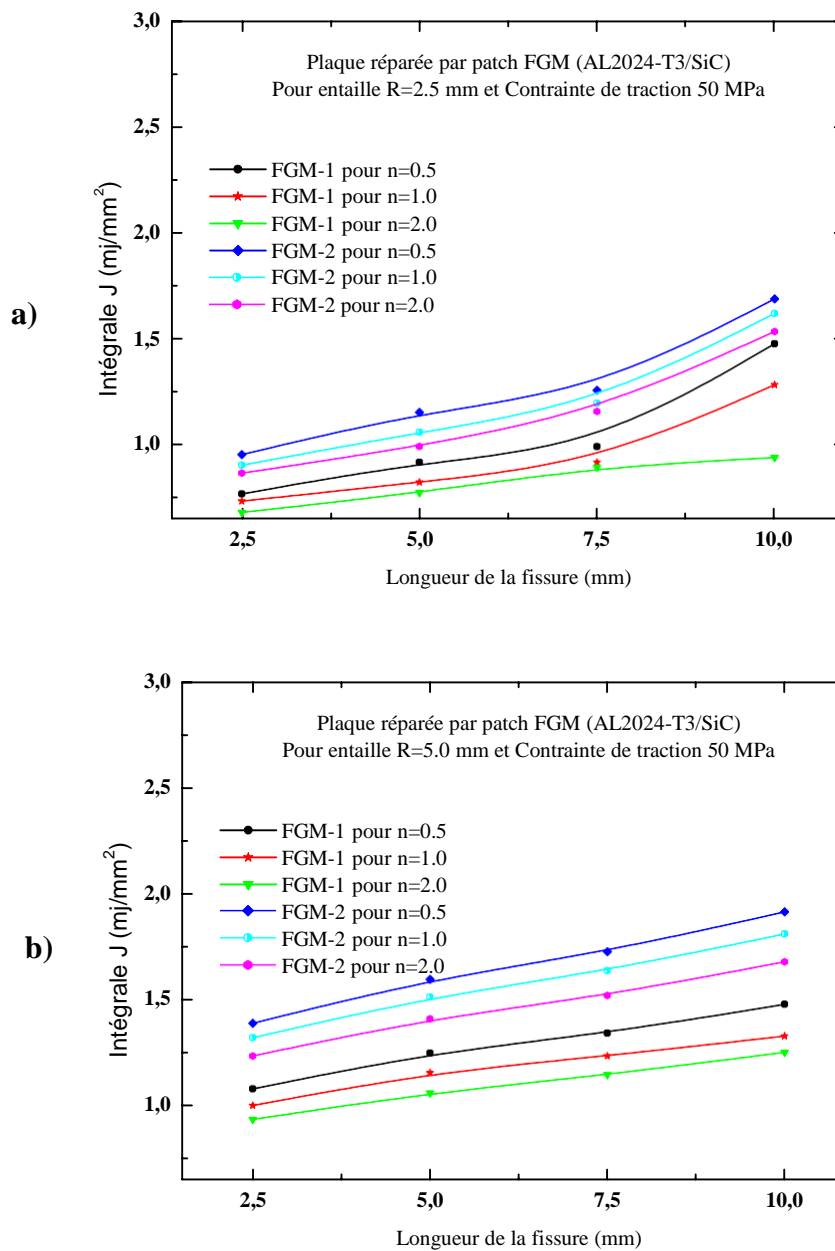
**Figure IV.5** Variation de l'intégrale-J en fonction de la longueur de la fissure dans la plaque endommagée et réparée par patch **FGM-2** pour différents diamètres de l'entaille avec a) R=2.5 b)R=5.0 mm, c)R=7.5 mm et d) R=10mm

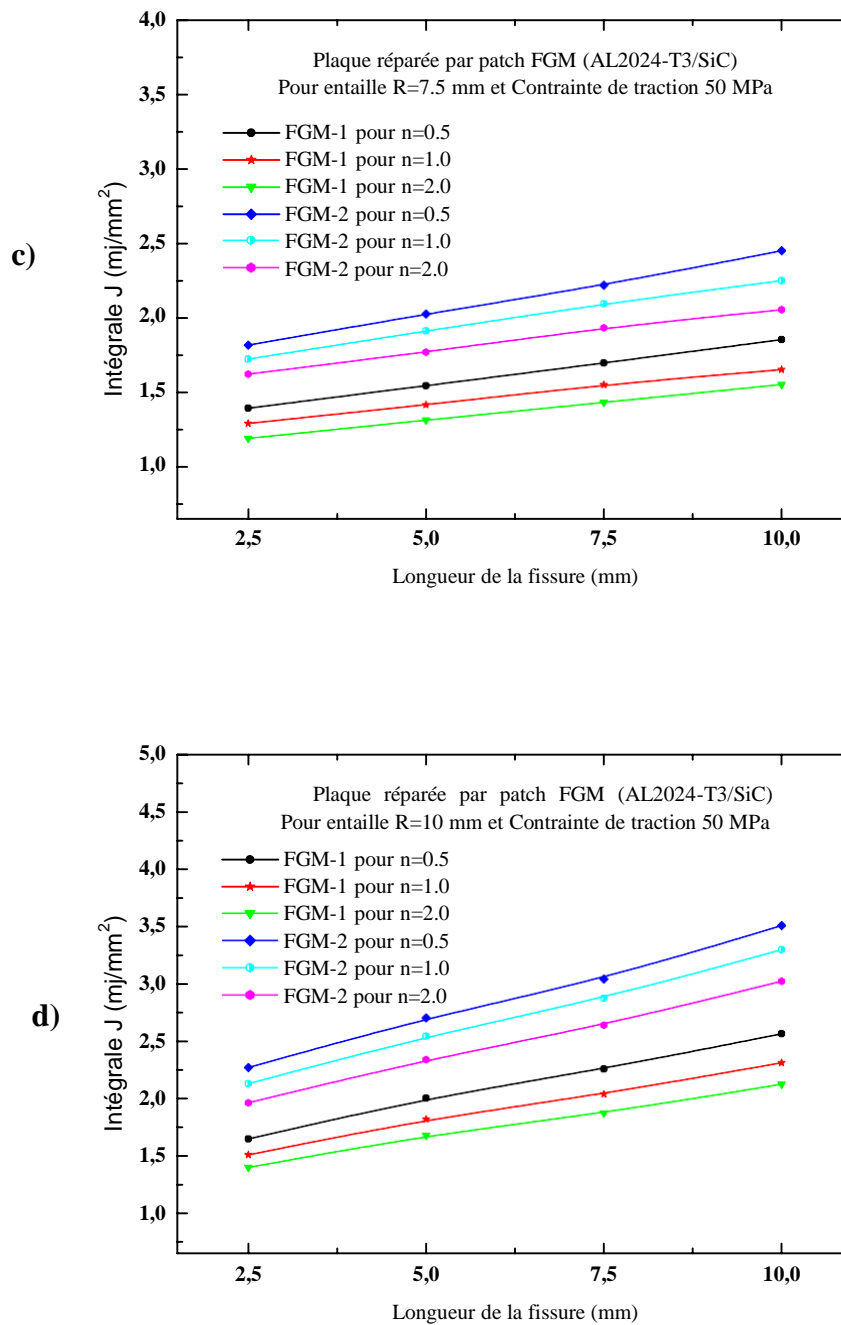
D'après la figure. IV.5, On remarque clairement le même comportement que pour le premier cas de conception de FGM. La valeur de l'intégrale-J augmente considérablement si l'entaille est maximale avec une longueur maximale de la fissure. Pour ce cas la largeur de la plaque devient minimum et la rupture de la structure est rapide. La réparation par patch composite est essentielle pour réduire les contraintes dans la plaque en aluminium. Le patch FGM-2 présente les plus faibles valeurs de l'intégrale-J que pour le cas d'une réparation par composite et aluminium.

#### IV.4.2.Comparaison entre les deux configurations FGM-1 et FGM-2 :

D'après les résultats de la variation de l'intégrale-J présentées ci-dessus. On a remarqué que la stabilité quelque soit la conception du patch FGM que ce soit le contact avec l'adhésive en céramique ou en métal. La valeur de l'intégrale-J est la plaque faible comparée à celle du cas où la réparation est par patch métallique ou en composite.

La comparaison des valeurs de l'intégrale-J pour les deux conceptions du patch FGM en fonction du diamètre de l'entaille et la longueur de la fissure est présentée dans la figure. IV.6





**Figure IV.6** Comparaison la variation de l'intégrale-J en fonction de la longueur de la fissure dans la plaque endommagée et réparée par deux configurations du patch FGM-1 et FGM-2 pour différent diamètre de l'entaille avec a) R=2.5 b) R=5.0 mm, c) R=7.5 mm et d) R=10 mm

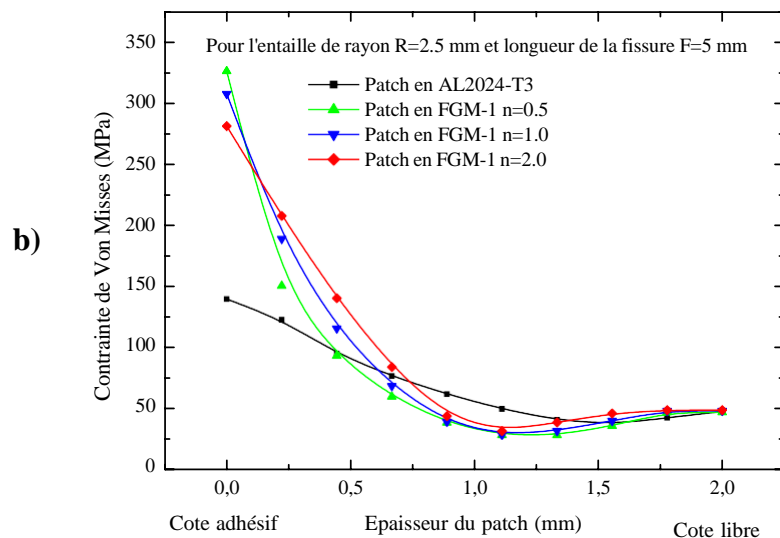
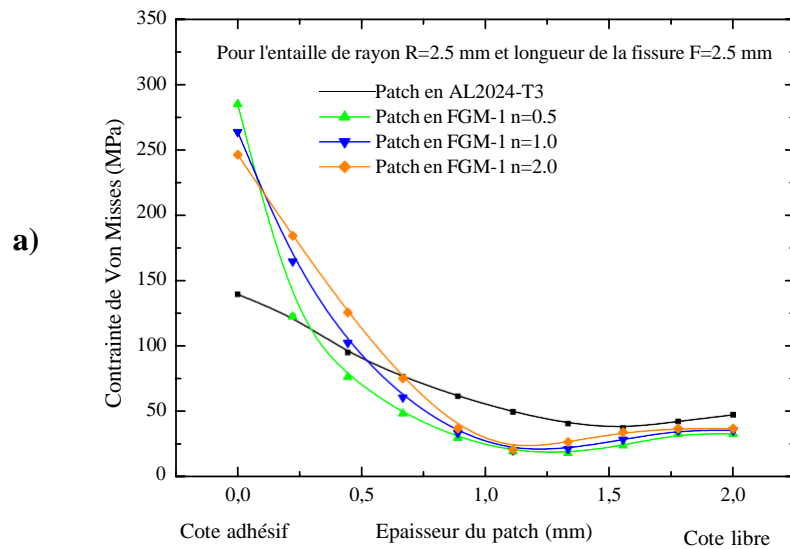
On remarque dans la figure IV.6 clairement que si la face qui est en contact avec l'adhésif est en aluminium et que le patch est riche en céramique avec un exposant de gradation égale à  $n=2$ , la valeur de l'intégrale-J est minimale et que la plaque présente une bonne résistance comparée aux autre cas de conception du patch. Cependant si la face de contact avec

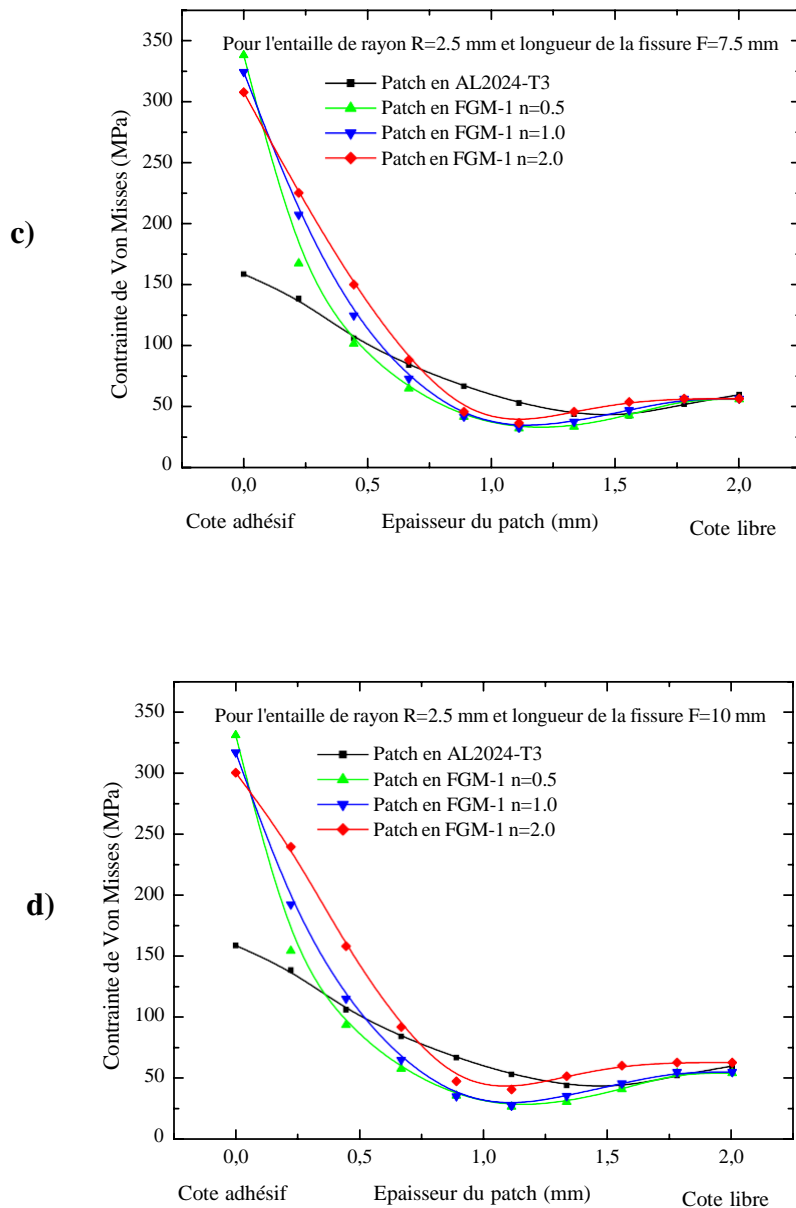
l'adhésif est en céramique, le patch présente toujours un bon transfert de charge mais la valeur de l'intégrale-J est un peu plus élevée que pour le cas où la face de contact est en aluminium.

#### IV .4.3.Variation des contraintes de Von Misses dans le patch

L'analyse de la distribution des contraintes est essentielle dans la couche du patch, la plus importante est la contrainte maximale suivi la traction. Les figures IV.7-IV.10 présentes Variation de la contrainte de Von Messes  $\sigma_{VM}$  en fonction de l'épaisseur du patch pour longueurs de fissure pour différentes valeur de l'exposant de gradation.

##### ➤ Cas de l'entaille R=2.5 mm





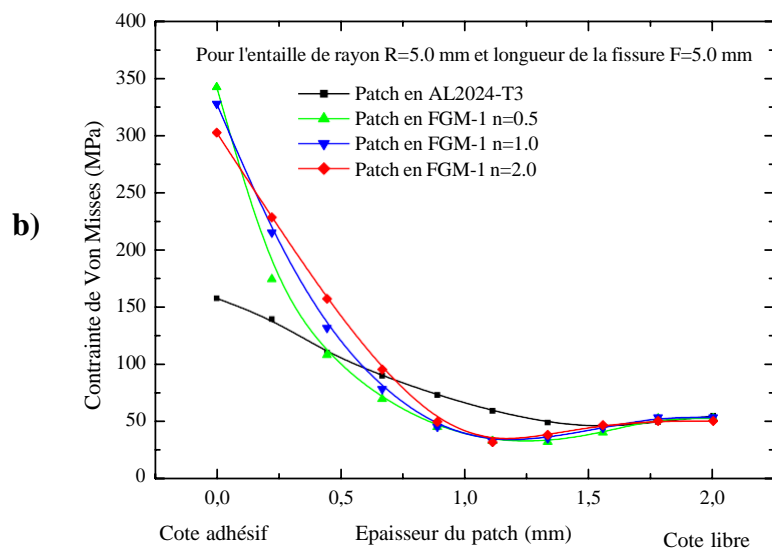
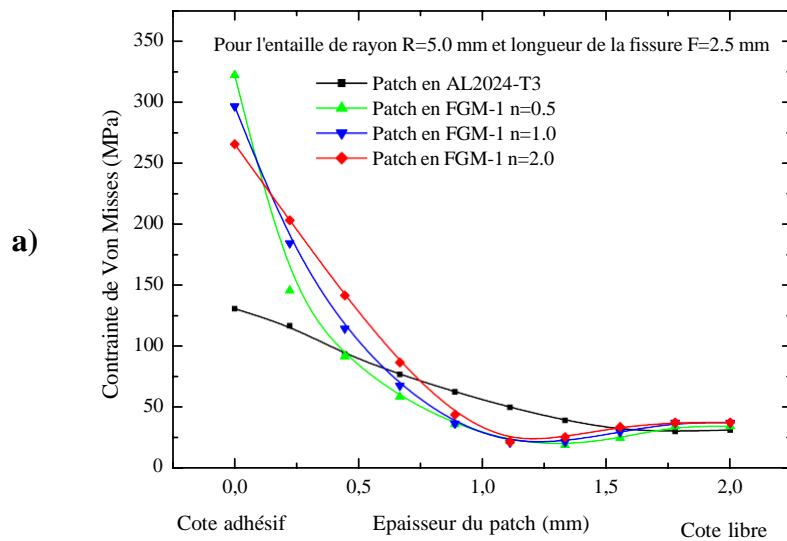
**Figure IV.7 :** Variation de la contrainte de Von Messes  $\sigma_{VM}$  en fonction de l'épaisseur du patch pour différentes longueurs de fissure avec a) F=2.5 b) F=5.0 mm, c) F=7.5 mm et d) F=10 mm (rayon d'entaille R=2.5).

La variation de la contrainte de Von Mises suivant l'épaisseur du patch montre clairement l'efficacité du patch à transférer les contraintes de la zone endommagée. On remarque clairement que le patch FGM présente les plus grandes valeurs de la contrainte de

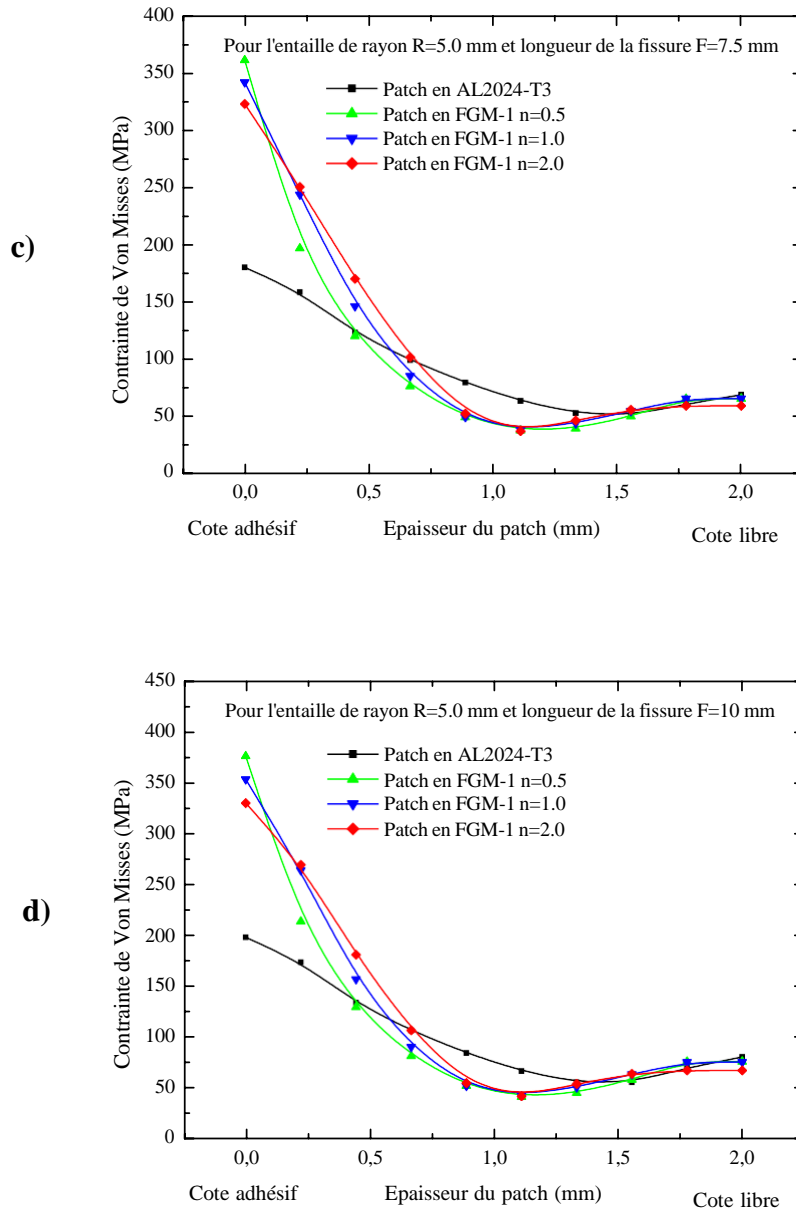
Von mises. Contrairement au patch métallique ou les valeurs sont faibles ce qui montre un faible transfert de charge.

La valeur de la contrainte de Von mises varie avec la variation du coefficient de gradation. La contrainte de Von mises présente une variation non symétrique suivant l'épaisseur du patch composite. La cote en contact avec l'adhésive présente les plus grandes valeurs.

➤ **Cas de l'entaille R=5.0 mm**

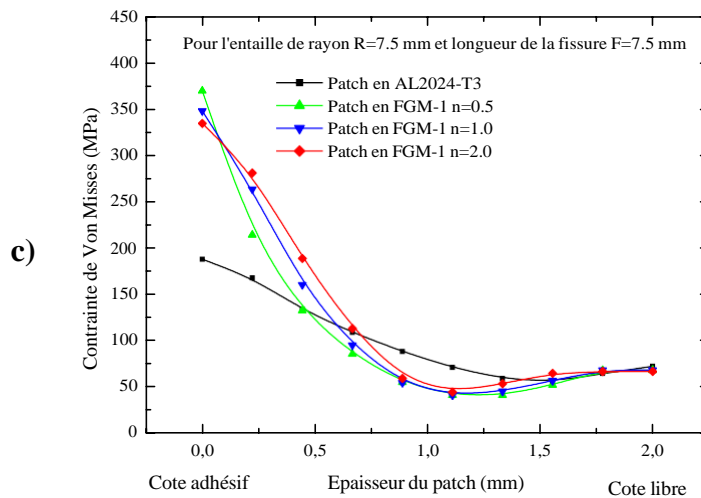
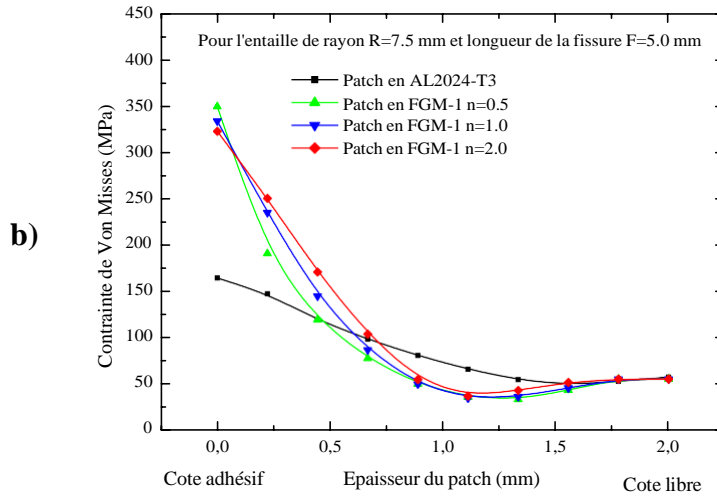
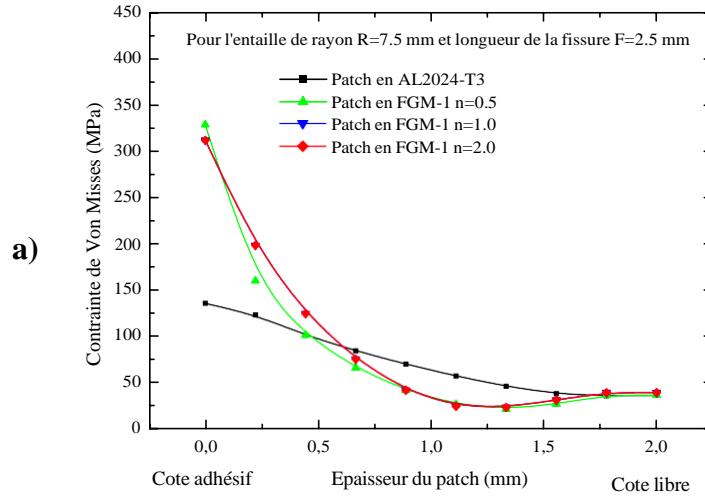






**Figure IV.8 :** Variation de la contrainte de Von Messes  $\sigma_{VM}$  en fonction de l'épaisseur du patch pour différentes longueurs de fissure avec a) F=2.5 b) F=5.0 mm, c) F=7.5 mm et d) F=10 mm (rayon d'entaille R=5).

➤ Cas de l'entaille R=7.5 mm



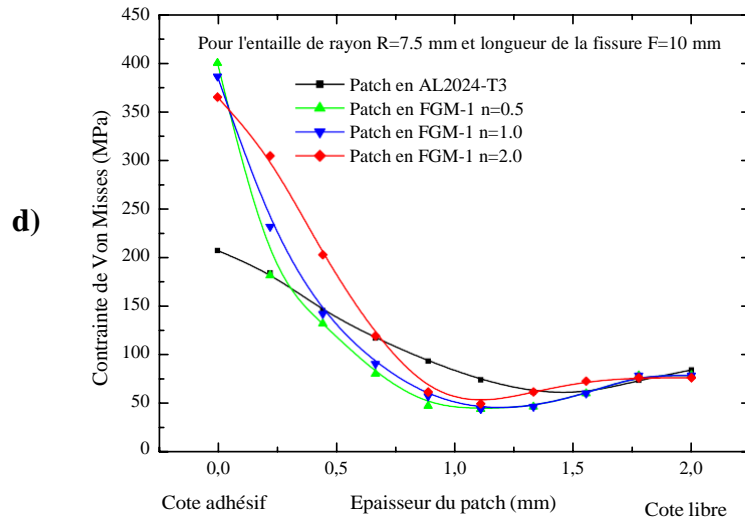
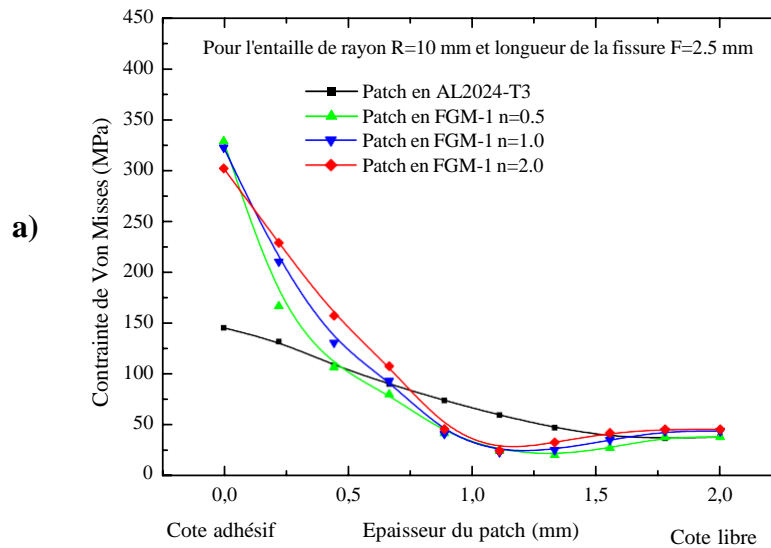
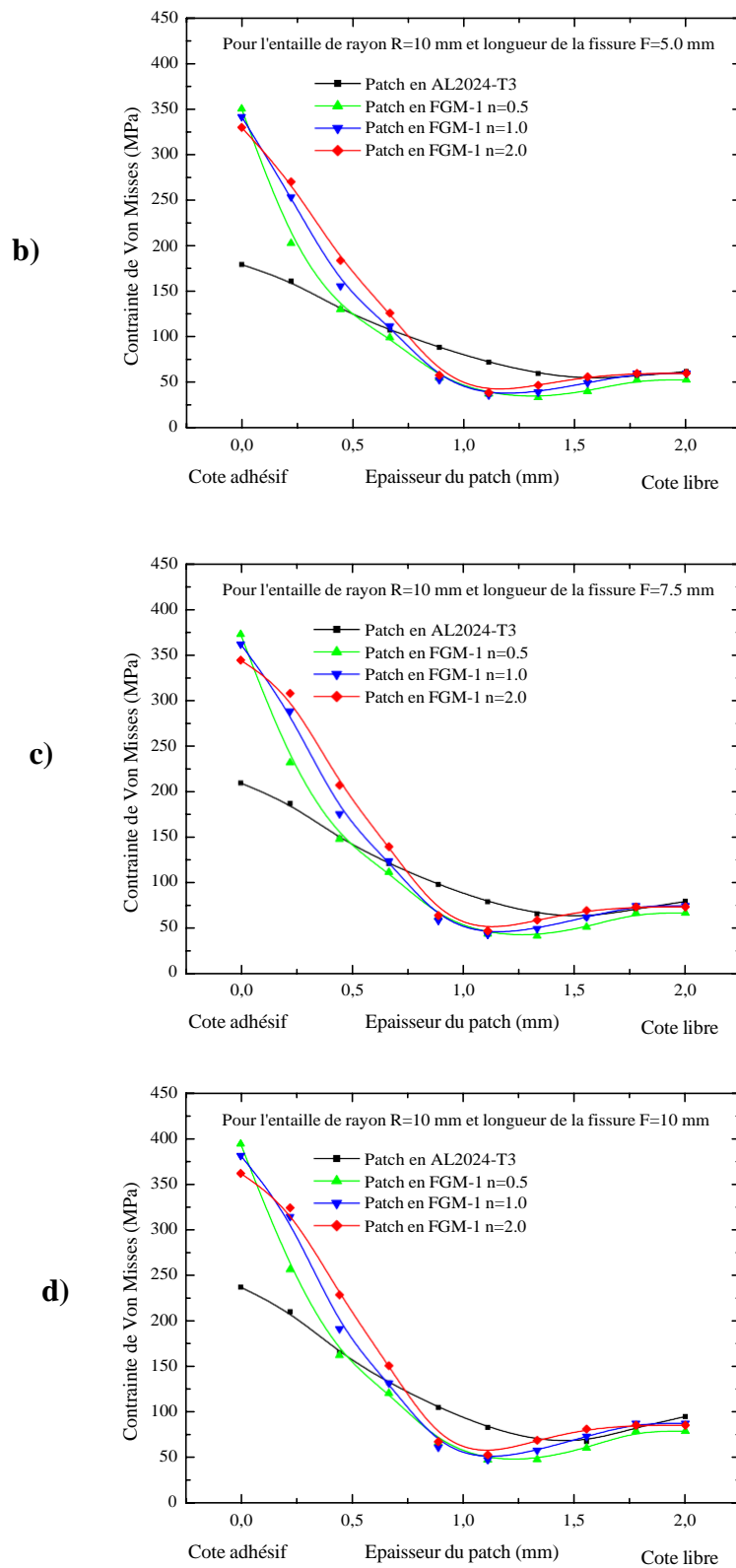


Figure IV.9 : Variation de la contrainte de Von Messes  $\sigma_{VM}$  en fonction de l'épaisseur du patch pour différentes longueurs de fissure avec a) F=2.5 b) F=5.0 mm, c) F=7.5 mm et d) F=10 mm (rayon d'entaille R=7.5).

➤ Cas de l'entaille R=10 mm





**Figure IV.10:** Variation de la contrainte de Von Messes  $\sigma_{VM}$  en fonction de l'épaisseur du patch pour différentes longueurs de fissure avec a) F=2.5 b) F=5.0 mm, c)F=7.5 mm et d) F=10 mm (rayon d'entaille R=7.5).

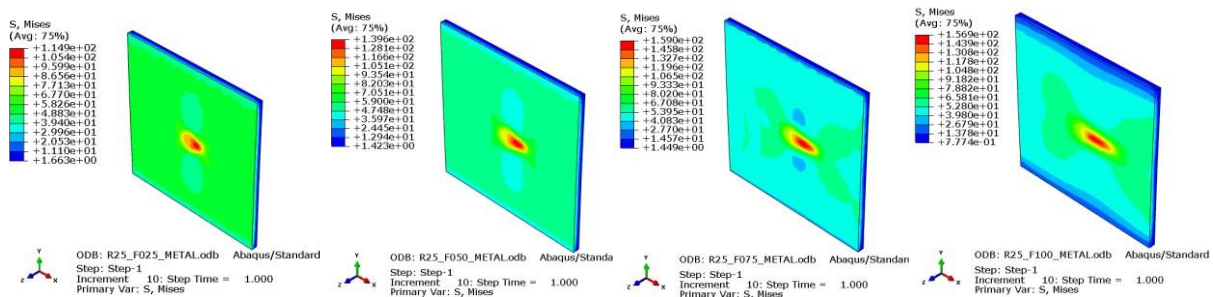
Les figures présentes (IV.7- IV.10), la Variation de la contrainte de Von Messes  $\sigma_{VM}$  en fonction de l'épaisseur du patch pour longueurs de fissure. En analysant, la contrainte de VM suivant l'épaisseur du patch. Si la longueur de la fissure est égale à la largeur de la pièce rapportée, la valeur des contraintes VM est identique, mais lorsque la taille de la fissure augmente la contrainte augmente avec un maximum est sur le côté en contact avec l'adhésif et un minimum avec même valeur sur l'autre face qui est libre. Seul le patch métal présente une moindre distribution des contraintes de VM puisque les différents patches FGM présentent des contraintes supérieures avec faible déférence entre eux. La variation de la contrainte de Von mises suivant l'épaisseur du patch présente la même allure si le rayon de l'entaille augmente sauf que la valeur de la contrainte de Von mises augmente légèrement.

**IV.4.4. Distribution les contraintes dans patch :**

Dans ce contexte, on a essayé de déterminer le niveau de la contrainte de Von mises dans patch en fonction du diamètre de l'entaille et du coefficient de gradation

**IV.4.4.1. Cas d'entaille de rayon R=2.5 mm et réparé par patch**

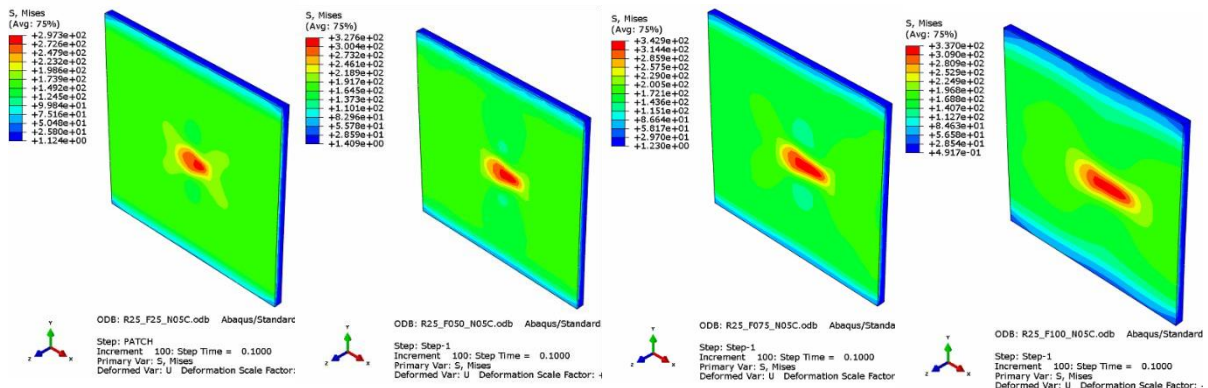
**a) Patch en AL2024-T3 :**



**Figure IV.11:** Distribution les contraintes de Von mises dans patch en métal-1: a) F=2.5 mm, b) F=5 mm, c) F=7.5 mm, d) F=10 mm

**b) Patch en FGM-1 :**

➤ **Pour un exposant de fraction volumique de FGM-1 : n=0.5**



**Figure IV.12:** Distribution les contraintes de Von mises dans patch en FGM-1: a) F=2.5 mm, b) F=5 mm, c) F=7.5 mm, d) F=10 mm

➤ Pour n exposant de fraction volumique de FGM-1 : n=1.0

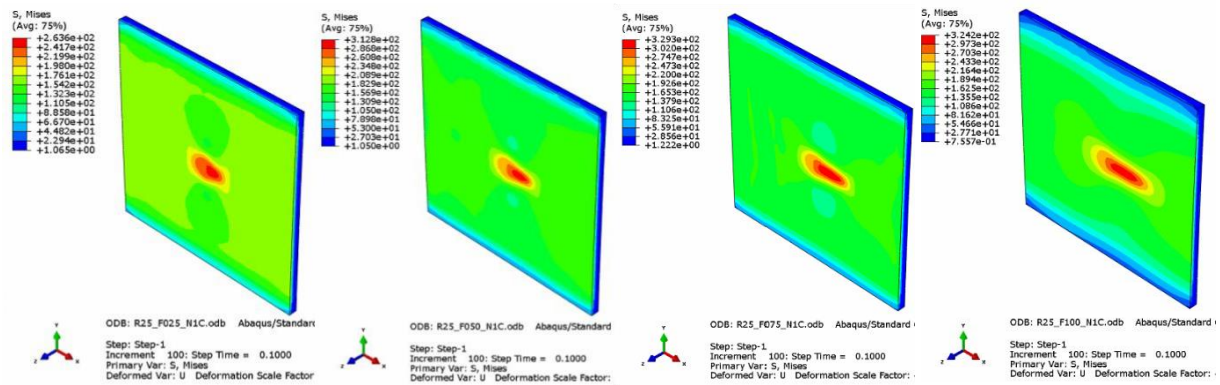


Figure IV.13: Distribution les contraintes de Von mises dans patch en FGM-1: a) F=2.5 mm, b) F=5 mm, c) F=7.5 mm, d) F=10 mm

➤ Pour un exposant de fraction volumique de FGM-1 : n=2.0

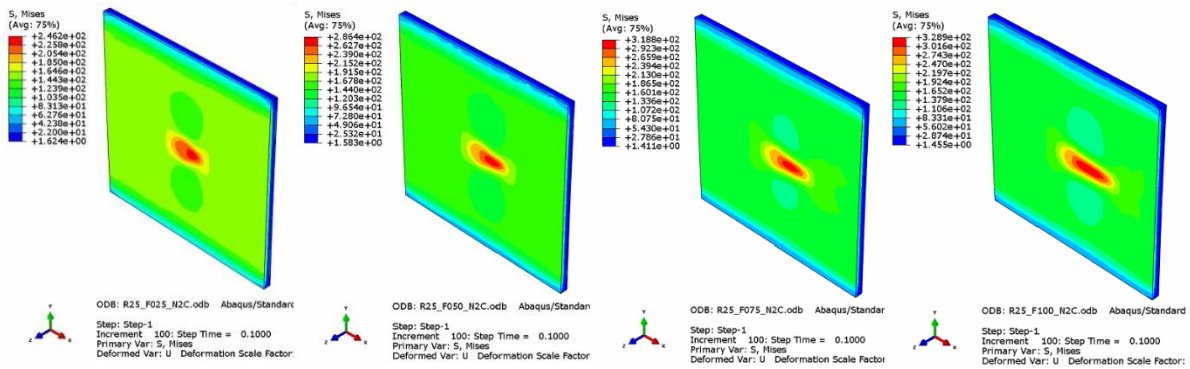


Figure IV.14: Distribution les contraintes de Von mises dans patch en FGM-1: a) F=2.5 mm, b) F=5 mm, c) F=7.5 mm, d) F=10 mm

IV.4.4.2. Cas d'entaille de rayon R=5.0 mm et réparé par patch :

c) Patch en AL2024-T3

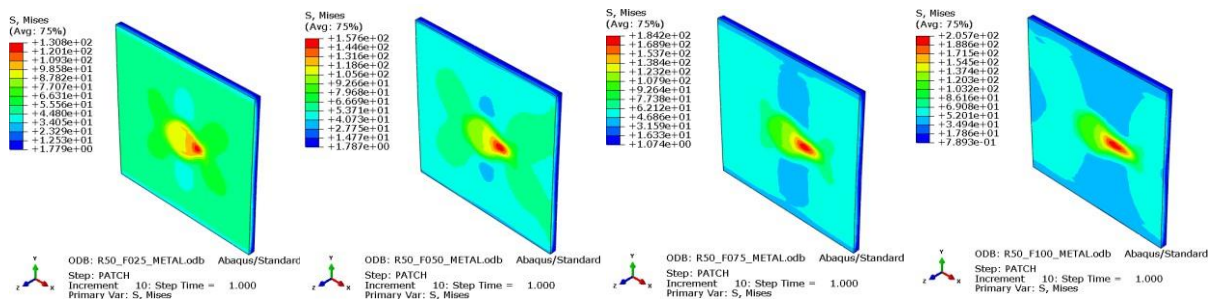
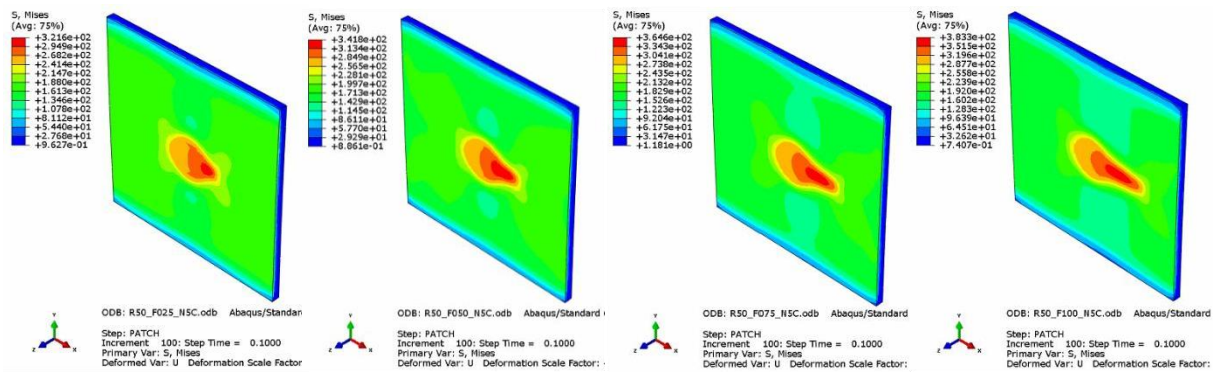


Figure IV.15: Distribution les contraintes de Von mises dans patch en Metal,: a) F=2.5 mm, b) F=5 mm, c) F=7.5 mm, d) F=10 mm

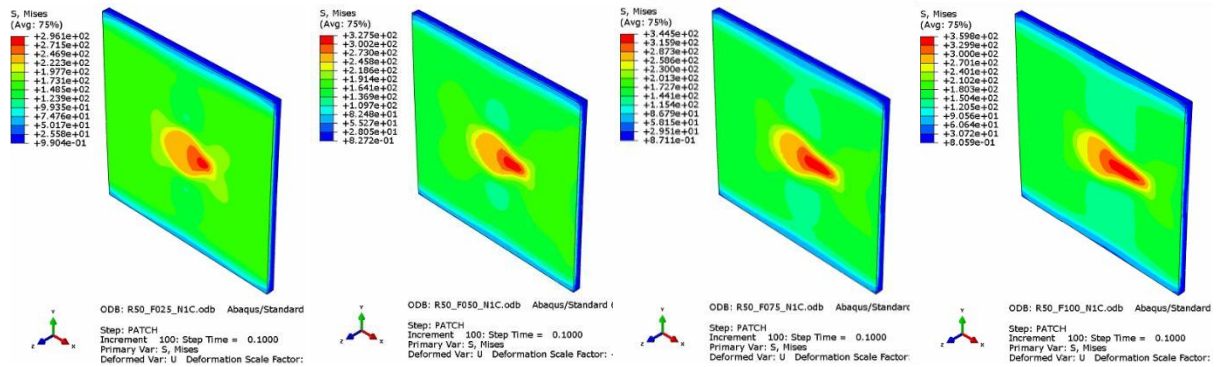
**d) Patch en FGM-1**

➤ **Pour un exposant de fraction volumique de FGM-1 :  $n=0.5$**



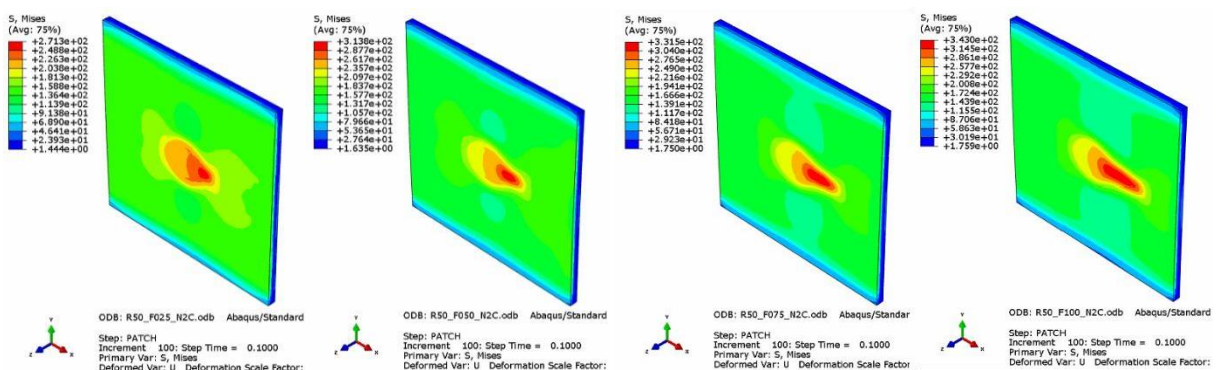
**Figure IV.16:** Distribution les contraintes de Von misses dans patch en FGM-1: a) F=2.5 mm, b) F=5 mm, c) F=7.5 mm, d) F=10 mm

➤ **Pour un exposant de fraction volumique de FGM-1 :  $n=1.0$**



**Figure IV.17:** Distribution les contraintes de Von misses dans patch en FGM-1: a) F=2.5 mm, b) F=5 mm, c) F=7.5 mm, d) F=10 mm

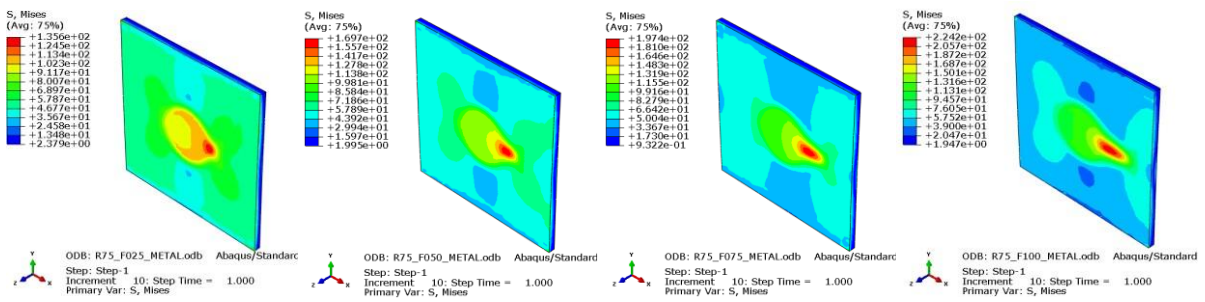
➤ **Pour un exposant de fraction volumique de FGM-1 :  $n=2.0$**



**Figure IV.18:** Distribution les contraintes de Von misses dans patch en FGM-1: a) F=2.5 mm, b) F=5 mm, c) F=7.5 mm, d) F=10 mm

**IV.4.4.3. Cas d'entaille de rayon R=7.5 mm et réparé par patch :**

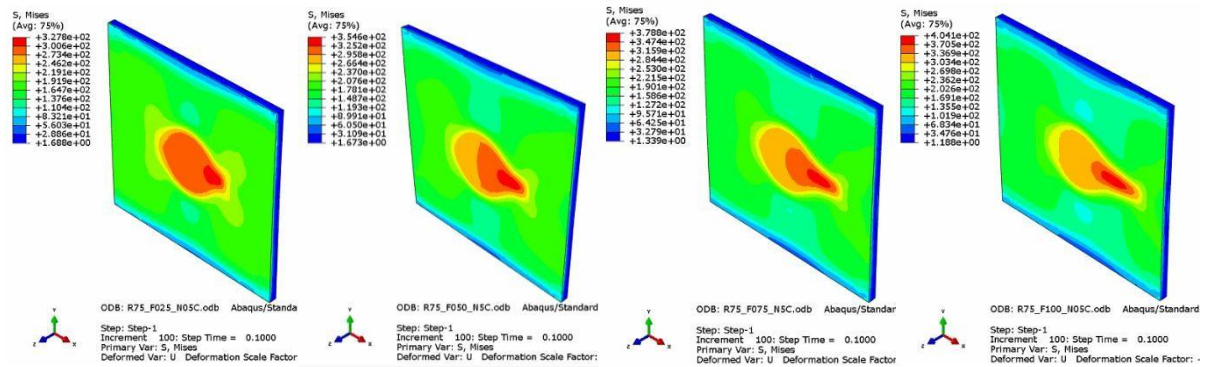
**e) Patch en AL2024-T3**



**Figure IV.19:** Distribution les contraintes de Von misses dans patch en métal: a) F=2.5 mm, b) F=5 mm, c) F=7.5 mm, d) F=10 mm

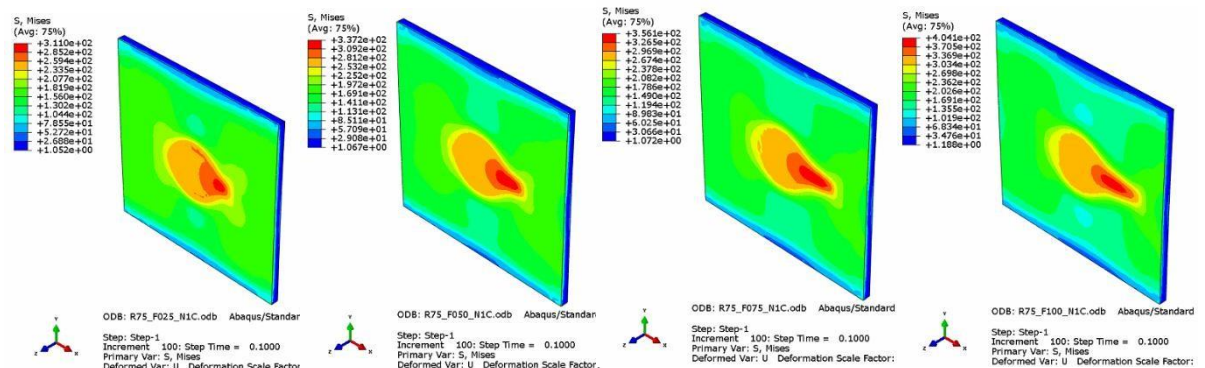
**f) Patch en FGM-1**

➤ **Pour un exposant de fraction volumique de FGM-1 : n=0.5**



**Figure IV.20:** Distribution les contraintes de Von misses dans patch en FGM-1: a) F=2.5 mm, b) F=5 mm, c) F=7.5 mm, d) F=10 mm

➤ **Pour un exposant de fraction volumique de FGM-1 : n=1.0**



**Figure IV.21:** Distribution les contraintes de Von misses dans patch en FGM-1: a) F=2.5 mm, b) F=5 mm, c) F=7.5 mm, d) F=10 mm



➤ Pour un exposant de fraction volumique de FGM-1 :  $n=2.0$

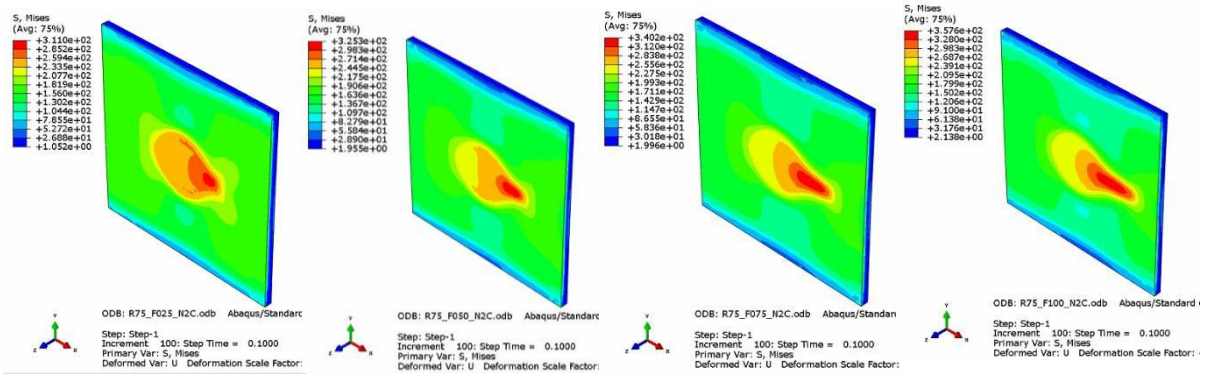


Figure IV.22: Distribution les contraintes de Von mises dans patch en FGM-1: a)  $F=2.5$  mm, b)  $F=5$  mm, c)  $F=7.5$  mm, d)  $F=10$  mm

IV.4.4.4.Cas d'entaille de rayon  $R=10$  mm et réparé par patch :

g) Patch en AL2024-T3

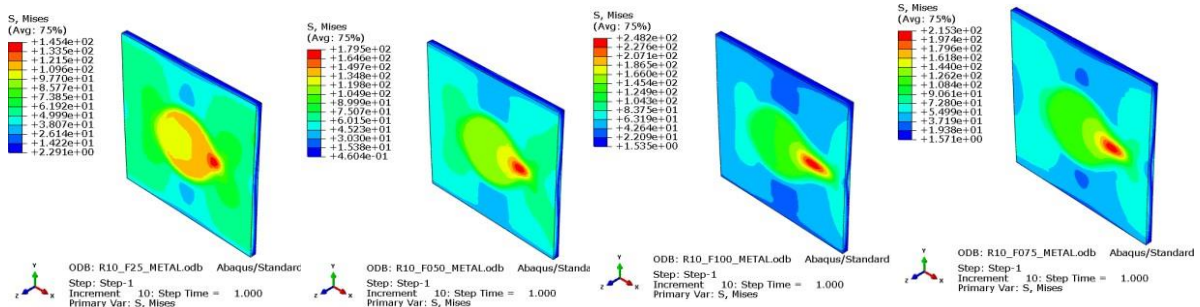


Figure IV.23: Distribution les contraintes de Von mises dans patch en métal: a)  $F=2.5$  mm, b)  $F=5$  mm, c)  $F=7.5$  mm, d)  $F=10$  mm

h) Patch en FGM-1

➤ Pour un exposant de fraction volumique de FGM-1 :  $n=0.5$

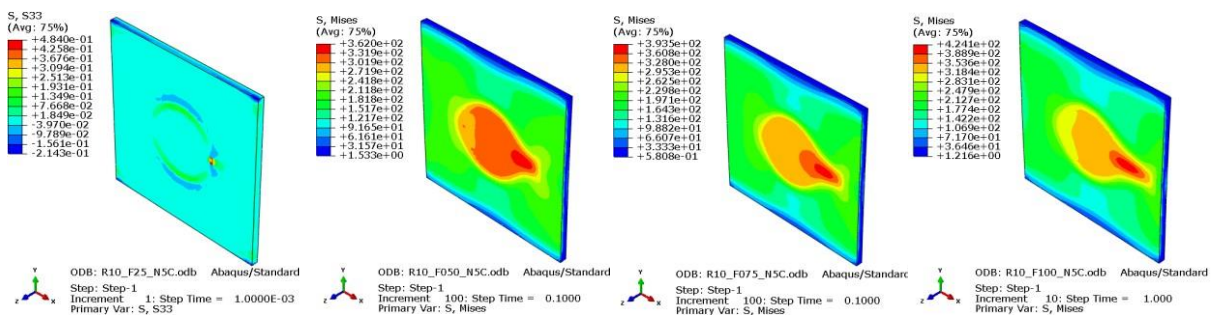


Figure IV.24: Distribution les contraintes de Von mises dans patch en FGM-1: a)  $F=2.5$  mm, b)  $F=5$  mm, c)  $F=7.5$  mm, d)  $F=10$  mm

➤ Pour un exposant de fraction volumique de FGM-1 :  $n=1.0$

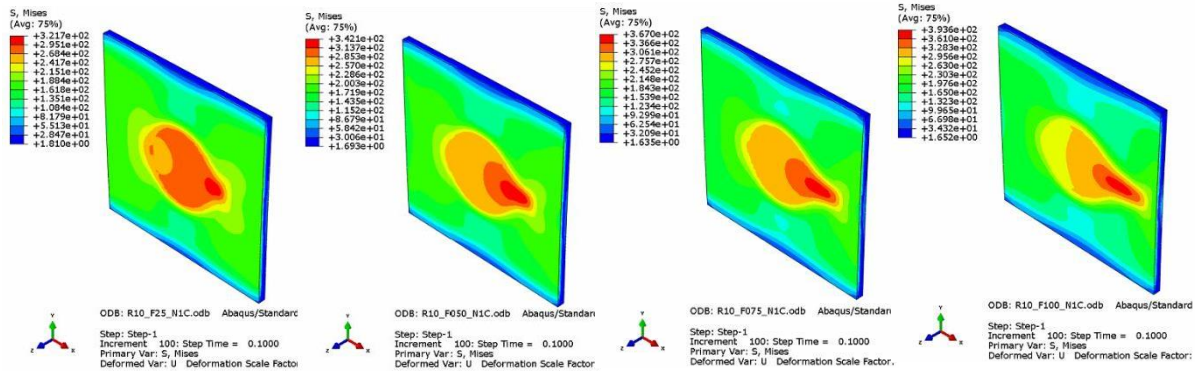


Figure IV.25: Distribution les contraintes de Von mises dans patch en FGM-1: a)  $F=2.5$  mm, b)  $F=5$  mm, c)  $F=7.5$  mm, d)  $F=10$  mm

➤ Pour un exposant de fraction volumique de FGM-1 :  $n=2.0$

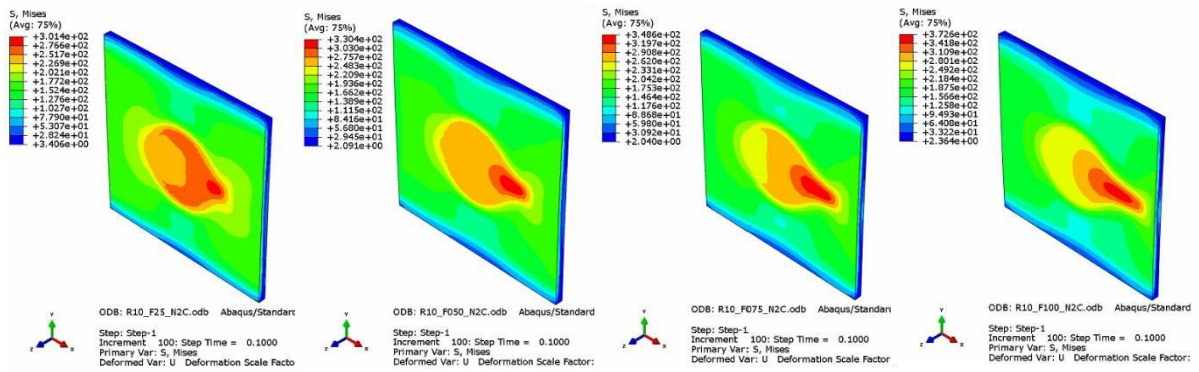


Figure IV.26: Distribution les contraintes de Von mises dans patch en FGM-1: a)  $F=2.5$  mm, b)  $F=5$  mm, c)  $F=7.5$  mm, d)  $F=10$  mm

Après les figures, On remarque clairement que le niveau de la contrainte de Von mises dans le patch présente une distribution non symétrique. La concentration de contraintes est localisée au niveau des deux bords et au niveau de la fissure. Les contraintes maximales sont au niveau du centre du patch là où le transfert de charge est maximal. Les contraintes les plus faibles sont celles pour le cas d'un patch métallique. Pour le patch FGM le niveau de contrainte présente un maximum si la longueur de la fissure est importante et que le coefficient de gradation est  $n=2$ .

Si l'entaille présente un diamètre important, le patch transmet plus de contrainte et le niveau de la contrainte de Von mises présente des valeurs élevées. Cette valeur augmente avec l'augmentation de la longueur de la fissure et le coefficient de gradation. La zone de forte

concentration de contrainte présente une surface plus étendue. Le patch en aluminium transmet lui aussi plus de charge mais qui reste faibles devant le patch en FGM.

#### **IV.5. Conclusion**

La distribution des contraintes se présente sous la forme continue du patch FGM puisque la continuité des propriétés mécaniques d'une couche à l'autre grâce à USDFLD selon la direction de gradation, si la longueur de la fissure augmente, la valeur de la contrainte de VM dans le patch augmente considérablement. Par contre, sur la face libre on remarque juste une légère différence entre les valeurs de la contrainte de VM.

## **Conclusion générale**

### Conclusion générale

A travers notre analyse numérique de l'effet de la présence d'un patch de réparation sur la réduction de la concentration de contrainte dans la plaque endommagée, on a pu tirer les conclusions suivantes :

- Quel que soit la nature du patch, la réduction des contraintes au niveau de la zone endommagée est importante et la plaque réparée présente une bonne résistance vis à vis la charge appliquée.
- Le patch en FGM avec différentes conception présente le meilleur transfert de contrainte par rapport aux autres natures du patch.
- La surface de contact patch avec adhésive doit être optimiser pour assurer un meilleur transfert de charge.
- La valeur de l'intégrale-J varie avec la taille de l'entaille et la longueur de la fissure.
- La valeur de l'intégrale-J est réduite par la présence du patch composite.
- Le patch FGM réduit considérablement la valeur de l'intégrale-J

## Références bibliographiques

---

- [1] [www.maxicours.com](http://www.maxicours.com).
- [2].Kaddouri Nadia, Influence des défauts géométrique dans la colle et modification géométrique de substrats sur la durabilité des assemblages collés, université DjillaliLiabes de sidi bel Abbes, 2020
- [3] Tsamasphyros, G., Kanderakis, G., Karalekas, D., Rapti, D., Gdoutos, E., Zacharopoulos, D., and Marioli-Riga, Z. Study of composite patch repai by analytical and numerical methods. *Fatigue FractEngng Mater Struct* 24 (2001), 631–636.
- [4] La norme AFNOR X 60-010-1994).
- [5] PRATT, J.L., introduction to the welding of structural steelwork, wtell construction institute .3rd rev, ed.1989.
- [6] R.J Callianan, I.R.F. Rose, C.H wang, three dimensional stress analysis of crack patching in :of international conference on fracture, ICF-9(1997)2151-2158.
- [7] Design, analysis and performance of adhesively bonded composite patch repair of cracked aluminum aircraft panels A.ChukwujekwuOkafora,b,\* ,Navdeep Singh a,b ;U.E.
- [8] <https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Assemblage-m%C3%A9tallique-riv%C3%A9.jpg>
- [9] A. baker, bonded composite repair of fatigue-cracked primary aircraft structure, *compos.Struct.*47 (1) (1999)431-443.
- [10] Abdullah Maleki, MiladSaeedifar, Mehdi Ahmadi Najafabadi, DimitriosZarouchas The Fatigue Failure Study of Repaired Aluminum Plates by Composite Patches using Acoustic Emission, *Engineering Fracture Mechanics* (2017), doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.12.034>.
- [11] H. Hosseini-Toudeshky et al. Experimental fatigue crack growth and crack-front shape analysis of asymmetric repaired aluminium panels with glass/epoxy composite patches / *Composite Structures* 71 (2005) 401–406
- [12].Association ouvrière des compagnons du devoir du tour de France reproduction interdite juillet 2012. Nommer les différents types de colles et leurs caractéristiques.
- [13] Tsamasphyros, G., Kanderakis, G., Karalekas, D., Rapti, D., Gdoutos, E., Zacharopoulos, D., and Marioli-Riga, Z. Study of composite patch repai by analytical and numericalmethods. *Fatigue FractEngng Mater Struct* 24 (2001), 631–636.
- [14] Wang, C. H., Rose, L. R. F., Callinan, R., and Baker, A. A. Thermal stresses in a plate with a circular reinforcement. *International Journal of Solids and Structures* 37 (2000), 4577–4599.

## Références bibliographiques

---

- [15] M. Hautier, Analyse des réparations des matériaux composites : mise en œuvre d'un procédé par infiltration et étude du comportement mécanique. Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2010.
- [16] M. Hautier, D. Lévêque, C. Huchette, and P. Olivier, Réparation des composites par infiltration de résine= Investigation of a composite repair method by liquid resin infiltration in JNC 16, 2009, p. 10.
- [17] Chris Alexander, Ozden O. Ochoa, Extending onshore pipeline repair to offshore steel risers with carbon-fiber reinforced composites, *Composite Structures* 92 (2010) 499–507.
- [18] Sylvain Popineau, Durabilité en milieu humide d'assemblages structuraux colles type ALUMINIUM/COMPOSITE. Thèse : Ecoles des mines de paris 2005. P10-11.
- [19] Houssam Toutanji, Sean Dempsey, Stress modeling of pipelines strengthened with advanced composites materials, *Thin-Walled Structures* 39 (2001) 153–165.
- [20] L'HERMITE R., Béton armé d'armatures collées. Colloque RILEM, Paris 4-6 septembre 1967, 175-203
- [21] THOMANN M., Connexions par adhérence pour les ponts mixtes acier-béton, Thèse de Doctorat de L'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005, 211 pages.
- [22] E. Darque-Ceretti, B. Monasse, 2008, p.9).
- [23] 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.
- [24] Bardis, J., and Kedward, K. Effects of surface preparation on long-term durability of composite adhesive bonds. Tech. Rep. DOT/FAA/AR-01/8, Federal Aviation Administration, 2001.
- [25] Bartolomeusz, R. A., Baker, A. A., Chester, R. J., and Searl, A. Bonded joints with through-thickness adhesive stresses - reinforcing the f/a-18.
- [26] Baker, A., and Aktepe, B. Sensor techniques to validate the stress intensity in cracked metallic panels repaired with bonded composite patches. Tech. rep., Defense Science and Technology Organisation, Australia
- [27] Cantu-Paz, E., and Goldberg, D. E. Efficient parallel genetic algorithms : theory and practice. *Computer methods in applied mechanics and engineering* 186 (2000), 221–238.
- [28] IRWIN G.R., Analysis of stresses and strains near the end of crack transversing a plate, *Journal of Applied Mechanics* 1957 (24), 361-364
- [29] GODARD B., LAFUENTE R., Etude expérimentale de l'adhésion entre un béton et une résine époxydique lors de l'assemblage par collage de voussoirs préfabriqués dans les ponts en béton précontraint, Congrès ISAP Aix-en-Provence 16-19 septembre 1986, 474-7-475.

## Références bibliographiques

---

- [30] Volkersen, O. Die niekraft in zugbeanspruchten mit konstantenlaschenquerschritten. Luftfahrtforschung 15 (1938), 41–
- [31]. association ouvrière des compagnons du devoir du tour de France reproduction interdite juillet 2012. Nommer les différents types de colles et leurs caractéristiques
- [32] Antoine Deheeger. Etude des effets thermiques dans des joints collés. Application à des structures renforcées par patchs composites. Thèse de doctorat. Université Blaise Pascal - Clermont II.France
- [33]Goland, and Reissner. The stress in cemented joints. Journal of Applied Mechanics 11 (1944), A17–A27.
- [34].<http://www.crash-aerien.news/forum/bonjour-a-tous-reparation-cellule-t23910.html>
- [35]Pengcheng CHENG, Etude et optimisation de la réparation des composites Stratifiés par collage des patchs externes, université de bourgogne, thèse de doctorat (2010).
- [36] Yin, H. ., Sun, L. ., &Paulino, G... (2004). Micromechanics-based elastic model for functionally graded materials with particle interactions. ActaMaterialia, 52(12), 3535–3543. doi:10.1016/j.actamat.2004.04.007
- [37]. Suresh, S., Mortensen, A., "Fundamentals of functionally graded materials,Ed", (IOM Comm.Ltd., London, (1998).
- [38].Bessaim (2015). AichaBessaim, Mohammed Sid Ahmed Houari, Fabrice Bernard and AbdelouahedTounsi, nonlocal quasi-3D trigonometric plate model for free vibration behaviour of micro/nanoscale plates Structural Engineering and Mechanics , Volume 56, Number 2, October25 2015, pages 223-240, DOI: <http://dx.doi.org/10.12989/sem.2015.56.2.223A>
- [39] Houari amin, 2012. Endommagement dans les plaques entaillées en FGM, université de sidi delabess, thèse de doctorat (2021).
- [40] Bao, G., Wang, L., (1995). Multiple cracking in functionally graded ceramic/metal coatings. International Journal of Solids and Structure, 32, 2853-2871.
- [41] Chung, Y.L., Chi, S.H., (2001).The residual stress of functionally graded materials. Journal of the Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering, 13, 1-9.
- [42]Delale, F., & Erdogan, F. (1983). The Crack Problem for a Nonhomogeneous Plane. Journal of AppliedMechanics, 50(3), 609, doi:10.1115/1.3167098.
- [43] Thèse, Xavier BUCH dégradation thermique et fluage d'un adhésif structural époxyde. Le 18 décembre 2000.
- [44].A. NACERI, et A. VAUTRIN, Caractérisation du comportement mécanique d'un composite (tissu de verre/résine époxyde) à différentes périodes de vieillissement hygrothermiques, (2006).



## Références bibliographiques

---

- [45].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.
- [46]. Thèse, Julien Mercier prise en compte du vieillissement et de l'endommagement dans le dimensionnement de structures en matériaux composites, Le 25 jun2007.
- [47] Houari amin, 2012. Endommagement dans les plaques entaillées en FGM, université de sidi delabess, thèse de doctorat (2021).
- [48] K. Madani, S. Touzain, X. Feaugas, M. Benguediab, M. Ratwani, (3April 2009). Stress distribution in a 2024-T3 aluminum plate with a circular notch, repaired by a graphite/epoxy composite patch. International Journal of Adhesion and Adhesives Volume 29, page 225-23
- [49] : Stéphane marie, approche énergétique de la déchirure ductile. Commissariat à l'énergie atomique (Direction des réacteurs nucléaires). 1999. France

## Résumé :

Les alliages d'aluminium sont couramment utilisés dans les applications aéronautiques en raison de leur bon équilibre entre la légèreté et de bonnes propriétés mécaniques et une meilleure résistance à la corrosion. La technique la plus utilisée pour la réparation des plaques fissurées est l'assemblage d'une plaque en matériau de base ou en matériau composite par collage sur la région fissurée ce qui atténue l'intensité des contraintes en pointe de fissure. Dans le présent travail, nous avons proposé une technique de réparation une plaque métallique en présence d'une fissure émanant par collage d'un patch en matériaux fonctionnel à gradient. Plusieurs paramètres ont été mis en évidence sur la qualité de réparation à savoir l'effet de l'exposant de la fraction volumique de FGM et de l'adhésif ainsi que leurs épaisseurs. Déplus, on a étudié l'influence la taille de la fissure dans le comportement élastoplastique de la plaque. La loi de comportement des deux matériaux Aluminium et la colle sont supposé non linéaires. Cependant, pour l'étude l'endommagement de la colle, la condition d'initiation de l'endommagement établie par critère de traction-séparation et la seconde condition est l'évolution de l'endommagement basée sur l'approche énergétique de rupture sont définie dans le code d'élément finis ABAQUS. La loi de puissance d'homogénéisation pour but définie la distribution des propriétés matérielle du patch FG suivant l'épaisseur a été utilisée. Pour obtenu les résultats la méthode de maillage UMM a été utilisé. Le sous-programme USDFLD codée avec le Fortran ont été employés pour modeler du patch du FGM avec les éléments pleins évalués dans le logiciel d'élément finis d'ABAQUS, afin d'optimisé et réduire au maximum la contrainte principale définie autour du trou. Enfin, l'analyse de la valeur de l'intégrale-J au niveau de la fissure dans la plaque d'une part, et la contrainte de Von misses pour le patch et l'adhésif a été abordée.

**Mots clés :** FGM, Patch, Entaille, Fissure, USDFLD, Intégrale-J.

## المخلص

تستخدم سبائك الألومنيوم بشكل شائع في تطبيقات الفضاء نظراً لتوازنها الجيد بين الوزن الخفيف والخصائص الميكانيكية الجيدة ومقاومة التآكل الأفضل. الأسلوب الأكثر شيوعاً لإصلاح الألواح المتشققة هو تجميع مادة أساسية أو لوح مادة مركبة عن طريق الارتباط بمنطقة التصدع ، مما يقلل من شدة الضغوط عند طرف الشق. في هذا العمل ، اقترحنا تقنية لإصلاح صفيحة معدنية في وجود صدع ناجم عن تراكب رقعة من مواد متدرجة وظيفية. تم تسليط الضوء على العديد من المعلمات على جودة الإصلاح ، وهي تأثير الأس لجزء الحجم من تشويه الأعضاء التناسلية الأنتوية والمادة اللاصقة وكذلك سمكها. بالإضافة إلى ذلك ، قمنا بدراسة تأثير حجم الشق في سلوك اللدائن المرنة للصفحة. من المفترض أن يكون القانون التأسيسي لمادتي الألمنيوم والغراء غير خطي. ومع ذلك ، بالنسبة لدراسة تلف المادة اللاصقة ، فإن شرط بدء الضرر الذي تم تحديده بواسطة معيار الفصل بين الجر والشرط الثاني هو تطور الضرر بناءً على نهج الطاقة للتمزق في كود العنصر المحدود الأبقس. يحدد قانون قوة التجانس للعرض توزيع خواص مادة رقعة FG وفقاً للسمك الذي تم استخدامه. للحصول على النتائج ، تم استخدام طريقة شبكة جامعة مجدية مالنح. تم استخدام روتين USDFLD الفرعي المشفر باستخدام Fortran لنمذجة رقعة تشويه الأعضاء التناسلية الأنتوية باستخدام العناصر الصلبة التي تم تقييمها في برنامج العناصر المحدودة من ABAQUS ، من أجل تحسين وتقليل الضغط الأساسي المحدد حول الثقب. أخيراً ، تم تحليل قيمة التكامل J على مستوى الشق في اللوحة من جهة ، وفقد Von الضغط على الرقعة والمادة اللاصقة. الكلمات المفتاحية: المادة المتدرجة الوظيفية، الرقعة، الشق، USDFLD.

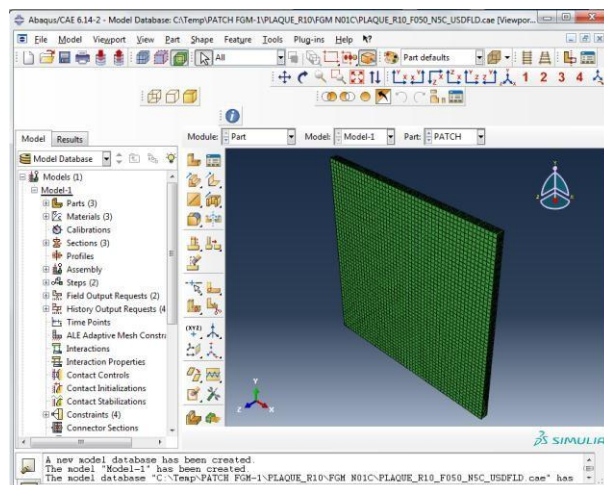
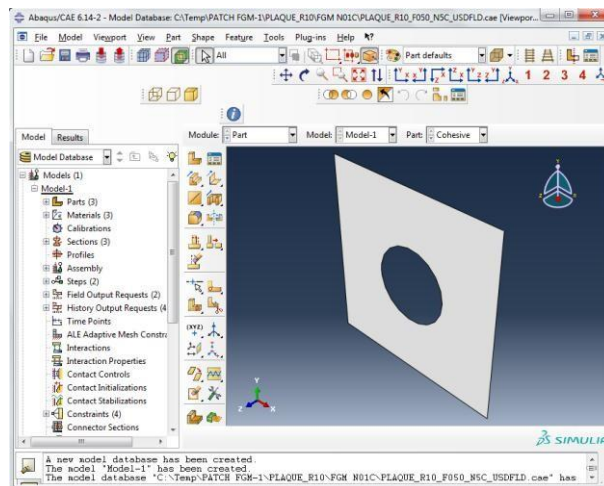
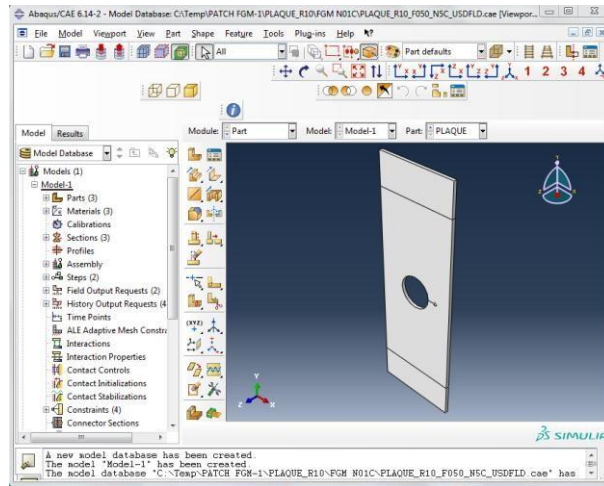
## Abstract

Aluminum alloys are commonly used in aerospace applications due to their good balance between light weight and good mechanical properties and better corrosion resistance. The most commonly used technique for repairing cracked plates is the assembly of a base material or composite material plate by bonding to the cracked region, which reduces the intensity of the stresses at the crack tip. In this work, we have proposed a technique for repairing a metal plate in the presence of a crack emanating from the bonding of a patch of functional gradient materials. Several parameters have been highlighted on the repair quality, namely the effect of the exponent of the volume fraction of FGM and of the adhesive as well as their thicknesses. In addition, we studied the influence of the size of the crack in the elastoplastic behavior of the plate. The constitutive law of the two materials Aluminum and the glue are supposed to be nonlinear. However, for the study of the damage of the adhesive, the condition of initiation of the damage established by criterion of traction-separation and the second condition is the evolution of the damage based on the energy approach of rupture are defined in the finite element code ABAQUS. The homogenization power law for purpose defines the distribution of the material properties of the FGM patch according to the thickness was used. To obtain the results, the UMM mesh method was used. The USDFLD subroutine coded with Fortran was used to model the patch of the FGM with the solid elements evaluated in the finite element software of ABAQUS, in order to optimize and minimize the principal stress defined around the hole. Finally, the analysis of the value of the J-integral at the level of the crack in the plate on the one hand, and the Von misses stress for the patch and the adhesive was approached.

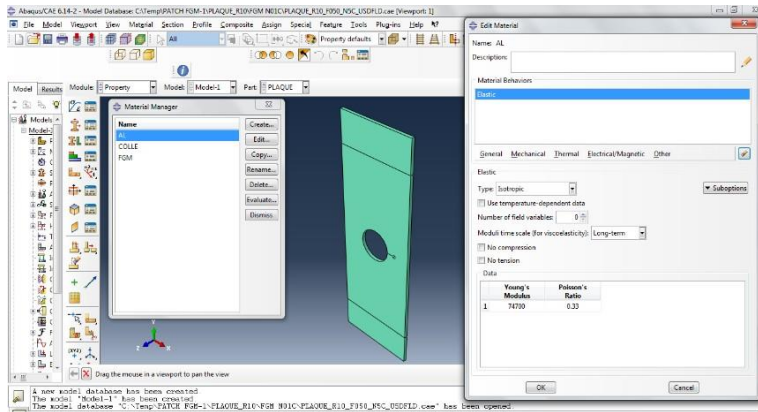
**Keywords:** FGM, Patch, Notch, Fissure, USDFLD, Integral-J.

# **Annexe**

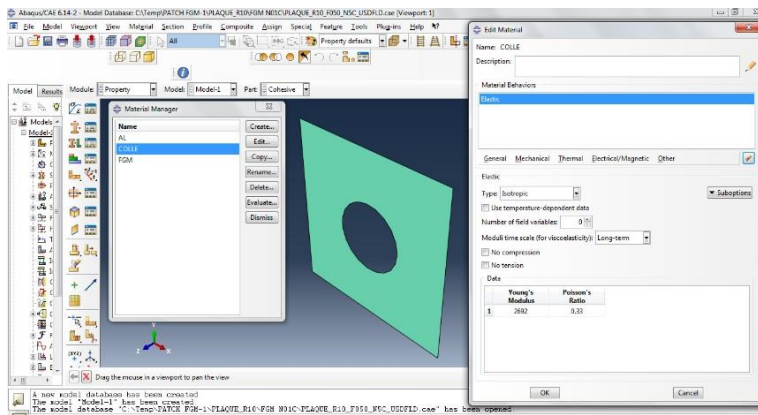
# 1. Cree les part



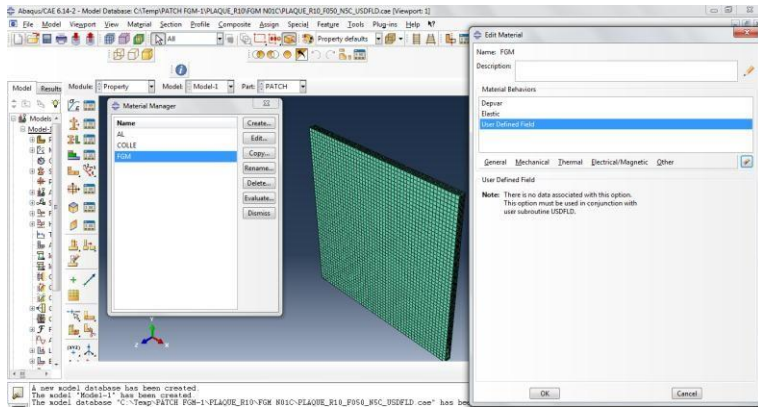
## 2. Les propriétés mécaniques des matériaux



Plaque

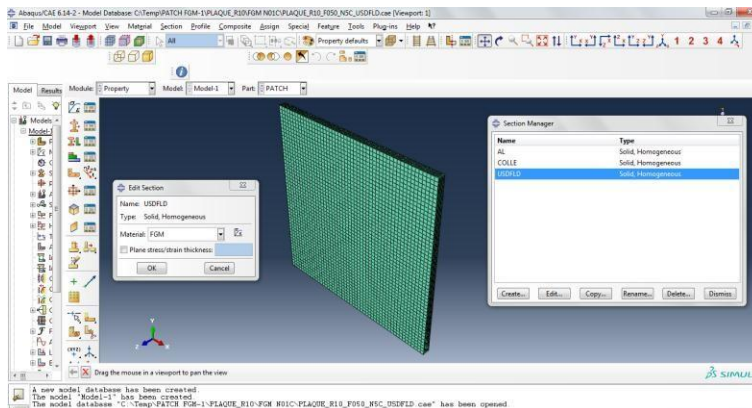
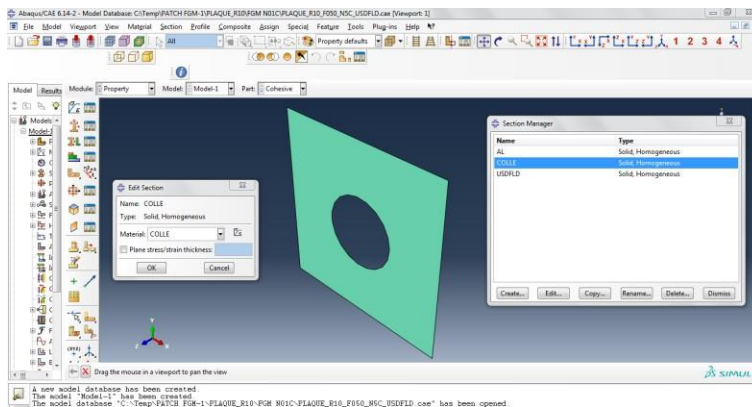
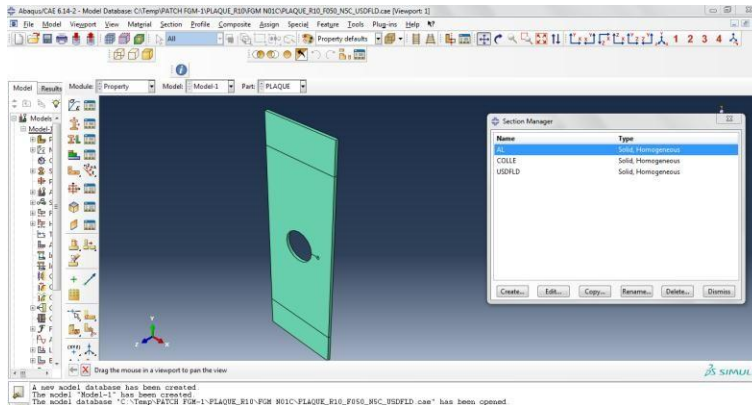


Colle

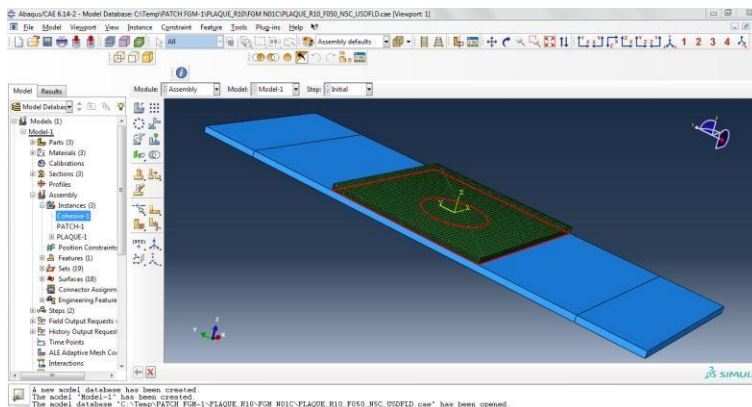


Patch

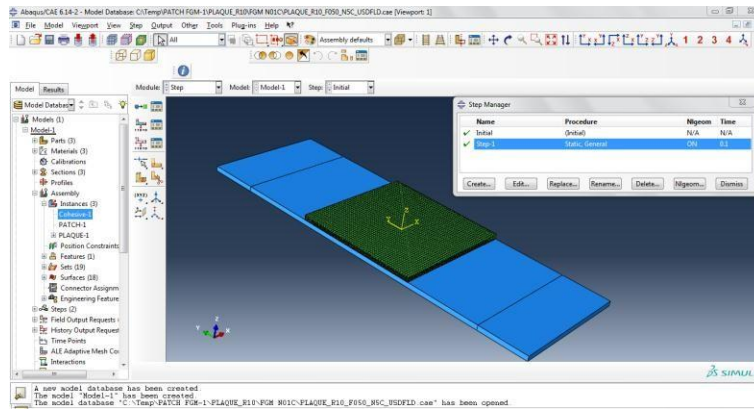
### 3. Identifie les sections des parts



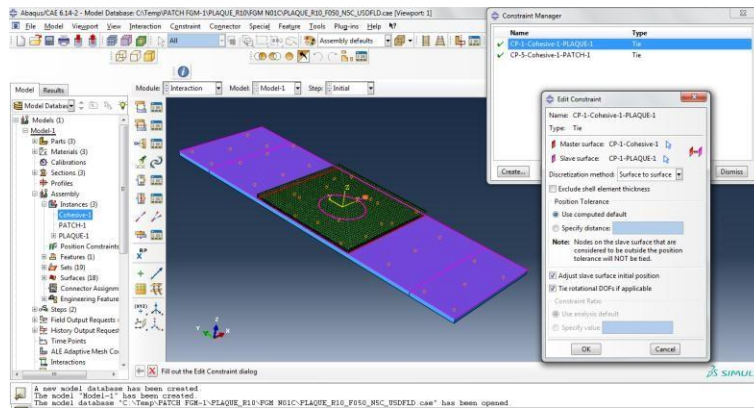
### 4. Assemblage



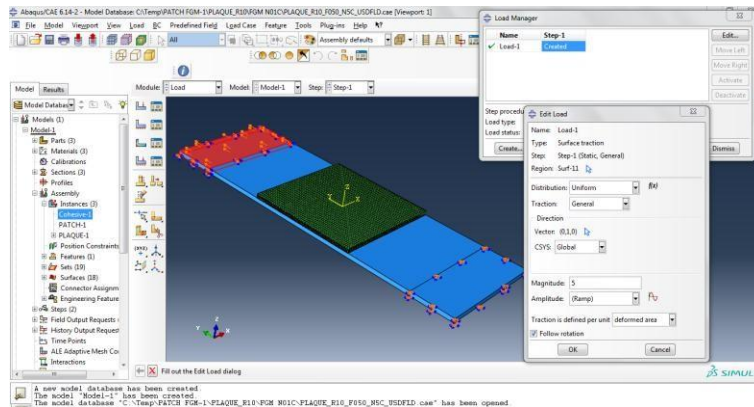
## 5. STEP



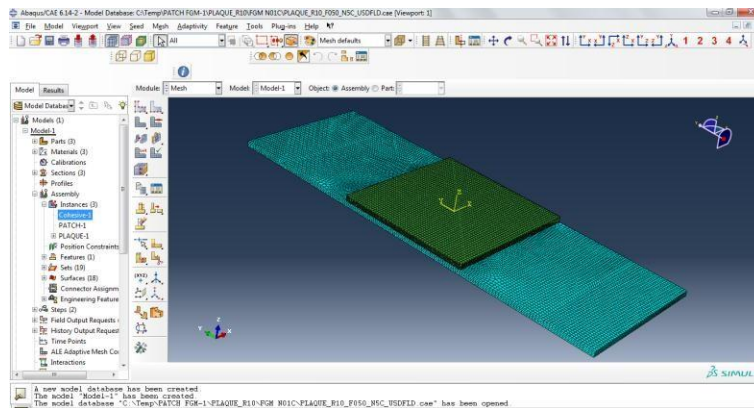
## 6. CONTACT



## 7. Les conditions aux limites

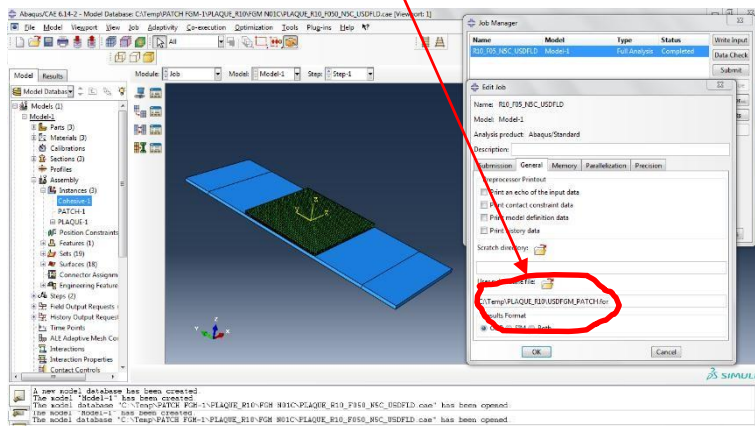


## 8. MAILLAGE



## 9. Résultat

### Tout d'abord implanté le sous-programme USDFLD



```
USDFGM_PATCH.for
G (Global Scope)
SUBROUTINE USDFLD(FIELD,STATEV,PNEWDT,DIRECT,T,CELENT,
TIME,DTIME,CNAME,ORNAME,NFIELD,NSTATV,NOEL,NPT,LAYER,
KSPT,KSTEP,KINC,NDI,NSHR,COORD,JMAC,JMATYP,MATLAYO,LACCFLA)
C
INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
C
CHARACTER*80 CNAME,ORNAME
CHARACTER*3 FLGRAY(15)
DIMENSION FIELD(NFIELD),STATEV(NSTATV),DIRECT(3,3),
T(3,3),TIME(2)
DIMENSION ARRAY(15),JARRAY(15),JMAC(*),JMATYP(*),COORD(*)
C
ELASTIC USER SUBROUTINE
PARAMETER (ONE=1.0D0,TWO=2.0D0,HALF=0.5D0,FOUR=4.3D0)
DOUBLE PRECISION
V,E
C
DIMENSION INTV(1),REALV(1)
E1 =71000.0D0
E2 =362000.0D0
H =2.0D0
N =-1.0D0
Z =COORD(3)
C
READ X COORDONE
C
CALCULATE YOUNG MODULE
C
RETURN
END
```

