



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès
Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique



THÈSE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE

DOCTEUR EN SCIENCES

Spécialité : Génie mécanique
Option : Sciences des matériaux

Présentée par:

BELGHOUL Hakima

Intitulé de la thèse

**Analyse du vieillissement de l'adhésif et du composite
utilisés dans la réparation des structures endommagées**

Soutenue le

Devant le Jury d'examen composé de :

Mr BELHOUARI Mohammed	Président	Pr	UDL-SBA
Mr MADANI .K	Directeur de thèse	Pr	UDL-SBA
Mr BOUTABOUT Benali	Examineur	Pr	UDL-SBA
Mr OUDDAD Wahid	Examineur	Pr	Université d'Ain Temouchent
Mr GHAZI Abdelkader	Examineur	MCA	Université de Mascara
Mr OULD CHIKH El Bahri	Examineur	Pr	Université de Mascara

REMERCIEMENTS

REMERCIEMENTS

Remerciements

Je remercie **ALLAH** de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce travail.

Mes premières pensées vont à mon directeur de thèse. Je voudrais remercier **Mr.MADANI Kouideur** pour m'avoir accepté de diriger ma thèse depuis ma 1^{er} années jusqu'à la rédaction de ces lignes. ses encouragements été indispensables à la finalisation de ce modeste travail.

Je voudrais également exprimer toute ma gratitude aux autres membres du jury : **Mr BELHOUARI Mohammed** pour avoir accepté de présider le jury ; **Mr BOUTABOUT Benali** et **Mr OUDDAD Wahid** et **Mr OULD CHIKH El Bahri** et **Mr GHAZI Abdelkader** pour avoir assumé la lourde tâche de relire et rapporter ma these; pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail. Merci à tous pour vos remarques et conseils précieux.

J'ai plaisir à remercier l'ensemble des enseignants, chercheurs et personnels administratif du département de génie mécanique à l'université UDL SAB. Pour leurs contributions, leurs précieux conseils durant ma formation de graduation et post-graduation.

Je veux dédier ce mémoire à ma famille : mon père, ma mère, mon mari, ma belle-famille qui m'ont élevé et porté jusqu'ici. À mes sœurs, mon frère et amis au milieu de qui je me suis construit.

Enfin, je voudrais dédier cette thèse mes petites princesses **Lina et Douaa**.

الخلاصة

الملخص

الملخص

تستخدم تقنية الإصلاح والتعزيز بواسطة التصحيح المركب على نطاق واسع في العديد من المجالات الصناعية وتستمر في التطور يوماً بعد يوم. يرجع حد استخدامه في الهياكل الأولية إلى مقاومته المنخفضة للشيخوخة (درجة الحرارة، ورطوبة الأشعة فوق البنفسجية، وما إلى ذلك) نظراً للتدهور الكبير في الخصائص الميكانيكية للمركب والمادة اللاصقة (بناءً على النتائج التجريبية) على نقل الضغوط من اللوح التالف إلى الرقعة المركبة.

ADIKETA-140 في هذا السياق ، استخدمنا هيكل الألومنيوم 2024- 3 ولكن اختيار المادة اللاصقة ثابت.

المادة المركبة عبارة عن رقعة مكونة من 16 لفة تسمح بنقل أفضل للحمل من اللوحة إلى الرقعة.

تأخذ الدراسة في الاعتبار عدة أنواع من مواد الترقيع (كربون ، بورون، أراميد ، رقعة معدنية من نوع الألومنيوم) ذات اتجاهات مختلفة من الألياف.

تم تقييم عامل شدة الإجهاد كدالة لطول الشق ووقت الغمر ودرجة الحرارة. كما تم تحليل التباين في إجهادات القص درجة الحرارة ، FIC القصوى في ضغوط اللاصق والقشر في الرقعة

الكلمات المفتاحية: الصفيحة ، التصحيح المركب ، اللاصق ، الشيخوخة ، الشق ، معامل الاجهاد ، درجة الحرارة.

RESUME

Résumé

Résumé

La technique de réparation et de renforcement par patch composite connaît un grand usage dans plusieurs domaines industriels et ne cesse de se développer de jour en jour. La limite d'utilisation de cette technique dans les structures primaires est causée par sa faible résistance au vieillissement (température, humidité UV etc...), vue la dégradation considérable des propriétés mécaniques du composite et de l'adhésif. L'objectif de notre travail est d'utiliser la méthode des éléments finis pour analyser l'effet de la dégradation des propriétés mécaniques du composite et de l'adhésif (basées sur des résultats expérimentaux) sur le transfert des contraintes de la plaque endommagée vers le patch composite. Dans ce contexte, nous avons utilisé la structure en aluminium 2024-T3, cependant le choix de l'adhésif est fixé sur l'ADIKET A-140 et pour le composite, un stratifié de 16 plis très fin permettant un meilleur transfert de charge de la plaque. L'étude prend en considération plusieurs types de matériaux du patch (Carbone, Boron et Aramide et patch métallique de type aluminium) avec différentes orientations de fibres.

Le Facteur d'Intensité de Contraintes a été évalué en fonction de la longueur de la fissure, du temps d'immersion et de la température. La variation des contraintes de cisaillement maximale dans l'adhésif et de pelage dans le patch ont également été analysés.

Mots clés: plaque, patch composite, colle, vieillissement, fissure, FIC, température

ABSTRACT

ABSTRACT

Abstract

The technique of repair and reinforcement by composite patch is widely used in several industrial fields and continues to develop day by day. Its limit of use in primary structures is caused by its low resistance to aging (temperature, UV humidity, etc.) given the considerable degradation of the mechanical properties of the composite and the adhesive.

The objective of our work is to use the finite element method to analyze the effect of the degradation of the mechanical properties of the composite and the adhesive (based on experimental results) on the transfer of stresses from the damaged plate to the composite patch. In this context, we used the 2024-T3 aluminum structure; however the choice of adhesive is fixed on the ADIKETA-140 and for the composite, a very thin de 16 ply laminate allowing better load transfer of the plate.

The study takes into consideration several types of patch materials (carbon, aramid boron and aluminum type metal patch) with different fiber orientations. The stress intensity factor was assessed as a function of crack length, immersion time and temperature. The variation of maximum shear stresses in the adhesive and peel stresses in the patch were also analyzed.

Keywords: Plate, Composite patch, Adhesive, Aging, Crack, FIC, temperature

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

Table des matières

المخلص

RESUME

ABSTRACT

TABLE DES MATIERES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES NOTATIONS

Introduction générale.....01

CHAPITRE I : Généralités sur la technique de réparation par patch

PARTIE A : TECHNIQUE DE REPARATION PAR PATCH COMPOSITE.

I.A.1 Introduction.....	04
I.A.2.Mécanismes de réparation par patch composite	05
I.A.3 Optimisation de la forme du patch	09
I.A.4 Pontage de fissure.....	10
I.A.5 Type de renfort	12
I.A.6 Matériaux de réparation	14
I.A.6 .1 Patch	14
I.A.6.2 Adhésif	16
I.A.6.3 Exemples d'applications de première réparation par patch.....	17

PARTIE B : EFFET DU VIEILLISSEMENT DES PATCHS COMPOSITE

I.B.1 Introduction.....	21
I. B.2 Généralités sur les types de vieillissement	21
I.B.3.Les facteurs influençant la durée de vie des joints collés.....	22
I.B.4 Vieillissement hygrothermique.....	22

TABLE DES MATIERES

I.B.5.L'eau et ses mécanismes de diffusion	25
I.B.6 Conséquences de l'absorption d'eau	26
I.B.7 Méthodes d'étude du vieillissement de notre étude.....	31
I.B.8 Rupture dans les assemblages de structures en composites collés.....	33
I.B.9 Conclusion.....	36
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	37

CHAPITRE II : Etat de l'art sur la réparation par patch composite

II. Introduction	40
II.2. Effet de type d'analyse	40
II.3. Effet de la géométrie du patch et de l'adhésif.....	41
II. 4. Effet des propriétés mécanique du patch	43
II. 5. Effet des propriétés mécanique de l'adhésif.....	45
II.6 Effet de l'orientation des fibres	46
II.7 Le nombre des coches de patch	47
II.8 Effet de forme de patch	48
II.9 Effet thermique sur la performance de réparation	49
II.10.Effet de température.....	51
II.11.Effet de vieillissement des adhésifs.....	52
II.12 Influence de décollements dans d'adhésif sur (FIC) et le (COD)	59
II.13.Influence d'absorption de l'eau sur la propagation des fissures	60
II.14.Effet de vieillissement à long terme d'un composite carbone/époxy sur la fatigue en fissuration application pâle d'hélice	61
II.15. Conclusion.....	61
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	62

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE III : Optimisation des paramètres géométriques et convergence

III.1.Introduction	65
III.2 Présentation des Matériaux utilisés	65
III.2.1 Alliage d'aluminium 2024-T3	65
III.2.2 L'adhésif structural ADEKIT A140	66
III.2.3 Matériau composite carbone/époxy	68
III.3 Modèle géométrique	68
III.4 L'optimisation du patch en composite (carbone /Epoxy)	70
III.4.1 Maillage	70
A. Influence de nombre des nœuds	70
B. Influence de type d'éléments	74
III.4.2 Chargement et conditions aux limites.....	78
a) Influence des conditions aux limites	78
III.4.3 influence de la dimension de patch en composite	81
III.4.4 variation de l'épaisseur du patch	81
III.4.5 Influence du formes de patch en composites.....	82
III. 5 Conclusion	84
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	85

CHAPITRE IV :Résultats et Discussions

IV.1 Introduction.....	86
IV.2.Géométrie et propriétés mécaniques	87
IV.3 Modélisation par élément finis.....	90
IV.4 Analyse et résultats.....	91
VI.4.1. Effet de la nature du patch	91
VI.4.2Effet de vieillissement de l'adhésif sur le facteur d'intensité des contraintes.....	93
VI.4.2.1Température de 20°C.....	93
VI.4.2.2Température de 40°C.....	94
VI.4.2.3Température de 60°C.....	95
IV.5.Analyse des contraintes dans l'adhésive et le patch	97

TABLE DES MATIERES

IV.6 Niveaux des contraintes dans le patch et l'adhsif	98
IV.7 Effet de vieillissement de la colle	103
IV.8 L'effet de perte des propriétés mécaniques de composite	122
IV.8.1 Composite vieillit colle non vieillit	123
IV.8.1.1. si on considère que le vieillissement de l'adhésif est accéléré /au composite.....	123
A. L'analyse des résultats de facteur d'intensité des contraintes	123
B. L'analyse de niveau des contraintes dans le patch et l'adhésif.....	123
IV.8.1.2. si on considère que le vieillissement de l'adhésif et le composite en même temps....	127
A. L'analyse des résultats de facteur d'intensité des contraintes	127
B. L'analyse de niveau des contraintes dans le patch et l'adhésif	129
IV.8.2 Composite vieillit colle non vieillit.....	138
A. L'analyse des résultats de facteur d'intensité des contraintes.....	138
B. L'analyse du niveau des contraintes de cisaillement dans l'adhésif.....	139
IV.9 Conclusion.....	143
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	148
<hr/>	
Conclusion générale.....	150
<hr/>	

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Liste des figures

Chapitre I

PARTIE A : TECHNIQUE DE REPARATION PAR PATCH COMPOSITE.

Figure I.1 : Modèle unidimensionnel d'une structure renforcée par un patch composite	06
Figure I. 2 : Equilibre représentatif du patch composite.	07
Figure 1. 3 : Patch composite avec une épaisseur dégressive	09
Figure I.4 : Diverses formes de patches composites d'après	09
Figure. I.5 : Structure fissurée et renforcée par un patch composite	10
Figure I. 6 : Evolution du facteur d'intensité K_I en fonction de la longueur de fissure	10
Figure. I.7 : Exemple d'essai sur éprouvette fissurée et renforcée avec patch composite	11
Figure I. 8 : Résultats d'un essai de fatigue sur une éprouvette fissurée et renforcée par un patch composite	11
Figure. I.9 : Exemples de patches riveté et collé d'après	12
Figure I. 10 : Exemple de réparation sur un avion F 111 d'après	18
Figure I. 11 : Exemple de réparation sur un avion Mirage d'après	19
Figure I.12 : Exemple de réparation sur un avion Hercules d'après	19

PARTIE B : EFFET DU VIEILLISSEMENT DES PATCHS COMPOSITES

Figure I.13 : Liaisons possibles de molécules d'eau avec un réseau époxy].....	23
Figure I.14 : Variation du module d'Young et du volume spécifique lors de la transition vitreuse	24
Figure I.15 : Courbe de diffusion de type Fick	26
Figure I.16 : Schéma récapitulatif des différents modes de pénétration de l'eau dans un assemblage collé.....	27
Figure I.17 : Evolution de $\tan \delta$ en / de vieillissement du réseau époxy massique.....	27
Figure I.18 : Plastification des polymères	28
Figure I.19 : Schéma montrant la formation de cloques au niveau de l'interface	28
Figure I.20 : Influence du vieillissement par immersion dans l'eau à 35°C des courbes charge-déformation obtenues en cisaillement sur un montage ARCAN dans le cas de joints métal/époxy.....	29
Figure I.21 : Evolution du faciès de rupture après vieillissement hygrothermique d'assemblages avec des substrats en aluminium.....	30
Figure I.22 : Evolution du faciès de rupture après vieillissement hygrothermique d'assemblages avec des substrats en acier.....	30

LISTE DES FIGURES

Figure I.23: Evolution de rupture d'un assemblage soumis à un cisaillement en torsion avant et après vieillissement en immersion.....	31
Figure I.24: Courbes caractéristiques contrainte-déformation de l'adhésif courbe moyen pour différents temps d'immersion	32
Figure I.25: Variation des modules d'Young en fonction de taux d'absorption d'eau	33
Figure I.26 : Modes de rupture d'assemblage collé.....	34
Figure I.27 : Rupture adhésive	34
Figure I.28 : Rupture cohésive	35
Figure I.29: Rupture mixte	36
Figure I.30 : Observation d'une rupture mixte d'un joint collé par MEB	36

Chapitre II

ETAT DE L'ART SUE LA REPARATION PAR PATCH COMPOSITE &VIEILLISSEMENT

Figure II.1 : Valeurs de FIC normalisé en fonction du chargement appliquée pour une géométrie linéaire et non linéaire [3]	41
Figure II.2 : a) modelé analysé b) Evolution de FIC en fonction des paramètres géométriques (H_p et W_p) du patch [6].	42
Figure II.3 : a) Evolution de FIC en fonction des épaisseurs de patch b) Evolution de FIC en fonction des épaisseurs d'adhésif [6].....	42
Figure II.4: Modèle géométrique de la structure patchée pour le mode de rupture II [11].....	43
Figure II.5 : Géométrie de la plaque patchée [11].....	43
Figure II.6 : Variation du FIC en fonction de la longueur de fissure [11].....	44
Figure II.7 : Effet de module de cisaillement de l'adessif sur les Valeurs de FIC [14].....	45
Figure II. 8: Evolution de FIC en fonction de module de cisaillement de l'adessif [14].....	46
Figure II. 9 : L'effet de l'orientation des fibres d'un patch octogonal sur le FIC [8]	46
Figure II.10 : géométrie et chargement de la structure patchée d'un seul côté [10].....	47
Figure II. 11 : Variation de la longueur de fissure en fonction de nombre de cycles pour un plaque réparée et non réparée a) $t=2.29$ mm. b) $t=6.35$ mm. [10].....	48
Figure II. 12 : Évolution de FIC en fonction de l'angle d'inclinaison β° pour différentes formes de patch [19].....	49
Figure II. 13 : Modèle géométrique [20].....	50
Figure II. 14 : Comparaison de FIC en fonction de la longueur de fissure entre $\Delta T=0^\circ$ et $\Delta T=100^\circ$ [20].....	51
Figure II.15 : coefficient de diffusion en fonction de la température [21].....	52
Figure II.16 : Démarche scientifique pour prédire la durée de vie des assemblages collés.....	54
Figure II.17 : Comparaison entre l'adhésif avec et sans défaut pour Boron / époxy, a) Réparation avec patch double, b) Réparation avec patch double ,c) Réparation avec patch simple.....	60

LISTE DES FIGURES

Chapitre III

OPTIMISATION DES PARAMETRES GEOMETRIQUE ET CONVERGENCE

Figure III.1: Courbe contrainte-déformation de l'aluminium 2024-T3.....	65
Figure III.2: Courbe contrainte-déformation de l'adhésif ADKEITA140.....	67
Figure III.3 : Modèle géométrique de la plaque réparé	69
Figure III.4 : Représentation des maillages choisis avec augmentation de nombre de nœuds.....	71
Figure III.5: Niveau de contraintes dans l'ensemble (Plaque+adhésif+ patch) pour 1 ^{er} maillage.....	72
Figure III.6 : Niveau de contraintes dans l'ensemble (Plaque+adhésif+ patch) pour le 2 ^{ème} maillage.....	72
Figure III.7 : Niveau de contraintes dans l'ensemble (Plaque+adhésif+ patch) pour le 3 ^{ème} maillage.....	72
Figure III.8 : Niveau de contraintes dans l'ensemble (Plaque+adhésif+ patch) pour le 4 ^{ème} maillage.....	73
Figure III.9 : Variation des contraintes « Von mises » suivant la mi-largeur de la plaque AL2024-T3 pour les différents Maillages.....	73
Figure III.10 : Niveau de contraintes dans l'assemblage pour le type Hex-structured.....	74
Figure III.11 : Niveau de contraintes dans l'assemblage pour le type Hex sweep	74
Figure III.13 : Niveau de contraintes dans l'assemblage pour le type wedge sweep.....	75
Figure III.14 : Variation des contraintes « Von Mises » suivant la mi-largeur de la plaque AL2024-T3 pour tous les types d'éléments.....	75
Figure III.15 : Niveau de contraintes dans l'assemblage pour le type hex structured.....	76
Figure III.16 : Niveau de contraintes dans l'ensemble (Plaque+adhésif+ patch) pour le type hex sweep.....	76
Figure III.17 : Niveau de contraintes dans l'ensemble (Plaque+adhésif+ patch) pour le type tet free	77
Figure III.18: Niveau de contraintes dans l'ensemble (Plaque+adhésif+ patch) pour le type wedge sweep..	77
Figure III.19 : Variation des contraintes « Von Mises » suivant la mi-largeur de la plaque AL2024-T3 pour tous les types d'éléments	77
Figure III.20 : Chargement et conditions aux limites.....	78
Figure III.21 : a- l'ensemble (plaque+ adhésif + patch) pour toute la surface fixe b- Variation des contraintes « Von Mises » suivant la mi-largeur de la plaque AL2024-T3.....	79
Figure III.22 : a- l'ensemble (plaque+ adhésif + patch) pour la barre en haut fixe, b- variation des contraintes « Von Mises » suivant la mi-largeur de la plaque AL2024-T3 pour la barre en haut fixe.....	79
Figure III.23: a- l'ensemble (plaque+ adhésif + patch) pour la barre en bas fixe, b- variation des contraintes « Von Mises » suivant la mi-largeur de la plaque AL2024-T3 pour La barre en bas fixe.....	80
Figure III.24: a- l'ensemble (plaque+ adhésif + patch) pour 2 appuis, b- variation des contraintes « Von Mises » suivant la mi-largeur de la plaque AL2024-T3 pour 2 appuis.....	80
Figure III.25: variation des contraintes « Von Mises » suivant la mi-largeur de la plaque AL2024-T3 pour différents largeurs de patch et pour D=10 mm	81
Figure III.26 : variation des contraintes « Von Mises » suivant la mi-largeur de la plaque AL2024-T3 pour différents épaisseurs de patch et pour D=10mm	81
Figure III.27: variation des contraintes « Von Mises » suivant la mi-largeur de la plaque AL2024-T3 pour différentes longueurs de patch et pour D=10mm	82
Figure III.28 : a- Patch carré / b- Patch hexagone / c- Patch cercle / d- Patch ellips / e- Patch losange/ f- Patch rectangle.....	83

LISTE DES FIGURES

Figure III.29 : Distribution des contraintes sur la plaque AL au niveau de l'entaille pour différentes forme de patch83

Chapitre IV

SIMULATION NUMERIQUE & RESULTATS ET DISCUSSION

Figure IV. 1: Modèle géométrique de la structure endommagée et réparée.....87

Figure IV.2 : Plaque soumise en traction uni-axiale (a) patch modélisé en multicouches (b) patch modélisé en monobloc.....88

Figure IV.3: sequence de empilement des pli.....89

Figure IV.4: Modèle de maillage de la structure..... 90

FigureIV.5 :Variation du facteur d'intensité de contraintes en fonction de la longueur de la fissure pour différentes natures du patch.....91

FigureIV.6 : Variation du FIC pour des différents natures de patch (monobloc et multicouches à $[0^{\circ}_8]_s$) en fonction de la longueur de la fissure).....92

FigureIV.7 : Variation du facteur d'intensité de contraintes pour des différents natures de patch (monobloc et multicouches à $[0_2/45_2/-45_2/0_2]_s$) en fonction de la longueur de la fissure).....92

FigureIV.8 :Variation du facteur d'intensité de contraintes pour des différents natures de patch (patch multicouches à $[0_8]_s$ et $[0_2/45_2/-45_2/90_2]_s$ en fonction de la longueur de la fissure.....93

Figure IV.9 : Variation de FIC en fonction de la longueur de la fissure pour différents temps d'immersion à la température de 20°C [orientation $[0_8]_s$].....94

Figure IV.10 : Variation de facteur d'intensité des contraintes en fonction de la longueur95

Figure IV.11 Variation FIC en fonction de la longueur de la fissure pour différents temps d'immersion à la température de 60°C [sequence d'empilement $[O_8]_s$].....96

Figure IV.12 Variation de contraintes de cisaillement de la colle et la contrainte de pelage dans le patch a)le carbone /époxyde b) le boron/epoxyde c) aramide/époxyde d) aluminium une température de 20°C.....98

Figure.IV.13 Exemple de distribution des contraintes au niveau de la plaque la colle et le patch pour des différents périodes d'immersion et différentes températures en longueurs des fissure.....103

Figure. IV.14: Les lignes de mesure utilisé dans l'analyse de transfert de charge pour patch, l'adhésif....103

Figure.IV.15 : Contrainte de cisaillement dans la colle pour fissure a=5mm et a=30mm.....104

Figure IV.16 Contrainte de pelage dans le patch en fonction largeur pour fissure a=5mm et a=30mm....104

Figure.IV.17 : Contrainte de cisaillement dans la colle en fonction largeur pour fissure a=5mm.....105

Figure.IV.18 : Contrainte de cisaillement dans la colle en fonction largeur pour fissure a=30mm.....106

Figure IV.19 : Contrainte de cisaillement dans le patch en fonction largeur pour fissure a=5mm.....107

Figure IV.20: Contrainte de pelage dans le patch en fonction largeur pour fissure a=30mm.....108

Figure IV.21 : Variation de la contrainte de cisaillement dans l'adhésif pour fissure a=5mm.....109

Figure IV.22 : Variation de la contrainte de cisaillement dans l'adhésif pour fissure a=30mm.....110

Figure.IV.23 : Variation de la contrainte de pelage dans le patch pour fissure a=5mm.....111

Figure.IV.24 : Contrainte de pelage dans la colle en fonction largeur pour fissure a=30mm.....111

LISTE DES FIGURES

Figure.IV.25 : Variation de la contrainte de cisaillement dans la colle pour fissure a=5mm.....	112
Figure.IV.26 : Variation de la contrainte de pelage dans le patch pour fissure a=30mm	112
Figure.IV.27 : Variation de contrainte de a) cisaillement b) pelage dans la colle pour fissure a=5mm.....	113
Figure.IV.28 : Variation de contrainte de cisaillement dans la colle pour fissure a=5mm.....	114
Figure.IV.29 : Variation de contrainte de cisaillement dans la colle pour fissure a=5 mm.....	115
Figure.IV.30 : Variation de contrainte de pelage dans le patch pour fissure a=5 mm.....	116
Figure.IV.31 : Variation de contrainte de cisaillement dans la colle pour fissure a=30mm.....	117
Figure.IV.32 : Variation de contrainte de pelage dans le patch pour fissure a=5mm.....	118
Figure.IV.33 : Variation de contrainte de cisaillement dans la colle pour fissure a=5 mm.....	119
Figure.IV.34 : Variation de contrainte de pelage dans le patch pour fissure a=5 mm.....	120
Figure.IV.35 : Variation de contrainte de cisaillement dans la colle pour fissure a=30 mm.....	120
Figure.IV.36 : Variation de contrainte de pelage dans le patch pour fissure a=30 mm.....	121
Figure IV.37 : Variation de FIC en fonction de différente longueur de fissure T=20°C.....	122
Figure.IV.38 : Variation de FIC en fonction de différente longueur de fissure T=40°C et 60°C.....	123
Figure.IV.39 : Contrainte de cisaillement adhésive fissure a) 5mm, b) 30mm carbone T=20°C.....	124
Figure.IV.40 : Contrainte de cisaillement dans la couche adhésive sans vieillissement pour une longueur de fissure a) 5mm et b) 30mm pour le cas de réparation par Aluminium.....	124
Figure.IV.41 : Contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure 5mm pour le cas de réparation par carbone T=40°C.....	125
Figure.IV.42 : Contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure 5mm pour le cas de réparation par Aluminium T=40°C.	125
Figure.IV.43 : Contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure 30 mm pour le cas de réparation par carbone T=40°C.....	125
Figure.IV.44 : Contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure 30mm pour le cas de réparation par Aluminium T=40°C.....	126
Figure.IV.45 : Contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure 5 mm pour le cas de réparation par carbone T=60°C.....	126
Figure.IV.46 : Contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure 30 mm pour le cas de réparation par A T=60°C.....	126
Figure.IV.47 : Contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure 30 mm pour le cas de réparation par carbone T=60°C.....	127
Figure.IV.48 : Contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure 30 mm pour le cas de réparation par Aluminium T=60°C.....	127
Figure.IV.49 : Variation de FIC en fonction de différente longueur de fissure a) carbone d) Alu ; pour vieillissement T=20°C, b) carbone c) Alu ; pour vieillissement T=40°C.....	128
Figure.IV.50 : Variation de FIC en fonction de différente longueur de fissure T=60°C, e) Composite f) Alu.....	129
Figure.IV.51 : Contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure a) 5mm, b) 30mm pour le cas de réparation par carbone T=20°C.....	130
Figure.IV.52 : Contrainte de cisaillement dans la couche adhésive sans vieillissement pour une longueur de fissure a) 5mm et b) 30mm pour le cas de réparation par Aluminium T=20°C.....	130

LISTE DES FIGURES

Figure.IV.53 : Contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure 5mm pour le cas de réparation par carbone T=40°C.....	131
Figure.IV.54 : Contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure 5mm pour le cas de réparation par Aluminium T=40°C.....	131
Figure.IV.55 : Contrainte de cisaillement dans la couche adhésive fissure 30mm carbone T=40°C.....	132
Figure.IV.56 : Contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure 30mm pour le cas de réparation par Aluminium T=40°C.....	132
Figure.IV.57 : Contrainte de cisaillement dans adhésive pour fissure 5mm pour carbone T=60°C.....	132
Figure.IV.58 : Contrainte de cisaillement adhésive pour fissure 30 mm pour le Aluminium T=60°C.....	133
Figure IV.59 : Niveau de la contrainte de cisaillement adhésive fissure 30mm pour carbone T=40°C.....	133
Figure IV.60 : Niveau de la contrainte de cisaillement adhésive fissure 30mm pour Aluminium T=60°C.....	134
Figure IV.61 : Niveau de la contrainte de pelage patch fissure a) 5mm, b) 30mm pour carbone T=20°C...	134
Figure IV.62 : Niveau de la contrainte de pelage patch a) 5mm, b) 30mm Alu sans vieill T=20°C	135
Figure IV.63 : Niveau de la contrainte de pelage dans le patch fissure 5mm carbone T=40°C.	135
Figure IV.64 : Niveau de la contrainte de pelage dans le patch de fissure 5mm pour Alu T=40°C.....	136
Figure IV.65 : Niveau de la contrainte de pelage dans le patch fissure 30mm pour carbone T=40°C... ..	136
Figure.IV.66 : Niveau de la contrainte de pelage dans le patch fissure 5mm pour Alu T=40°C.	136
Figure IV.67 : Niveau de la contrainte de pelage dans le patch fissure 5mm pour carbone T=60°C.....	137
Figure IV.68 : Niveau de la contrainte de pelage dans le patch de fissure 5mm pour Alu T=60°C.....	137
Figure. V.69 : Niveau de la contrainte de pelage dans le patch fissure 30mm pour carbone T=60°C.....	137
Figure IV.70 : Niveau de la contrainte de pelage dans le patch fissure 30mm pour Aluminium T=60°C...	137
Figure IV.71 : Variation de FIC en fonction de différente longueur de fissure a) carbone vieillit T=20°C, b) Alu, c) carbone vieillit T=40°C, d) carbone vieillit T=60°C.....	138
Figure IV.72 : Niveau des contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure a) 5mm, b) 30mm pour le cas de réparation par patch en carbone/epoxyde T=20°C.....	140
Figure IV.73 : Contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure a) 5mm, b) 30mm pour le cas de réparation par Aluminium T=20°C.....	140
Figure IV.74 : Niveau de la contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure a) 5mm, b) 30mm pour le cas de réparation par carbone T=40°C.....	141
Figure IV.75 : Niveau de la contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure a) 5mm, b) 30mm pour le cas de réparation par Aluminium T=40°C.....	141
Figure IV.76 : Niveau de la contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure a) 5mm, b) 30mm pour le cas de réparation par carbone T=60°C.....	142
Figure.IV.77 : Niveau de la contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure a) 5mm, b) 30mm pour le cas de réparation par Aluminium T=60°C.....	142

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Propriétés physiques et mécaniques des différents matériaux de réparation	16
Tableau I.2 : Exemples de réparations par patches composites effectuées par la RAAF d'après [22,27].	18
Tableau I.3 : Les différentes propriétés mécaniques utilisées dans les calculs [35].....	32

Chapitre II

Tableau II.1 : Dimensions et propriétés des matériaux [11].....	44
Tableau II.2 : Dimensions de la plaque, l'adhésif et les couches du patch [10].....	47
Tableau II.3 : Propriétés élastiques et thermiques des matériaux. [20].....	50
Tableau III.4 : détermination de coefficient de diffusion à partir de masses d'échantillons.....	52

Chapitre III

Tableau III.1 : Propriétés mécaniques de l'alliage d'Aluminium 2024-T3 [1]	66
Tableau III.2 : Propriétés physiques de l'adhésif	67
Tableau III.3 : Propriétés mécaniques et thermiques de l'adhésif	67
Tableau III.4 : Propriétés mécaniques de l'assemblage [2]..	67
Tableau III.5 présente quelques caractéristiques mécaniques des fibres de carbone et du verre.....	68
Tableau III.6 : Les dimensions de l'ensemble (plaque+adhésif+patch composite)	69
Tableau III.7 : Les Propriétés Mécaniques de l'ensemble (plaque+adhésif+patch composite) utilisées dans ce chapitre	70
Tableau III.8 : comparaison des résultats pour les différents types d'éléments.....	78

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Propriétés des différents matériaux utilisés dans la réparation [23].....	88
Tableau IV. 2 : Orientation des plis utilisé dans le calcul	89
Tableau IV.3 : Nombre des element type	91

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

Les diverses transformations que l'adhésif a subi jusqu'à la conception aujourd'hui de résines synthétiques, qui sont largement employées dans de nombreux procédés de fabrication, ont permis à la technique de collage des structures métalliques et/ou composites de prendre une grande partie dans différents secteurs industriels. Ces résines offrent, entre autres, la possibilité de rassembler des matériaux qui jusqu'alors ne pouvaient pas être collés. Ces différents secteurs industriels exigent la nécessité de disposer de structures plus performantes, plus légères, plus résistantes et plus fiables ce qui a poussé le développement de nouvelles méthodes d'assemblage structural. L'assemblage par collage remplace petit à petit les techniques d'assemblages classiques (vissage, soudage et rivetage etc..) puisqu'elle assure la réduction du poids, la possibilité d'unir différents matériaux, une bonne résistance à la fatigue, l'atténuation du choc et la facilité pour rassembler les formes les plus complexes. et d'autre part, cette technique évite les concentrations de contraintes dues aux trous et les éléments de liaison puisque la colle remplit tout l'espace entre les deux éléments rassemblés, ce qui favorise la répartition des efforts et assure un amortissement aux vibrations dans la structure grâce aux propriétés de l'adhésif, un allègement des structures, une amélioration de l'esthétique et un prix de revient souvent inférieur aux techniques d'assemblages classiques.

Le procédé d'assemblage par collage et suite au développement des matériaux composites s'est amélioré pour être proposé comme une méthode efficace de réparation des défauts géométriques (entaille et fissure) dans les différentes structures. Ces défauts géométriques produisent une concentration locale de contraintes et de déformation qui dépassent souvent la limite de résistance du matériau dans une petite région autour du défaut géométrique, même pour des contraintes nominales élastiques relativement faibles. Le procédé de réparation par collage de patch composite a connu une rapide expansion et a pris une grande partie dans diverses industries puisqu'il assure la réduction du poids, la possibilité d'unir différents matériaux, une bonne résistance à la fatigue, l'atténuation du choc et la facilité pour rassembler les formes les plus complexes.

La réparation des défauts géométriques exige un collage de patch qui présente des propriétés mécaniques élevées afin de réduire au maximum la concentration de contraintes. Le choix de la méthode de réparation se fait en fonction de la nature du matériau à réparer, de l'ampleur du dommage et de son utilisation. En effet, il faut faire un bon choix sur le patch composite dont sa forme, nombre de couches, orientation et nature de fibre soient adaptable à un meilleur transfert de

INTRODUCTION GENERALE

charge de la zone endommagée sans toutefois oublier l'adhésif convenable, afin d'assurer une réparation structurale surtout si le dommage est plus important.

Malgré ces avantages multiples de cette technique d'assemblage, L'utilisation d'adhésifs présente pourtant quelques inconvénients comme la faible résistance à la température et l'absorption de l'eau. Cependant, Les composants collés peuvent aussi présenter des défauts qui réduisent la qualité de l'assemblage comme les porosités et les espaces vides. L'adhésive est en effet amené à subir les conditions climatiques extérieures qui vont faire évoluer ses propriétés mécaniques au cours du temps.

Cependant, la maîtrise du vieillissement du patch et adhésif reste un des principaux problèmes. Les contraintes environnementales que subissent ces matériaux entraînent un affaiblissement des propriétés intrinsèques de l'adhésif, de l'interface et du composite provoquant l'endommagement des assemblages. Ce problème se pose particulièrement dans les secteurs de l'aéronautique et de l'automobile où la perte d'adhérence des joints adhésifs en milieu humide est une réelle pierre d'achoppement de la technologie d'assemblage par collage structural. De plus, l'absence de modèles fiables pour mieux modéliser le comportement mécanique de ces matériaux et prédire l'évolution des propriétés en fonction du temps est un handicap certain pour faire accepter cette technologie.

L'exposition simultanée de l'adhésif à l'environnement (humidité et température) sous une sollicitation mécaniques provoque une dégradation de ces propriétés mécaniques ce qui nécessite une protection de l'adhésif durant son service.

Des travaux de recherches sont encore nécessaires pour caractériser l'adhésif sous forme d'un joint de colle ou pour utilisation dans la réparation des défauts où des fissures et éclaircir les mécanismes de ruine des assemblages collés afin de déterminer des critères validés et destinés aux bureaux d'études puis de donner des règles pratiques pour la conception des joints collés en tenant compte des conditions environnementales.

C'est dans ce contexte que se situent les travaux présentés dans ce travail.

Le premier chapitre présente une étude bibliographique. Il nous a paru utile de présenter les techniques de réparation par patch composite et l'effet du vieillissement de ces patches sur la qualité de réparation.

Le second chapitre c'est un état d'art s'intéresse sur les différentes recherches effectuées dans le domaine de la réparation. Une attention particulière sera portée aux problèmes de vieillissement du composite.

Dans le troisième chapitre, et afin d'avoir des résultats numériques fiables, on a présenté une étude de convergence par l'analyse de l'influence des conditions aux limites, types de maillage et nombres d'éléments sur la réponse en contrainte de Von Mises de la plaque réparée.

INTRODUCTION GENERALE

Le quatrième chapitre est consacré à l'analyse par la méthode des éléments finis du comportement en rupture d'une plaque en Aluminium 2024-T3 endommagée et réparée par un patch composite, La plaque présente une entaille circulaire centrale. L'analyse prend en compte d'une part, l'effet des paramètres géométriques et mécaniques liés au patch et l'adhésive et d'autre part, l'effet du vieillissement de l'adhésif et du composite sur la qualité de la réparation par la détermination des différentes contraintes dans le patch et l'adhésive. Les propriétés mécaniques de l'adhésif époxyde bi-composant type ADEKIT-A140 et du composite carbone/époxyde ont été déterminées sous l'effet de l'absorption d'eau après vieillissement en immersion dans l'eau à différentes températures 20°C, 40°C et 60°C.

Enfin, une conclusion générale récapitule les points clés de ce travail.

CHAPITRE I

PARTIE A : TECHNIQUE DE REPARATION PAR PATCH COMPOSITE.**I.A.1.Introduction**

Comme toutes les structures mécaniques, les structures composites peuvent être soumises à des chocs et à des impacts bas vitesses qui sont souvent de nature accidentelle. Les endommagements engendrés peuvent alors se propager jusqu'à provoquer la rupture prématurée de la pièce, ce qui peut s'avérer très dangereux. Mais dans de nombreuses applications, le coût élevé des structures complexes ne permet pas l'échange systématique des éléments endommagés. On peut alors envisager la réparation comme une bonne alternative économique et mécanique.

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...).

Le point faible du renforcement par matériaux composites réside dans la colle qui permet de solidariser le renfort au substrat. En effet, 53% des défaillances constatées dans les structures aéronautiques ainsi réparées sont dues à la colle. Ces défaillances sont essentiellement dues au transfert d'effort du substrat vers le patch composite [1]. Cette zone de transfert d'effort entraîne en effet un pic de cisaillement à proximité du bord libre du patch composite. Le calcul des distributions de contraintes est donc un point important pour proposer une solution de renforcement adaptée. Plusieurs modèles ont été développés sous certaines hypothèses comme Volkersen [2] ou Goland et Reissner [3] par exemple. Ces modèles permettent de calculer quelques solutions des champs de contraintes dans la colle et dans le composite [4]. Plus récemment, ces théories ont été raffinées, en intégrant, par exemple, de grands déplacements [5], le comportement élastoplastique de la colle [6] ou de nouvelles hypothèses sur la distribution des contraintes dans l'épaisseur [7]. D'autres apports peuvent être cités comme l'influence de la géométrie du bord libre [8] ou encore l'étude d'adhérents épais [9]. Il est important de noter que de telles théories sont unidirectionnelles, au sens où la structure renforcée est soumise à des conditions de chargement simples et que les contraintes sont calculées suivant un modèle de poutre renforcée. Les structures renforcées sont cependant plus complexes. Par exemple, les structures aéronautiques réparées ou renforcées par patches composites

sont typiquement des structures bidimensionnelles soumises à des états de contraintes plus compliqués que les tests usuels de cisaillement de joints collés [10-11].

La technologie de réparation des structures endommagées a progressé considérablement et est actuellement largement exploitée surtout en aéronautique de par les avantages qu'elle fournit. 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. De ce fait, des travaux antérieurs sur la réparation par patchs composites ont servi de point de départ. Ce chapitre, a pour but de présenter quelques-uns de ces travaux qui concernent la réparation des structures endommagées avec des matériaux composites. En effet, grâce à leurs propriétés mécaniques spécifiques élevées et à leur diversité, les matériaux composites sont de plus en plus utilisés pour réparer des structures aéronautiques vieillissantes [11].

I.A.2. Mécanismes de réparation par patch composite

I.A.2.1. 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 [12-16] car cette dernière est souvent le maillon faible dans une réparation. En effet, elle est souvent à l'origine des défaillances du patch composite [17] 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.1 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 ;
- σ_{xx}^p et σ_{xx}^s représentent les contraintes longitudinales suivant x du patch composite et du substrat respectivement;
- σ_{xz}^a représente la contrainte de cisaillement de la colle ;
- σ_{xx}^∞ 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.1 représente les principaux mécanismes qui entrent en jeu lors du renforcement d'une structure par matériaux composites. La contrainte longitudinale dans le patch σ_{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 σ_{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 [15,19]. Les principaux résultats de ces études sont rappelés ici. Le modèle est développé suivant la direction x . La figure I.2 représente l'équilibre représentatif du patch composite.

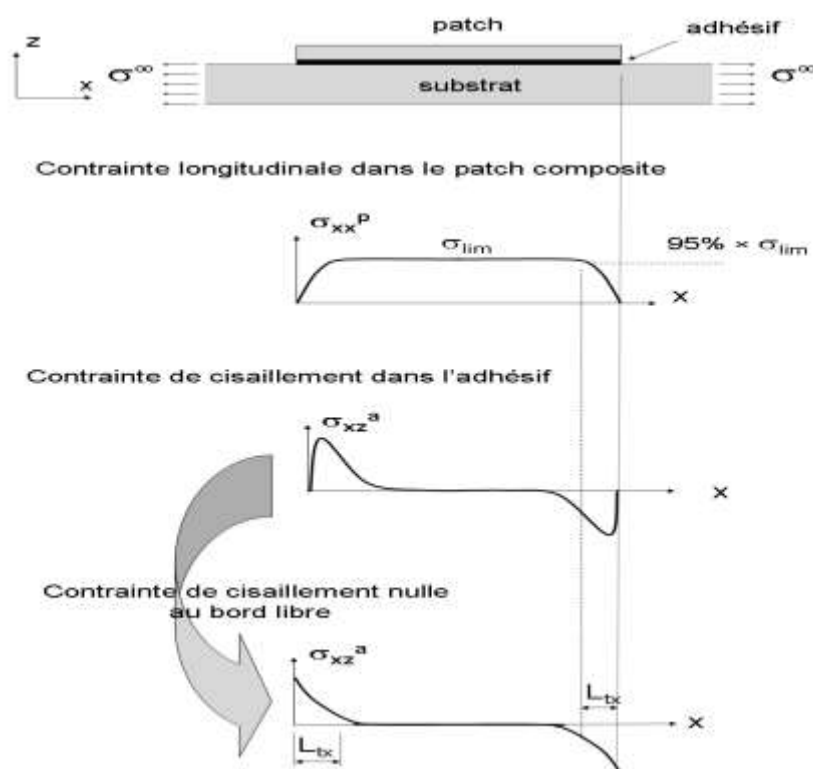


Figure I.1 : Modèle unidimensionnel d'une structure renforcée par un patch composite [12].

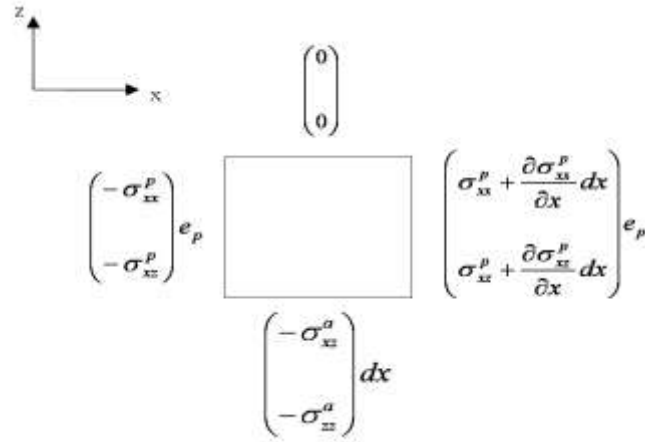


Figure I. 2 : Equilibre représentatif du patch composite [3-4].

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 :

$$\sigma_{xx}^p(x) = C_1 \cosh(\sqrt{\xi}x) + C_2 \sinh(\sqrt{\xi}x) - \frac{\chi}{\xi} \tag{I.4}$$

Avec les conditions aux limites précédentes, C_1 et C_2 peuvent être calculées. σ_{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 $\sigma_{xz}^a(x)$ dans la colle constitue un point important lors de l'étude du renforcement par patchs composites. La distribution du déplacement longitudinal du composite $u_x^p(x)$ 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 patchs 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.A.3 Optimisation de la forme du patch

Certaines études ont été réalisées sur la forme du bord libre du patch pour limiter le pic de contrainte de cisaillement dans la colle [19]. Ces travaux ont pour but d'évaluer l'influence de la forme des bords libres du patch composite sur la diminution de ces pics (Fig. I.3). Colombi P., Bassetti ont montré que des patches présentant une épaisseur dégressive amoindrieraient les contraintes dans la colle car la singularité géométrique est alors moins marquée. Ils ont par exemple optimisé l'angle et la longueur de la diminution d'épaisseur du patch composite. D'autres travaux ont été menés sur l'optimisation de la forme du patch composite [19]. La Figure I.4 présente ainsi plusieurs formes de patches étudiées. Des travaux récents ont montré que les patches composites arrêtant au mieux la propagation des fissures sont les patches composites en forme d'étoile

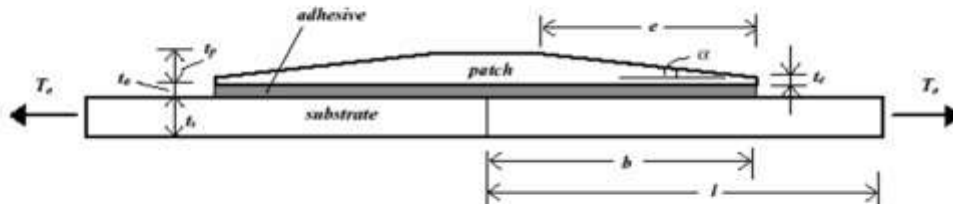


Figure I.3 : Patch composite avec une épaisseur dégressive [19].

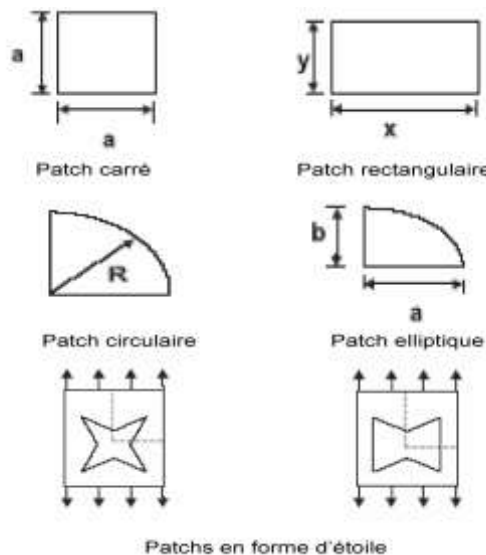


Figure 1.4 : Diverses formes de patches composites [19].

II.A.4 Pontage de fissure

Plusieurs études numériques ont été effectuées afin d'analyser le comportement des structures réparées par patches composites. Ces patches viennent se coller sur la zone endommagée afin de

ponter des fissures existantes. La Figure I.5 montre une structure fissurée et renforcée par un patch composite et le maillage associé au modèle mécanique. Le but de cet exemple est d'étudier l'influence du patch composite sur la propagation de la fissure.

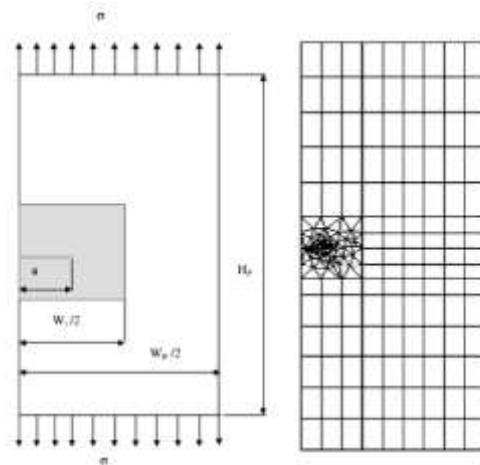


Figure. I.5 : Structure fissurée et renforcée par un patch composite [19][34].

Le patch composite a pour conséquence de rigidifier la structure et de retarder la propagation de la fissure. La Figure 1.6 représente le facteur d'intensité K_I en fonction de la longueur de fissure pour une plaque réparée et non réparée avec patch.

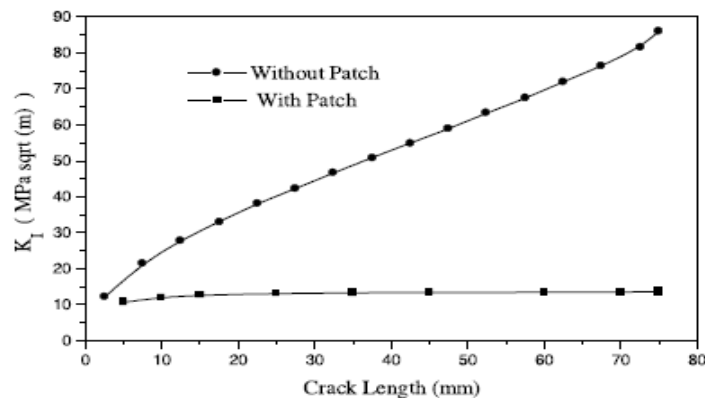


Figure I.6 : Evolution du facteur d'intensité de contrainte K_I en fonction de la longueur de fissure [20] [34].

Le patch composite a tendance à diminuer nettement K_I par rapport à une structure non renforcée, ce qui prolonge ainsi la durée de vie de la structure. Afin de valider ou non des modèles théoriques ou numériques, plusieurs études expérimentales sur la réparation par patches composites ont été

effectuées. La figure I.7 représente un essai classique qui consiste à étudier le comportement en fatigue d'une structure fissurée, puis renforcée par un patch composite.

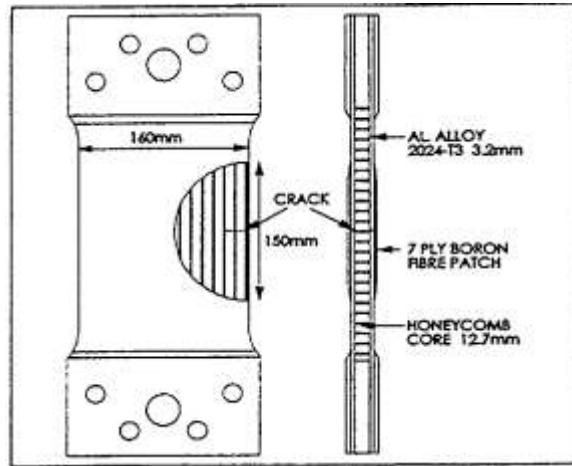


Figure. I.7 : Exemple d'essai sur un matériau sandwich et renforcée par un patch composite [21].

La figure 1.8 représente des résultats typiques issus de cette étude expérimentale. Elle représente le logarithme du rapport de l'incrément de la longueur de fissure da sur l'incrément du nombre de cycles dN en fonction du logarithme du facteur d'intensité K .

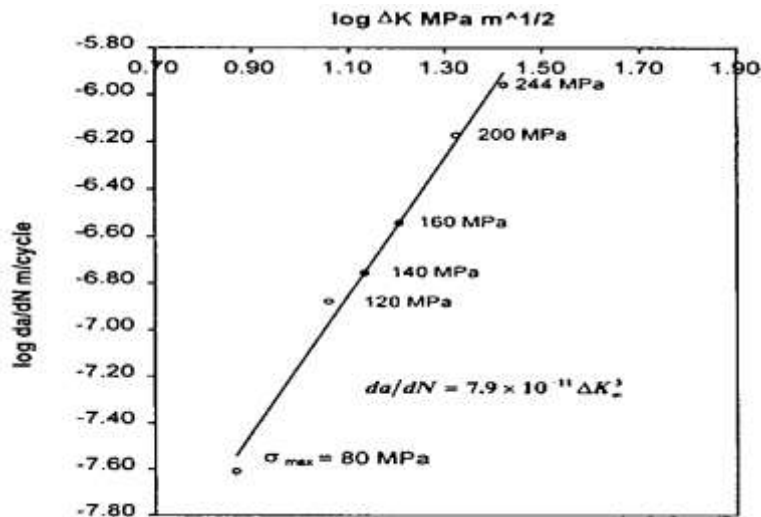


Figure I.8 : Résultats d'un essai de fatigue sur une éprouvette fissurée et renforcée par un patch composite [22].

I.A.5 Type de renfort

La figure I.9 présente les deux types de patches, l'un étant riveté, l'autre collé.

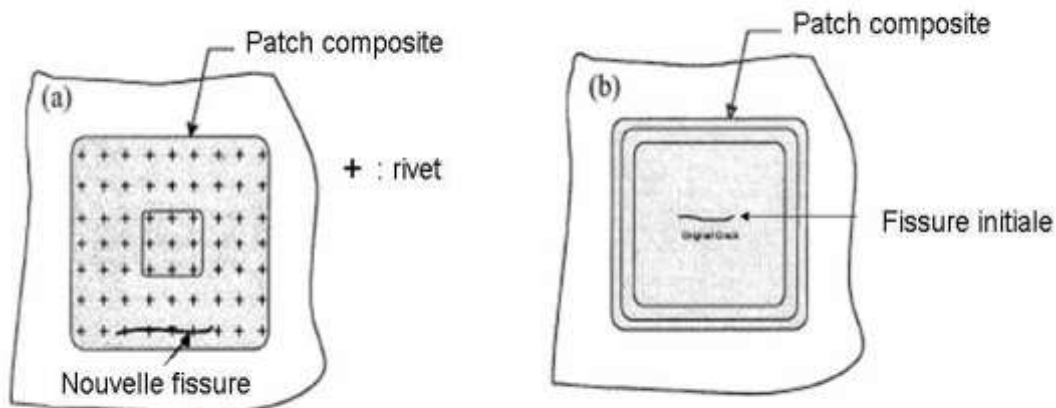


Figure. I.9 : Exemples de patches riveté et collé [23].

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

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

Au vu de ces résultats, l'utilisation de patches collés a été préférée à l'utilisation de patches rivetés.

I.A.5.2 Patch composite et patches métalliques

Les avantages des matériaux composites à fibre de graphite/époxy et de bore/époxy pour les patches en comparaison avec les alliages métalliques incluent [24] :

- Rigidité élevée permettant l'utilisation de patch de faible épaisseur (important pour des réparations externes) et permettant d'appliquer le renfort dans les directions désirées ;
- Déformation élevée à la rupture et durabilité sous des chargements cycliques permettant de réduire le risque de décollement du patch.
- faibles densités.

- Excellente malléabilité (formabilité) permettant une fabrication moins coûteuse des patches de formes complexes.
- Absence de traitement de surface pour les patches à base de matériaux composites.

Dans la plupart des réparations, l'utilisation de patch unidirectionnel est optimale puisque ceci fournit l'efficacité de renfort la plus élevée dans la direction de chargement, et minimise la rigidité inutile dans d'autres directions. Cependant, dans certains cas sous chargement bi axial élevé et d'un changement de l'orientation probable de la fissure, il est indispensable de fournir le renfort transversal et/ou de cisaillement. Ceci peut être réalisé en employant un stratifié avec un nombre approprié de plis de $\pm 45^0$ et de 90^0 .

L'inconvénient principal d'employer graphite/époxy et de bore/époxy résulte de la différence des coefficients de dilatation thermique entre le composite et le métal [2]. Les contraintes résiduelles sont de tension dans le métal et de compression dans le composite. Ces contraintes sont particulièrement nuisibles quand les températures de traitement des adhésifs sont élevées et les températures de fonctionnement sont très basses, en général de -10 à -50°C . Par ailleurs, le chargement thermique cyclique de la région réparée engendre des contraintes provoquant la propagation de la fissure, indépendamment de la contrainte externe.

La nécessité d'éviter le problème des contraintes résiduelles est à l'origine du développement de l'utilisation des patches à base de GLARE [25,26] pour la réparation des structures de fuselage à de faibles épaisseurs. Le GLARE est un stratifié d'alliage d'aluminium à fibre de verre renforcé par l'époxyde. Les matrices d'époxyde agissent également comme un adhésif qui colle les couches d'alliage d'aluminium. Le GLARE possède un coefficient de dilatation thermique semblable à ceux des alliages d'aluminium. Ce matériau est doté d'une excellente résistance à la propagation de fissure par fatigue comparée à celles des matériaux d'alliages d'aluminium. Le GLARE est moins approprié à la réparation des structures épaisses puisqu'il a un module de Young inférieur à ceux des alliages d'aluminium ; sa formabilité est limitée comparée aux composites à base de fibre. ARALL (Aramid Reinforced-Aluminium Laminate, stratifié d'aluminium renforcé par Aramide) est un matériau composite de fibres d'aramide de rigidité plus élevée par rapport aux fibres de verre. Bien que L'ARALL soit caractérisé par une forte rigidité, sa résistance à la fatigue est faible si on le compare au GLARE.

En dépit des soucis des contraintes résiduelles, les matériaux composites graphite/époxy et de bore/époxy offrent d'excellentes propriétés pour des patches ou des renforts. Cependant, bore/époxy est généralement le plus utilisé, en raison de ces avantages :

- Combinaison efficace de force et de rigidité fournissant un bon renforcement ;
- Coefficient de dilatation thermique élevé atténuant le problème de contraintes résiduelles ;
- Une basse conductivité électrique permettant :
 - D'éviter la corrosion galvanique du métal,
 - D'optimiser l'utilisation du CND, détecter et surveiller les fissures sous le patch.

Cependant, graphite/époxy est choisi si des patches de bas rayons de courbure (Moins de 30mm) sont exigés ou si le coût du bore/époxy (élevé par rapport graphite/époxy) est important.

I.A.6 Matériaux de réparation

I.A.6 .1 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 [26].

- **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) [2]. 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 [2].
-

- **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.

La connaissance approfondie des propriétés des matériaux utilisés est préalablement nécessaire. Le tableau I.1 présente la comparaison des propriétés mécaniques et thermiques des différents matériaux de renforcement et de réparation.

Matériaux	E (GPa)	G (GPa)	$\epsilon_C \cdot 10^{-3}$	$\epsilon_F \cdot 10^{-3}$	D (g/cm ³)	α (°C x 10 ⁻⁶)
Alliage d'AL 7075 T6	72	27	6.5	3.3	2.8	23
Alliage d'AL 2024 T3	72	27	4.5	3.3	2.8	23
Alliage de Titane 6Al/4V	110	41	8.8	6.8	4.5	9

Bore/époxy (Unidirectionnel)	208 max 20 min	7	7.3	7	2	4.5min 23max
Graphite/époxy (Unidirectionnel)	148max 12min	5	13	12	1.6	-0.3min 28max
Stratifié d'ALGLARE 2	65	-	5.2	3.3	2.5	≈ 15
Stratifié d'ALARALL 3	68	-	8.9	3.3	2.3	≈ 16

E : module de Young (max dans la direction des fibres et min dans la direction transversale), G : module de cisaillement. ϵ_C : Déformation critique (pour les composites c'est la déformation à la rupture et pour les métaux c'est la déformation à la limite plastique). ϵ_F : Déformation à la fatigue (à l'initiation de la fissure sous 10^6 cycles), D : densité et α : Coefficient d'expansion thermique.

Tableau I.1 : Propriétés physiques et mécaniques des différents matériaux de réparation [26].

I.A.6.2 Adhésif

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 (hot-melts), 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. 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. Le traitement des cyanoacrylates dus à la présence des molécules d'eau sur les substrats déclenchent la polymérisation. Ils ont une excellente résistance au cisaillement mais une mauvaise résistance aux forces de pelages, une faible tenue à la température, une dégradation par l'humidité et une faible mouillabilité de surface. Les contraintes de retrait relativement élevées minimisent leur utilisation dans des réparations collées.

Les polyuréthanes ont de bonnes caractéristiques de dureté et de flexibilité, mais de faibles résistances au cisaillement et à la température, exigées pour des réparations collées. Les adhésifs phénoliques étaient les adhésifs structuraux originaux utilisés dans la construction aéronautique mais très fragiles jusqu'à l'introduction des composés phénoliques modifiés (les adhésifs "Redux") ; ceux-ci ont une plus haute résistance au pelage. [2],[26].

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 [26]. Le durcissement des époxydes soit à froid (entre 20 min et 16 h selon les formules) pour adhésifs époxydes bi composants ou à chaud (10 à 30 min) pour des températures comprises entre 120⁰C et 175⁰C) pour les adhésifs époxydes mono composant. Ils comportent une faible résistance au pelage sauf pour les formules spéciales, et un prix relativement élevé de l'ordre de 5 à 20 €/kg selon les performances (moins chers que les polyamides à hautes températures) [26].

I.A.6.3 Exemples d'applications de première réparation par patch

Dans les années 70, la RAAF (Royal Australian 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 I.2 résume les principaux travaux effectués [22,29].

Avion	Type de dommages	Commentaires
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
F 111	Corrosion	En service depuis 1980

Tableau I.2 : Exemples de réparations par patches composites effectuées par la RAAF d’après [22,29].

En Australie, l’utilisation de patches composites est devenue une opération classique afin de réparer des zones endommagées par la fatigue ou la corrosion. Les Figures I.10, I.11 et I.12 en montrent quelques exemples. Sur la Figure I.10, l’avion représenté est un F 111. 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.11 représente les dommages ainsi que le patch composite utilisé. Des essais de fatigue ont été effectués et ont montré que le patch composite diminuait fortement la propagation des fissures déjà présentes [28]. Cette solution a été validée par la RAAF et plus de 180 avions Mirage ont été réparés par cette procédure. Le dernier exemple concerne un endommagement du cette fois-ci à la corrosion et concerne l’avion Hercules. Les dommages ainsi que le patch composite sont situés à l’intérieur de l’aile (Fig. I.12). Cet exemple est intéressant du fait de sa mise en œuvre pratique. La procédure de réparation antérieure consistait à riveter des plaques d’aluminium sur la partie endommagée. Elle nécessitait l’intervention d’un ouvrier pendant six jours. L’utilisation de patches composites a été intégrée aux processus de réparation.

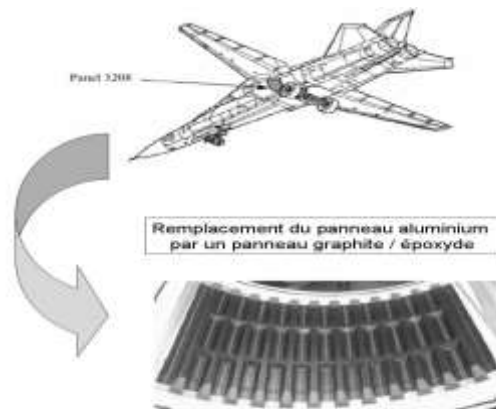


Figure I.10 : Exemple de réparation sur un avion F 111 d’après [22].

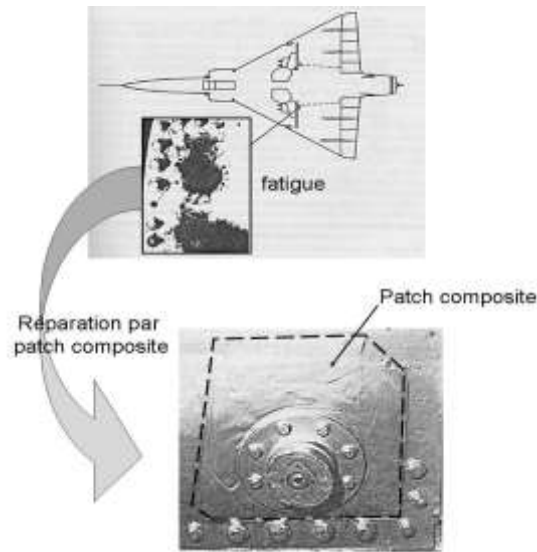


Figure I.11 : Exemple de réparation sur un avion Mirage d'après [22].

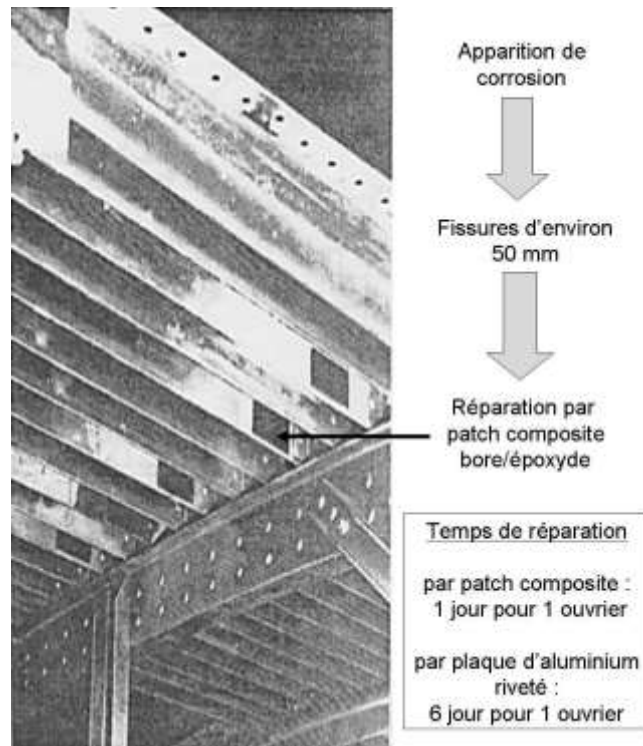


Figure I.12 : Exemple de réparation sur un avion Hercules d'après [22].

Les renforcements et les réparations des structures métalliques par patch à base de composite peuvent être considérés comme une méthode rentable et souple. Les renforts ou les patches sont

idéalement mis en application in situ, évitant ainsi de recourir au démontage coûteux des structures d'avions.

Des applications potentielles peuvent être récapitulées comme suit :

- o ***Réduire l'intensité des contraintes***
 - Dans les régions présentant des fissures de fatigue ;
 - Dans les régions présentant des fissures dues aux corrosions ;
 - En augmentant la tolérance à l'endommagement (fournir les caractéristiques d'une propagation lente des fissures) afin de prolonger la durée de fonctionnement de l'avion ou en cas de structure contenant plusieurs sites de dommages.
- o ***Restauration de la force et de la rigidité***
 - Après élimination des dommages de corrosion ;
 - Après suppression des impuretés ;
 - Après remise en forme des corps métalliques pour réduire les concentrations de contraintes ;
 - Après le dommage causé par la chaleur.
- o ***Renforcement des régions à conception médiocre***
 - Pour réduire la déformation aux zones de concentrations de contraintes ;
 - Pour réduire la vibration et empêcher des dommages acoustiques.

I.B.1 Introduction

Le mot durabilité ayant la même racine que durée, étudier la durabilité ne revient pas systématiquement à estimer la durée de vie d'un système. Il s'agit en réalité de vérifier que l'assemblage assurera une fonction pérenne au cours de sa vie, et cela passe par une conservation de ses propriétés voire un abatement acceptable sous l'effet du vieillissement [28]. La durabilité des assemblages structuraux est un problème récurrent, d'une importance capitale pour les industriels du secteur aéronautique, en conditions de service, les assemblages collés structuraux sont généralement soumis à deux types de sollicitations qu'elles soient statiques ou périodiques : les contraintes mécaniques, les sollicitations environnementales, principalement l'humidité et la température. L'effet individuel ou combiné de ces sollicitations modifie non seulement le comportement de l'adhésif de l'assemblage mais agit également sur les interactions inter faciales et les forces d'adhésion. Ces sollicitations sont donc les facteurs de la diminution de la résistance mécanique des assemblages, de la perte de la fonction adhérence et éventuellement d'une diminution de la durée de vie des assemblages collés [29]. L'expérience de ces dernières années souligne l'importance des effets de l'environnement (humidité et température) sur les propriétés mécaniques des matériaux et la stabilité de leurs performances à long terme (vieillessement). L'eau agit à l'interface milieu extérieur/polymère, mais aussi au cœur du polymère, ce qui est possible grâce au déplacement des molécules d'eau dans la matière, appelé phénomène de diffusion. Au cours d'un vieillissement hygrothermique, la présence d'eau au sein des matériaux provoque une détérioration des propriétés mécaniques et entraîner ainsi une dégradation irréversible des propriétés des matériaux [30].

I. B. 2.Généralités sur les types de vieillissement

On distingue dans la littérature plusieurs types de vieillissement, le vieillissement étant considéré comme une évolution lente des propriétés du matériau à partir d'un état de référence, résultant de son instabilité propre ou de l'environnement. Cette évolution peut concerner la structure chimique des macromolécules, la composition du matériau (pénétration ou départ de petites molécules), ou son état physique (fraction de volume libre, contraintes internes). Il est reconnu qu'en dessous de sa température de transition vitreuse (T_g), un polymère n'est généralement pas dans un état d'équilibre thermodynamique. En effet, au cours d'un refroidissement, le matériau se fige avec un excès de volume libre et d'enthalpie au passage de la zone de transition vitreuse. Le vieillissement physique résulte alors d'une restructuration progressive des molécules dans le polymère vers une configuration plus stable. De nombreuses études dans ce domaine menées sur polymère et sur composites à matrice organique ont montré que les propriétés dépendant de la mobilité moléculaire sont significativement affectées. Contrairement au le vieillissement physique, le vieillissement chimique se réfère à un changement irréversible dans le réseau moléculaire dû à des réactions chimiques. Aux températures considérées, les processus chimiques les plus importants concernent les réactions de coupure de chaînes, de post-réticulation ou d'oxydation. Les phénomènes de post-réticulation ou de thermolyse impliquent respectivement une augmentation ou

une diminution de la densité de réticulation. Cette variation s'accompagne généralement une de la T_g et des propriétés mécaniques. Ce type de vieillissement modifie peu la forme des courbes de traction des polymères, mais joue un rôle important sur les propriétés à rupture et notamment sur l'allongement à rupture qui diminue avec le temps de vieillissement [28].

I.B.3. Les facteurs influençant la durée de vie des joints collés

Même pour un joint collé présentant des propriétés optimales à l'élaboration, il est impossible de garantir le maintien de ces dernières en fonctionnement. En effet, en service les joints sont soumis à des sollicitations qui peuvent l'endommager, ce sont :

- ✓ La température,
- ✓ L'application d'une contrainte mécanique,
- ✓ L'environnement, l'humidité dans la plupart des cas.

Ce sont les trois facteurs d'endommagement de l'adhésif lui-même en tant que polymère, mais aussi du joint. Dans le cas du joint, les mécanismes d'endommagement sont plus complexes que dans le cas de l'adhésif massique. Une fois au sein de l'assemblage, l'eau affaiblit la tenue du joint par une combinaison de mécanismes impliquant à la fois l'interface et l'adhésif lui-même. Comme l'eau, chacun des facteurs température et contrainte a, à lui seul, une action délétère sur la résistance mécanique des assemblages et peut conduire à une perte totale de l'adhérence [30].

I.B.4 Vieillissement hygrothermique

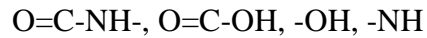
La nature plus ou moins polaire d'un polymère (selon les groupes chimiques le constituant) lui confère naturellement une sensibilité particulière pour des solvants polaires comme l'eau. Cette sensibilité se traduit par la pénétration de molécules du solvant dans le polymère ; on parle d'absorption. En raison de l'absence de toute structure cristalline, l'espace entre les chaînes moléculaires est important comparé à la taille des molécules d'eau. Ces dernières peuvent se déplacer dans les interstices. L'hydrophile se caractérise en pratique par la teneur massique en eau que le matériau peut atteindre à l'équilibre dans un milieu isotherme et à taux hygrométrique constant. Dans la littérature, on trouve en général deux approches du mécanisme d'hydrophilie, qui peuvent être recombinaisonnées : l'approche « volumique » et l'approche mettant en jeu des interactions entre polymère et molécules d'eau grâce aux liaisons hydrogène.

Approche structurale

Suivant la polarité des groupements chimiques constituant le polymère, ce dernier sera plus ou moins susceptible d'absorber de l'eau. On peut classer les groupements suivant leur polarité :

- Les groupements très peu polaires sont les groupements hydrocarbonés comme
-CH-, -CH₂-, -CH₃, les cycles aromatiques.
- Les groupements modérément polaires sont :
-O-, O=C-, O=C-O-, -C.N.

- Les groupes polaires susceptibles de créer une liaison hydrogène avec l'eau sont :



Une étude portant sur des mesures d'absorption et de désorption puis de résonance magnétique (RMN) permet de connaître les caractéristiques de liaison de l'eau avec l'époxy. Il apparaît que les molécules d'eau se lient à la résine à travers des liaisons Hydrogène de deux types qui dépendent de l'énergie d'activation :

- ◆ Type I : Une molécule d'eau forme une liaison H simple. Elle possède une énergie d'activation faible (10 kcal/mol) et pourra se séparer facilement de la résine.
- ◆ Type II : Une molécule d'eau forme des liaisons H multiples, possède une énergie d'activation plus élevée (15kcal/mol) et aura plus de mal à se séparer.

La figure IV-2 suivante illustre ces deux types de liaison. Les liaisons de type I sont les plus nombreuses. Des durées d'immersion plus longues et des températures plus élevées favorisent la formation de liaisons de type II.

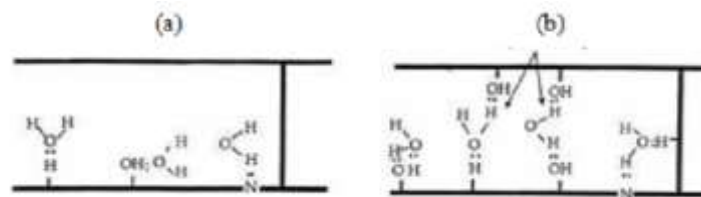


Figure I.13: Liaisons possibles de molécules d'eau avec un réseau époxy [[31].

- : Les molécules d'eau forment une liaison Hydrogène avec la résine. (b) : Elles forment plus d'une liaison hydrogène et ont une énergie d'activation plus élevée.

I.B.4 .2 Approche volumétrique

Le « volume libre » est assimilée à la place laissée entre les molécules et qui n'est pas occupée par les vibrations des atomes des constituants. En simplifiant le concept de volume libre, cette approche évoque la présence possible de molécules d'eau dans les volumes disponibles entre les chaînes macromoléculaires du réseau 3D.

I.B.4 .3 Propriétés mécaniques spécifiques

➤ Phénomènes visqueux

La réponse d'un polymère à une sollicitation est toujours décomposée en une partie instantanée qui peut être élastique et/ou plastique et une partie différée [31]. On parle alors de visco-élastoplasticité. Les matériaux dits viscoélastiques ont, entre autre, la particularité de continuer à évoluer dans le temps même lorsqu'ils ne sont plus sollicités.

➤ Plasticité

Le phénomène de plasticité se caractérise par l'apparition de déformations permanentes lorsque le niveau de sollicitation dépasse un certain seuil. Dans le domaine plastique, plusieurs phénomènes coexistent. L'écrouissage concerne la modification du seuil de plasticité due à la charge appliquée. Enfin pour des sollicitations extrêmes, l'endommagement se caractérise par l'apparition de ruptures locales qui en coalesçant vont provoquer la ruine du matériau. Ces phénomènes sont décrits par des lois parfois couplées qui permettent de décrire l'évolution du comportement du matériau [30].

➤ **Transition vitreuse**

Pour simplifier, un polymère possède deux états physiques différents, un état vitreux et un état caoutchoutique. Dans l'état caoutchoutique, les macromolécules ont une forte mobilité moléculaire et peuvent se réorganiser rapidement, suite à une sollicitation, grâce à la quantité de volume libre relativement importante. Dans l'état vitreux c'est le contraire, les molécules ont beaucoup de difficultés à trouver une position d'équilibre à cause d'une mobilité moléculaire faible et d'une petite quantité de volume libre. On dit que l'état est métastable.

Le passage d'un état à un autre est appelé transition vitreuse et se caractérise par une température de transition, un changement de module et une augmentation du volume spécifique (Figure I.14). Quand la température diminue, cette transition s'apparente à un phénomène de remise en ordre partiel à courte distance et s'accompagne d'une diminution de volume spécifique et d'une augmentation du module d'Young. Les macromolécules s'arrangent un peu mieux entre elles et le volume libre diminue. Cette transition vitreuse est fortement dépendante des conditions environnantes du matériau.

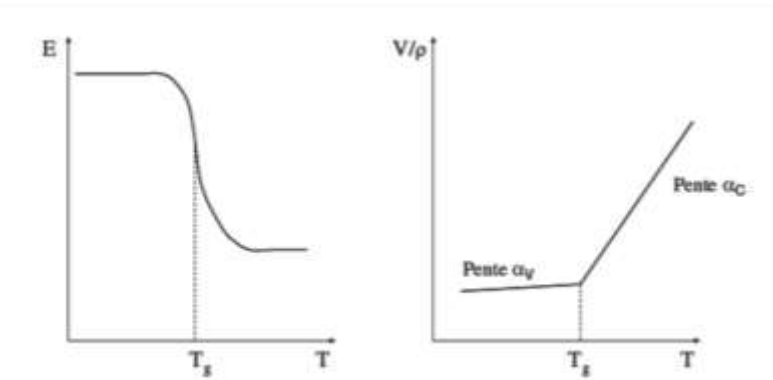


Figure I.14 : Variation du module d'Young et du volume spécifique lors de la transition vitreuse [32].

➤ **Critère de rupture**

Dans la littérature, on trouve un grand nombre de critères de rupture adaptables aux matériaux polymères. Les notions de critère de rupture et de critère de plasticité sont proches, aussi de nombreux critères peuvent être employés pour juger de l'un ou l'autre des événements. Il suffit pour cela de bien choisir le niveau du critère. Afin de rester cohérent, seuls ceux qui sont couramment employés pour l'étude des assemblages collés seront présentés. Il existe, de façon simple, deux types de critères qui sont basés soit sur l'état de contraintes de la couche de colle, soit sur l'état de

déformation de cette dernière. Un critère de rupture peut simplement être défini par un niveau de contrainte qu'il ne faut pas dépasser. On sait que dans un assemblage collé, le pelage est à éviter, aussi on peut très simplement définir le critère comme un niveau de contrainte de pelage en bout de recouvrement à ne pas dépasser. Le critère de Von Mises, qui tient compte du cisaillement, consiste à définir une contrainte équivalente maximum et si à un endroit donné la contrainte locale dépasse cette valeur, on considère qu'il y a rupture. D'autres critères s'attachent à proposer des descriptions plus réalistes des phénomènes physiques rencontrés dans les nouveaux types d'adhésifs. On sait par exemple que pour les époxy, la déformation volumique est très importante dès qu'on sollicite le matériau ce qui implique un effet de la pression hydrostatique non négligeable. Ainsi les ruptures en traction et en compression n'interviennent pas au même moment [33].

I.B.5.L'eau et ses mécanismes de diffusion

L'eau est un des facteurs principaux agissant sur le vieillissement des adhésifs, eau présente une grande permittivité (fortes paires d'ions contribuent aux forces inter faciale) mais aussi parce qu'elle a une grande tension de surface (ceci agit sur la formation de liaisons faibles entre l'adhésif et le substrat métallique). Le principal effet macroscopique de la pénétration de l'eau dans un assemblage collé est la chute importante des propriétés mécaniques, c'est-à-dire des contraintes à la rupture et des modules d'élasticité en cisaillement et en traction.

I.B.5.1 Diffusion de l'eau dans un adhésif L'évaluation de l'affaiblissement de l'assemblage nécessite tout d'abord l'étude du comportement au vieillissement de l'adhésif massique, à travers la détermination des cinétiques d'absorption d'eau et la caractérisation des effets physiques et chimiques de l'eau sur le polymère. Le modèle le plus simple pour la diffusion d'un solvant (espèce diffusante) dans un solide est donné par la loi de Fick (1855). Le gradient de concentration du solvant induit un flux ϕ qui lui est proportionnel. C'est donc le moteur de la diffusion. La vitesse de diffusion est caractérisée par le coefficient de diffusion D. La première loi de Fick donnée par l'équation (I.10) suivante :

$$\bar{\phi} = -D \overline{\text{grad}C} \tag{I.10}$$

Ou D : coefficient de diffusion du milieu en mm²/s, C : concentration du solvant au sein du milieu.

Le signe négatif indique que le flux est dirigé des zones à concentration élevée vers celles à concentration plus faible. La quantité de matière diffusant dans la direction x au travers d'une unité de surface par unité de temps, est appelée le flux et est relié au gradient de concentration ($\partial c / \partial x$) par la première loi de Fick. La seconde loi de Fick fait intervenir le temps, On considère que l'eau pénètre librement et sans interaction avec les composant alors la seconde loi de Fick qui s'applique, et s'écrit :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] \tag{I.11}$$

Si la diffusion est unidirectionnelle dans la direction x, comme par exemple lors du phénomène de sorption dans un film fin, la seconde loi de Fick s'écrit plus simplement

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \tag{I.12}$$

Ces équations ont des solutions appropriées à des conditions aux limites données. La cinétique de diffusion est donnée par la résolution de l'équation (I.13). Aux temps courts, cette solution s'écrit:

$$\frac{M_t}{M_\infty} = \frac{4}{l} \left(\frac{Dt}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{I.13}$$

Où M_t est la masse d'eau absorbée au temps t , M_∞ la masse d'eau absorbée à saturation et l l'épaisseur de l'échantillon. Le coefficient de diffusion peut être déterminé expérimentalement, si la prise en diffusant ne dépasse pas 60% (partie linéaire de la courbe), par la tangente de la courbe

$$\frac{M_t}{M_\infty} = f \left(\frac{\sqrt{t}}{l} \right)$$

On en déduit le coefficient de diffusion D par la relation

$$D = \frac{\pi a^2}{16 M_\infty^2} \tag{I.14}$$

La courbe c 'est une fonction linéaire en début d'absorption et qui s'incurve au moment de la saturation, quand le matériau se met en équilibre avec l'environnement [34].

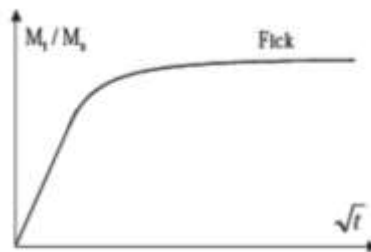


Figure I.15 : Courbe de diffusion de type Fick [34].

Où a : est la pente de la tangente à la courbe.

I.B.6 Conséquences de l'absorption d'eau

La pénétration des molécules d'eau dans le réseau peut induire simultanément plusieurs phénomènes, qui constituent globalement le vieillissement humide:

Une plastification du réseau (diminution de la température de transition vitreuse). En effet, l'eau va se fixer sur les sites hydrophiles du polymère et rompre des liaisons physiques inter ou intramacromoléculaires. Il en résulte une augmentation de la mobilité des chaînes, qui se traduit naturellement par un décalage de la température de transition vitreuse vers les basses températures. Le phénomène de plastification s'accompagne généralement d'une diminution importante des

propriétés mécaniques de l'adhésif (contrainte à la rupture, module d'élasticité), mais aussi d'une augmentation notable de la ductilité.

I.B.6.1. Un gonflement du réseau: la rupture des liaisons physiques conduit également à un relâchement général des mailles du réseau qui favorise encore l'insertion de nouvelles molécules d'eau et le gonflement global du polymère. Dans les joints adhésifs, ce gonflement n'est pas homogène et génère des contraintes mécaniques supplémentaires [34].

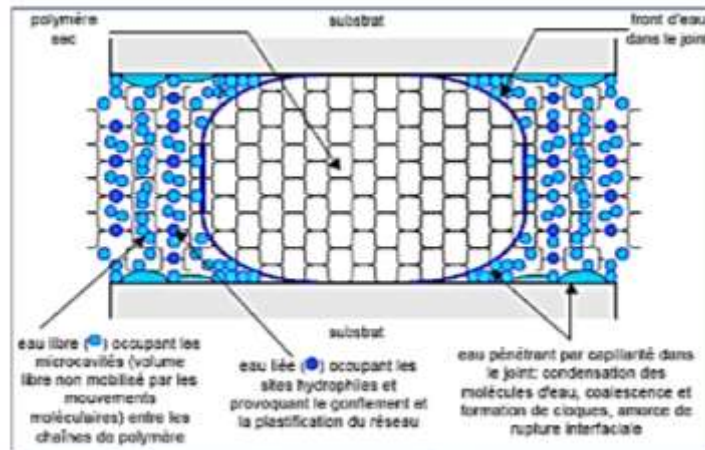


Figure I.16 : Schéma récapitulatif des différents modes de pénétration de l'eau dans un assemblage collé [30].

En effet, l'eau va se fixer sur les sites hydrophiles du polymère et rompre des liaisons physiques inter ou intramacromoléculaires. Il en résulte une augmentation de la mobilité des chaînes moléculaires qui se traduit naturellement par un décalage de la température de transition vitreuse vers les basses températures⁴⁶. Cette modification de propriétés viscoélastiques a été observée par [30]. Dans le cas d'un vieillissement d'un réseau modèle époxydiamine par immersion dans l'eau distillée à 70°C (cf. figure I.17).

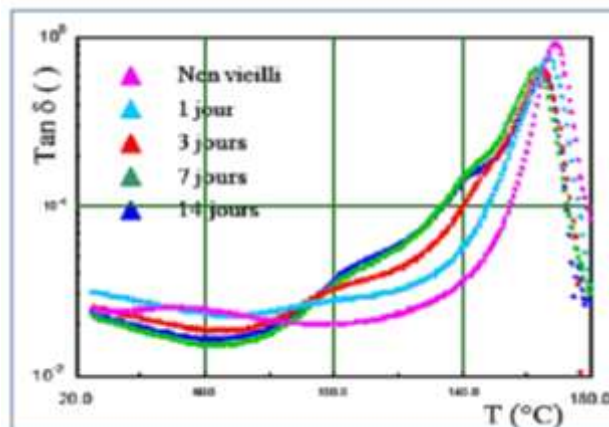


Figure I.17 : Evolution de tan δ en fonction du temps de vieillissement du réseau époxy massique [31]

Le phénomène de plastification s’accompagne généralement d’une diminution importante des propriétés mécaniques de l’adhésif (contrainte à la rupture, module d’élasticité), mais aussi d’une augmentation notable de la ductilité.

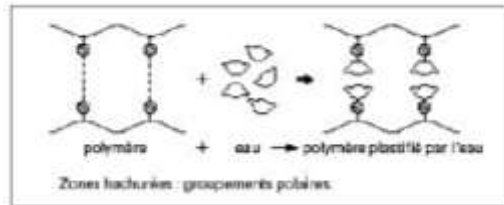


Figure I.18 : Plastification des polymères [31]

I.B.6.2 Au niveau de l’interface

La zone interfaciale entre le polymère et le substrat est une zone particulière où s’établissent des liaisons physiques ou chimiques polymère/substrat. Cette zone peut constituer une voie préférentielle de diffusion de l’eau par phénomène de capillarité. En effet, l’énergie de surface du substrat peut être assez élevée pour que les interactions eau/substrat se forment au détriment des interactions polymère/substrat.

Les risques de décohésion au niveau de l’interface seront donc plus importants (figure I.19).

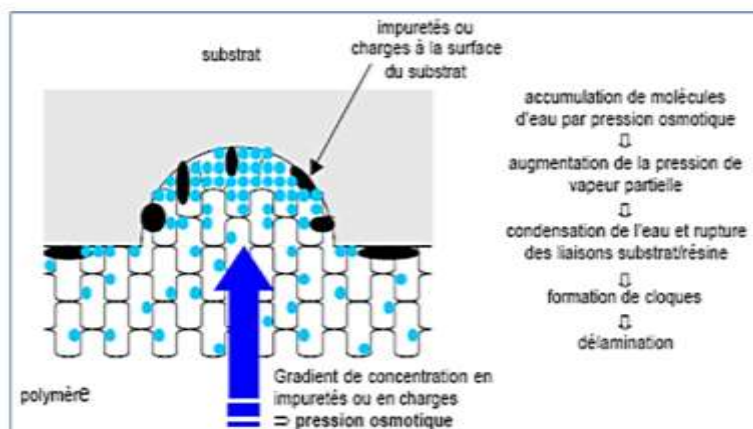
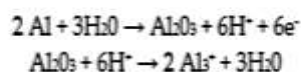


Figure I.19: Schéma montrant la formation de cloques au niveau de l’interface [30].

I.B.6.3 Au niveau d’un substrat métallique

La présence d’eau à l’interphase peut fragiliser la couche superficielle d’oxyde métallique du substrat. En particulier, quand les surfaces métalliques comportent un oxyde sacrificiel tel que l’oxyde d’aluminium, une réaction entre l’eau et cet oxyde se produit provoquant ainsi la séparation de l’oxyde de l’adhésif suivant la réaction:



Dans le cas d'une liaison aluminium époxy, il a en effet été démontré que la déstabilisation de la couche d'oxyde d'aluminium résultait d'un mécanisme de rupture alcaline résultant d'une extraction du durcisseur amine de la résine époxy.

II.B.6.4 Au niveau d'un assemblage

Pour déterminer l'évolution des propriétés mécaniques des assemblages dans un milieu humide, des tests mécaniques (pelage, clivage, torsion,...) sont généralement pratiqués sur des éprouvettes de collage vieilles pendant des durées variables (figure I.20)

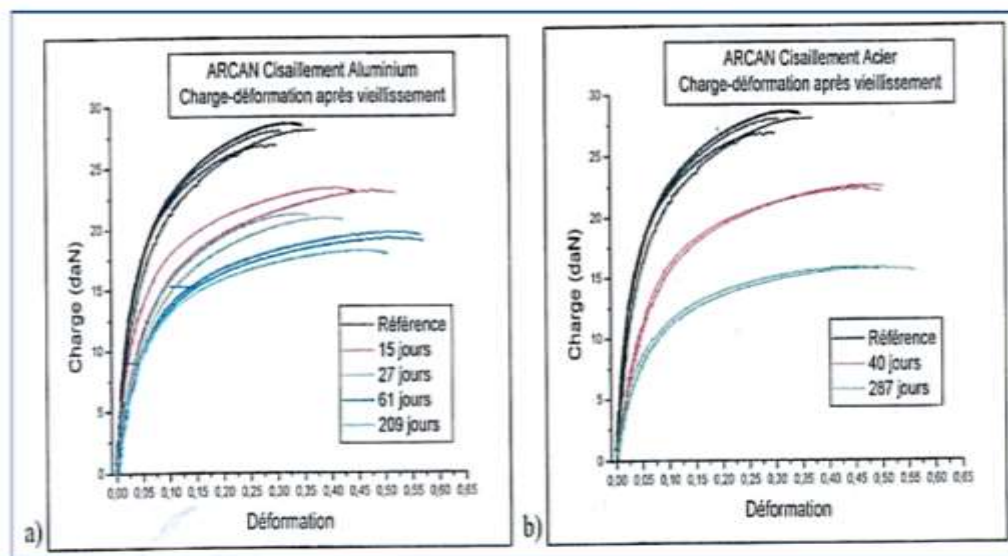


Figure I.20: Influence du vieillissement par immersion dans l'eau à 35°C des courbes charge-déformation obtenues en cisaillement sur un montage ARCAN dans le cas de joints métal/époxy [31].

Les résultats de ces essais sont corrélés aux résultats d'essais gravimétriques permettant de quantifier la contribution de la diffusion aux interphases par comparaison avec la cinétique associée au joint en masse.

Enfin, un suivi de l'évolution du faciès de rupture après vieillissement est également réalisé afin d'identifier la zone à l'origine de l'affaiblissement des propriétés de l'assemblage (joint en masse ou interphase). Les travaux ont permis d'identifier une évolution différente des faciès de rupture après vieillissement en fonction de la nature du substrat métallique. Dans le cas d'assemblages basés sur l'emploi de substrats aluminium, il semble que le faciès de rupture reste cohésif quelle que soit la durée du vieillissement (figure I.20). L'affaiblissement est donc uniquement dû à la chute de propriétés du polymère.



Figure I.21: Evolution du faciès de rupture après vieillissement hygrothermique d’assemblages avec des substrats en aluminium [32].

Dans le cas de l’acier, les observations sont très différentes. Ainsi, dès les premiers temps de vieillissement, une couronne extérieure de rupture adhésive apparaît où le métal est à nu. Cette zone croît avec la pénétration d’eau et pour les longs temps d’immersion, la rupture devient pratiquement essentiellement adhésive (figure I.21).

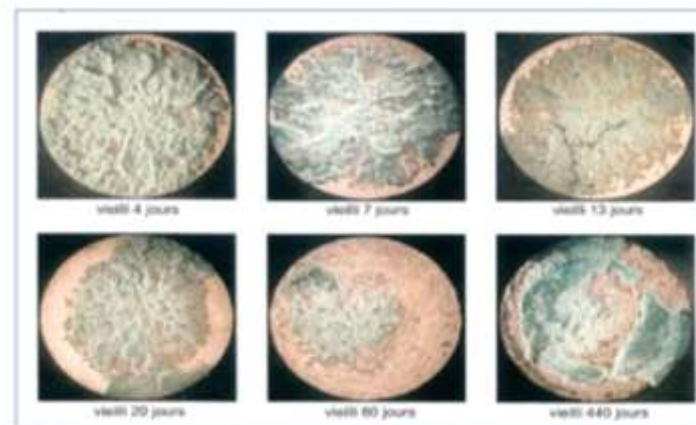


Figure I.22: Evolution du faciès de rupture après vieillissement hygrothermique d’assemblages avec des substrats en acier[33].

Une évolution similaire a été obtenue par [36] dans le cas d’assemblages cylindre/plaque en aluminium soumis à un cisaillement en torsion.

La zone importante de rupture cohésive observée à l’état non vieilli est considérablement réduite après 15 jours de vieillissement et a complètement disparu après 4 semaines d’immersion (cf. figure I.22).

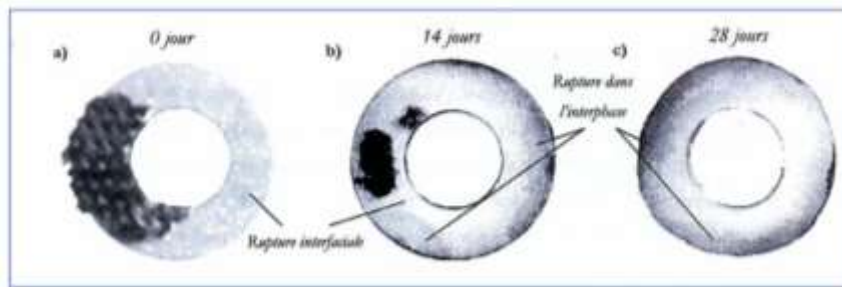


Figure I.23: Evolution de rupture d'un assemblage soumis à un cisaillement en torsion avant et après vieillissement en immersion [34].

Outre l'humidité, d'autres facteurs environnementaux sont susceptibles d'agir sur l'adhésif induisant des scissions des chaînes macromoléculaires et donc une dégradation du matériau:

- la chaleur peut catalyser des réactions chimiques internes qui vont rompre le squelette carboné, avec les mêmes conséquences que les réactions d'oxydation,
- le rayonnement ultraviolet, par son apport énergétique, aura les mêmes effets.

Cependant, dans le cas des assemblages collés, seuls les bords libres sont exposés à la lumière, et ceux-ci sont de faible épaisseur. Le rayonnement ultraviolet est donc négligeable.

Les phénomènes de dégradation thermiques seront plus limités n'intervenant qu'à très haute température dans le cas des thermodurcissables.

I.B.7 Méthodes d'étude du vieillissement de notre étude :

La méthode d'étude du vieillissement utilisée pour déterminer l'évolution des propriétés mécaniques de l'adhésif au cours de la durée de vieillissement, en immersion dans l'eau. Pour déterminer le comportement en d'une structure collée exposé à l'eau, il est primordial de connaître l'évolution des propriétés mécaniques de cette structure au cours de la durée de vieillissement afin de prévoir le comportement de l'assemblage en vieillissement. Donc il est nécessaire de connaître et comprendre le comportement des assemblages collés en vieillissement.

✚ Vieillissement de l'adhésif en immersion de l'eau :

Pour déterminer les propriétés mécaniques après le vieillissement d'une structure collée par adhésif, il est primordial de connaître l'évolution des propriétés mécaniques des substrats et de l'adhésif au cours de la durée de vieillissement afin de prévoir le comportement de l'assemblage en vieillissement. Les adhésifs ont été choisis ont basé sur leur utilisation dans la construction et la réparation des structures aérospatiales. On a choisis pour les joints adhésifs collés une couche d'adhésif époxyde bi-composant type ADEKIT A140 fait par la compagnie d'AXSON, et pour suivre le processus de diffusion de l'eau dans ce matériau et l'évolution de ces caractéristiques mécaniques. On a supposé que seul l'adhésif qui se manifeste en présence des molécules d'eau et qui absorbe l'eau puisque l'aluminium dans les cas générale sera revêtus avec une peinture. Les spécimens de l'adhésif ont été pesés avant et après l'immersion pour déterminer la masse d'eau absorbée par l'adhésif après chaque temps d'immersion. Les mesures de masse effectuées sur

l'adhésif ont été réalisées sur une balance numérique et les résultats sont représentés dans la figure I.24. Le taux d'absorption d'eau est donné par l'expression suivante :

$$A(\%) = \frac{M_t - M_0}{M_0} \tag{I.15}$$

Mt: la masse de l'échantillon après l'immersion Mo: la masse de l'échantillon avant l'immersion

Les essais de traction effectués sur les adhésifs massique après chaque durée d'immersion trouvés par Mr K. MADANI, ont donné les courbes de contrainte-déformation de l'adhésif présentés sur la figure I.24. Le module d'Young a été calculé suite à ces essais, et les résultats trouvés sont montrés dans le tableau I.3

Module d'Young E (Mpa)	2680	1450	1000	750	625	500
Module de cisaillement G	1030.77	557.70	384.61	288.46	240.38	192.31
Taux d'absorption $\Delta M/M_0$	0.000	0.010	0.0125	0.0175	0.020	0.040

Tableau I.3 : Les différentes propriétés mécaniques utilisées dans les calculs [35]

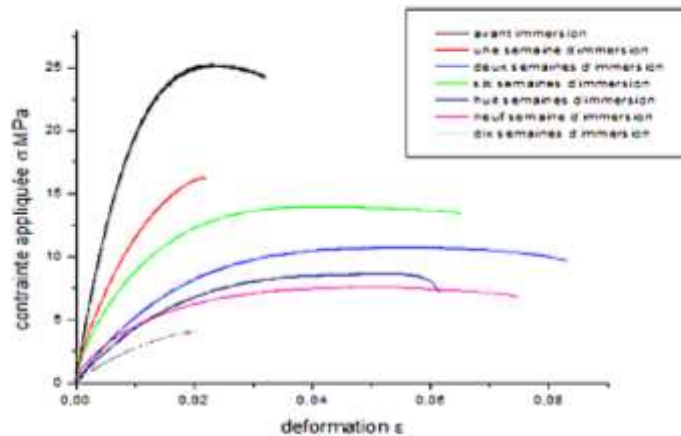


Figure I.24: Courbes caractéristiques contrainte-déformation de l'adhésif courbe moyen pour différents temps d'immersion [35].

Et à partir de ces résultats (Tableau I.3) on a tracé la courbe qui représente la variation des modules d'Young en fonction de taux d'absorption d'eau, pour expliquer l'effet de la présence des molécules d'eau sur la rigidité de l'adhésif.

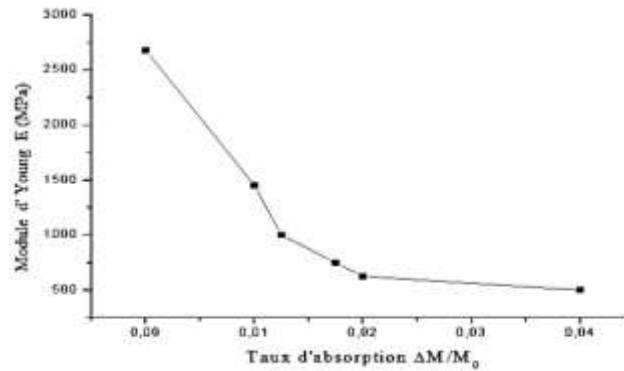


Figure I.25: Variation des modules d'Young en fonction de taux d'absorption d'eau [35].

On remarque une chute considérable de module d'Young avec l'augmentation de taux d'absorption d'eau, c'est-à-dire que la résistance mécanique de l'adhésif diminue de manière significative avec l'absorption d'eau, le temps d'immersion a un effet considérable sur le comportement mécanique de l'adhésif, on note aussi après certain période, la résistance de l'adhésif demeure pratiquement constante en raison de la saturation en absorption d'eau. L'analyse des résultats expérimentaux du vieillissement de l'adhésif permet de faire les remarques suivantes : L'absorption d'eau conduit à une chute importante de la rigidité et de la contrainte à la rupture. En revanche, l'allongement à la rupture augmente avec la teneur en eau, ce qui traduit l'augmentation de ductilité du matériau. Ces différents effets résultent du phénomène de plastification induit par les molécules d'eau. Une reprise en eau entraîne nettement une réduction de la résistance essentielles, et plus la durée de vieillissement est importante plus l'adhésif perd ses propriétés mécaniques et les caractéristiques de résistance essentielles.

I.B.8 .Rupture dans les assemblages de structures en composites collés

L'assemblage par collage présente de nombreux avantages par rapport aux techniques traditionnelles employées en aéronautique comme le rivetage ou le boulonnage. Elle est tout d'abord très rapide à mettre en œuvre, d'autant plus que son application est souvent automatisée. Elle s'adapte lorsqu'il faut assembler des matériaux différents, fragiles ou minces. L'assemblage entre les matériaux est continu ce qui permet de répartir uniformément les efforts et d'éviter le perçage de trous qui génèrent de fortes concentrations de contraintes dus aux effets de bords et des endommagements. Il en résulte une résistance mécanique supérieure à celle produite par le rivetage par exemple. Le gain de masse est aussi important. Par ailleurs, les adhésifs absorbent une partie des vibrations et apportent une isolation aussi bien thermique, phonique qu'électrique. Cependant, ce type d'assemblage introduit une masse supplémentaire ainsi qu'une augmentation de l'épaisseur de la structure. La performance du système assemblé dépend fortement de la qualité et du comportement des joints collés.

La durabilité de la réparation est un point crucial qui mérite une attention particulière. Le point faible de ce mode d'assemblage est la sensibilité aux chargements mécaniques qui peuvent causer la destruction de la liaison. De nombreux modes de rupture peuvent être répertoriés pour un

assemblage collé. La rupture du joint se produit soit au niveau de l'interface adhésif-substrat, dite rupture adhésive, soit dans l'adhésif, nommée rupture cohésive. En réalité, dans la majorité des cas, le mode de rupture d'un assemblage collé bien réussi est un mélange des deux modes comme illustré par la Figure I.26.

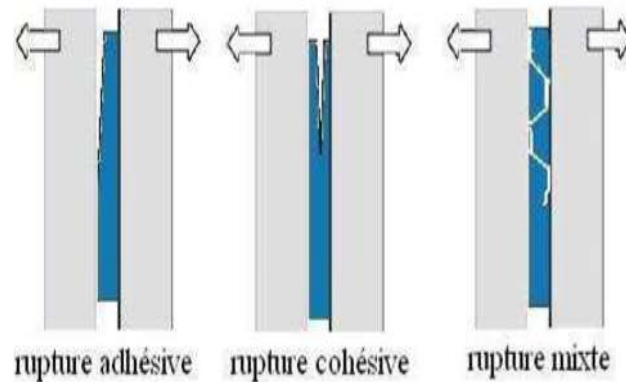


Figure I.26 : Modes de rupture d'assemblage collé [34].

I.B.8.I. Modes de rupture dans les joints collés

I.B.8.I.1 Rupture adhésive

Les ruptures adhésives sont caractérisées par l'absence d'adhésif sur l'une des surfaces du joint collé (Figure I.27). En général, si la liaison chimique formée à l'interface adhésif-substrat n'est pas protégée contre l'hydratation alors une rupture adhésive va plutôt se produire. Ce type de rupture est bien sûr considéré inacceptable pour un assemblage collé. Il est souvent une conséquence directe d'un mauvais procédé : les surfaces des substrats sont mal préparées ; le cycle de polymérisation de l'adhésif mal choisi, etc.

Bien que la nature des contraintes subies par le joint puisse favoriser la rupture adhésive, par exemple : les contraintes de pelage, les contraintes cycliques et le fluage de l'adhésif elle peut contribuer à la séparation finale des deux composants. Cependant, cette contribution n'est pas la cause principale de la rupture prématurée engendrée par la rupture adhésive [36].

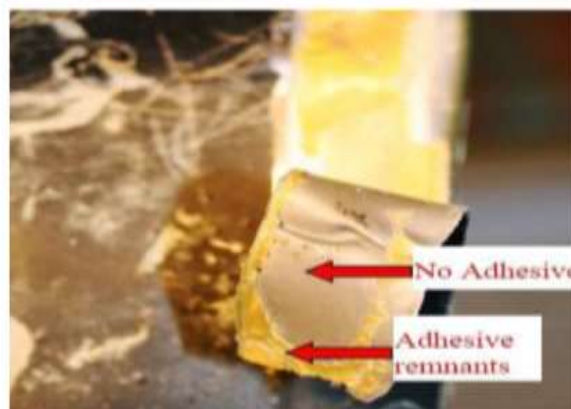


Figure I.27 : Rupture adhésive [36]

I.B.8.I.2 Rupture cohésive La rupture cohésive signifie que celle-ci se produit à l'intérieur de l'adhésif lui-même et est caractérisée par une présence de colle sur les surfaces des deux substrats. Si l'adhésion du joint est suffisamment forte, la rupture cohésive dans l'adhésif est souvent due aux contraintes de cisaillement, mais une contrainte de pelage ou une combinaison de contraintes de cisaillement et de pelage peut aussi conduire à une rupture cohésive. On observe fréquemment ce type de rupture dans les essais de cisaillement selon la norme ASTM D1002 ou dans les essais de pelage selon la norme ASTM D1781-76. La rupture cohésive peut être due à une mauvaise conception du joint collé, par exemple, une longueur de chevauchement insuffisante ou une contrainte de pelage excessive.

En général si la longueur de chevauchement est suffisante ou les substrats sont fins (typique peau d'avion) alors la rupture cohésive provoqué par la fatigue est peu probable. Il faut noter que la résistance à la fatigue d'un joint collé est relativement importante. La rupture cohésive dans le joint provoqué par un chargement en fatigue se produit seulement quand les substrats sont épais et le joint fortement chargé [37]. La Figure I.28 montre un exemple de rupture cohésive dans une structure sandwich.

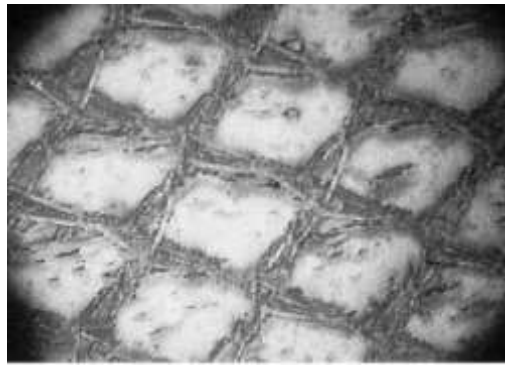


Figure I.28 : Rupture cohésive [42]

I.B.8.I.3 Rupture mixte La rupture mixte sera donc une combinaison de rupture adhésive et de rupture cohésive (Figure I.29) [36]. Lorsqu'un défaut se trouve à l'interface entre l'adhésif et le substrat alors la rupture adhésive peut s'amorcer à ce point. Cela conduit à une surcharge locale de l'adhésif autour de la fissure interfaciale ce qui entraîne ensuite la rupture de l'adhésif. Inversement, si une rupture se produit d'abord au sein de l'adhésif, la concentration de contraintes autour de la fissure cohésive peut provoquer une rupture adhésive si une faiblesse de cohésion se présente. En fait, la rupture mixte est une phase transitoire entre une rupture adhésive et une rupture cohésive. La rupture produit alors des zones lisses ainsi que des zones rugueuses. En général, la résistance à la rupture adhésive est plus faible que celle de la rupture cohésive. Cependant, la résistance apparente à une rupture mixte n'est pas forcément située entre celle adhésive et celle cohésive. Elle dépend de la proportion de surface lisse ou rugueuse qui représente le niveau de dégradation de l'interface. Des tentatives ont été fait par l'observation de faciès de rupture à l'aide d'un Microscope Electronique à Balayage (MEB) afin de trouver une corrélation entre la résistance du joint et la proportion de surface lisse ou rugueuse [37-39], mais la quantification de la rupture mixte par cette méthode s'avère difficile et délicate..

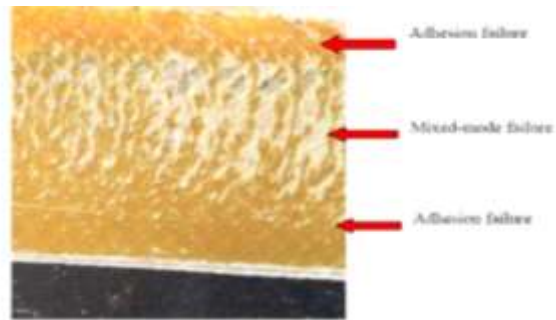


Figure I.29: Rupture mixte [38]

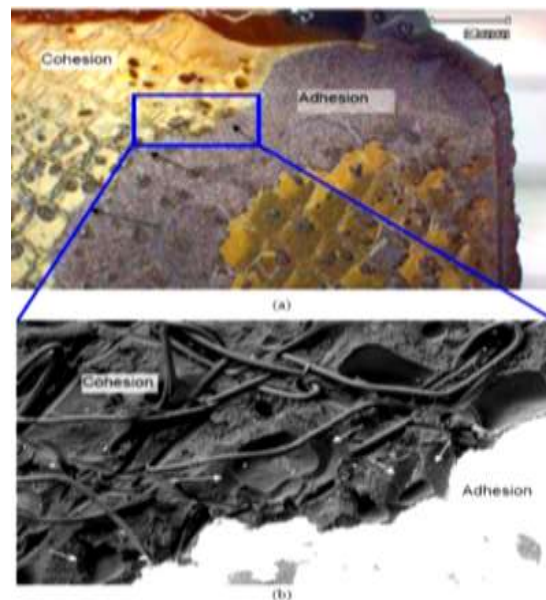


Figure I.30 : Observation d'une rupture mixte d'un joint collé par MEB [39]

I.B.9 Conclusion

Les principaux résultats des travaux menés sur les réparations par patches composites ont été rappelés très brièvement. Ces travaux permettent d'appréhender les mécanismes qui entrent en jeu lorsqu'une structure est réparée par un patch composite. Ils ont servi de point de départ pour développer des modèles et des méthodes existantes qu'ils soient théoriques, numériques ou expérimentaux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Davis, M., and Bond, D. Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 19 (1999), 91–105.
- [2] Volkersen, O. Die niekraft in zugbeanspruchten mit konstanten laschenquerschnitten. *Luftfahrtforschung* 15 (1938), 41–47.
- [3] Goland, and Reissner. The stress in cemented joints. *Journal of Applied Mechanics* 11 (1944), A17–A27.
- [4] Adams, R., and Wake, W. *Structural adhesive joints in engineering*. Elsevier, 1984.
- [5] Oplinger, D. Effects of adherent deflection in single lap joints. *International Journal of Solids and Structures* 31, 18 (1994), 2565–2587.
- [6] Hart-Smith, L. Adhesive-bonded double-lap joints. Tech. Rep. CR-112235, NASA, 1973.
- [7] Tsai, M. Y., Oplinger, D. W., and Morton, J. Improved theoretical solutions for adhesive lap joints. *International Journal of Solids and Structures* 35, 12 (1998), 1163–1185.
- [8] Tsai, M. Y., and Morton, J. The effect of a spew fillet on adhesive stress distributions in laminated composite single-lap joints. *Composite Structures* 32 (1995), 123–131.
- [9] Tomblin, J., Harter, P., Seneviratne, W., and Yang, C. Characterization of bondline thickness effects in adhesive joints. *Journal of Composite Technology and Research* 24, 2 (2002), 80–92.
- [10] Baker, A., and Jones, R. *Bonded repair of aircraft structures*. Martinus Nijhoff Publishers, 1988.
- [11] Bartolomeusz, R. A., Baker, A. A., Chester, R. J., and Searl, A. Bonded joints with through-thickness adhesive stresses - reinforcing the f/a-18.
- [12] 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.
- [13] Baker, A. Bonded composite repair of metallic aircraft components - overview of australian activities. AGARD-CP-550 (1995), 1–14.
- [14] Baker, A. Bonded composite repair of fatigue-cracked primary aircraft structure. *Composite Structures* 47 (1999), 431–443.
- [15] 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..
- [16] 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.
- [17] Bartolomeusz, R. A., Baker, A. A., Chester, R. J., and Searl, A. Bonded joints with through-thickness adhesive stresses - reinforcing the f/a-18.

- [18] Cant`u-Paz, E., and Goldberg, D. E. Efficient parallel genetic algorithms : theory and practice. *Computer methods in applied mechanics and engineering* 186 (2000), 221–238.
- [19] Colombi, P., Bassetti, A., and Nussbaumer, A. Delamination effects on cracked steel members reinforced by prestressed composite patch. *Theoretical and applied fracture mechanics* 39 (2003), 61–71.
- [20] Darwin, C. *The origin of species*. <http://etext.library.adelaide.edu.au/d/d22o/>, 1859.
- [21] Kumar, A., and Hakeem, S. Optimum design of symmetric composite patch repair to centre cracked metallic sheet. *Composite Structures* 49 (2000), 285– 292.
- [22] 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 Fract Engng Mater Struct* 24 (2001), 631–636.
- [23] Tse, P.-C., Lau, K.-J., and Wong, W.-H. Stress and failure analysis of woven composite plates with adhesive patch-reinforced circular hole. *Composites : Part B* 33 (2002), 57–65.
- [24] Adams, R., Aivazzadeh, S., Cardon, A., and Rigolot, A. *Mechanical behaviour of adhesive joints*. Pluralis, 1997.
- [25] Avril, S., Ferrier, E., Vautrin, A., Hamelin, P., and Surrel, Y. A full-field optical method for the experimental analysis of reinforced concrete beams repaired with composites. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* 35, 7 (2004)
- [25] Tsutsui, S., and Goldberg, D. E. Search space boundary extension method in real-coded genetic algorithms. *Information Sciences* 133 (2001), 229–247.
- [27] 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.
- [28] Thèse, Céline GROS, Durabilité de joints adhésifs silicone sous conditions environnementales sévères : application au packaging en électronique de puissance, (2006).
- [29] Thèse Frédéric Simon, Endommagement et rupture des joints colles sollicités en traction ou cisaillement application au collage du bois (2001).
- [30] Thèse, Marie Pierre FOULC, durabilité des assemblages par colles : état de l’art. (2008).
- [31] A. NACERI, et A. VAUTRIN, Caractérisation du comportement mécanique d'un composite (tissu de verre/résine époxyde) à différentes périodes de vieillissement hygrothermiques, (2006).
- [32] Schierffer Anne, Maire Jean-François et L'évêque David, Analyse multiechelle du vieillissement et du comportement thermomécanique de composites a matrice organique, (2005).
- [33] Thèse, Romain LEGER. Contribution à l'étude de la durabilité des structures collées soumises à des efforts mécaniques après vieillissement humide, (2010).
- [34] Thèse, Aïcha benchiha Simulation numérique de l'effet de la présence des défauts de collage sur le comportement des assemblages collés sous chargement (2015)
- [35] Thèse, Kouider Madani, Etude numérique et expérimentale de la technique de réparation des fissures Dans les structures aéronautiques par patch en composite, (2007).
-

[36] Thèse, Julien Mercier, Prise en compte du vieillissement et de l'endommagement dans le dimensionnement de structures en matériaux composites, (2006).

[37] Thèse, Marie-Anne Bruneaux, Durabilité des assemblages colles: modélisation mécanique et physico-chimique, (2004).

[38] Davis M.J., McGregor A., Assessing adhesive bond failures: mixed-mode bond failures explained. ISASI Australian Safety Seminar, Canberra, 4-6 June 2010.

[39] Davis M.J., Bond D.A., The importance of failure mode identification in adhesive bonded aircraft structures and repairs. 12th ICCM, Paris, 05-09 July, 1999.

CHAPITRE II

II.1. Introduction

Les structures peuvent subir des dommages locaux et des fissures microscopiques à cause des défauts métallurgiques ou de conditions d'exploitation extrêmes. L'accumulation de défauts a un effet néfaste sur la durée de vie de ces structures. Afin d'arrêter l'évolution de ces défauts, plusieurs techniques de réparation ont été proposées. Pour éviter les inconvénients des méthodes de réparation traditionnelles, les chercheurs trouvent une nouvelle solution qui aidera à surmonter les difficultés existantes. Dans ce contexte, le patch de matériau composite est une méthode très prometteuse pour réparer et / ou renforcer les structures métalliques [1,2]. Les patchs composites empêchent la croissance des fissures et prolongent donc la durée de vie de la structure réparée. Il est utilisable dans des environnements sévères. Ainsi, ils peuvent être complétés plus rapidement avec un faible poids ajouté et ne provoquent pas de concentration de contraintes. Ces caractéristiques réduisent considérablement le coût et le temps des réparations et des renforts.

Plusieurs recherches ont été effectuées et continuent jusqu'à présent à améliorer les paramètres affectant l'efficacité de la réparation par patch composite. Cette partie présente des recherches analysant l'effet des différents paramètres géométriques et mécaniques du composite et de l'adhésif sur la qualité de réparation par patch en composite.

II.2. Effet de type d'analyse

Les composants aéronautiques sont soumis en service à des sollicitations mécaniques donnant lieu à des états de contraintes généralement multiaxiaux et à amplitude variable, ce qui provoque un phénomène d'endommagement par fatigue et par corrosion. Cependant, le coût pour changer des parties importantes de la structure ou de grands composants tels que la voilure est très souvent rédhibitoire. Une alternative consiste à utiliser des patchs composites pour réparer les composants endommagés. La conception des réparations nécessite une optimisation des caractéristiques du patch: géométrie, nombre de plis unidirectionnels, orientation des plis les uns par rapport aux autres, positionnement autour de la zone à soulager. Les analyses des structures réparées par patch en composites collés ont fait l'objet de nombreuses études. La plupart de ces études portaient sur la tolérance aux dommages de la structure réparée à l'aide d'une analyse linéaire. Des chercheurs [3,4] ont fait une analyse non linéaire de la structure réparée par patch composite collé pour étudier ses effets sur la tolérance aux dommages de la structure réparée. Il est utilisé dans l'analyse non linéaire la technique à trois couches qui comprend une non-linéarité géométrique pour tenir compte de grands déplacements de la structure réparée et également un matériau non-linéarité de l'adhésif. La technique à trois couches utilise l'analyse des éléments finis à deux dimensions avec des éléments de plaque pour modéliser la plaque fissurée, et le patch adhésif composite. Les effets du non linéarité géométrique sur la tolérance aux dommages de la plaque fissurée sont étudiés par le calcul du facteur d'intensité de contrainte et le taux de croissance de la fissure de fatigue dans la plaque. L'adhésif est modélisé sous la forme d'un matériau non linéaire pour caractériser le comportement décohésion. L'analyse élastique-plastique de l'adhésif utilise le modèle de Drucker-Prager prolongée.

Pour l'analyse géométriquement non linéaire, les facteurs d'intensité de contrainte ont été calculés à partir de ces équations :

$$K_I^2 + K_{II}^2 = \left(\frac{GE}{\beta} \right) \tag{II.1}$$

$$\sum_{i=1}^n [(K_I^i)^2 + (K_{II}^i)^2] = \sum_{i=1}^n \left(\frac{GE}{\beta} \right)$$

Les farceurs d'intensité des contraintes ont été calculés pour l'analyse linéaire pour trois longueurs de fissure. La comparaison des facteurs d'intensité de contrainte normalisés par rapport à la charge appliquée, sous une charge mécanique uniquement, l'étude montre que pour les analyses linéaires et non linéaires, le facteur d'intensité de contrainte augmente quand la longueur de fissure augmente (figure II-1). Les facteurs d'intensité de contrainte de l'analyse non linéaire sont inférieurs par rapport à l'analyse linéaire. Les différences des valeurs de FIC entre les deux analyses sont dues au champ de déplacement, près de la pointe de fissure, entre l'analyse géométrique linéaire et non linéaire [3].

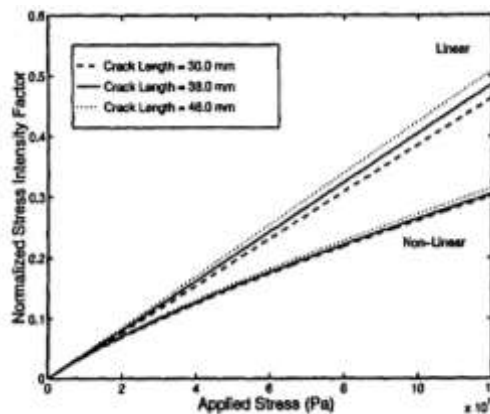


Figure II.1 : Valeurs de FIC normalisé en fonction du chargement appliquée pour une analyse linéaire et non linéaire [3]

II.3. Effet de la géométrie du patch

Une étude paramétrique a été effectuée pour voir la sensibilité de réparation par rapport aux paramètres géométriques du patch (hauteur, largeur et épaisseur) et l'épaisseur de l'adhésif [4, 6,7]. En considérant une contrainte de traction de 70 MPa comme indiquée dans la figure II.2 qui représente le facteur d'intensité de contrainte en fonction de la hauteur de patch Hp pour différentes largeurs de patch Wp. On constate que le FIC augmente rapidement pour les petites largeurs de patch (c.-à-d. Moins de 40 mm), ce qui indique que l'efficacité du patch est fortement réduite lorsque sa largeur devient proche de la longueur de fissure car les contraintes de champ singulières ne sont pas complètement récupérées. En ce qui concerne la hauteur du patch, on peut observer

qu'une dimension optimale existe dans la direction perpendiculaire à la ligne de fissure. Ce résultat peut sembler surprenant, car on peut s'attendre à ce qu'une plus grande hauteur de patch induit systématiquement plus de renforcement et donc moins de contraintes en pointe de fissure. [5,6,8].

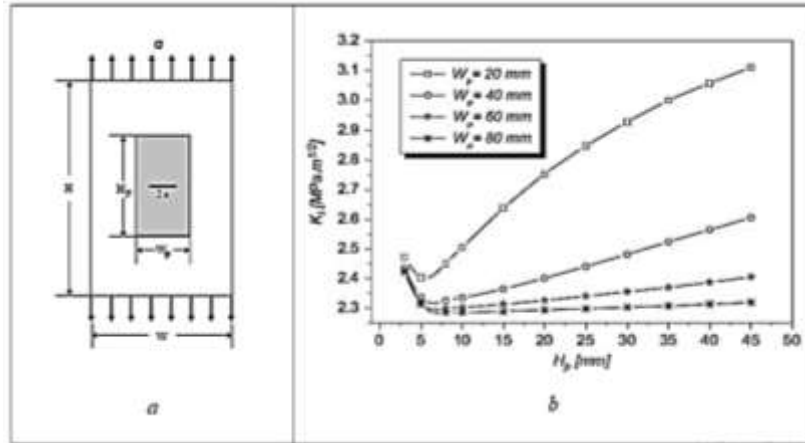


Figure II.2 a) Modèle géométrique b) Evolution de FIC en fonction des paramètres géométriques (H_p et W_p) du patch [6].

La figure II. 3 représente l'effet de l'épaisseur d'adhésif et de patch sur le l'évolution du facteur d'intensité des contraintes. On remarque que les tendances de la variation sont opposées. Contrairement à l'épaisseur du patch T_p , l'augmentation de l'épaisseur de l'adhésif T_c entraîne une augmentation du facteur d'intensité des contraintes. Ceci est attendu, car une grande épaisseur d'adhésif entraînera une réparation plus résiliente permettant une plus grande déformation de la feuille d'aluminium. À partir de ces résultats, on conclut que les épaisseurs de patch et d'adhésif sont des variables de conception prédominantes qui déterminent l'efficacité de la réparation du patch [9].

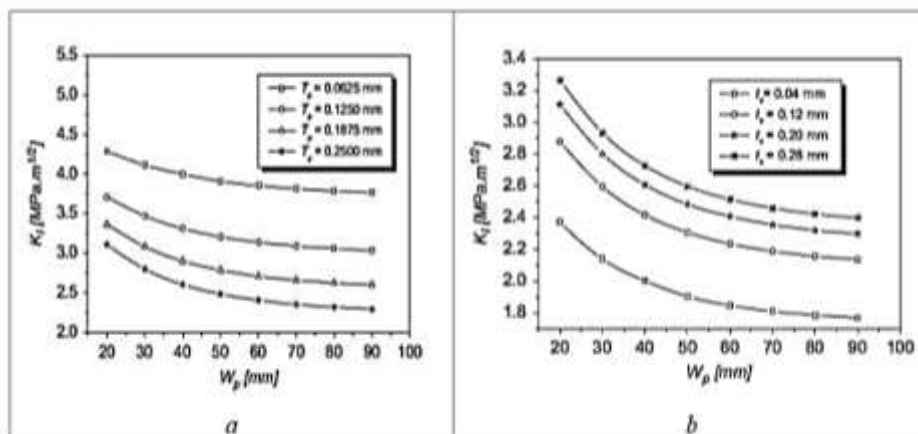


Figure II.3: Evolution de FIC en fonction a) des épaisseurs de patch b) des épaisseurs d'adhésif [6].

Dans ce contexte, des auteurs [10-12] ont conclu que l'épaisseur de l'adhésif doit être optimisée afin de réduire l'intensité des contraintes à la pointe de la fissure. A. Megueni [13] a fait la même étude mais pour le mode de rupture II comme indiqué dans la figure II.4

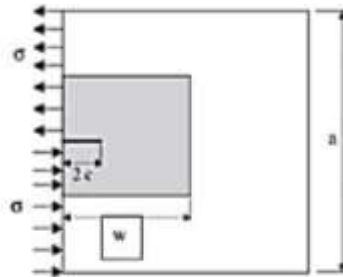


Figure II.4: Modèle géométrique de la structure patches pour le mode de rupture II [11]

Après la simulation numérique, il conclue que le facteur d'intensité de contrainte est asymptotique et est fortement réduit par la présence d'un patch, l'augmentation de l'épaisseur du patch réduit considérablement l'intensité de contraintes à la pointe de la fissure (90%). Pour les longueurs de fissures minimales, l'épaisseur minimale du patch est souhaitable. Le facteur d'intensité de contraintes présente un comportement asymptotique à mesure que la longueur de fissure augmente.

II.4. Effet des propriétés mécaniques du patch

La réparation composite prend de l'importance pour prolonger la durée de vie des structures endommagées.

En raison de divers avantages des matériaux composites, la méthode de collage du patch a reçu beaucoup d'attention des chercheurs et des ingénieurs. Des études considérables ont été effectuées pour mettre en évidence l'effet de type de patches composites collés sur les paramètres de rupture tels que les facteurs d'intensité de contrainte (FIC) [14,11]. Une modélisation par éléments finis est effectuée avec un patch de type Boron/époxy et un autre type Graphite/époxy pour analyser l'effet des propriétés mécaniques des patches composites collés sur la qualité de réparation en mode I pure [11]. La figure II.5 représente le modèle géométrique de la structure patches.

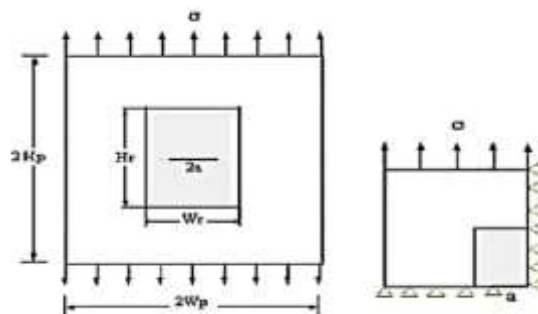


Figure II.5 : Géométrie de la plaque réparée [11]

Vu la symétrie de la géométrie et des conditions de chargement suivant les axes X-X et Y-Y, uniquement le un quart (1/4) de la structure est analysée afin de minimiser le temps de calcul.

Les dimensions et les propriétés des matériaux du modèle réparé sont données dans le tableau II.1.

Propriétés et dimensions	Matériaux			
	Aluminium 2024-T3	Adhésif (FM73)	Boron/epoxy	Graphite/epoxy
E ₁ (GPa)	72	0.97	208	172
E ₂ ; E ₃ (GPa)	-	-	25.4	10.34
ν ₁₂ ; ν ₁₃	0.33	0.32	0.17	0.3
ν ₂₃	-	-	0.04	0.18
G ₁₂ (GPa)	-	-	7.24	4.82
G ₁₃ ; G ₂₃ (GPa)	-	-	4.94	3.1
W (mm)	120	180	180	180
H (mm)	120	90	90	90
t (mm)	3	0.2	1	1

Tableau II.1 Dimensions et propriétés des différents substrats [11].

L'effet de type de patchs composites collés sur la réparation d'une plaque fissurée est représenté sur la figure II. 6

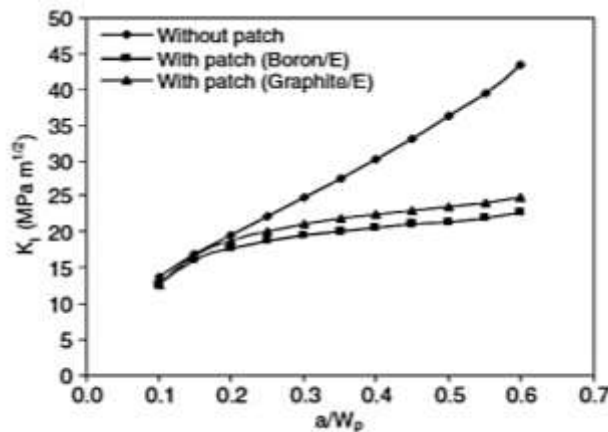


Figure II. 6 : Variation du FIC en fonction de la longueur de fissure [11].

La figure II.6 montre les variations du facteur d'intensité de contrainte en mode I (K_I) en fonction de la longueur de fissure pour des propriétés du matériau de patch (Graphite / Epoxyde et Boron / Epoxyde). On remarque que l'augmentation de la fissure conduit à une augmentation du facteur d'intensité de contrainte K_I . On peut noter que le renforcement avec le patch diminue considérablement le facteur d'intensité de contrainte (FIC). Ce dernier porte la charge dans la zone de fissures. Le patch Boron / Epoxyde réduit K_I plus que le patch Graphite / Epoxyde. Cela signifie

que des matériaux de patches plus rigides sont souhaitables pour la réparation et l'extension de la durée de vie de la structure endommagée [15,11].

II.5. Effet des propriétés mécaniques de l'adhésif

L'adhésif joue un rôle important dans la réparation par patches composites collés car, d'une part, elle assure le transfert des charges entre le patch composite et la plaque fissurée, et d'autre part, elle maintient les deux structures ensemble. C'est pour cette raison que plusieurs travaux ont été réalisés afin d'étudier l'effet des propriétés mécaniques de l'adhésif sur le structure réparée [8],[17]. Les adhésifs de meilleures qualités sont caractérisés par un faible module de cisaillement, ce qui permet d'atténuer les contraintes transmises par l'adhésion. Dans le cas de structures réparées, l'objectif est de transmettre le maximum de contraintes à l'adhésif et par conséquent au patch afin de les réduire à la pointe de fissure. Théoriquement, il est donc préférable d'utiliser des adhésifs avec un module de cisaillement élevé (adhésif de mauvaises qualités) pour réparer les fissures ou les défauts [8],[18]

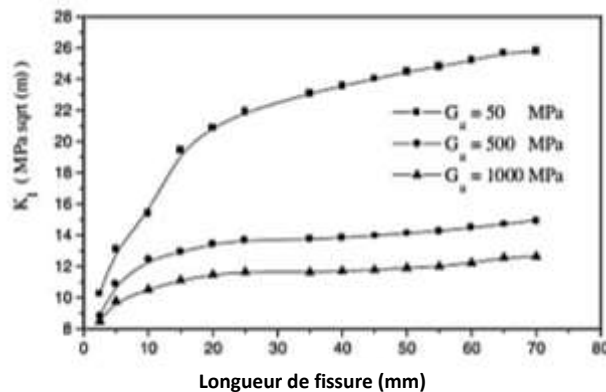


Figure II. 7 : Effet de module de cisaillement de l'adessif sur les valeurs de FIC [8].

La Figure II.7 représente la variation du facteur d'intensité de contrainte en fonction de la longueur de fissure pour différentes valeurs du module de cisaillement de l'adhésif. On remarque que le facteur d'intensité de contrainte diminue quand le module de cisaillement de l'adhésif augmente, la figure II. 8 représente la variation du facteur d'intensité de contraintes en fonction du module de cisaillement de l'adhésif. On note que l'augmentation du module de cisaillement de l'adhésif réduit la résistance à l'adhérence, ce qui peut générer une rupture d'adhérence. Par conséquent, le choix de l'adhésif (caractérisé par son module de cisaillement) pour réparer les fissures doit être optimisé afin de permettre la transmission des contraintes vers le patch et d'éviter la défaillance de l'adhésif.

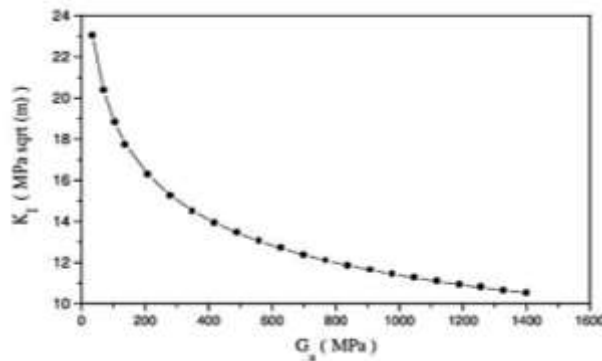


Figure II. 8 : Evolution de FIC en fonction de module de cisaillement de l'adessif [8].

II.6. Effet de l'orientation des fibres

Pour montrer l'effet des directions des fibres de patch composites sur la réparation d'une structure fissurée, deux cas ont été considérés. Le premier cas consiste à prendre un patch ayant des fibres selon la direction X parallèle à la fissure. Dans le deuxième cas, les fibres sont perpendiculaires à la fissure (direction y) [8,18].

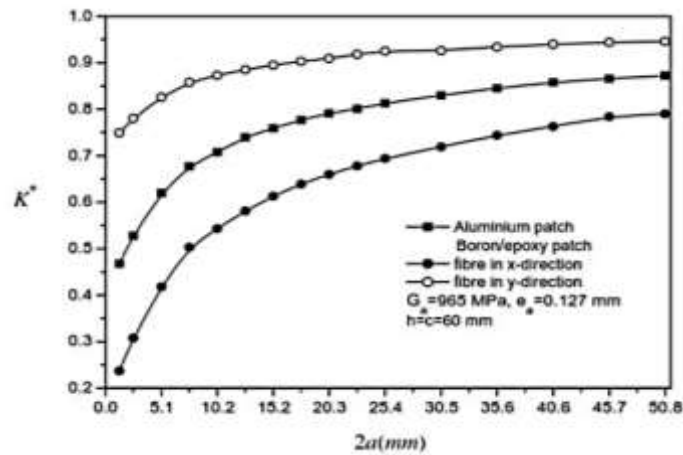


Figure II.9 : L'effet de l'orientation des fibres d'un patch octogonal sur le FIC [8]

A partir des résultats obtenus, on remarque dans la figure III. 9 que l'application d'un même patch de matériau composite dans le processus de réparation de structure fissurée donne des différents résultats. La courbe du FIC montre que la structure réparée par patch à des fibres dans la direction Y converge rapidement par rapport aux plaques métalliques et au patch composites à des fibres en direction X. La réduction du FIC est bien meilleure lorsque l'orientation des fibres est perpendiculaire à la fissure. La réduction maximale du patch composite de fibres dans la direction Y est d'environ 30% par rapport au patch métallique [8].

II.7. Le nombre des couches de patch

Des analyses tridimensionnelles sont effectuées pour étudier l'effet de nombres des couches du patch sur la durée de vie de la fissuration par fatigue des structures contenant des fissures, renforcées par des patches composites. H. Hosseini-Toudeshky et *al.* [10] a étudié le comportement expérimental de croissance des fissures par fatigue d'une plaque en aluminium à une fissure centrale sous le mode-I réparée par patch en composite simple. La figure II.10 représente le modèle géométrique étudié.

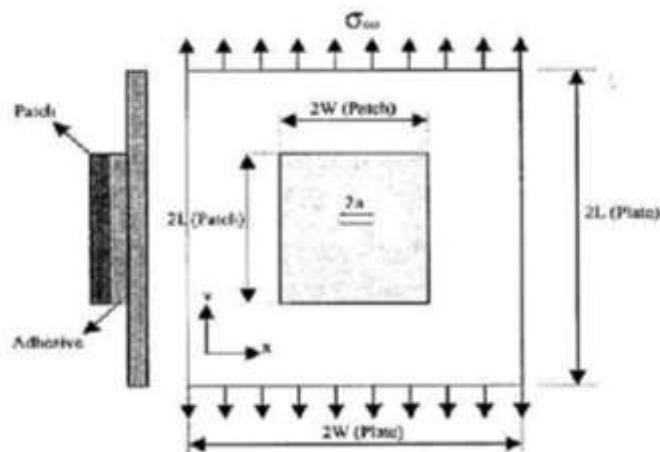


Figure II. 10 : géométrie et chargement de la structure patches d'un seul côté [10]

Les dimensions de la plaque, l'adhésif et les couches du patch sont données dans le tableau II.3

Material	Plaque d'Aluminium	Adhésif	Patch
L(mm)	100	40	40
W(mm)	50	35	35
r(mm)	2.29 et 6.35	0.1	0.18 par couche

Tableau II.2 : Dimensions de la plaque, l'adhésif et les couches du patch [10].

Les résultats obtenus par les essais expérimentaux sont représenté dans la figure II. 11

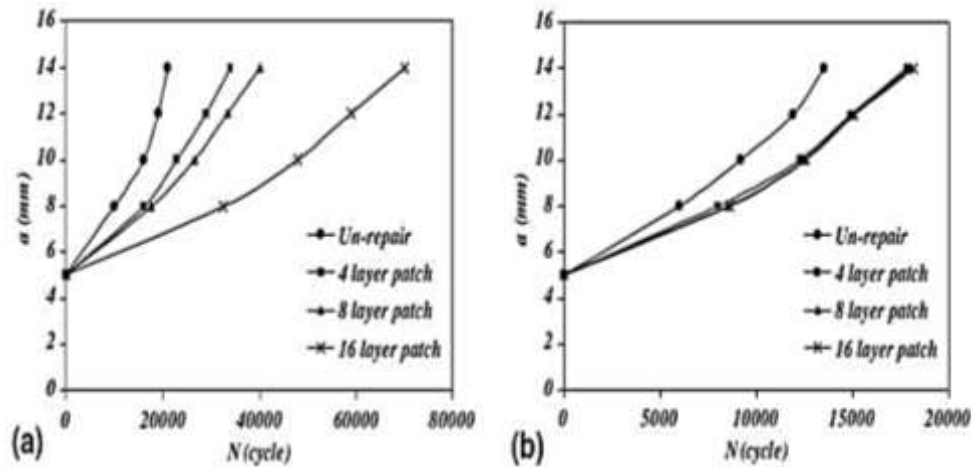


Figure II. 11 : Variation de la longueur de fissure en fonction de nombre de cycles pour un plaque réparée et non réparée a) $t=2.29$ mm. b) $t=6.35$ mm. [10]

Cette figure montre la variation de la longueur de fissure par rapport au nombre de cycles de charge pour les plaques réparée et non réparée avec différents nombres de couches de patch pour les plaques minces figure.II.11.a et épaisses figure II.11.b. Cette figure montre que technique du collage du patch composite est efficace pour l'augmentation de la durée de vie pour les plaques minces et épaisses. La durée de vie des plaques réparées avec une épaisseur de 2,29 augmente significativement avec l'augmentation du nombre de couches de patch. Lorsque le nombre de couches de patch augmente de de 8 à 16 couches, un grand effet s'est produit dans l'extension de la vie. Cependant, pour les plaques réparées avec une épaisseur de 6,35 mm, il n'y a aucune différence significative entre la durée de vies obtenues pour les plaques réparées avec 4, 8 et 16 couches. Il montre que la durée de vie de la fissure des plaques minces peut augmenter jusqu'à 236% en utilisant un patch de 16 couches. Cependant, pour les plaques épaisses, la durée de vie peut s'étendre d'environ 21 à 35% à l'aide d'un patch de 4 couches et la mise en œuvre des patchs de 8 et 16 couches n'a pas d'effet significatif sur l'extension de vie par rapport à la durée de vie des patchs de 4 couches [10].

II.8. Effet de forme de patch

Certaines études précédentes ont essayé de concevoir la forme optimale pour améliorer la rupture et l'endommagement par fatigue [8,18]. M. Ramji [18] a analysé le problème de la réparation optimale de la forme d'un patch pour une plaque fissurée.

Dans cette étude, une analyse par éléments finis en 3D a été effectuée pour obtenir une forme de patch composite optimale appliquée sur une structure avec une fissure centrale inclinée réparé par patch, Les formes de patch considérées sont le cercle, le rectangle, le carré, l'ellipse et l'octogone. De même, la réduction FIC est comparée pour le même volume de patch [18]. La figure II. 12 représente les résultats de cette analyse.

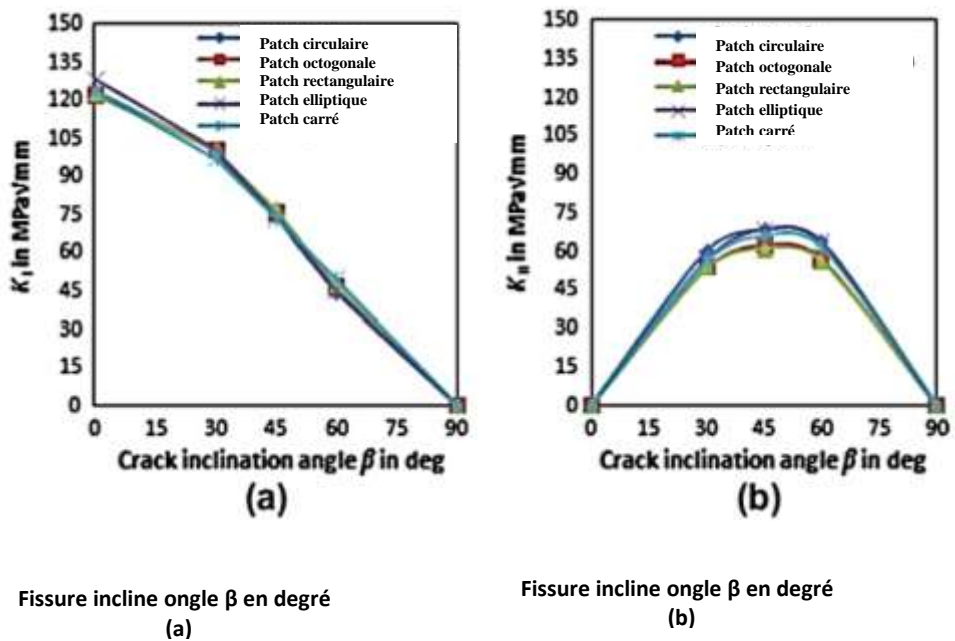


Figure II.12 : Évolution de FIC en fonction de l'angle d'inclinaison β ° pour différentes formes de patch [18].

Dans cette section, l'influence de la forme du patch sur la réduction de FIC pour différentes fissures inclinées est analysée pour une zone de patch fixe de 804 mm², correspondant au cercle de rayon 16 mm. La figure ci-dessus montre la variation de FIC (K_I et K_{II}) pour différents angles d'inclinaison de fissure. La (Figure II.12.a) montré que K_I est maximum à β° = 0° et il est minimum à β° = 90°, parce qu'il y a un déplacement maximal d'ouverture de fissuration en β° = 0° par contre en β° = 90° le déplacement est nul. Il est également observé que pour un patch à double face, il existe une réduction significative de K_I pour les formes carrées, rectangulaires et octogonales. De la (Figure II.12 b), on constate que K_{II} est maximum à β° = 45° et nul pour les inclinaisons d'angles β° = 0° et 90°. A partir d'une observation globale, il existe une plus grande réduction du FIC avec les patches octogonaux étendus et rectangulaires. On peut sûrement confirmer que la forme du patch influence sur l'évolution du FIC et son impact dépend par les différentes inclinaisons de fissures [18].

III.9. Effet thermique sur la performance de réparation

Pour étudier l'effet de la température sur une structure fissurée réparée par le patch collé pendant l'exécution de la technique de réparation [19,20]. Une analyse numérique a été faite pour connaître la répartition des contraintes résiduelles thermiques dues au durcissement de l'adhésif. L'influence de ces contraintes résiduelles sur la performance de réparation est soulignée en analysant leur effet sur le facteur d'intensité de contrainte à la pointe de fissure. La figure II.13 représente le modèle géométrique à analyser.

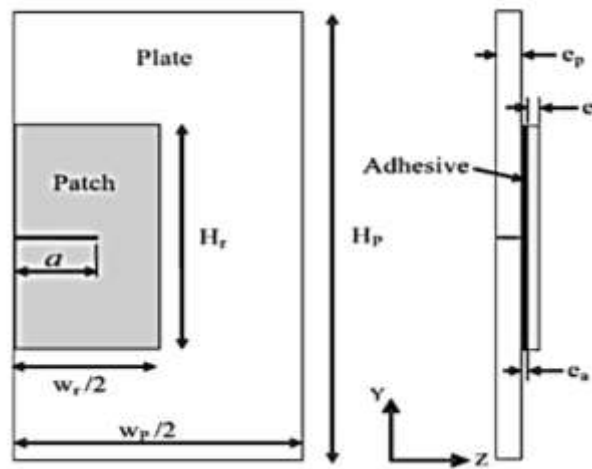


Figure II. 13 : Modèle géométrique [19]

Les propriétés élastiques et thermiques de la plaque, du patch et des adhésifs sont données dans le tableau II.3

Material	E_L (GPa)	E_T (GPa)	ν_L	ν_T	G (GPa)	G_{23} (GPa)	α_T ($10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	α_L ($10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
Boron/epoxy	210	19.6	0.3	0.028	5.46	4.94	6.1	30.3
Aluminum	73	-	0.33	-	-	-	23.22	-
Adhesive	-	-	0.30	-	0.42	-	-	-

Tableau II.3 : Propriétés élastiques et thermiques des matériaux. [19]

Dans cette étude, le facteur d'intensité de contrainte est calculé avec et sans présence de contrainte résiduelle thermique afin d'estimer l'effet de ces contraintes sur les performances de réparation. Un chargement mécanique en traction de grandeur $\sigma=70$ MPa est appliqué à la plaque en aluminium avec un chargement thermique pour le processus de durcissement de l'adhésif. L'adhésif utilisé pour cette analyse est le FM73 et les épaisseurs pour les différents matériaux sont: plaque ($e_p = 3$ mm), patch ($e_r = 1,5$ mm) et adhésif ($e_a = 0,2$ mm).

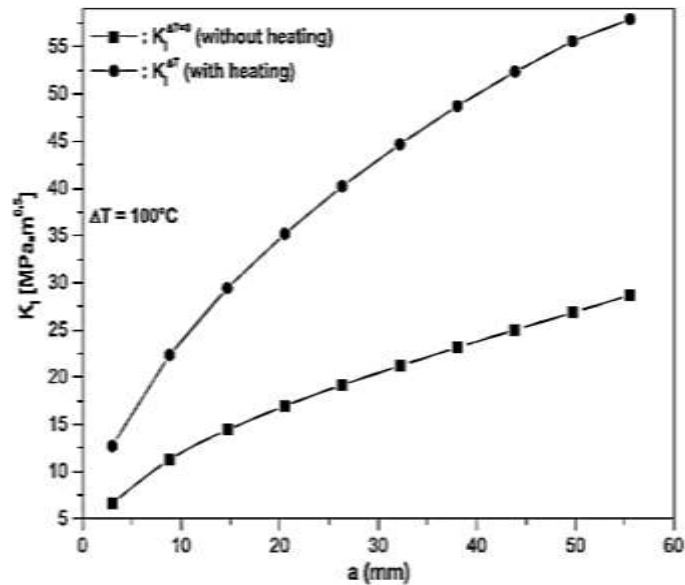


Figure II. 14 : Comparaison de FIC en fonction de la longueur de fissure entre $\Delta T=0^\circ$ et $\Delta T=100^\circ$ [19]

La figure II.14 présente la variation du FIC en fonction de la longueur de fissure pour deux cas de chauffage: avec chauffage ($\Delta T = 100^\circ \text{C}$) et sans chauffage ($\Delta T = 0$). ΔT est la différence entre la température de chauffage et la température ambiante. On remarque que la présence de la contrainte thermique résiduelle (due au chauffage dans le processus de liaison) a un effet considérable sur la variation du FIC à la pointe de fissure. En effet, les valeurs de FIC sont fortement augmentées. Les résultats obtenus par cette analyse montre que les contraintes thermiques normales dans la plaque et le patch sont importantes et que les contraintes de cisaillement sont moins significatives. Le niveau des contraintes thermiques dans l'adhésif est relativement élevé. La présence des contraintes thermiques augmente le facteur d'intensité de contrainte à la pointe de fissure, ce qui réduit les performances de réparation [19].

II.10.Effet de température

Le coefficient de la diffusion $D(T)$ dépend de la température et pour un système idéal, suit un Arrhenius, avec une barrière d'énergie à la diffusion E_D .

$$D(T) = D_0 \exp\left(-\frac{E_D}{kT}\right) \tag{II.2}$$

Donc, augmentant la température (T) devrait augmenter le taux diffusion et accéléré le vieillissement de système. k constante de Boltzmann et le paramètre D_0 and E_D peut être déterminé en traçant $\log D(T)$ sur $1/T$. Table II.4 indique diffusion coefficients déterminé pour un époxy adhésive à différents températures. Figure II. 15 indique la trace de logarithme coefficient de la

diffusion en fonction $1/T$ déterminé pour époxy adhésive. Une parcelle de suggérant que les coefficients Arrhenius vaut pour cette gamme des températures.

Sample Thickness (mm)	Temperature (°C)	Apparent D_a (m^2s^{-1})	Saturation Concentration (%)	Corrected D_c (m^2s^{-1})
1	4	1.28×10^{-14}	5.2*	1.19×10^{-14}
1	23	6.89×10^{-14}	5.2	6.38×10^{-14}
1	44	5.69×10^{-15}	4.7	5.24×10^{-15}
1	64	3.23×10^{-12}	4.5	2.99×10^{-12}
3.2	23	9.02×10^{-14}	5.2	7.09×10^{-14}
3.2	44	7.23×10^{-15}	4.65	5.80×10^{-15}
3.2	64	4.02×10^{-12}	4.5	3.16×10^{-12}

Tableau II.4 : Détermination de coefficient de diffusion à partir de masses d'échantillons [20].

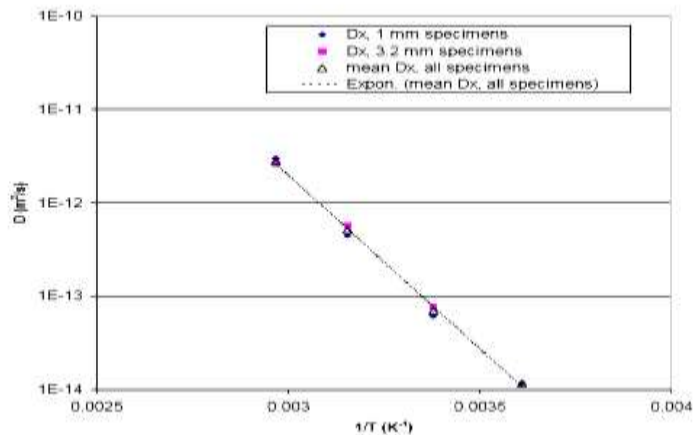


Figure II. 15: Coefficient de diffusion en fonction de la température [20].

II.11.Effet de vieillissement des adhésifs

La prédiction de la durée de vie des assemblages collés est un sujet qui a souvent été abordé dans la littérature scientifique, mais qui reste complexe et sans solution universelle. La difficulté réside dans le fait qu'il ne faut pas prédire la durabilité d'un matériau, mais d'un système « adhésif/interface, interphase/métal ». L'adhésion est fonction de très nombreux paramètres relatifs au substrat: chimie de surface, pollution, homogénéité, réactivité, topographie, rigidité, allongement, corrosion...; et à l'adhésif : température de transition vitreuse, contraintes, charges minérales et organiques, stœchiométrie, taux de réticulation, mouillage, viscosité, durabilité...[21] En outre, les interactions polymère/métal sont nombreuses et peuvent conduire à la formation d'interphases. Il est par conséquent difficile de considérer l'influence de tous ces paramètres sur la qualité de l'adhésion et sur sa tenue au vieillissement [22].

II.11.1 Diffusion de l'eau et l'influence d'environnement chaud et humide

L'étude des assemblages collés soumis à un environnement chaud et humide est d'autant plus difficile que plusieurs phénomènes se superposent, avec différentes cinétiques, durant le vieillissement :

- ◆ Dégradation de l'adhésif (réversible ou irréversible : prise en eau, gonflement, plastification, hydrolyse, endommagement osmotique...)
- ◆ Tenue de l'interphase polymère/métal et son hydrolyse.
- ◆ Corrosion du substrat.

Néanmoins, il est souvent noté que la diffusion de l'eau à l'interface et au sein de l'adhésif est responsable de la dégradation des propriétés mécaniques d'un assemblage collé. Les modèles actuels de prédiction de la durée de vie des assemblages collés sont d'ailleurs basés sur une corrélation entre ces deux paramètres : diffusion-tenue mécanique. M. Bordes [23], par exemple, part du fait que le module d'un adhésif époxy dépend de sa prise en eau et d'une cartographie des contraintes dans le joint, pour prédire qualitativement l'amorçage d'un endommagement plastique dans un assemblage collé. Ces modèles se limitent néanmoins à des phénomènes de dégradation irréversible de l'adhésif et négligent les phénomènes d'interface. Une des raisons est la méconnaissance du chemin de diffusion de l'eau dans les assemblages collés. Zanni-Deffarges [24] propose une diffusion capillaire à l'interface alors que J. Cognard [25] présente un processus menant à la formation de pores à l'interface métal/adhésif où l'eau se condense. Aucune de ces considérations n'a abouti à un modèle de diffusion de l'eau à l'interface tel ceux, proposés par Fick et Langmuir pour modéliser la diffusion de l'eau dans les polymères. Cependant, même pour ces modèles, les interactions de l'eau avec la matière sont toujours discutées [26] et c'est peut être une raison pour laquelle il est si difficile de proposer un modèle de diffusion pour les assemblages collés.

En citant les différents phénomènes pouvant intervenir au cours du vieillissement hygrothermique d'un assemblage adhésif/métal, on constate qu'ils sont tous d'origine physico-chimique. La propagation de l'eau au sein de l'assemblage est certes à l'origine de ces événements, mais ce sont bien les cinétiques des réactions chimiques qui vont gouverner la vitesse de perte des propriétés mécaniques de l'assemblage collé. Dans cette optique, l'étude du vieillissement hygrothermique d'assemblages acier galvanisé/époxy a pour but d'établir une (ou des) relation(s) entre l'évolution physico-chimique de l'adhésif et la tenue mécanique des joints.

La démarche envisagée est schématisée sur la figure II.16

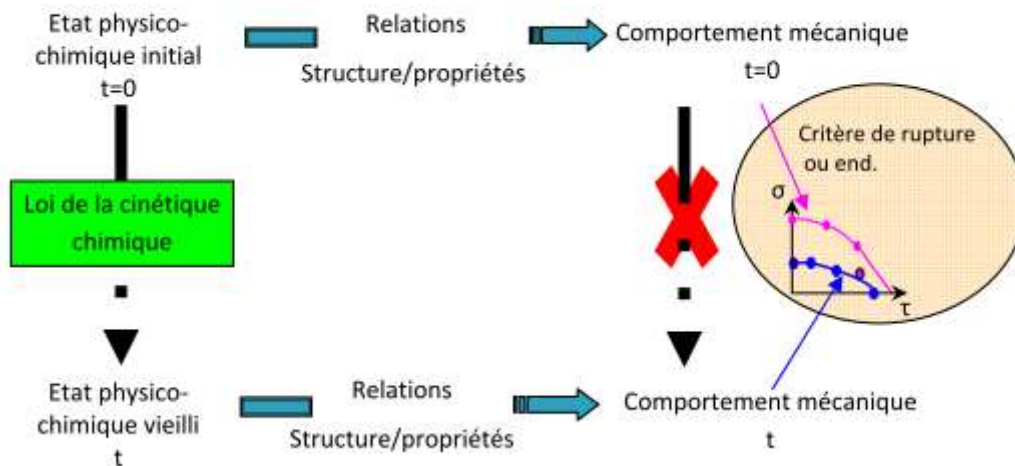


Figure II.16 : Démarche scientifique pour prédire la durée de vie des assemblages collés.

Dans cette démarche, une approche multi-échelles est envisagée afin d'apporter une meilleure compréhension des phénomènes. L'état physico-chimique de l'adhésif doit être défini précisément à l'état initial et à différents temps de vieillissement, pour plusieurs conditions de vieillissement. Par état physico-chimique (ou structural), on entend la taille des mailles du réseau tridimensionnel (densité de réticulation), la présence ou non de chaînes pendantes et la composition chimique.

L'objectif est de déterminer une loi cinétique décrivant l'évolution chimique de l'adhésif au cours de son vieillissement. A partir de cette loi, il est envisagé de déterminer une concentration critique en un groupement chimique à partir de laquelle, une chute des propriétés de l'adhésif apparaît. C'est ce qui a pu être réalisé par Ganem [27] en modélisant le vieillissement hydrolytique et en étudiant l'amorçage des fissures dans le matériau. Dans cette étude, le temps d'induction avant fissuration et le temps d'hydrolyse sont proches, mais pas identiques. Ce qui indique qu'il est nécessaire d'avoir une connaissance précise des relations structure/propriétés pour pouvoir lier l'évolution chimique d'un adhésif à son comportement mécanique. Dans le cas des assemblages collés, il faut de plus, connaître l'influence des interactions adhésif/métal sur le comportement mécanique du joint adhésif. Ainsi, des analyses microscopiques sont nécessaires pour faire le lien entre des événements chimiques et des mesures macroscopiques de la tenue d'un assemblage.

L'originalité de la démarche présentée sur la figure II.16 est d'avoir une compréhension des phénomènes à l'échelle locale du joint adhésif. Le comportement mécanique est mesuré à l'échelle de la structure, mais dans cette étude, il est envisagé de définir des critères de rupture ou d'endommagement à l'échelle du joint, en utilisant un outil de corrélation d'images et une modélisation des tests mécaniques appropriée.

II.11.2 Le vieillissement assemblage métallique collé :

Dans une étude établie par E. Chipot [28] sur l'assemblage aluminium/adhésifs époxy, il a été montré que l'huile présente sur les tôles était totalement absorbée par l'adhésif et qu'en conséquence la viscosité de cet adhésif en était localement modifiée. La concentration locale maximale en huile ayant été estimée à 5% en masse, implique que l'huile reste totalement piégée par le réseau polymère après réticulation. Cette étude indique aussi les différents paramètres sur lesquels l'huile joue un rôle:

- ◆ Plastification de la colle et présence d'un gradient de propriétés dans l'épaisseur du joint dépendant des cinétiques de réticulation et de diffusion de l'huile dans la colle.
- ◆ Vitesse de diffusion de l'eau dans la colle plastifiée, exposée à un milieu salin ou non.
- ◆ Nature des interactions adhésif/aluminium et modification des transferts de charges.
- ◆ Mouillabilité adhésif/aluminium.

Cette étude indique que les propriétés mécaniques de l'assemblage collé ne sont pas modifiées par la présence d'huile. De même, après différents tests de vieillissement, l'influence de l'huile sur les propriétés à rupture de l'assemblage collé n'est pas suffisamment notable pour conclure sur le bienfait éventuel de sa présence.

A. Vieillissement des assemblages collés :

Le développement des adhésifs dans les structures d'engins ne peut se faire sans connaître les effets du vieillissement sur leurs propriétés. Plusieurs facteurs environnementaux ainsi que l'application de contraintes peuvent être à l'origine du vieillissement d'un assemblage. De nombreuses études menées sur des assemblages aluminium/ époxy dans le domaine aéronautique ont révélé que non seulement l'eau, la chaleur pouvaient détériorer ce joint, mais aussi des produits comme les carburants...

Doyle et al. [29] en étudiant la durabilité de joints époxy/aluminium exposés à 7 fluides différents, à 65°C, ont observé plusieurs phénomènes à l'origine de cette dégradation, généralisables à la majorité des systèmes adhésif époxy/métal. Ils indiquent que dans des environnements aqueux, la dégradation est le résultat d'une plastification de la résine, d'une diminution de la température de transition vitreuse (T_g) suite à la pénétration de l'eau et d'une corrosion du substrat. Les effets combinés du gonflement, de la baisse de la T_g et de la croissance de la couche d'oxyde accentuent la fissuration de l'adhésif et contribuent à une pénétration plus importante de l'eau et à terme, à la rupture du joint adhésif. Dans des solvants non polaires, tels que l'essence ou un fluide hydraulique, le gonflement et la plastification de la résine sont les mécanismes responsables de la baisse de résistance mécanique du joint adhésif. Le dichlorométhane est le composé ayant l'effet le plus endommageant sur l'assemblage collé car il entraîne une dégradation chimique de l'adhésif.

Facteurs environnementaux favorisant le vieillissement et tests associés I est conseillé d'exposer les assemblages collés testés aux différentes conditions environnementales ou de contraintes auxquelles ils peuvent être confrontés au cours de leur mise en service. Parmi ces conditions, peuvent être citées [30] :

- ◆ Le vieillissement thermique statique ou l'exposition à des températures négatives.

- ◆ L'exposition à une atmosphère humide (notamment chaud/humide)
- ◆ L'immersion dans l'eau à température ambiante ou élevée.
- ◆ Les vieillissements cycliques gel/dégel et sec/humide.
- ◆ L'immersion dans une solution saline ou l'exposition à un brouillard salin, en continu ou intermittent.
- ◆ L'exposition à des contraintes mécaniques combinées à une atmosphère favorisant le vieillissement.
- ◆ L'exposition à des solvants, des solutions acides et alcalines et enfin, à des huiles ou de l'essence.

Le type de vieillissement choisi doit mettre en œuvre au mieux, les facteurs environnementaux qui sont réellement déterminants pour le système étudié, sachant que la température et le taux d'humidité sont des facteurs prédominants.

L'application des contraintes mécaniques [31] a été démontrée comme étant un facteur qui accélérerait les mécanismes de vieillissement de l'assemblage collé en milieu humide, chaud ou salé. Cependant l'action simultanée d'une contrainte mécanique avec un milieu chaud humide sur le vieillissement est relativement complexe à exploiter car il est difficile de juger la contribution spécifique de chaque facteur sur le vieillissement.

Les tests de vieillissement accéléré sont souvent sujets à controverse, notamment à cause de la faible connaissance de leur validité par rapport aux tests de vieillissement naturel [30],[32]. Les tests accélérés ont tendance à surestimer la réduction des propriétés d'adhésion dans l'assemblage collé, avec des conséquences négatives sur le dimensionnement des assemblages collés et sur leur performance.

Selon Broughton [30], l'environnement le plus néfaste dans le monde peut être représenté par une humidité relative de 85% et une température de 60°C. Tout en sachant que le maximum d'humidité relative qui peut être atteint est de 96% et qu'en Europe, l'atmosphère ambiante correspond généralement à une température de 23°C et un taux d'humidité relative de 50%.

Broughton et Mera [30] proposent un test de vieillissement accéléré en trois (3) étapes qui selon eux, trouve son intérêt dans la modélisation mathématique de la diffusion de l'eau pour chaque étape du test de vieillissement. Dans une première étape, le matériau est exposé à l'humidité relative maximum disponible (96%) jusqu'à ce que la concentration d'eau à l'équilibre atteigne le niveau correspondant aux conditions d'humidité/température les plus basses. La deuxième étape consiste à exposer le matériau à un taux d'humidité relative plus bas (par exemple 15% HR), ce qui correspond donc à une étape de séchage, pour enlever l'excès d'eau sur les couches de surface extérieures. La dernière étape utilise un taux d'humidité relative correspondant au niveau final désiré (c'est-à-dire 84% HR). Ainsi, la distribution est homogénéisée à travers toute l'épaisseur du matériau.

D'autres critiques à l'encontre des tests de vieillissement sous conditions sévères sont l'éventuel déclenchement de mécanismes de dégradation qui ne sont pas représentatifs du vieillissement naturel et une possible non linéarité des phénomènes quand la température est proche ou supérieure

à la température de transition vitreuse. Il n'existe pas de méthode simple pour déterminer la durabilité sur le long terme des assemblages collés à partir des tests accélérés [31].

B .L'eau et ses mécanismes de diffusion :

L'eau est un des facteurs principaux agissant sur le vieillissement des adhésifs, d'une part parce que l'eau présente une grande permittivité (fortes paires d'ions contribuent aux forces interfaciales) mais aussi parce qu'elle a une grande tension de surface (ceci agit sur la formation de liaisons faibles entre l'adhésif et le substrat métallique [32]. Le principal effet macroscopique de la pénétration de l'eau dans un assemblage collé est la chute importante des propriétés mécaniques, c'est-à-dire des contraintes à la rupture et des modules d'élasticité en cisaillement et en traction. Les résines époxy totalement réticulées présentent souvent une certaine fragilité et sont sensibles à la prise en eau, ce qui limite leur application dans des environnements humides [34]. La diffusion de l'eau dans des joints époxy/métal se fait au sein de l'adhésif lui-même, à travers les pores et fissures par capillarité, mais aussi par l'interphase adhésif/métal [35]. Ce processus est accéléré par la température car la diffusion de l'eau dans les adhésifs structuraux obéit à la loi d'Arrhenius [32]. La modification des propriétés de l'adhésif par la pénétration d'eau dans l'adhésif est souvent considérée de moindre importance, par comparaison avec celle induite par l'infiltration d'eau au niveau des interfaces [32]. Ces pertes d'adhésion aux interfaces polymère/métal peuvent parfois être minimisées en appliquant un traitement de surface adéquat au métal (anodisation, silanes...).

Les conséquences de la pénétration de l'eau dans un assemblage collé sont donc abordées en considérant, dans un premier temps, sa diffusion dans l'adhésif et dans un second temps, à l'interface. Auparavant, la notion de concentration critique en eau pour les assemblages collés est explicitée.

En considérant le taux d'humidité relative (HR) du milieu de vieillissement, le taux maximum d'absorption ou la concentration critique en eau w_{max} est définie par la relation suivante :

$$w_{max} = k (HR)^n \quad \dots\dots(II.3)$$

Avec k et n, des constantes dépendant de la nature du polymère et variant pour les polyépoxydes de 0,049 à 0,066 pour k et de 1 à 1,8 pour n.

Cette concentration critique en eau définit une limite au-dessus de laquelle apparaît l'affaiblissement des propriétés. Kinloch, Gledhill et Shaw [36] ont testé la tenue d'assemblages collés bout à bout composés d'un adhésif époxy à base de DGEBA (**DGEBA** : Diglycyléther du Bisphénol (la résine la plus ancienne) les polyépoxydes sont des résines thermodurcissables présent de bonne propriétés mécaniques, une bonne tenue en température, un faible retrait) et réticulé par le 2-éthylhexanoate de 2, 4,6-tri (diméthylamino)-phénol. Les conditions de vieillissement prévoyaient une variation de la température de 20 à 90°C pour les tests en immersion et maintenaient une température de 20°C pour les tests en atmosphère humide (55% HR). Par une approche de la mécanique de la rupture, il a été observé que la résistance des joints est affaiblie par immersion dans l'eau et qu'une fissure apparaît pour une concentration critique en eau absorbée de 1,35% [31], [37].

Pour des joints simple recouvrement d'un système adhésif époxy/aluminium, Brewis et Comyn [37] ont eu déterminé une concentration critique en eau de 1,45% (soit la concentration en eau à l'équilibre pour le joint vieilli à 50°C et 65% HR). L'adhésif considéré est une résine époxy de type DGEBA réticulée par du 1,3-diaminobenzène et ses propriétés d'absorption d'eau n'indiquent pas

d'humidité relative critique comme pour les joints. Ceci laisse supposer que l'affaiblissement de l'assemblage collé au-delà d'une humidité critique de 65% HR a lieu à l'interface aluminium/adhésif époxy, soit par affaiblissement des interactions adhésif/substrat (forces de Van der Waals, par exemple), soit par hydratation de la couche d'oxydes. Une combinaison de ces deux phénomènes est aussi envisageable. La valeur de cette concentration critique en eau peut s'expliquer par l'apparition d'une discontinuité des phénomènes à l'interface, comme l'hydratation des sels. Le sel absorbe l'eau jusqu'à son taux d'hydratation maximum. Une fois ce processus terminé, l'eau ne pourra plus être captée par les sels et sera libre d'engendrer la dégradation de l'interface.

Enfin, Popineau [38] définit la concentration critique en eau pour un assemblage aluminium/adhésif époxy comme étant la concentration en eau au-dessous de laquelle il n'y a pas suffisamment de liaisons secondaires interfaciales rompues pour permettre la rupture interfaciale des joints, dimensionnés pour des tests de clivage en coin. Cette concentration critique en eau est aussi de l'ordre de 1% (exactement 1,1%). Il est à noter que cette hypothèse peut ne pas être valable pour des prétraitements de la surface métallique par des agents de couplage tels que les silanes pour lesquels des liaisons covalentes M-O-Si se forment à l'interface polymère/métal [39].

Bowditch conteste cette notion de concentration critique en eau et est sceptique vis-à-vis de la notion d'une concentration seuil [40]. Dans certaines circonstances, il est possible d'observer que l'affaiblissement attribuable à une dégradation interfaciale par l'eau est contrebalancé par un renforcement du joint adhésif dû à la diminution des contraintes internes par l'infiltration d'eau dans la couche d'adhésif. Il existe donc, dans ce cas, une concentration d'équilibre en eau en dessous de laquelle la force d'adhésion du joint n'est pas affectée par l'eau.

C. Diffusion dans l'adhésif :

La mesure de l'évolution de la masse d'eau absorbée par un adhésif lors de son vieillissement peut être réalisée en mesurant les variations de masse d'un film immergé. La courbe obtenue permet de déterminer le coefficient de diffusion D et la concentration d'eau à l'équilibre m_e [32]. La diffusion de l'eau au sein d'un assemblage collé et en particulier au sein de l'adhésif, peut se décomposer selon trois étapes principales:

- ◆ Une pénétration des premières molécules d'eau dans le polymère. Elles se lient aux sites polaires, avec lesquels elles ont une forte interaction, en cassant les liaisons secondaires. Il est à noter que les résines époxy ne présentent que très peu de volume libre 0,72%, et la plupart des molécules d'eau pénétrant dans un tel réseau sont liées par liaisons hydrogène aux fonctions polaires de la résine époxy [24]. Le phénomène de plastification est donc principalement causé par l'eau liée, qui est en concentration très importante dans les réseaux époxy composés de groupes très polaires comme les hydroxyles, amines ou carboxyles [33].
- ◆ Une fois que tous les sites polaires ou presque sont liés aux molécules d'eau, un plateau est atteint. Le réseau est au maximum de plastification.
- ◆ L'eau qui pénètre ensuite dans le réseau polymère se loge dans les micro-volumes formés par le gonflement et la relaxation du réseau. Ces molécules d'eau n'ont que peu d'interaction avec le polymère puisqu'elles sont sous la forme d'agrégats. Lors de cette dernière étape, les propriétés mécaniques ne sont pas modifiées par rapport à la seconde étape. [41].

Lors du vieillissement d'une résine époxy DGEBA modifiée avec des élastomères et comportant des charges minérales dans une solution d'eau déminéralisée, il a été montré que l'absorption d'eau pouvait se résumer en deux (2) étapes [42]. La première étape d'absorption d'eau suit la loi de Fick et est attribuée au procédé de saturation de la matrice époxy. Cette première étape d'absorption a lieu jusqu'à un taux d'absorption en eau de 4,3% en fraction massique et mène à la plastification de la résine. Au-delà de ce taux, l'eau se loge dans les microcavités formées lors du procédé de vieillissement et ne modifie pas le spectre mécanique de la résine. La force motrice pour la seconde étape d'absorption est la pression osmotique. Après séchage, la température de transition vitreuse ne revient pas à sa valeur initiale car une quantité d'eau résiduelle (~1%) est piégée dans le matériau. La seconde étape d'absorption n'est pas observée lors d'un vieillissement en immersion dans une solution saline (5% NaCl (w/w)) [42]. La résine époxy, qui a un rôle de membrane, n'est pas perméable au soluté et la solution saline étant plus concentrée en ions que les poches formées lors de la dégradation hydrolytique du réseau époxyde, l'eau ne peut pas diffuser à travers la résine époxy pour équilibrer les concentrations. Il y a un phénomène d'osmose inverse qui limite l'absorption d'eau à un taux de 4,1% (en masse).

D. Lois de diffusion de l'eau :

Pour modéliser la diffusion de l'eau dans les adhésifs époxy, la loi de Fick est insuffisante. En effet ce modèle ne rend pas compte des cas de diffusion, anormale qui correspondent par exemple à un comportement linéaire de la prise en eau en fonction du temps (la loi de Fick indique une variation linéaire en fonction de la racine carrée du temps) ou à une vitesse de désorption plus rapide que l'absorption. De plus, à haute température et fort taux d'humidité relative, ce qui peut correspondre à des conditions de vieillissement accéléré, le modèle fickien n'est plus valable. Il existe une température limite au-dessus de laquelle la diffusion de l'eau dérive du modèle classique monophasique de Fick, vers un modèle biphasique de type Langmuir [30]. C'est ainsi que le modèle de Carter et Kibler [43] a été adapté à la description des phénomènes de diffusion de l'eau dans des adhésifs structuraux époxy. Ce modèle repose sur le modèle de Langmuir à 2 phases qui considèrent l'existence d'eau « libre » et d'eau « liée ». Ces deux modèles cinétiques de la diffusion de l'eau (Fick et Langmuir) ne sont plus applicables dans le cas de dégradation irréversible de l'adhésif. Les coefficients de diffusion de l'eau dans des systèmes époxy-amines sont relativement faibles et varient entre 5.10^{-14} et $2.10^{-13} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, à 25°C [23].

E. Influence de la présence des défauts sur la distribution des contraintes

Dans cette étude, la méthode des éléments finis a été utilisée pour analyser la répartition des contraintes de cisaillement dans un joint collé de deux plaques d'aluminium 2024 -T3 avec et sans présence des défauts. Les effets des propriétés adhésives, module de cisaillement, l'épaisseur et la longueur de l'adhésif ont été mis en évidence. Les résultats montrent que les valeurs élevées de la contrainte de cisaillement sont situées sur les bords libres de la zone de liaison par adhérence, et peuvent atteindre des valeurs maximales à proximité du défaut, car la concentration de contrainte élevée se produit près de cette zone [44].

II.12 Influence de décollements dans l'adhésif sur (FIC) et le (COD)

La détermination du facteur d'intensité de contrainte à la pointe de la fissure est l'une des méthodes les plus utilisées pour prédire la durée de vie des structures d'aéronefs. Cette prédiction est plus compliquée pour les fissures réparées avec le patch composite lié. Cette étude est utilisée pour calculer le facteur d'intensité de contrainte (FIC) et le déplacement d'ouverture de fissure (COD) pour les fissures réparées avec des patches composites simples et double face (figure II.17). L'effet de la présence de la région dans les décollements adhésif à la fissure a été pris en considération. Les

résultats [45]. Montrent qu'il y a une réduction considérable de la valeur asymptotique des facteurs d'intensité et de l'ouverture de déplacement à la pointe de la fissure. L'utilisation d'un patch double face supprime l'effet de flexion due à l'excentricité du patch sur un seul côté [45].

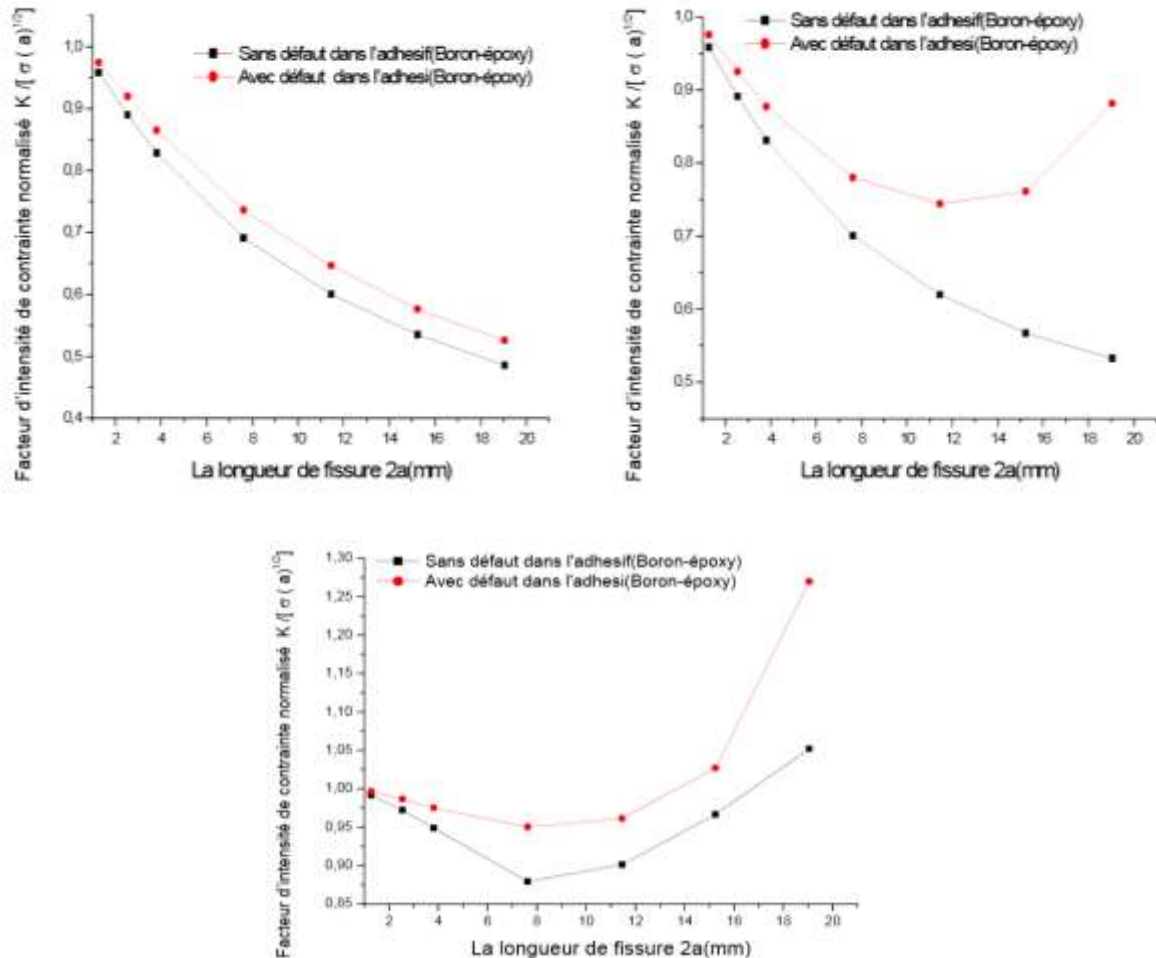


Figure II.17 : Comparaison entre l'adhésif avec et sans défaut pour le patch Boron / époxy, a) Réparation avec patch double, b) Réparation avec patch double, c) Réparation avec patch simple [45].

II.13. Influence d'absorption de l'eau sur la propagation des fissures

L'objectif d'étude [46] est d'analyser par des essais expérimentaux, l'effet du vieillissement hygrothermique du patch et de l'adhésif sur le comportement en fatigue d'une plaque d'aluminium 2024-T3 endommagée et réparée par un patch composite carbone/époxy. L'effet de l'absorption d'eau par l'adhésif et le composite a un effet important sur le transfert de charge dans la plaque endommagée et donc le retard de propagation de la fissure. Plus le temps d'immersion dans l'eau est important, moins la résistance à la fatigue de la structure réparée est importante. Les résultats expérimentaux ont montré que le nombre de cycles de rupture est directement lié au temps de vieillissement [46].

Dans cette étude, l'effet de l'absorption d'eau sur la propagation de fissures a été analysé à l'aide de la méthode de l'élément finit. Les résultats obtenus nous permettent de tirer les conclusions

suivantes: La réduction du SIF est d'environ 70% pour le patch sans absorption d'eau, mais cette réduction 46% absorbé par le patch. 46% lorsque le taux d'absorption d'eau par le patch de composition est de 1,46%. Le taux d'absorption d'eau a une incidence importante sur la variation du FIC pour la fissure réparée. L'augmentation de l'absorption d'eau par le composite entraîne une augmentation du FIC dans les deux modes de propagation des fissures, I et mixte, ce qui a des effets négatifs sur les performances de réparation (transfert de charge de la plaque au patch et moins donc concentrations des contraintes dans la zone endommagée est plus importante mais la propagation de la fissure est plus rapide.

II.14.Effet de vieillissement à long terme d'un composite carbone/époxy sur la fatigue en fissuration application pâle d'hélice :

L'étude [47] présent l'effet du vieillissement à long terme en eau de mer sur les propriétés en fatigue d'un composite carbone /époxy. Ce matériau composite est composé d'une résine époxy et d'un renfort fibre longues en carbone. Les essais de fissuration en fatigue effectué suivant le mode I et II.

Des vieillissements en eau de mer ont montré un comportement Fickien et les éprouvettes de fatigue ont testées en condition non vieilli et vieilli à saturation et vieilli à saturation puis sèches. Les résultats indiquent une dégradation des propriétés après saturation. Par contre en mode I cette réduction est permanente, tandis qu'en mode II elle est réversible.

Cette étude a montré la sensibilité d'un composite en carbone époxy à l'environnement marine, le composite subit une diffusion d'eau conforme à la loi de Fick avec une valeur de masse à saturation de 1.2 %. L'énergie de fissuration en mode I et en mode II présente une perte de 25% lorsque les essais et quasi-statique. Cette perte s'est montrée irréversible dans le cas des essais de mode I et partiellement réversible dans le cas de fissuration en mode II. L'eau de mer provoque une perte d'énergie de fissuration en mode I et mode II. Cette perte semble plus importante pour les vitesses de fissuration plus élevées pour le mode I tandis qu'elle semble constante en mode II.

Conclusion

Notre étude approfondie sur les recherches antérieures nous a aidés à choisir le modèle à étudier et fixer ces conditions aux limites, et nous avons obtenu à travers celui-ci les conclusions suivantes :

Les résultats de l'analyse numérique par éléments finis en utilisant le code de calcul Abaqus ont montré l'efficacité ce code dans la détermination de facteurs d'intensités des contraintes dans les assemblage.

L'optimisation des joints collés basés sur la variations des dimensions du joint tel que la variation de différentes types du maillage, le nombre des éléments utilisés, les conditions aux limites, le chargement, l'épaisseur de l'adhésif, la longueur de recouvrement et le module de cisaillement.

Le maillage constitue aussi un facteur déterminant sur la précision des résultats.

L'augmentation de l'épaisseur de l'adhésif comporte une réduction de contrainte de cisaillement, mais le choix de cette épaisseur doit être optimisé afin d'éviter l'émergence d'un troisième matériau de faible propriétés mécanique.

L'absorption d'eau par l'adhésif augmente sa ductilité et réduit sa rigidité, donc les matériaux secs étant toujours les plus résistants et les matériaux humides étant toujours les plus fragiles.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A. Baker, Bonded composite repair of fatigue-cracked primary aircraft structure, *Compos. Struct.* 47(1) (1999) 431-443.
- [2] T. F. Christian, D. O. Hammond, J. B. Cochran, Composite material repairs to metallic airframe components, *J. Aircraft.* 29(3) (1992) 470-476.
- [3] S. Naboulsi, S. MALL. Nonlinear analysis of bonded composite patch repair of cracked aluminum panels. *Composite Structures*, v.41, Issues 3-4, p. 303-313, 1998.
- [4] W. Y. Lee, J. J. Lee, Successive 3D FE analysis technique for characterization of fatigue crack growth behavior in composite-repaired aluminum plate, *Compos. Struct.* 66(1) (2004) 513-520.
- [5] A. Amrouche et G. Mesmacque, Cold expansion effect on the initiation and the propagation of the fatigue crack, *International Journal of Fatigue*, 2003, V25, PP 949–954.
- [6] H. Errouane, Z. Sereir, A. Chateaneuf, Numerical model for optimal design of composite patch repair of cracked aluminum plates under tension. *Int. J. Adhes. Adhes.* 49 (2014) 64-72.
- [7] T. V. Umamaheswarar, R. Singh, Modelling of a patch repair to a thin cracked sheet, *Eng. Fract. Mech.* 62(2) (1999) 267-289.
- [8] Madani, K., Touzain, S., Feugas, X., Roy, A. and Cohendoz, S. (2009), "Analyze of the notch effect on the distribution of the stresses in the adhesive layer between two bonded aluminum 2024-T3 plates", *J. Mater. Technol.*, 97(5), 315-324.
- [9] T. Achour, B. Bachir Bouiadjra, B. Serier, Numerical analysis of the performances of the bonded composite patch for reducing stress concentration and repairing cracks at notch, *Comp. Mater. Sci.* 28(1) (2003) 41-48.
- [10] H. Hosseini-Toudeshky, B. Mohammadi, H. R. Daghyani, Mixed-mode fracture analysis of aluminium repaired panels using composite patches, *Compos. Sci. Technol.* 66(2) (2006) 188-198.
- [11] M. R. Ayatollahi, R. Hashemi, Computation of stress intensity factors (K I, K II) and Tstress for cracks reinforced by composite patching, *Compos. Struct.* 78(4) (2007) 602-609.
- [12] Madani K, Touzain S, Feugas X, Cohendouz S, Ratwani M. Experimental and numerical study of repair techniques for panels with geometrical discontinuities. *Comput Mater Sei* 2010;48:83-93.
- [13] A. Megueni, B. Bachir Bouiadjra, B. Boutabout, Computation of the stress intensity factor for patched crack with bonded composite repair in pure mode II, *Compos. Struct.* 59(3) (2003) 415-418.
- [14] H. Jian-Bin, L. Xu-Dong, M. Zhi-Tao, Fatigue behavior of thick center cracked aluminum plates repaired by two-sided composite patching, *Mater. Design.* 88 (2015) 331-335.
- [15] H. Fekirini, B. Bachir Bouiadjra, M. Belhouari, B. Boutabout, B. Serier, Numerical analysis of the performances of bonded composite repair with two adhesive bands in aircraft structures, *Compos. Struct.* 82(1) (2008) 84-89.
- [16] C. Soutis, F. Z. Hu, Design and performance of bonded patch repairs of composite structures, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: J. Aerospace. Eng.* 211(4) (1997) 263-271.
- [17] X. Liu, G. Wang, Progressive failure analysis of bonded composite repairs, *Compos. Struct.* 81(3) (2007) 331-340.
- [18] M. Ramji, R. Srilakshmi, M. B. Prakash, Towards optimization of patch shape on the performance of bonded composite repair using FEM, *Compos. Part B-Eng.* 45(1) (2013) 710720.
- [19] Aminallah, L., et al. "Analysis of the distribution of thermal residual stresses in bonded composite repair of metallic aircraft structures." *Computational Materials Science* 46.4 (2009): 1023-1027.

- [20] J. Aakkula, O. Saarela, An experimental study on the fatigue performance of CFRP and BFRP repaired aluminium plates, *Compos. Struct.* 118 (2014) 589-59.
- [21] RD Adams. *Adhesive Bonding. Science, technology and applications*. Chapter 1: History of adhesive bonding (P.A Fay). Adams R.D (Ed.). GBR : Woodhead Publishing (2005) 3-22.
- [22] J.Y. Cognard, P. Davies, L. Sohier, R. Créac'hcadec. A study of the non linear behavior of adhesively bonded composite assemblies. *Composite Structures*. 76 (2006) 34-46.
- [23] M.Bordes, P. Davies, J-Y. Cognard, L. Sohier, V. Sauvant-Moynot, J. Galy. Prediction of long term strength of adhesively bonded steel/epoxy joints in sea water. *Int. J. of Adhes. Adhes.* 29 (2009) 595-608.
- [24] M.P.Zanni-Deffarges, M.E.R. Shanahan. Diffusion of H₂O into an epoxy adhesives: comparison between bulk behaviour and adhesive joints. *Int. J. Adhes. Adhes.* 15 (1995) 137-142.
- [25] J. Cognard. *Science et technologie du collage*. Ed. PPUR presses polytechniques et universités romandes. Chapitre 8 : Durée de vie des joints collés (2000) 253-295.
- [26] C.L. Soles, A. F. Yee. A discussion of the molecular mechanisms of moisture transport in epoxy resins. *Journal of Polymer Science : Part B : Polymer Physics*. 38 (2000) 792-802.
- [27] M.Ganem, B. Mortaigne, V. Bellenger, J. Verdu. Hydrolytic ageing of vinyl ester materials. Part 1. Ageing of prepolymers and model compound. *Polym. Networks Blends*. 4 (1994) 87-92.
- [28] E. Chipot. Mécanismes d'adhésion et de vieillissement d'assemblages collés. Thèse de doctorat à l'Université de Haute-Alsace (2002).
- [29] G. Doyle, R.A. Pethrick. Environmental effects on the ageing of epoxy adhesive joint. *Int. J. Adh. Adh.* 29(2009) 77-90.
- [30] WR Broughton and RD Mera. NPL Report CMMT(A)61. Review of durability test methods and standards for assessing long term performance of adhesive joints. 1997.
- [31] A.J. Kinloch. Durability of structural adhesives. Introduction. Ed. A.J. Kinloch. Applied Science Publishers, London and New York (1983) 18-35.
- [32] RD Adams. *Adhesive Bonding. Science, technology and applications*. Chapter 6: Environmental (durability) effects (J. Comyn). Adams R.D (Ed.). GBR : Woodhead Publishing (2005) 123-142.
- [33] D.M. Brewis, J. Comyn et al. The effect of humidity on the durability of aluminium-epoxide joints. *Joints. Int. J. Adhes. Adhes.* 10 (1990) 247-253.
- [34] S.G. Prolongo. Comparative study on the adhesive properties of different epoxy resins. *Int. J. Adhes.* 26, 125-132 (2006).
- [35] J-A.Petit, Y. Baziard, V. Nassiet, B. Hassoune-Rhabbour. Durabilité des assemblages collés. Etude. *Techniques de l'Ingénieur*. BM 7 666. (2005).
- [36] R.A. Gledhill, A.J. Kinloch, S.J. Shaw. A model for predicting joint durability. *The journal of Adhesion*. 11 (1980) 3-15.
- [37] D.M. Brewis, J. Comyn et al. The effect of humidity on the durability of aluminium-epoxide joints. *Joints. Int. J. Adhes. Adhes.* 10 (1990) 247-253.
- [38] S. Popineau. M.E.R Shanahan. Simple model to estimate adhesion of structural bonding during humid ageing. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 26 (2006) 363-370.
- [39] M-L. Abel, R.P. Digby, I.W. Fletcher, J.F. Watts. Evidence of specific interaction between γ -glycidoxypropyltrimethoxylane and oxidized aluminium using high-mass resolution ToF-SIMS. *Surf. Interface Anal.* 29 (2000) 115-125.
- [40] M.R.Bowditch. The durability of adhesive joints in the presence of water. *Int. J. Adhesion and adhesives*. Vol 16 (1996) 73-79.

- [41] P.Nogueira, C. Ramirez, A.Torres, M.J. Abad, J.Cano, J.Lopez, I.Lopez-Bueno, L.Barral. Effect of water sorption on the structure and mechanical properties of an epoxy resin system. *Journal of Applied Polymer Science*. 80 (2001) 71-80.
- [42] K.I. Ivanova et al. Hygrothermal aging of rubber modified and mineral filled dicyandiamide cured DGEBA epoxy resin. I. Diffusion behaviour. *Journal of Applied Polymer Science*, vol 82 (2001) 3468-3476.
- [43] H.G. Carter, K.G. Kibler. Langmuir-type model for anomalous moisture diffusion in composite resins. *J. Composite materials*. 12 (1978) 118-130.
- [44] Aicha Benchiha · Kouider Madani « Influence of the presence of defects on the stresses shear distribution in the adhesive layer for the single-lap bonded joint ». 2015
- [45] Aicha Benchiha · Kouider Madani · Sebastien Touzain « Numerical analysis of the Influence of the presence of disbond region in adhesive layer on the stress intensity factors (SIF) and crack opening displacement (COD) in plates repaired with a composite patch » 2016 ·
- [46] Laid Rezgani, K.Madani F. Xavier, S.Touzain Influence of water ingress onto the crack propagation rate in a AA2024-T3 plate repaired by a carbon/epoxy patch. *Aerospace Science and Technology* 55 (2016) 359-365.
- [47] Antoine le Gruen-Geffroy ,B Pierre-yvers,B Habret, P Davies « Effet de vieillissement à long terme d'un composite carbone/époxy sur la fatigue en fissuration application pale d'hélice », compte rendu des JNC21, bourdeaux INP 1-3 juillet 2019.

CHAPITRE III

III.1 Introduction

L'objectif de cette première étape de modélisation numérique est d'obtenir un modèle qui soit léger en temps de calcul, prises et proche de modèle réelle. Bien que le travail en amont se concentre sur des modèles numérique bien dimensionné, la stratégie de modélisation est créée afin d'être adaptée à la modélisation des modèles proposé. Le nombre d'éléments et de mailles va donc augmenter considérablement, augmentant par la même occasion le temps de calcul.

De cette manière, il est donc primordial de trouver le nombre minimum d'éléments pour lequel les modèles numériques restent cohérents et fiables. Ainsi, grâce aux premières études sur le cisaillement, il est possible d'effectuer une étude de la sensibilité au maillage.

L'analyse numérique est un outil important pour déterminer la distribution des contraintes dans différents substrats. Plusieurs auteurs ont proposé de nombreuses méthodes pour modéliser la structure réparée en tenant compte des paramètres mécaniques de l'adhésif et du composite. L'analyse des contraintes dans la couche adhésive est importante car cette dernière est le maillon le plus faible de la structure ou ses propriétés mécaniques sont les plus faibles et donc des dommages rapides à cette dernière. L'objectif de ce chapitre est d'analyser par la méthode des éléments finis le comportement en rupture d'une plaque Aluminium 2024-T3 endommagée et réparée par un composite. L'influence, des conditions aux limites, type de maillage, type d'éléments, dimension de patch et la forme de patch ont été mis en évidence sur le transfert de charge de la plaque endommagé vers le patch composite. Les résultats de l'analyse numérique montrent clairement l'influence de type de maillage, les conditions aux limites et surtout les dimensions de patch composite et sa forme réduit considérablement les contraintes lors de calculs.

III.2 Présentation des Matériaux utilisés

III.2.1 Alliage d'aluminium 2024-T3

L'élément 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 $2,7 \text{ g.cm}^{-3}$ 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.

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.1. 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).

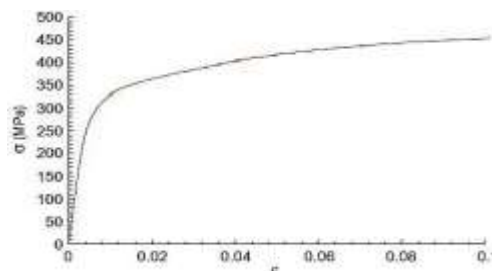


Figure III.1 Courbe contrainte/déformation Plaque Aluminium 2024-T3 (courbe expérimentale) [1]

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)	69000 MPa
Contrainte à la rupture Rm	452 MPa
Limite d'élasticité R0.2	230MPa
Coefficient de poisson (ν)	0.3
Module de cisaillement (G)	26000 MPa
Allongement (A%)	2.4

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

III.2.2 L’adhésif structural ADEKIT A140 [1]:

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 [1].

➤ **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 [2].

PROPRIETES PHYSIQUES			
Composition	RESINE	DURCISSEUR	MELANGE
Proportion de mélange en poids	100	90	
Proportion de mélange en volume à 25°C	100	100	
Couleur	Beige Marron Noir Gris	Beige	Beige Marron Noir Gris

Viscosité à 25°C	400	450	430
Densité des parts avant mélange à 25°C	1.38	1.23	1.30
Pot life à 25°C sur 100 g (min)			30
Durée pratique d'utilisation (min)			40

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

Propriétés mécaniques et thermiques			
Dureté	ISO 868-85	Shore D1/D15	80/70
Résistance en traction	ISO 527-96	MPa	30
Allongement à la rupture	ISO 527-96	%	2
Température de transition vitreuse	TMA-METTLER	°C	70
Coefficient de dilatation linéaire (CTE)	TMA-METTLER	10 ⁻⁶ K ⁻¹	70
Température de service		°C	-40 ; +100

Tableau III.3 : Propriétés mécaniques et thermiques de l'adhésif [1].

Propriétés Mécaniques de l'Assemblage			
Durée pour obtenir 1 MPa RTC à 25°C	ISO 4587 : 2003	H	4h30
Durée pour obtenir 50% RTC finale à 25°C	ISO 4587 : 2003	H	20h
RTC (1) sur aluminium (2)	ISO 4587 : 2003	MPa	21RC (3)
Résistance au pelage galet mobile (2)	ISO 4587 : 1997	KN/m	5RC (3)
RTC après cataplasme humide 15 jours à 80°C	ISO 4587 : 2003	MPa	20 RC

Tableau III.4 : Propriétés mécaniques de l'assemblage [2].

- (1) RTC : résistance en traction cisaillement sur aluminium 2017A décapé sulfochromique
- (2) Conditions de réticulation : 8 h à 80°C + 48 h à température ambiante
- (3) Selon la norme ISO 10365, RC = Rupture cohésive [2]

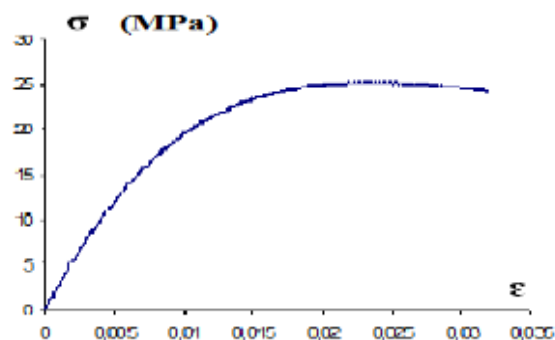


Figure III.2: Courbe contrainte-déformation de l'adhésif ADKEITA-140.

III.2.3 Matériau composite carbone/époxy :

On appelle de façon courante, matériaux composites, des arrangements de renforts (fibres et/ou particules) noyés dans une matrice (résines), dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible, que celle des renforts donc c'est la combinaison macroscopique de deux ou plusieurs matériaux non miscible, qui se complètent et qui ont des caractéristiques différentes.

Ce qui donne un matériau hétérogène et anisotrope. Le composé final aura des propriétés que les éléments constitutifs seuls ne possèdent pas.

- Matériau composite Carbone/ Epoxyde :

La fibre de Carbone est du matériel du brin long et mince d'environ 0,0002 ~0,0004 pouce (0,005 ~ 0,010 mm) de diamètre et composé essentiellement d'atomes de Carbone. Les fibres de Carbone sont utilisés pour fabriquer des pièces d'avions et d'engins spatiaux, de carrosseries de voitures de course, des puits du club golf, de cadres de bicyclette, des cannes à pêche, les ressorts automobiles, des mâts de voiliers, et de nombreux autres composants où le poids léger et la haute résistance sont nécessaires [3].

Les polyEpoxydes sont des résines thermodurcissables présentant de bonnes propriétés mécaniques, une bonne tenue en température, un faible retrait.

Le terme exact est polyEpoxyde mais il est admis de parler d'Epoxyde et, par abus de langage, d'époxy. Les Epoxydes cycloaliphatiques avec des propriétés mécaniques, électriques, et de résistance au vieillissement supérieures [3].

La nature du carbone/époxyde lui procure de bonnes caractéristiques mécaniques vis-à-vis les sollicitations mécaniques. Le Carbone/époxy est largement utilisé dans la réparation des fissures dans les secteurs de l'aéronautique, de l'aérospatiale et même du génie civil.

Le tableau III.5 présente quelques caractéristiques mécaniques des fibres de carbone et du verre.

Caractéristiques	Verre	Carbone HR	Carbone HM
Masse volumique (Kg /m ³)	2600	1750	1810
Diamètre (Um)	10 à 20	5 à 7	5 à 7
Module d'Young (GPa)	73	230	400
Module spécifique (mm /Kg)	28	130	120
Contrainte à la rupture (MPa)	3400	3000-4000	2800
Contrainte spécifique (KMN/Kg)	1300	1710- 2290	1550
Prix de revient rapporté aux fibres de Verre E	1	10-15	30-50

Tableau III.5: Caractéristiques des fibres de Carbone, comparées à celles des fibres de Verre E [4].

III.3 Modèle géométrique

Le modèle géométrique de la plaque réparée par patches en composite est représenté sur la figure III.1. La plaque en aluminium 2024 T3 est caractérisée par sa hauteur $H_p = 250$ mm, sa largeur $W_p = 100$ mm et son épaisseur 2 mm. Cette plaque présente une entaille centrale de diamètre 10 mm et réparée

par un patch en composite de dimensions $H_r = 50$ mm, $W_r = 50$ mm et $e_r = 2$ mm. Le patch étant collé à la plaque par un adhésif ADEKIT A140 d'épaisseur $e_a = 0,2$ mm. L'ensemble (plaque+ patch et adhésif) sont soumis à un chargement mécanique d'amplitude variable 70 à 120 MPa. Les propriétés mécaniques de la plaque du patch ainsi que l'adhésif sont illustrés dans le tableau III.2.

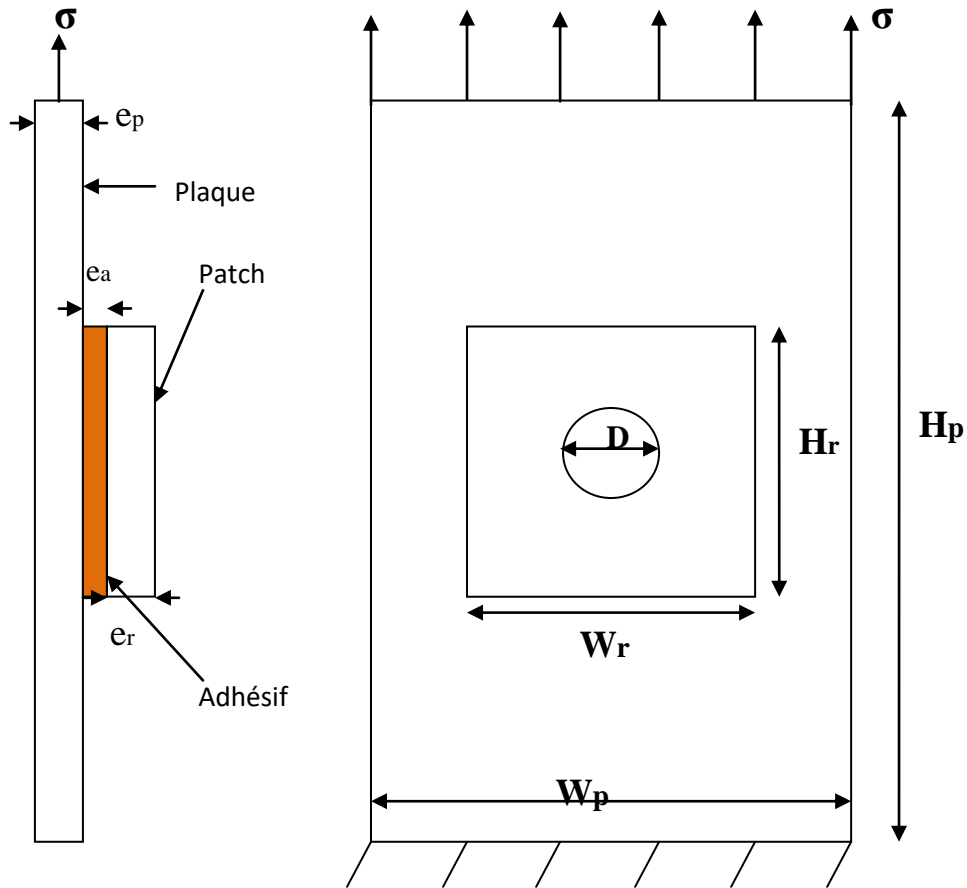


Figure III.3 : Modèle géométrique de la plaque réparée

Les Dimensions des différents substrats								
Plaque (mm)	$W_p = 100$	$H_p = 250$	$e_p = 2$	Diamètre de l'entaille (mm)				
Adhésif (mm)	$W_a = 50$	$H_a = 50$	$e_a = 0.2$	10				
Patch (mm)	$W_r = 50$	$H_r = 50$	$e_r = 2$					
Tableau III.6 : Les dimensions de l'ensemble (plaque+adhésif+patch composite).								
Propriétés du patch composite								
E1(Mpa)	E2(Mpa)	E3(Mpa)	v12	v13	v23	G12(Mpa)	G13(Mpa)	G23(Mpa)
109000	8819	8819	0.34	0.34	0.38	4315	4315	3200

Propriétés du Plaque Aluminium			
Propriétés élastiques		Propriétés plastique	
E (Mpa)	N	σ_e (Mpa)	ϵ_p
69000	0.3	256	0
		310	0.003
		355	0.008
		380	0.025
		410	0.042
		450	0.079
Propriétés de l'Adhésif ADEKIT A140			
Propriétés élastiques		Propriétés plastique	
E (Mpa)	N	σ_e (Mpa)	ϵ_p
2692	0.3	15	0
		20	0.0005
		24.9	0.0011
		27	0.0019
		32	0.0037

Tableau III.7: Propriétés Mécaniques des différents substrats (plaque+adhésif+patch composite) utilisées dans cette étude.

III.4 L'optimisation du patch en composite (carbone /Epoxy) :

Afin de voir l'influence des paramètres géométriques et éléments de maillage sur le comportement de la structure on a essayé de voir plusieurs facteurs :

III.4.1 Maillage :

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.

La figure III.4 montre le maillage de la structure en fonction du nombre de nœuds.

a)

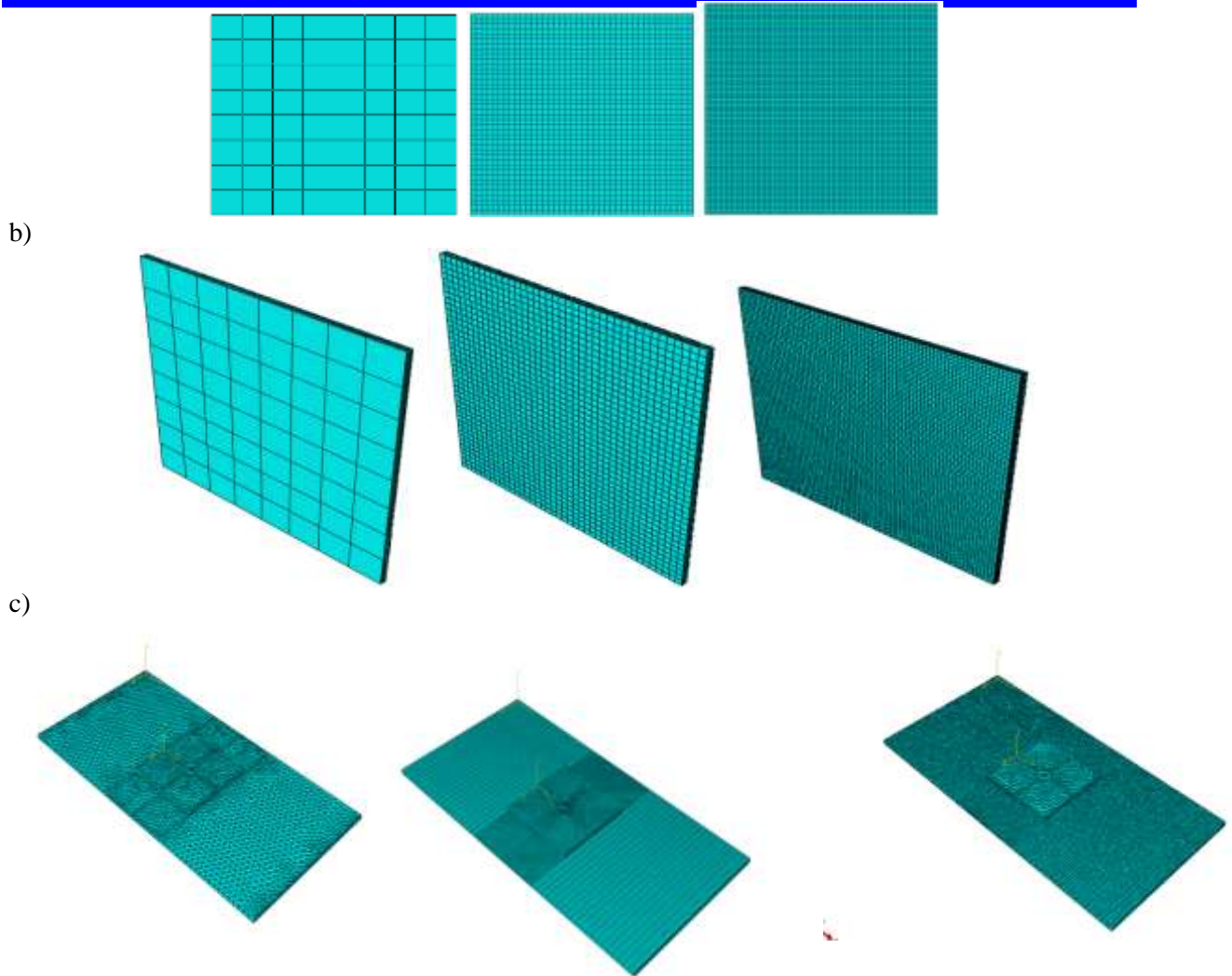


Figure III.4 : Représentation des maillages choisis avec augmentation de nombre de nœuds. a) adhesive. b) patch. c) maillage du l'ensemble (plaque+adhésif+patch)

Dans cette partie d'étude on a fixé le diamètre de l'entaille (10 mm) et on a fait varier le nombre de nœuds et types des éléments de maillage.

A. Influence de nombre des nœuds :

afin de voir l'influence du nombre des nœuds dans le maillage sur la distribution des contraintes, on a fixé le type d'éléments à savoir (linéaire hexe sweep) et on a essayé d'augmenter le nombre des nœuds afin de raffiner de plus en plus la structure.

✚ Les condition aux limites:

➤ Coté fixe, la face supérieur de la plaque:

$$U1=U2=U3=0 \text{ et } R1 \neq 0 ; R2 \neq 0 ; R3 \neq 0.$$

➤ Coté mobile, la face inférieur de la plaque:

$$U2=U3=0, U1 \neq 0$$

$$R1 \neq 0 ; R2 \neq 0 ; R3 \neq 0$$

Les figures III.5/8 montrent le maillage de la structure en fonction du nombre des nœuds.

Maillage :1

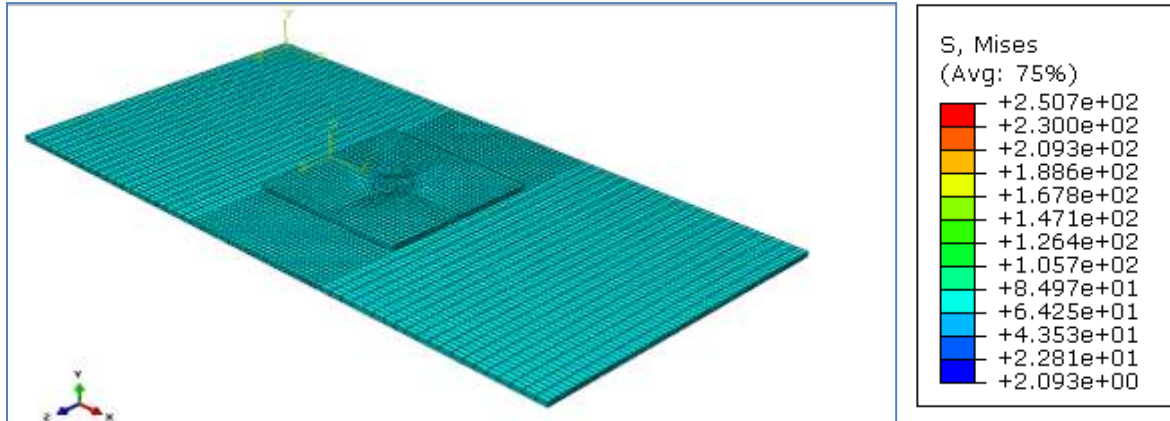


Figure III.5: Niveau de contraintes dans l'ensemble (Plaque+adhésif+ patch) pour le premier maillage.

Maillage 2 :

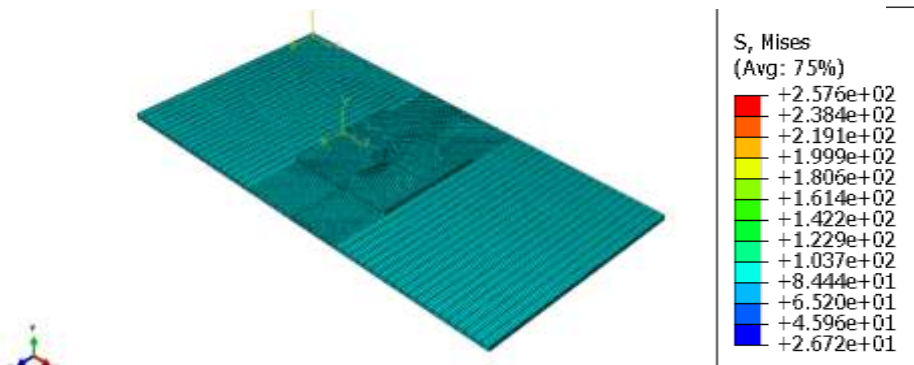


Figure III.6 : Niveau de contraintes dans l'ensemble (Plaque+adhésif+ patch) pour le deuxième maillage.

Maillage 3:



Figure III.7 : Niveau de contraintes dans l'ensemble (Plaque+adhésif+ patch) pour le troisième maillage.

Maillage 4 :

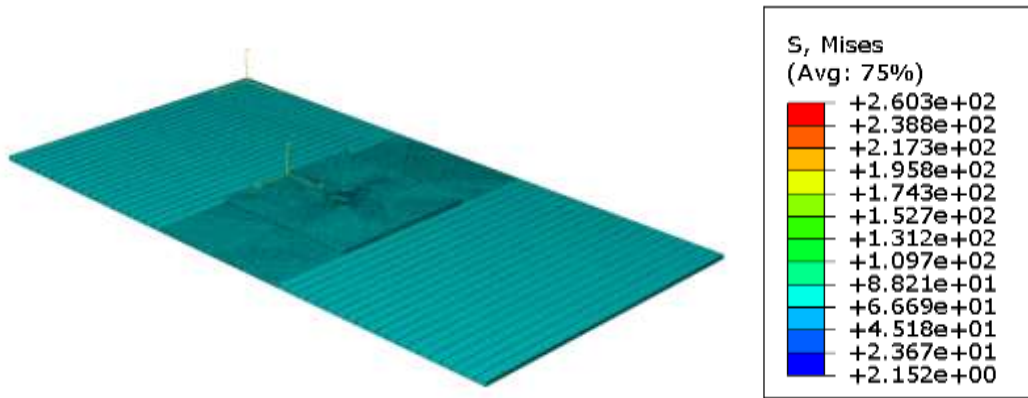


Figure III.8 : Niveau de contraintes dans l'ensemble (Plaque+adhésif+ patch) pour le quatrième maillage.

L'analyse des résultats de la distribution des contraintes de Von Mises dans la structure est représentée dans les figures III.9.

✚ L'ensemble des 4 Maillages :

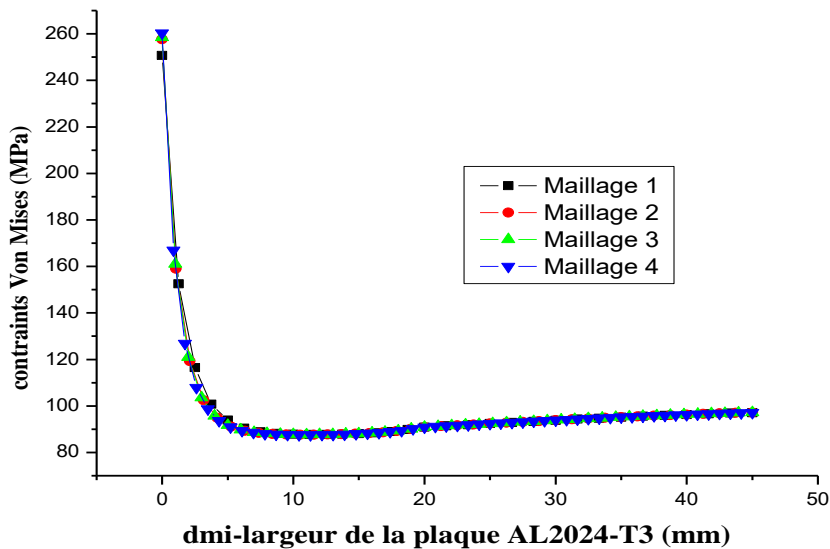


Figure III.9 : Variation des contraintes « Von mises » suivant la mi-largeur de la plaque AL2024-T3 pour les différents Maillages.

On remarque que l'augmentation du nombre de nœuds dans la structure donne une structure plus raffiné surtout à niveau des points sensible à savoir l'entaille.

La valeur de la contrainte est pratiquement la même loin de l'entaille par contre, une légère différence est noté au niveau de l'entaille.

B. Influence de type d'éléments :

Le choix de type de maillage est basée sur des modèles proposés dans la bibliothèque des codes de calcul Abaqus.

On a essayé d'exploiter tout les types de maillage afin de voir leur influence sur la valeur de la contrainte dans la plaque.

Deux cas sont proposés, un maillage linéaire et un autre quadratique.

Pour chaque type on a 3 cas :

{	Hex
	Wedge
	Tete

✚ Cas d'un maillage linéaire :

a- Hex structured :

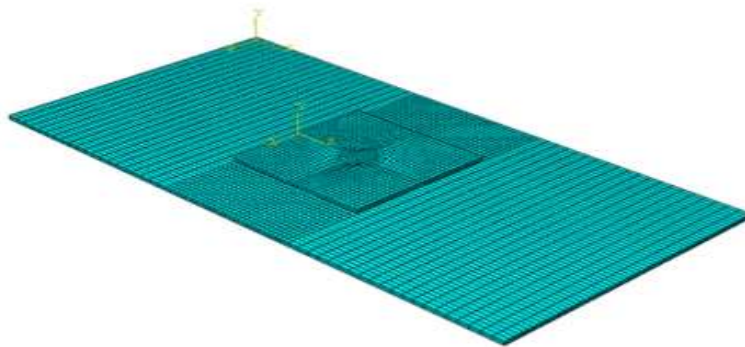


Figure III.10 : Niveau de contraintes dans l'ensemble (Plaque+adhésif+ patch) pour le type Hex-structured.

b- Hex sweep :

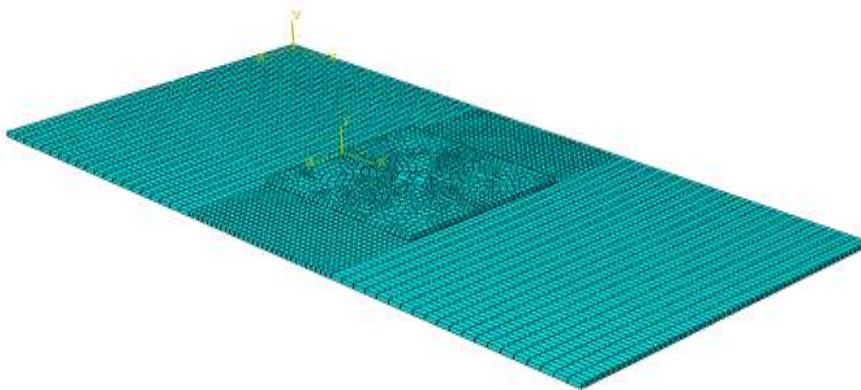


Figure III.11 : Niveau de contraintes dans l'ensemble (Plaque+adhésif+ patch) pour le type Hex sweep.

c- **Tet-free** :



Figure III.12: Niveau de contraintes dans l'ensemble (Plaque+adhésif+ patch) pour le type tet free.

d- Wedge-sweep :

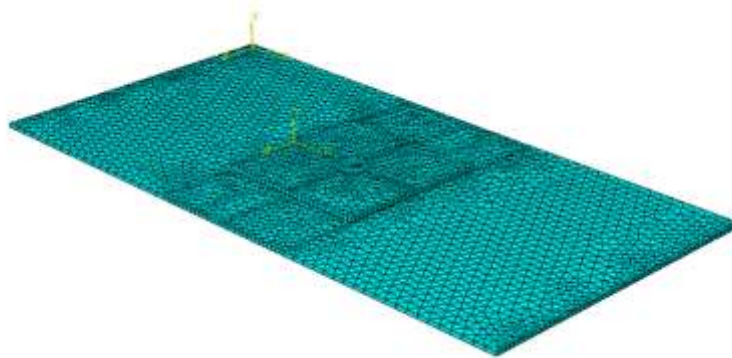


Figure III.13 : Niveau de contraintes dans l'ensemble (Plaque+adhésif+ patch) pour le type wedge sweep.

L'analyse des résultats de la distribution des contraintes en fonction du type d'éléments de maillage est montrée dans la figure III-14 ci-dessous.

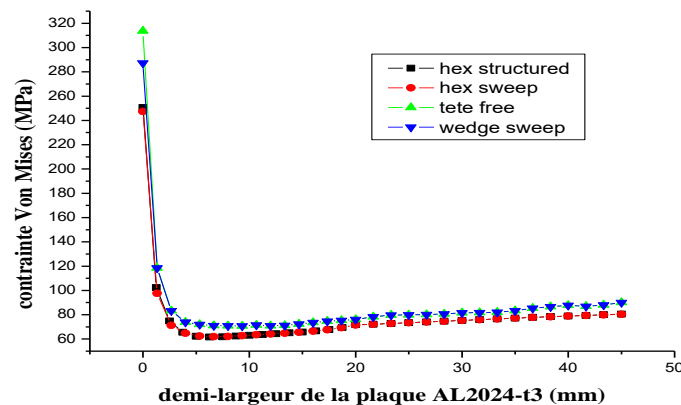


Figure III.14 : Variation des contraintes « Von Mises » suivant la mi-largeur de la plaque AL2024-T3 pour tous les types d'éléments.

Les figures III.14 représente la distribution de la contrainte de Von Mises suivant la demi-largeur de la plaque pour un type de maillage linéaire (tétraèdres, wedge, hex)

On remarque que le type de maillage a une grande influence sur la valeur de la contrainte maximale dans la plaque.

Pour le type de maillage linéaire, la distribution des contraintes varie selon le type de maillage linéaire.

La valeur de la contrainte est différente au niveau de l'entaille et même loin de l'entaille.

✚ **Cas d'un maillage quadratique :**

a- Hex structured :

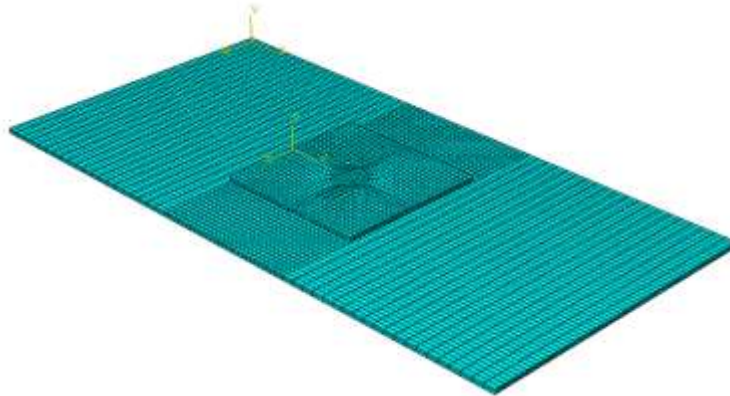


Figure III.15 : Niveau de contraintes dans l'ensemble (Plaque+adhésif+ patch) pour le type hex structured.

b- Hex sweep :

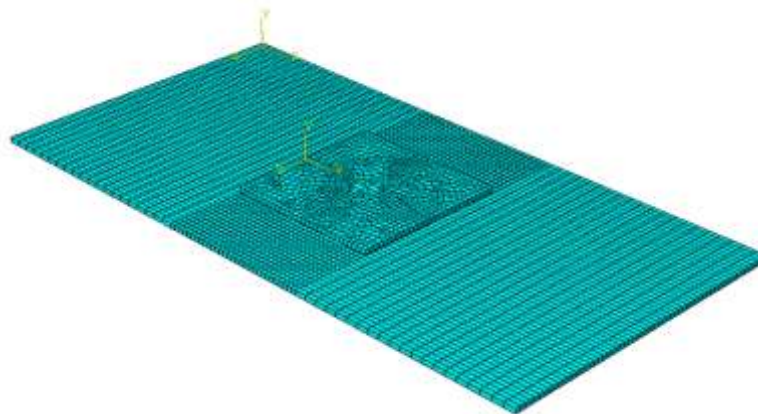


Figure II.16 : Niveau de contraintes dans l'ensemble (Plaque+adhésif+ patch) pour le type hex sweep.

c- Tet free :



Figure III.17 : Niveau de contraintes dans l'ensemble (Plaque+adhésif+ patch) pour le type tet free.

d- Wedge sweep :

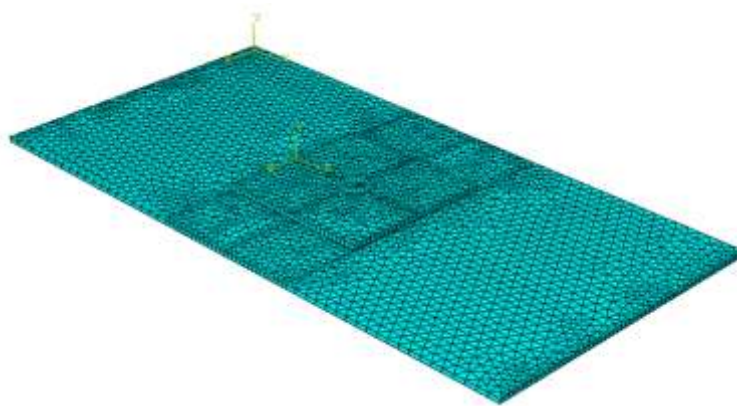


Figure III.18: Niveau de contraintes dans l'ensemble (Plaque+adhésif+ patch) pour le type wedge sweep.

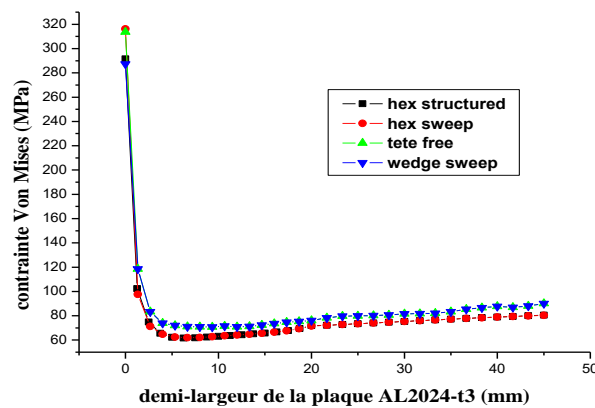


Figure III.19 : Variation des contraintes « Von Mises » suivant la mi-largeur de la plaque AL2024-T3 pour tous les types d'éléments.

Pour le type de maillage quadratique, on a des résultats de la distribution des contraintes presque identique loin de l'entaille par contre une légère différence au niveau de l'entaille.

Le choix final du type de maillage est pratiquement difficile, selon les résultats obtenus pour l'analyse de la distribution des contraintes.

Le type choisis est basé sur une comparaison des résultats obtenus par rapport à la théorie.

➤ **Comparaison des résultats**

Structural linéaire			
Hexaédrique		Wedge	Tétraèdres
Structured	Sweep	Sweep	Free
250.7 (MPa)	247 (MPa)	287.2 (MPa)	313.6 (MPa)
Structural quadratique			
Hexaédrique		Wedge	Tétraèdres
Structured	Sweep	Sweep	Free
291.5 (MPa)	316.1 (MPa)	287.2 (MPa)	313.6 (MPa)

Tableau III.8 : comparaison des résultats pour les différents types d'éléments.

II.4.2 Chargement et conditions aux limites:

- Contrainte de traction « $\sigma_o=120MPa$ » appliquée normalement à la section transversale du structure et parallèlement à l'axe « Z » et fixe dans tous les modèles.
- Coté fixe, la face supérieur de la plaque:
 $U1=U2=U3=0$ et $R1 \neq 0$; $R2 \neq 0$; $R3 \neq 0$.
- Coté mobile, la face inférieur de la plaque:
 $U2=U3=0$, $U1 \neq 0$ et $R1 \neq 0$; $R2 \neq 0$; $R3 \neq 0$.

- U1= l'axe « X »
- U2= l'axe « Y »
- U3= l'axe « Z »

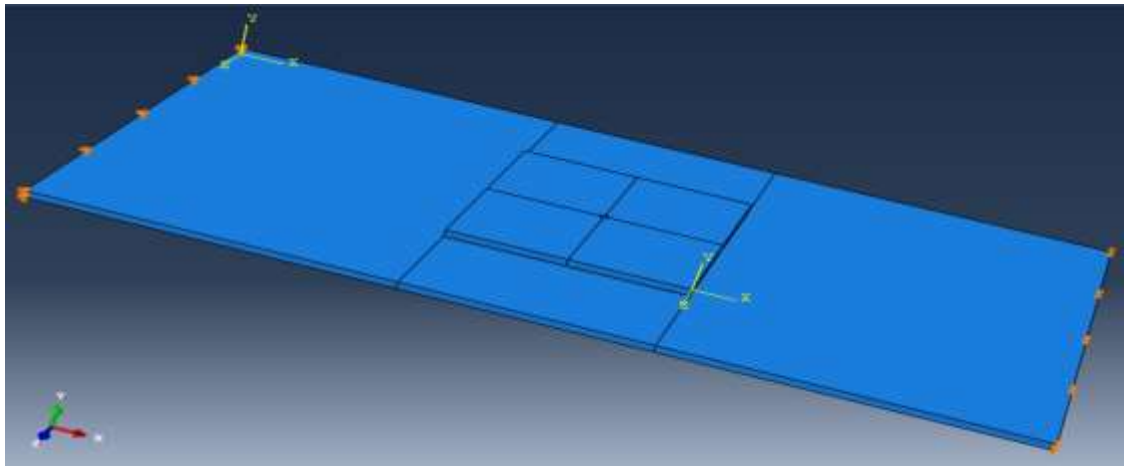


Figure III.20 : Chargement et conditions aux limites.

a) **Influence des conditions aux limites :**

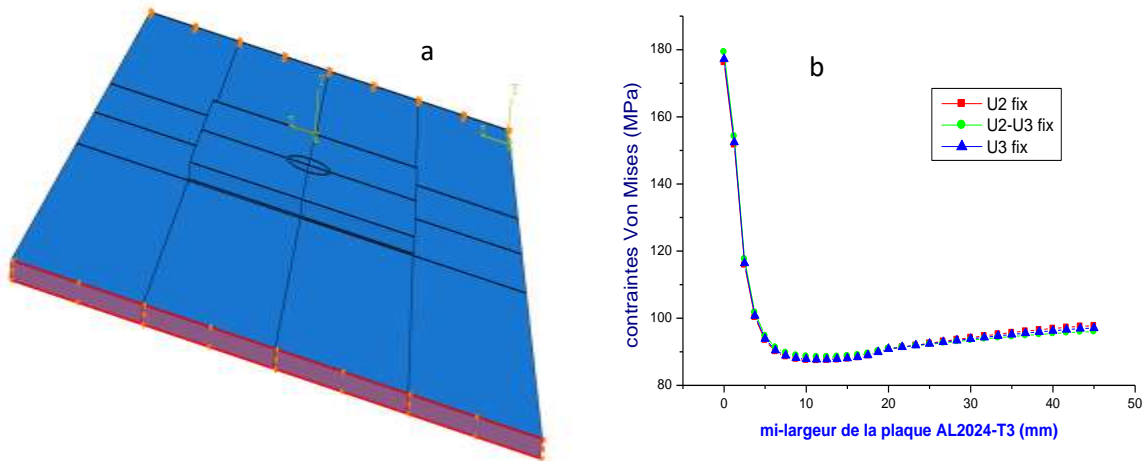


Figure III.21 : a- l'ensemble (plaque+ adhésif + patch) pour toute la surface fixe.
 b- Variation des contraintes « Von Mises » suivant la mi-largeur de la plaque AL2024-T3.

La barre en haut fixe :

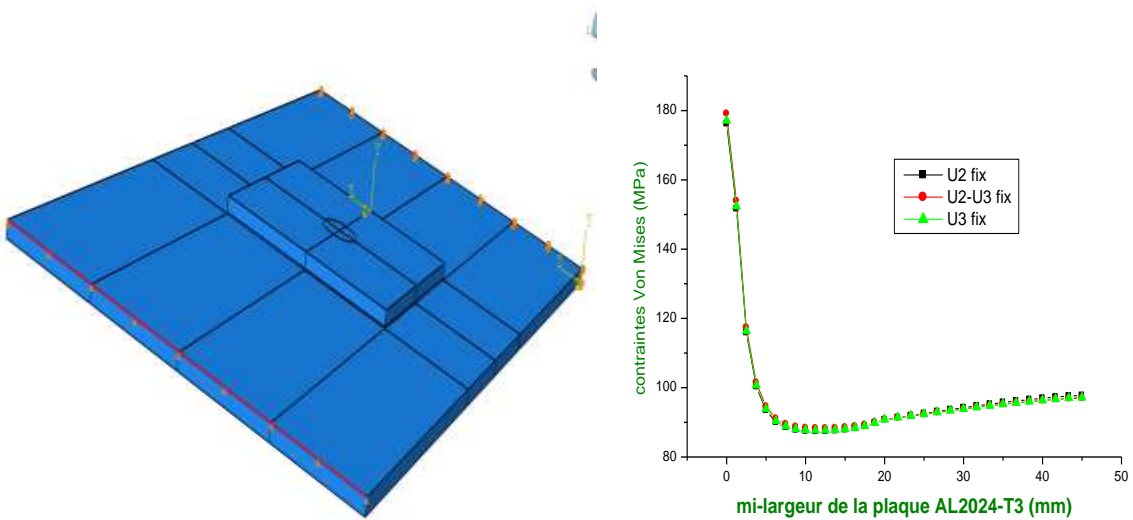


Figure III.22 : a- l'ensemble (plaque+ adhésif + patch) pour la barre en haut fixe.
 b- variation des contraintes « Von Mises » suivant la mi-largeur de la plaque AL2024-T3 pour la barre en haut fixe.

La barre en bas fixe :

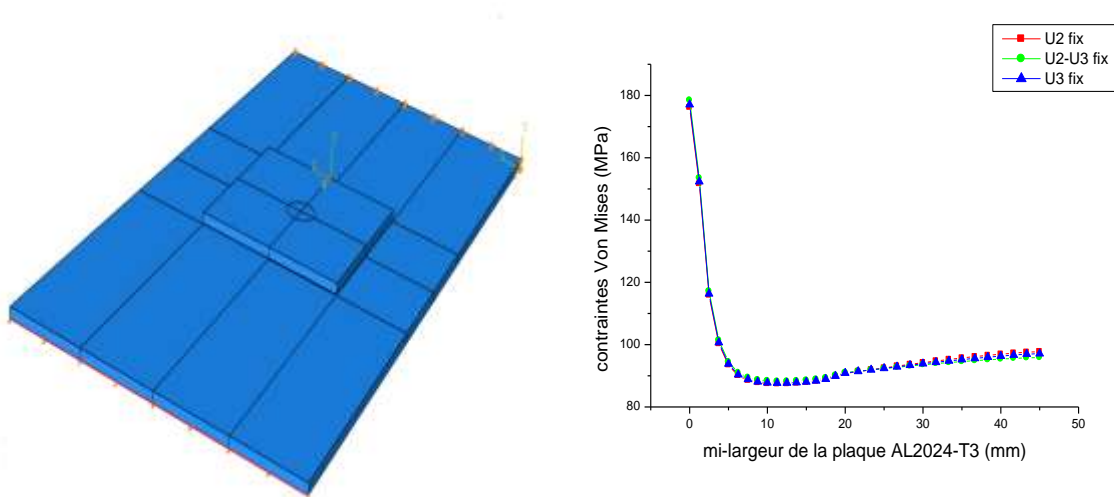


Figure III.23: a- l'ensemble (plaque+ adhésif + patch) pour la barre en bas fixe.
 b- variation des contraintes « Von Mises » suivant la mi-largeur de la plaque AL2024-T3 pour La barre en bas fixe.

Deux (2) appuis :

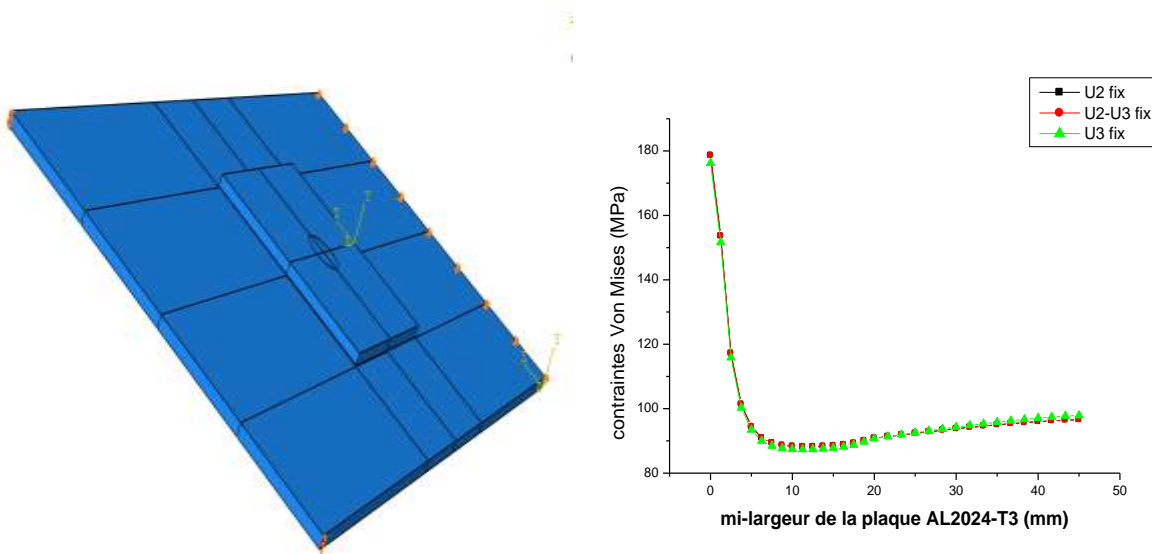


Figure III.24: a- l'ensemble (plaque+ adhésif + patch) pour 2 appuis .
 b- variation des contraintes « Von Mises » suivant la mi-largeur de la plaque AL2024-T3 pour 2 appuis.

À partir de cette analyse, on remarque clairement que le choix des conditions aux limites au niveau de la partie bas de la plaque n'a qu'une légère influence au niveau de la valeur de la contrainte.

Une contrainte maximale au niveau de l'entaille et une faible valeur au niveau du bord de la plaque.

Les figures III.21/24 représentent les résultats des différentes conditions aux limites, on remarque clairement que les différentes conditions aux limites n'ont qu'une légère influence sur la valeur de la contrainte maximale pour les différents diamètres de l'entaille.

III.4.3 influence de la dimension de patch en composite

Afin de voir l'effet des paramètres géométrique du patch sur la réduction des contraintes au niveau de l'entaille on a essayé d'étudier l'effet de la largeur, la longueur et l'épaisseur du patch.

Ces paramètres nous seront utile afin d'optimisé le choix du patch et dans le reste de notre étude.

Longueur fix : Hr= 50 mm .

epaisseur fix : er = 2 mm.

Largeur Wr (mm)	50	45	40	35
-----------------	----	----	----	----

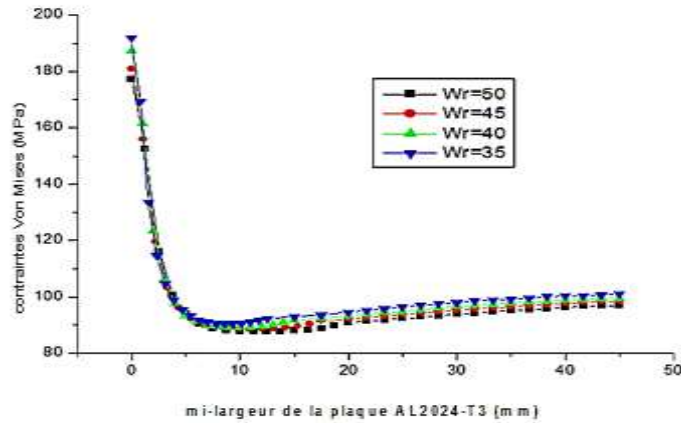


Figure III.25: variation de la contrainte de « Von Mises » suivant la mi-largeur de la plaque AL2024-T3 pour différentes largeurs de patch (Diamètre de l'entaille D=10 mm).

On remarque clairement que la largeur du patch a une grande influence sur la valeur de la contrainte, plus la largeur du patch augmente plus la zone de collage augmente est donc plus d'absorption des contraintes vers le patch et donc moins de contraintes dans la zone endommagée.

III.4.4 variation de l'épaisseur du patch :

Pour cette partie on a fixé la largeur et la longueur du patch de sorte que largeur fix: Wr= 50 mm .

Longueur fix : Hr = 50 mm .cependant l'épaisseur du patch est variable.

er (mm)	2	1.75	1.5	1.25
---------	---	------	-----	------

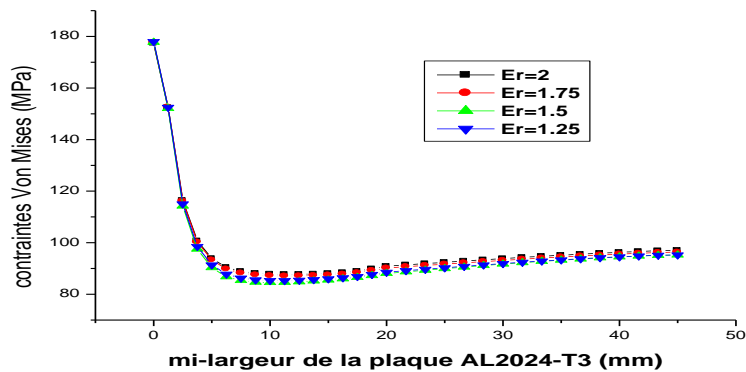


Figure III.26 : Variation des contraintes « Von Mises » suivant la mi-largeur de la plaque AL2024-T3 pour différents épaisseurs de patch (Diamètre de l'entaille D=10 mm).

L'analyse de l'effet de l'épaisseur du patch sur la réduction des contraintes au niveau de la plaque est représentée dans les Figures II.25/26/27.

Le choix de l'épaisseur du patch doit être optimisé afin de prévoir l'effet aérodynamique de la structure, un patch épais absorbe mieux les contraintes de la plaque par contre provoque une flexion de la plaque et des contraintes de pelage élevées

✚ pour $D=10\text{ mm}$:

Largeur fixe : $W_r=50\text{ mm}$.

épaisseur fixe : $e_r=2\text{ mm}$.

Longueur H_r (mm)	50	45	40	35
---------------------	----	----	----	----

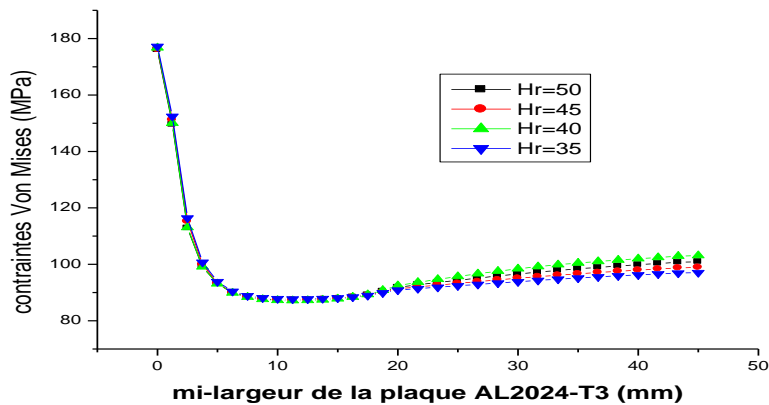
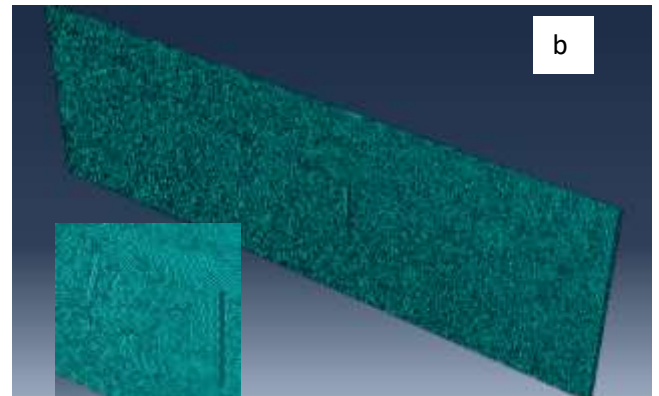
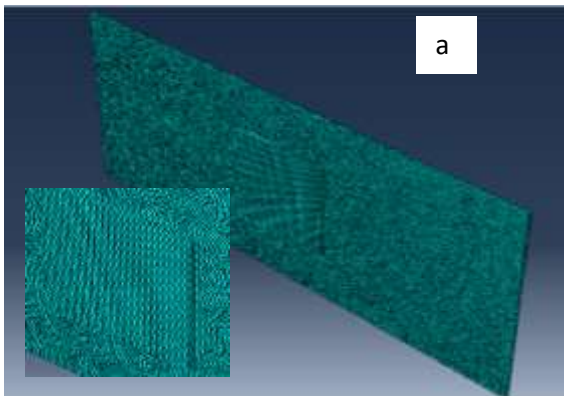


Figure III.27: variation des contraintes « Von Mises » suivant la mi-largeur de la plaque AL2024-T3 pour différentes longueurs de patch et pour $D=10\text{mm}$.

L'analyse des résultats montre clairement que la longueur de patch a une influence sur la valeur de la contrainte

De la longueur 35 à 45mm on remarque une légère diminution de la contrainte au niveau de l'entaille par contre une diminution remarquable loin de l'entaille en augmentant la longueur du patch à 50mm la valeur de la contrainte diminue considérablement donc il est préférables de prendre une longueur assez importante devant la valeur du diamètre de l'entaille.

III.4.5 Influence de la forme de patch en composites:



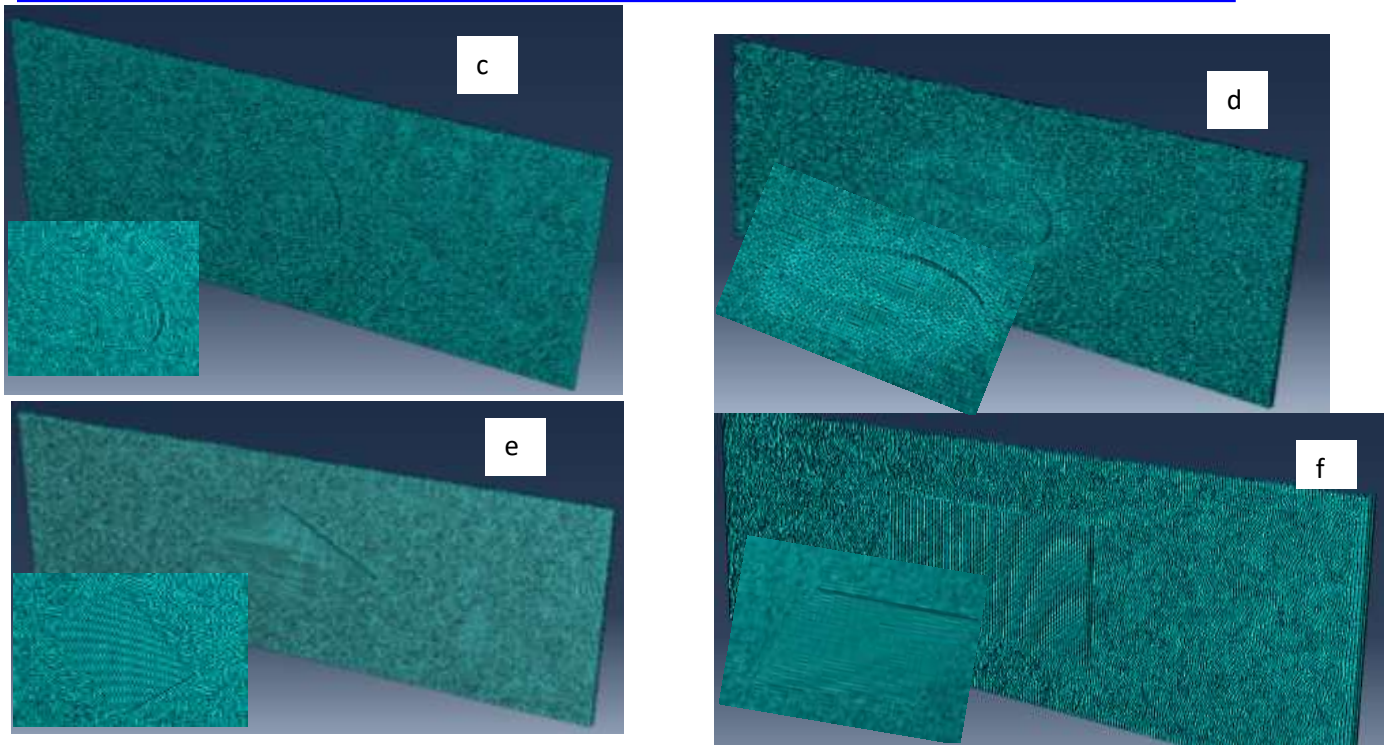


Figure III.28 : a- Patch carré / b- Patch hexagone / c- Patch cercle / d- Patch ellips / e- Patch losange/ f-Patch rectangle.

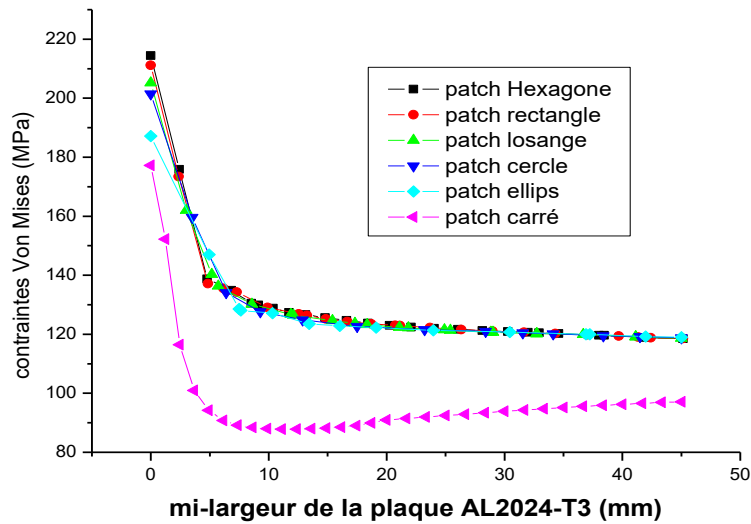


Figure III.29 : Distribution des contraintes sur la plaque AL au niveau de l’entaille pour différentes forme de patch.

Afin de faire un choix optimal sur la forme du patch on a proposé six formes différentes de patch de telle sorte que la surface du patch soit la même pour les différentes formes.

L’analyse de la distribution des contraintes suivant la mi-largeur de la plaque est montrée dans la figure III.29.

La variation des contraintes est pratiquement la même quelque soit la forme de patch.

La forme du patch carré présente moins de contrainte dans la plaque, le transfert de charge est meilleur pour celle forme par rapport aux autres formes.

Cette forme présente un avantage d'absorption de contraintes au niveau de l'entaille et même loin de l'entaille.

Ceci est du à ce que pour cette forme la distance des arrêts du patch se trouve sur la même distance contrairement aux autres.

III. 5 Conclusion

Le but de ce chapitre est de mettre en évidence le choix des paramètres géométrique du patch ainsi que le choix des paramètres du maillage sur la valeur de la contrainte dans la plaque.

Les résultats obtenus de l'analyse des effets de la géométrie du patch ainsi les types de maillage montre que :

- ❖ le maillage linéaire sweep donne une grande contrainte par contre le wedge a donné une contrainte minimale.
- ❖ Le maillage quadratique tétraèdres résulte une contrainte maximale pour le structurale une contrainte minimale.
- ❖ Le nombre de nœuds dans le maillage a un effet sur les contraintes
- ❖ L'augmentation de l'épaisseur du patch entraine une diminution de la contrainte
- ❖ L'augmentation de la largeur et de la longueur du patch provoque une diminution de contrainte
- ❖ Il faut raffiné au niveau de l'entaille pour avoir des valeurs précises de la contrainte

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] : Thèse « **étude numérique et expérimentale de la technique de réparation des structures aéronautiques par patch en composite, cas de l'aluminium 2024-T3 réparé par composite carbone/époxyde** » pour obtenir le grade de **DOCTEUR DE L'université** /spécialité é sciences des matériaux présentée et soutenue publiquement par **MADANI Kouider** Mai 2007

[2] : AXON technologies « **ADEKIT A 140 / ADEKIT H 9940** ». Adhésif époxy structural / hautes PE performances

[3] : <http://www.mingdrum.com/fre/accessories/carbon-fiber.html>

[4] : <http://www.futura-sciences.com/magazines/matiere/infos/dico/d/chimie-epoxyde-2879/>

CHAPITRE IV

IV. 1 Introduction

La technologie de collage prend de plus en plus une ampleur dans différents domaines à savoir aéronautique, Aerospace, génie civil Cette technologie devient de plus en plus efficace et rentable pour les structures endommagées afin de réparer et prolonger leur durée de vie en service vis-à-vis les sollicitations mécaniques et thermiques répétées.

Divers méthodes existant, pour la réparation des défauts ou des fissures dans les structures dont la mise en place de patch boulonnés ou rivetés. Cependant l'inconvénient de ces méthodes réside dans la concentration de contraintes qui apparaît au niveau des liaisons. Les joints collés sont plus préférables aux joints mécaniques dans la réparation des structures spécialement pour les matériaux composites [1].

De nombreuses études ont été consacrées à l'étude théorique des contraintes dans le patch composite et dans la colle [2-7] car cette dernière est souvent le maillon faible dans la structure réparée. En effet, elle est souvent à l'origine des défaillances de réparation [8]. Car c'est sa rupture ou sa décohésion qui provoque le détachement du patch composite.

Pour l'optimisation de la forme du patch en zone d'ancrage certaines études ont été réalisées sur la forme du bord libre du patch pour limiter le pic de contrainte de cisaillement dans la colle [9-10]. Afin de prolonger la durée de vie de telles structures, il existe plusieurs alternatives qui dépendent du niveau de ces dommages à titre d'exemple le patch composite peut être collé à la proximité de la zone endommagée afin de la renforcer de manière préventive si les fissures ne sont pas encore apparues c'est la meilleure solution prospective envisagée.

De nombreux paramètres géométriques, matériels et de charge affectent l'efficacité de la réparation de patch composite. Certaines des études précédentes ont examiné ces effets. Par exemple, les dimensions du patch, y compris son épaisseur du patch, ont été étudiées par [11]. L'orientation de la couche de composite fibreux a été étudiée par [12-13]. Ces travaux ont montré que les patchs composites arrêtant au mieux la propagation des fissures sont les patchs composites en forme rectangulaire unidirectionnels [14-18].

Afin de valider ou non des modèles théoriques ou numériques, plusieurs études expérimentales sur la réparation par patchs composites ont été effectuées. A titre d'exemple [17], Cet essai consiste à étudier le comportement en fatigue d'une structure fissurée, renforcée par un patch composite.

Parmi les auteurs utilisant la méthode d'éléments finis dans le calcul du FIC dans le cas des fissures renforcées, on peut citer des études réalisées sur la réparation d'une fissure émanant d'entaille par un patch en composite [18-19] et qui ont montré l'efficacité de l'utilisation du patch composite par des essais expérimentaux et modélisation numérique, il ont pu analyser la réduction de concentration de contraintes aux fonds d'entailles et le facteur d'intensité des contraintes au niveau de pointes de fissures. Les critères de la rupture ont été appliqués pour prévoir l'échec cohésif [20] et hors plan pour prévoir l'échec adhésif [21] en utilisant la méthode des éléments finis.

Ces travaux permettent d'appréhender les mécanismes qui entrent en jeu lorsqu'une structure est réparée par un patch composite. Ils nous ont aidés à servir comme de point de départ pour développer notre modèle utilisé dans ce travail.

Notre travail s'inscrit dans ce contexte, l'objectif est d'analyser par la méthode des éléments finis le comportement en rupture d'une plaque endommagée et réparée par patch.

Dans la première partie de ce chapitre, on a utilisé différentes natures de matériaux pour le composite pour voir l'effet de sa rigidité sur le transfert de charge, tout en les comparant avec un patch métallique [type aluminium].

L'effet de l'influence du vieillissement de l'adhésif a été pris en considération en fonction de la durée d'immersion et la température.

Les résultats montrent clairement que le facteur d'intensité des contraintes varie en fonction de la durée du vieillissement et la température et d'autre part par l'effet de l'orientation des fibres dans le patch composite.

Dans la 2eme partie de notre travail on considère le cas extrême, ou on a supposé que le patch et l'adhésif subissent en même temps le vieillissement en température et immersion en eau.

Donc une dégradation de leurs propriétés mécaniques et les conséquences sur le transfert de charge de la zone endommagée à différentes températures 20°C, 40°C, 60°C. L'analyse tient en compte de la variation de FIC dans la plaque en fonction de différentes longueurs de fissure, L'analyse présente aussi les niveaux des contraintes de cisaillement dans l'adhésif et de pelage dans le patch afin d'avoir une idée sur les zones actives de forte concentration de contraintes dans la couche d'adhésif qui présente le maillon faible de la structure.

IV.2. Modèle géométrique et propriétés mécaniques

On considère une plaque en Aluminium 2024-T3 de module de Young $E = 70000 \text{ MPa}$ de coefficient de poisson $\nu = 0.3$ avec la présence d'une entaille latérale semi-circulaire de diamètre $D = 10 \text{ mm}$. La plaque possède les dimensions suivantes : longueur $H_p = 250 \text{ mm}$, largeur $W_p = 100 \text{ mm}$ et l'épaisseur $e_p = 2 \text{ mm}$. On considère une fissure de longueur variable émanant d'entaille et perpendiculaire au plan de sollicitation en mode I. Les caractéristiques mécaniques et géométriques, de la plaque du patch et de l'adhésive sont respectivement notées par les indices p,r,c (Figure IV.1(a)) Le patch a les dimensions: longueur $h_r = 50 \text{ mm}$, largeur $w_r = 50 \text{ mm}$ et l'épaisseur $e_r = 2 \text{ mm}$ est collé sur la plaque à travers un adhésif de type ADEKIT-A140 de module de Young $E = 2690 \text{ Mpa}$ et de coefficient de poisson 0.3 son épaisseur $e_c = 0.2 \text{ mm}$. (Figure IV.1 (b)).

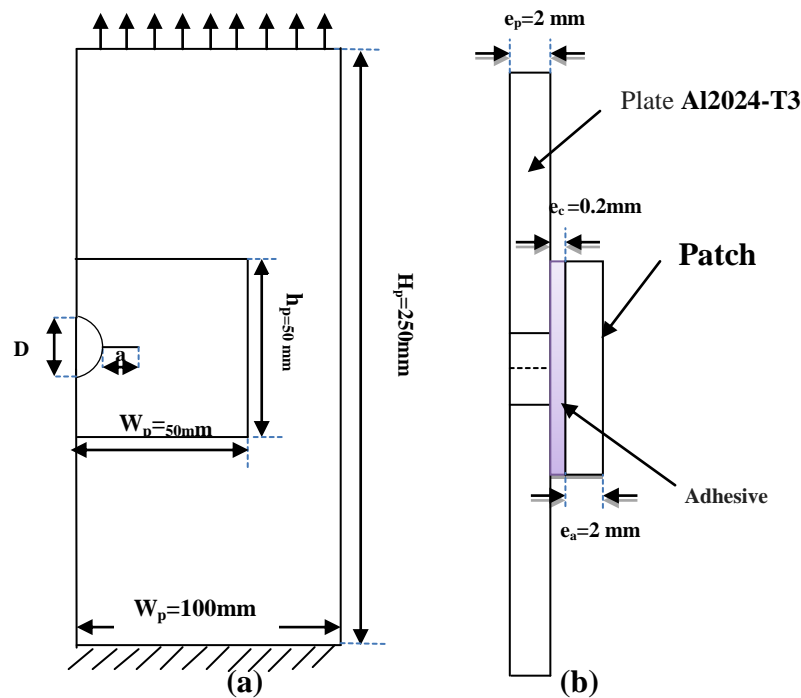


Figure IV. 1 : Modèle géométrique de la structure endommagée et réparée.

La plaque est sollicitée en traction uni-axiale dans la direction verticale suivant l'axe (x) sous une contrainte appliquée d'une valeur $\sigma=70\text{MPa}$ (figure IV.2). L'autre extrémité de la plaque est supposée encastree.

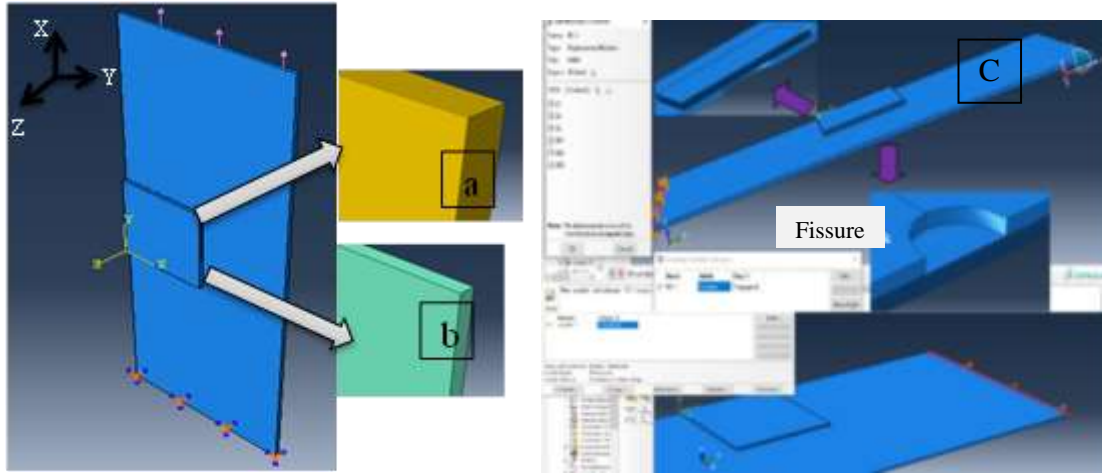


Figure IV.2 : Plaque soumise en traction uni-axiale (a) patch modélisé en multicouches (b) patch modélisé en monobloc (c) conditions aux limites imposées sur la structure.

Pour notre analyse, la plaque endommagée fissurée est réparée en premier lieu par un patch en matériau composite modélisé en multicouches ensuite on a considéré une réparation par patch en matériau métallique de même nature que la plaque (alliage 2024-T3 d'aluminium) pour modélisé en bloc.

La modélisation du composite en bloc donne de bons résultats si l'orientation des différentes couches est selon zéro degré mais pour se rapprocher mieux de la réalité du patch, essentiellement lorsque les différentes couches présentent des orientations des fibres différentes de zéro degré, on a modélisé ce dernier en multicouches en le divisant en 16 couches avec $e_r=16.e_{r1}$ ($e_{r1}=0.125\text{mm}$) (Figure IV.3). La modélisation du composite en multicouches permet d'introduire les propriétés réelles de chaque couche selon l'orientation des fibres.

On a choisis pour la nature du composite (03) types à savoir Carbone/époxyde, Boron/époxyde, et Aramide/époxyde et pour le patch métallique la nature est en Aluminium 2024-T3. Les propriétés des matériaux utilisés dans cette étude sont énumérées dans le tableau IV.1. L'adhésif de type ADEKIT A-140 a été choisi en raison son utilisation dans les structures aérospatiales (Voir le tableau IV.1).

Matériau	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	E_3 (GPa)	G_{12} (GPa)	G_{13} (GPa)	G_{23} (GPa)	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
Adekit A140	2.690			0.99			0.35		
Carbone-époxy	109.000	8.819	8.819	4.315	4.315	3.200	0.342	0.342	0.38
Boron-époxy	193.06	18.617	18.61	5.516	5.516	7.757	0.21	0.21	0.2
Aramide-époxy	76	5.5	5.5	2.3	2.3	2.3	0.34	0.34	0.34

Tableau IV.1 : Propriétés mécaniques des différents substrats utilisées dans la structure réparée [23].

Deux séquences d'empilement $[0_8]_s$ et $(0_2/45_2/-45_2/90_2)_s$ (tableau IV.2) ont été prises en considération pour voir l'effet d'orientation de fibres sur le transfert de charge de la plaque endommagée vers le patch et par conséquent sur la réduction du facteur d'intensité de contraintes (Figure IV.3)

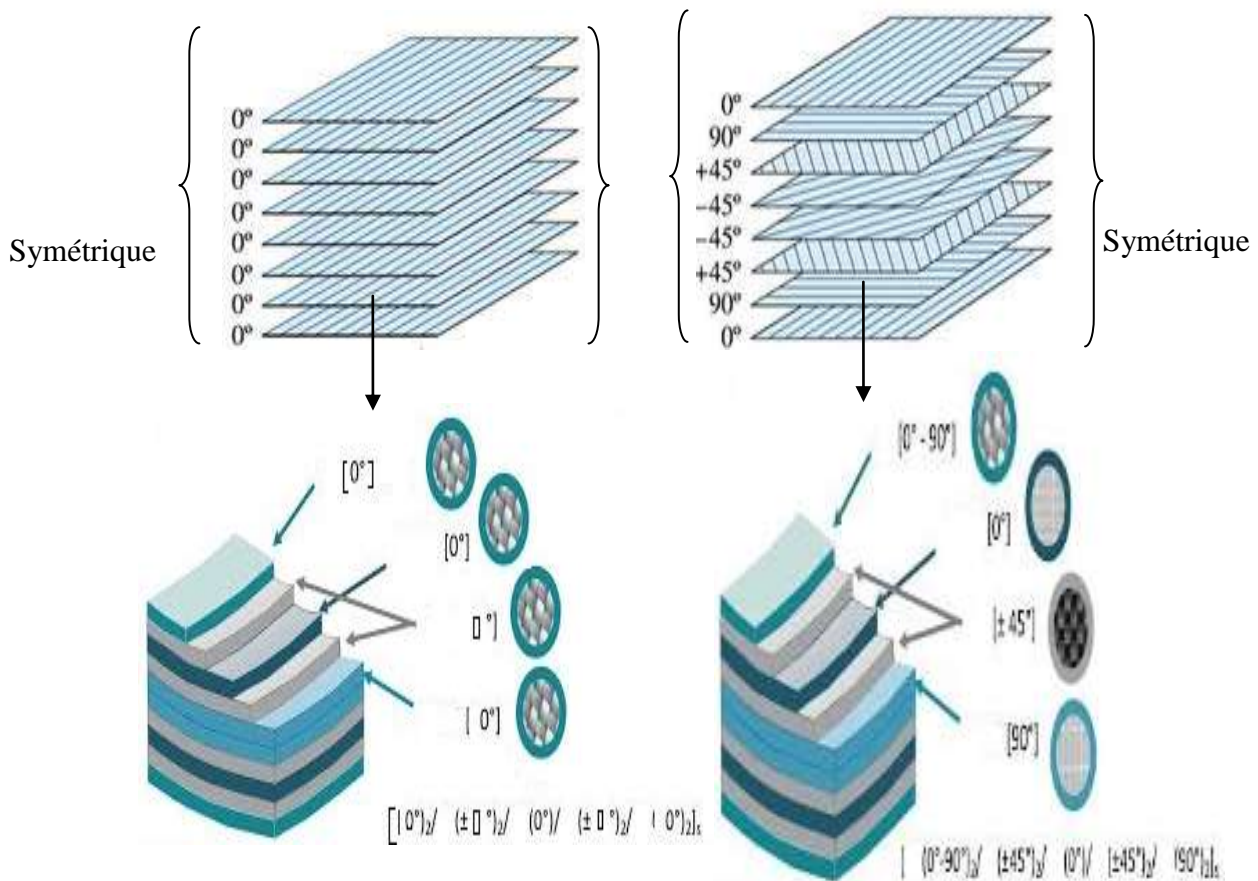


Figure IV.3: Présentation des deux séquences d'empilement utilisées pour le patch composite.

Tableau IV. 2 Orientation des plis utilisés dans le modèle numérique.

Composite	Séquences des plis
1	$(0_s)_s$
2	$(0_2/45_2/-45_2/90_2)_s$

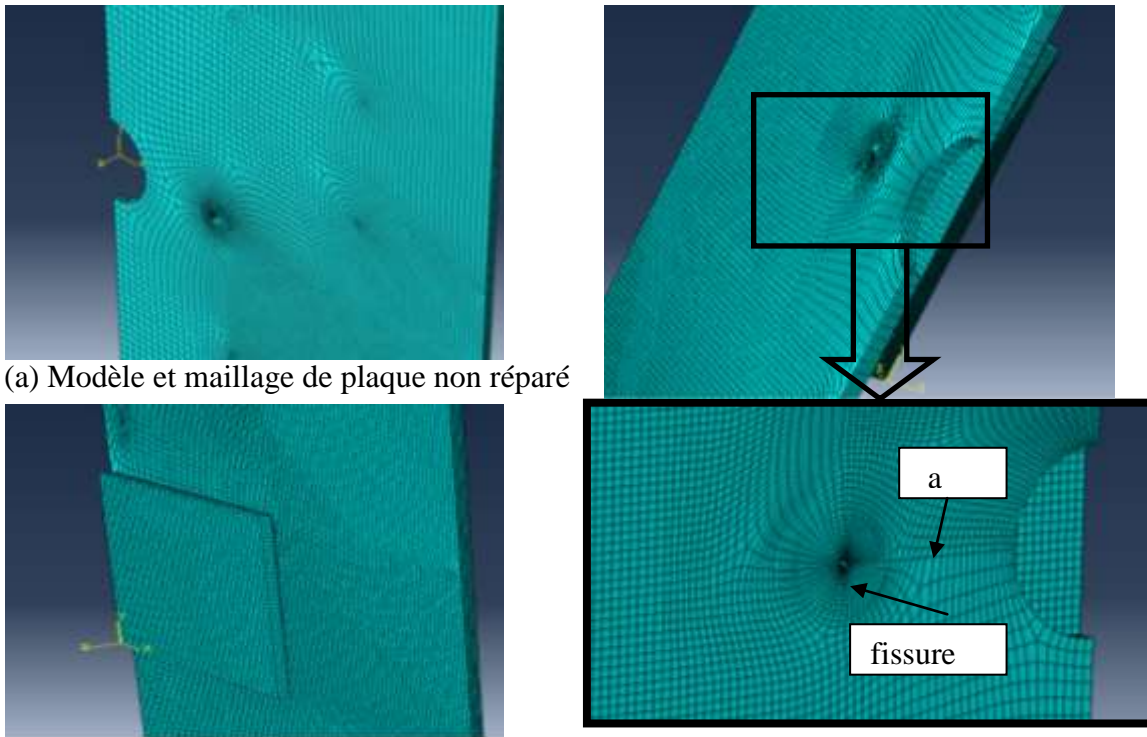
Lorsque l'orientation des fibres dans les différentes couches est suivant 0° , il n'y a pas un influence du comportement du patch composite du point de vue résistance ou transfert de charge si on modélise le patch en bloc ou en multicouches. Cependant, si l'orientation des fibres est différentes d'une couches a une autre, et différente de 0° , la modélisation du patch composite en multicouches est preferable.

IV.3 Modélisation par élément finis

Le modèle numérique de la structure réparée ou non par patch composite a été réalisé sur le code de calcul Abaqus/CAE™ qui résout les problèmes de divers champs par la technique des éléments finis (M.E.F). Dans ce cadre il présente un système complet intégrant non seulement les fonctions de calculs proprement dites mais également les fonctions de construction du modèle (pré-processeur) et les fonctions de traitement des résultats (post-traitement). Abaqus/CAE™ est un programme qui traite des problèmes d'élasticité linéaire dans les domaines statiques et dynamiques, des problèmes non linéaire, des problèmes thermiques [22]. etc...

Pour modéliser la structure, nous avons utilisé 112395 éléments de type hexadrales quadrilatéraux et 140928 nœuds de type C3D8R avec un maillage raffiné et structuré au voisinage de l'entaille comme le montre la Fig.8.

En présence de fissure, le nombre des éléments quadrilatéraux atteint 29617 de type CPS4R et 812 éléments triangulaires de type CPS3. La singularité en tête de fissure peut être intégrée dans la solution en remplaçant les éléments en tête de fissure par des éléments spéciaux quart point (figure IV.4).



(a) Modèle et maillage de plaque non réparée

(b) Modèle et maillage de la plaque réparée

(c) Maillage autour de la fissure plaque réparée

Figure IV.4: Modèle de maillage de la structure.

Le tableau IV-3 présente le nombre d'éléments de maillage pour le cas d'une structure réparée par patch sous forme monobloc et cas de patch en multicouches

Tableau IV.3: Nombre des éléments pour modéliser la structure réparée.

Maillage globale	Nombre des elements	Type
Maillage de la structure	112395	C3D8

Maillage de la structure mono-couche et fissure raffinée	140928	C3D8+ C3D8R
Maillage de la structure multi-couche et fissure raffinée	178770	C3D8+ C3D8R

Un modèle d'élément finis en trois dimensions d'une telle structure implique plusieurs degrés de complexité. Dans cette étude, nous faisons des hypothèses simplificatrices qui nous permettent encore de saisir les caractéristiques essentielles de la réponse. Ces hypothèses comprennent

Chaque couche est considérée comme une structure tridimensionnelle individuelle dans un état de contrainte plane.

- Les couches individuelles peuvent être connectées avec des liaisons adhésives.
- La couche adhésive est homogène, élastoplastique et isotrope.
- L'adhésif se déforme sous des contraintes de traction, cisaillement et de pelage.

IV.4 Analyse et résultats

IV.4.1. Effet de la nature du patch

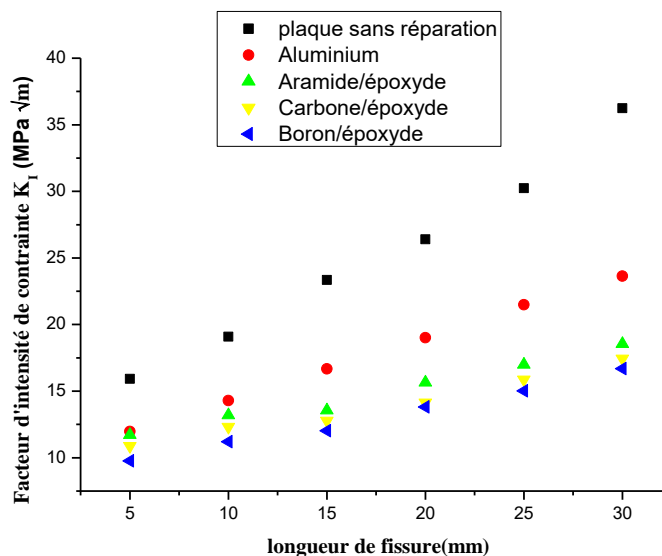


Figure IV.5 : Variation du facteur d'intensité de contraintes en fonction de la longueur de la fissure pour différentes natures du patch.

La figure (IV.5) présente la variation du facteur d'intensité des contraintes en fonction de la longueur de la fissure pour différentes natures du patch. On remarque que l'allure des courbes est la même quel que soit la nature du patch et présente deux pentes suivant la longueur de fissure.

Plus les propriétés mécaniques du patch sont élevées, plus le transfert de charge est meilleur de la zone endommagée vers le patch.

Quel que soit la nature de patch, on a toujours une diminution de la valeur du facteur d'intensité des contraintes par rapport à la plaque non réparée.

Pour des petites longueurs de fissure l'effet de la nature de patch disparaît.

Le patch en Bore/époxyde présente les plus faibles valeurs du facteur d'intensité des contraintes vu ses propriétés mécaniques élevées. Cependant, le patch métallique présente les valeurs les plus élevées du facteur d'intensité de contrainte.

- Effet du mode de simulation du patch

On a considéré le patch sous forme bloc ou les propriétés mécaniques ont été introduite sous forme constantes d'ingénieurs calculées à travers le code de calcul Cadec conçu pour les matériaux composite.

Par contre, pour la deuxième simulation, on a considéré le composite sous forme multicouches ce qui plus réel, les propriétés mécaniques ont été introduites pour chaque couche en calculant les constantes d'ingénieurs selon la loi d'homogénéisation.

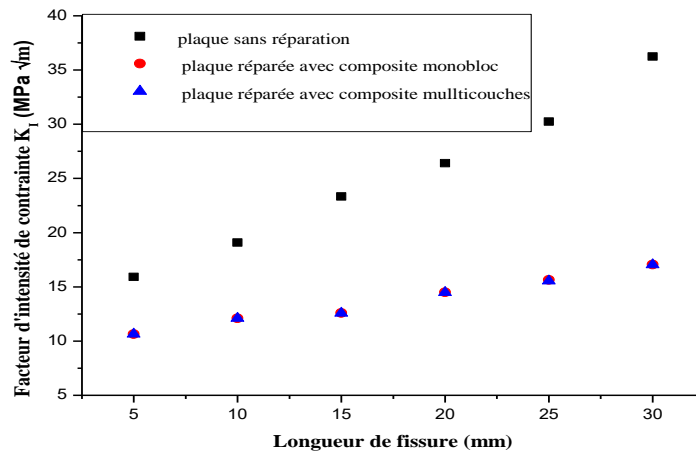


Figure IV.6 : Variation du facteur d'intensité de contraintes pour les différentes natures du patch (patch monobloc et multicouches avec la séquence d'empilement $[0^{\circ}_8]_s$) en fonction de la longueur de la fissure).

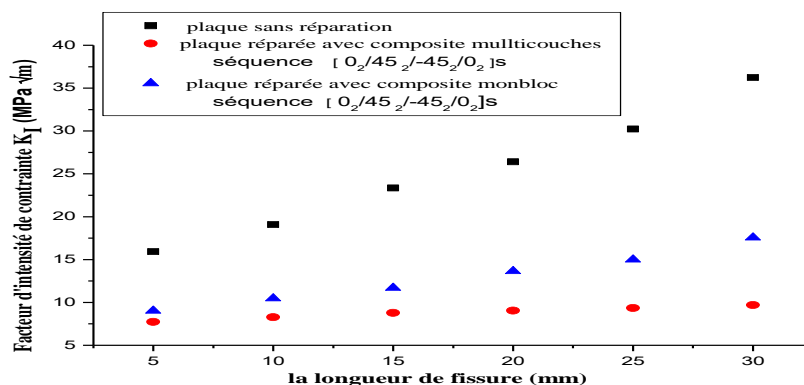
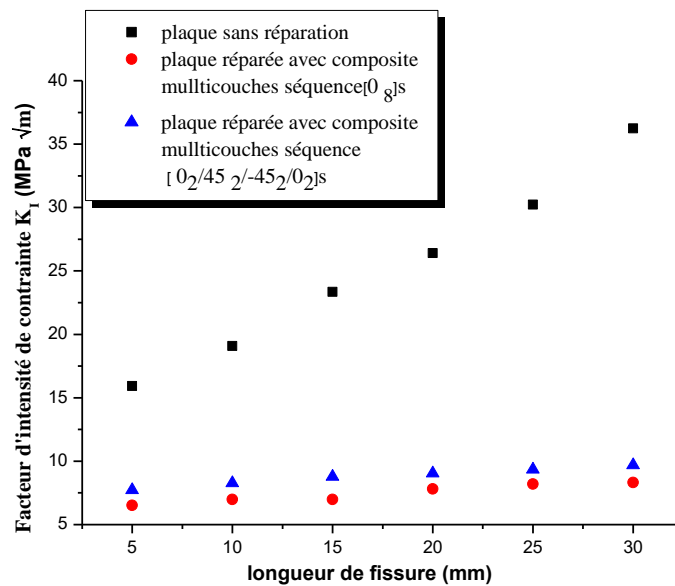


Figure IV.7 : Variation du facteur d'intensité de contraintes pour les différents natures du patch (patch monobloc et multicouches avec la séquence d'empilement $[0_2/45_2/-45_2/0_2]_s$) en fonction de la longueur de la fissure).

Présentent la variation du facteur d'intensité des contraintes en fonction de la longueur de la fissure dans le cas d'un patch multicouches et monobloc. Si l'orientation des fibres dans toutes les couches est 0° , on remarque une faible différence du facteur d'intensité des contraintes. Par contre si la séquence d'empilement est $[0_2/45_2/-45_2/0_2]_s$, le patch sous forme multicouches présente les plus faibles valeurs du facteur d'intensité de contraintes qui dépend des propriétés mécaniques de chaque couches alors que le patch composite sous forme bloc présente une seule orientation et donc mauvaise absorption des contraintes.

- Patch multicouches avec différentes orientations

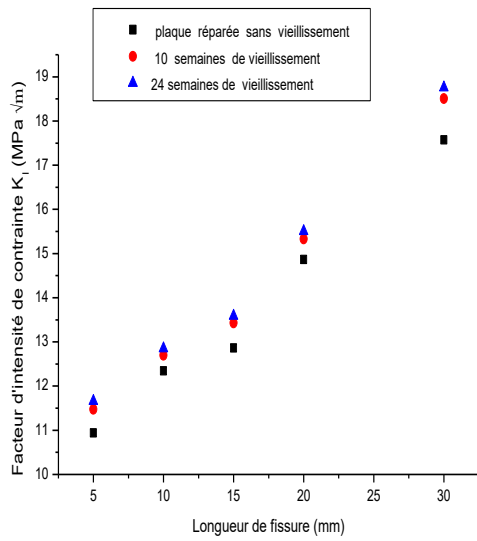


FigureIV.8 : Variation du facteur d'intensité de contraintes pour des différents natures de patch (patch multicouches avec séquence d'empilement à $[0_8]_s$ et $[0_2/45_2/-45_2/90_2]_s$ en fonction de la longueur de la fissure.

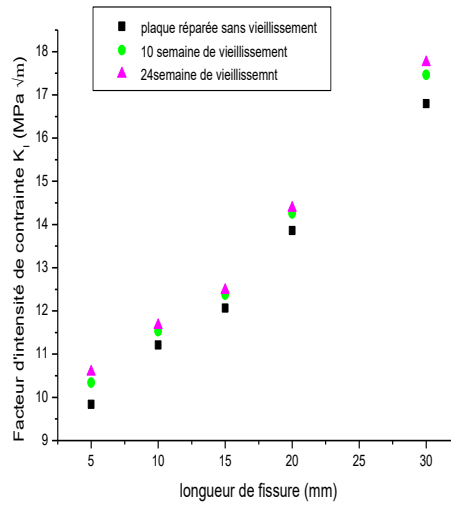
la figure IV.8 présente la variation du facteur d'intensité de contraintes en fonction de la longueur de la fissure pour deux séquences d'empilement $[0_8]_s$ et $[0_2/45_2/-45_2/90_2]_s$ en considérant un patch multicouches. Les valeurs les plus faibles du facteur d'intensité de contraintes sont pour le cas d'une réparation par patch avec la séquence d'empilement $[0_8]_s$ qui présente des propriétés mécaniques élevées et qui assure un bon transfert de charge de la zone endommagée. Cependant si le patch présente la séquence $[0_2/45_2/-45_2/90_2]_s$, ses propriétés mécaniques deviennent faibles et donc un mauvais transfert de la charge de la zone endommagée et par conséquent un facteur d'intensité de contrainte élevée.

IV.4.2 Effet de vieillissement de l'adhésif sur le facteur d'intensité des contraintes

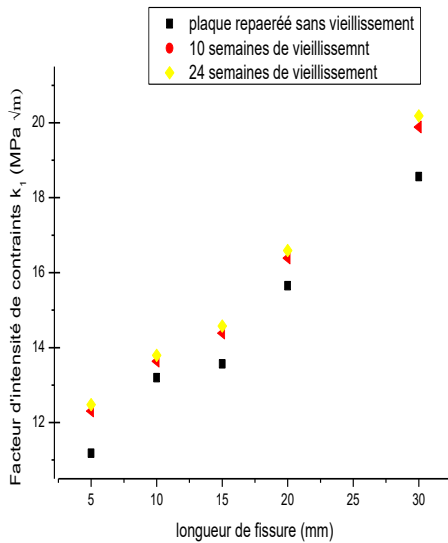
IV.4.2.1 Température de 20°C



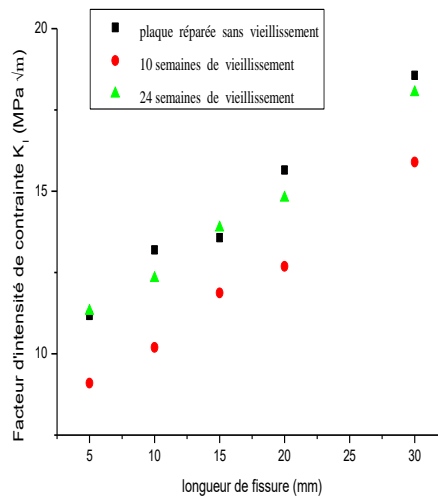
a) Réparation par patch carbone /époxyde



b) Réparation par patch Boron/epoxyde



c) Réparation par patch Aramide/epoxyde

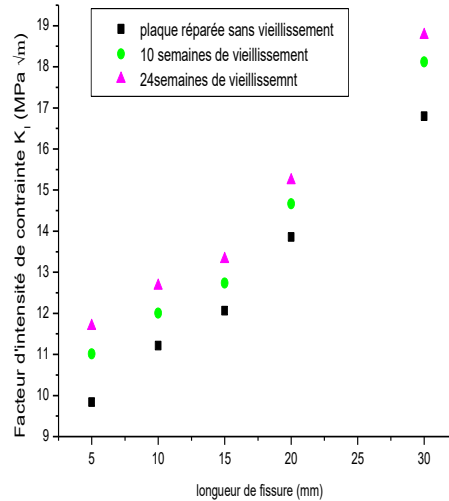
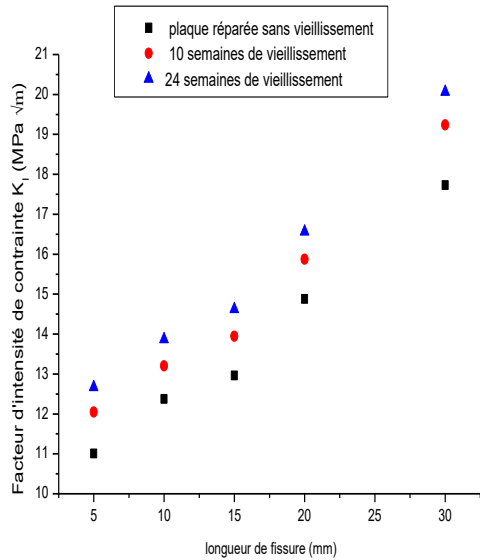


d) Réparation par patch Aluminium

Figure IV.9 : Variation de facteur d'intensité des contraintes en fonction de la longueur de la fissure pour différents temps d'immersion à la température de 20°C [orientation $[0_8]_s$].

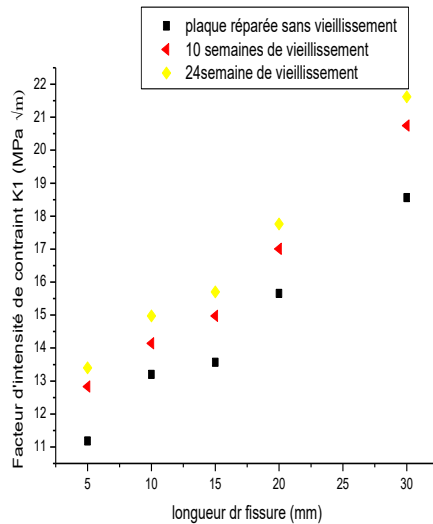
On considère que seule l'adhésif qui sera exposé à l'eau et température. On remarque que les courbes sont identiques (figure IV.9), l'effet de vieillissement de l'adhésif apparait clairement sur les valeurs du facteur d'intensité des contraintes après dix semaines de vieillissement à la température ambiante. A cette température même si la durée de vieillissement en immersion dans l'eau augmente la valeur de facteur d'intensité des contraintes augmente légèrement et reste toujours inférieure au cas de la plaque non réparée. Le pourcentage de la valeur du facteur d'intensité des contraintes varie en fonction de la longueur de la fissure.

VI.4.2.2 Température de 40°C



a) réparation par patch carbone /époxyde

b) réparation par patch Boron /époxyde



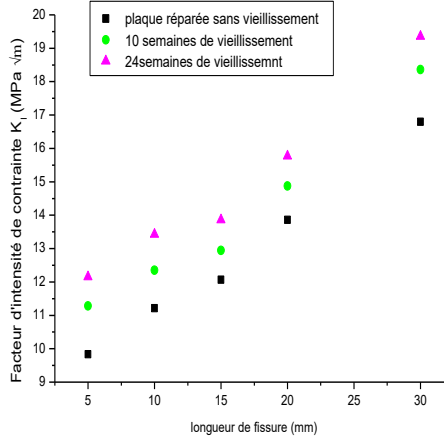
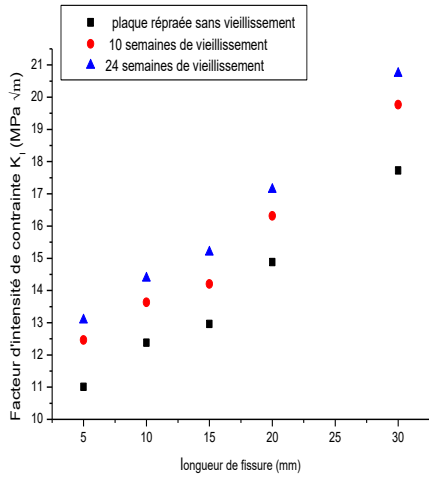
c) réparation par patch Aramide/époxyde

FigureIV.10 : Variation de facteur d'intensité des contraintes en fonction de la longueur de la fissure pour différents temps d'immersion à la température de 40°C [orientation $[O_8]_s$].

En augmentant la température (figureIV.10), le processus de diffusion de l'eau s'accélère et donc l'absorption de l'eau devient rapide et par conséquent la dégradation des propriétés de l'adhésif continue. De suite, On remarque une chute considérable du module de Young. Ce qui provoque par la suite un mauvais transfert de charge de la plaque vers le patch.

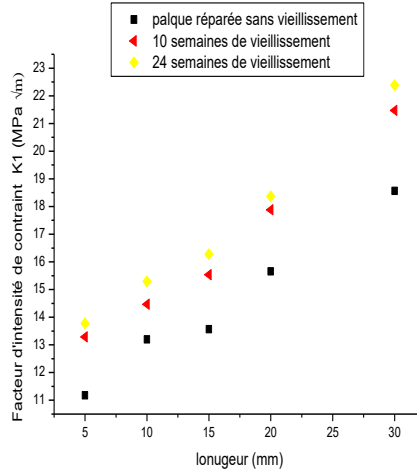
Et donc un facteur d'intensité des contraintes légèrement élevé par rapport à celui à température 20°C.

VI.4.2.3 Température de 60°C



a) réparation par patch carbone /époxyde

b) réparation par patch Boron /époxyde



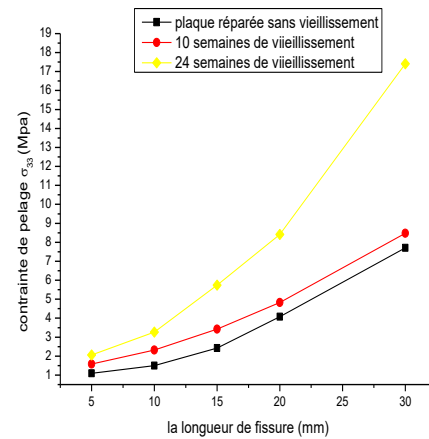
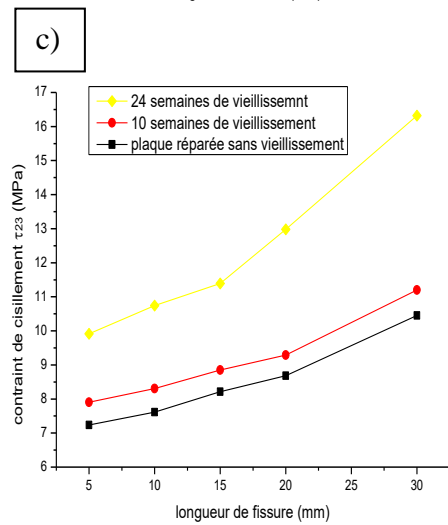
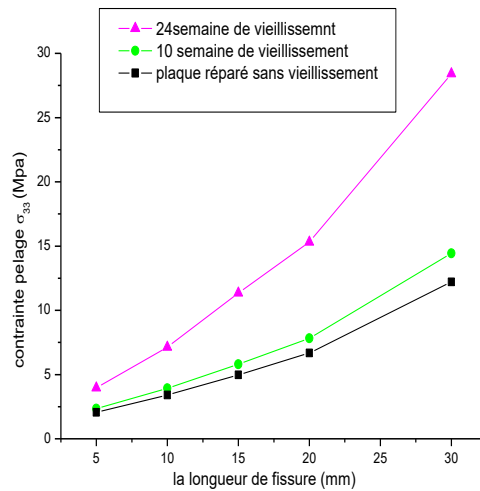
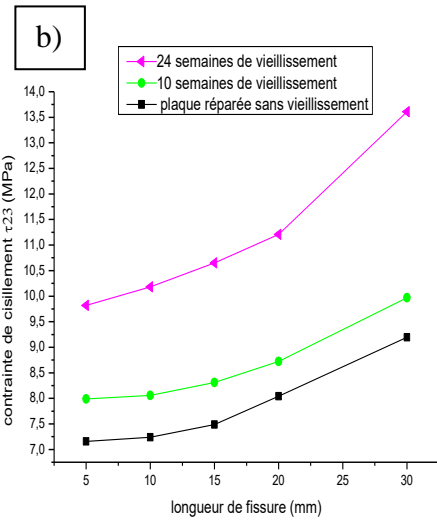
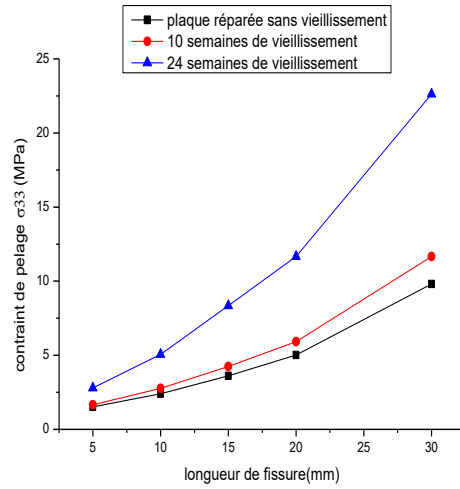
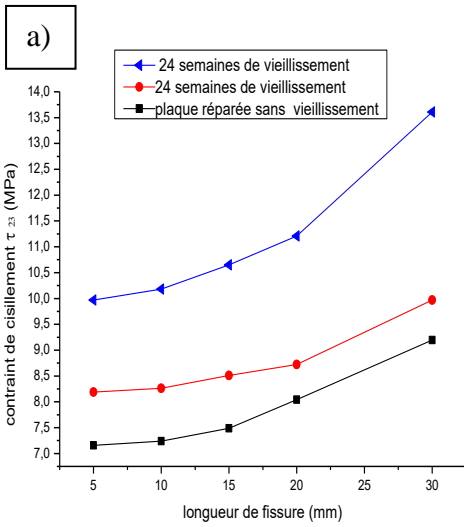
c) réparation par patch Aramide/époxyde

Figure IV.11 Variation due facteur d'intensité des contraintes en fonction de la longueur de la fissure pour différentes durées temps d'immersion à la température de 60°C [séquence d'empilement [O₈]_s].

La figure IV.11 montre clairement que les valeurs du facteur d'intensité des contraintes sont considérable à cette température et en fonction de la durée de vieillissement, contrairement à la température de 20°C. L'effet de vieillissement de l'adhésif apparaît même pour des petites longueurs de fissure.

Le taux d'augmentation de la valeur du facteur d'intensité des contraintes dépend de la température, de la durée de vieillissement et de la nature du patch composite. Plus la longueur de fissure augmente le transfert de charge de la plaque vers l'adhésif diminue et donc un facteur d'intensité des contraintes élevées.

IV.5. Analyse des contraintes dans l'adhésive et le patch



d)

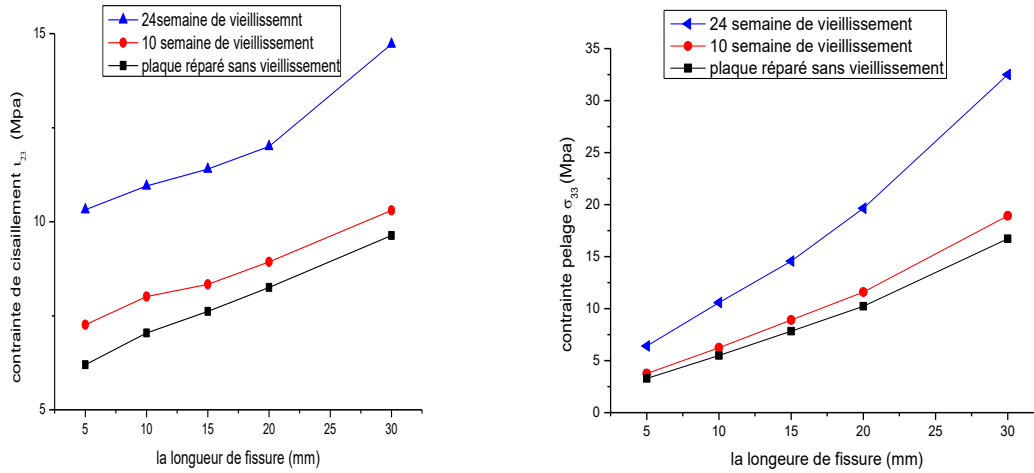


Figure IV.12 Variation de contraintes de cisaillement de la colle et la contrainte de pelage dans le patch a) le patch carbone /époxyde b) le patch boron/epoxyde c) patch aramide/époxyde d) aluminium une température de 20°C.

La figure IV.12 montre clairement que plus les propriétés mécaniques du patch sont élevées, plus l'absorption des contraintes de la zone endommagée sont élevée et donc le transfert de charge est meilleur vers le patch.

La réparation par patch composite augmente la rigidité de la structure endommagée et retarde la propagation de la fissure, assurant ainsi une longue durée de vie de la structure.

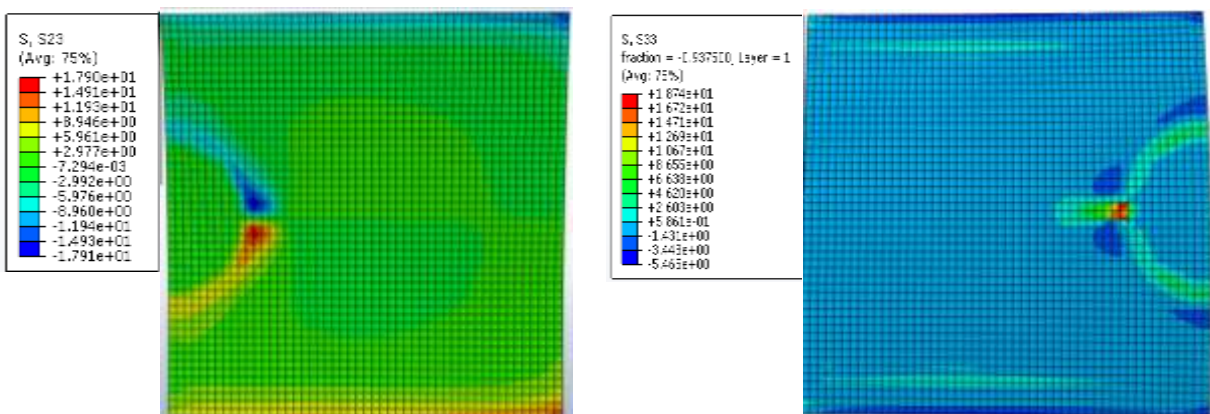
Pour de petites longueurs de la fissure et durée minimale de vieillissement, l'effet de la nature de matériau du patch sur la valeur des contraintes dans le patch et l'adhésive disparaît.

Si le temps de vieillissement est important, le composite et l'adhésif absorbent plus de quantité de l'eau et donc une dégradation importante de leur propriétés mécaniques, le transfert de charge de la plaque vers le patch à travers l'adhésif est donc moins important dans la zone endommagées.

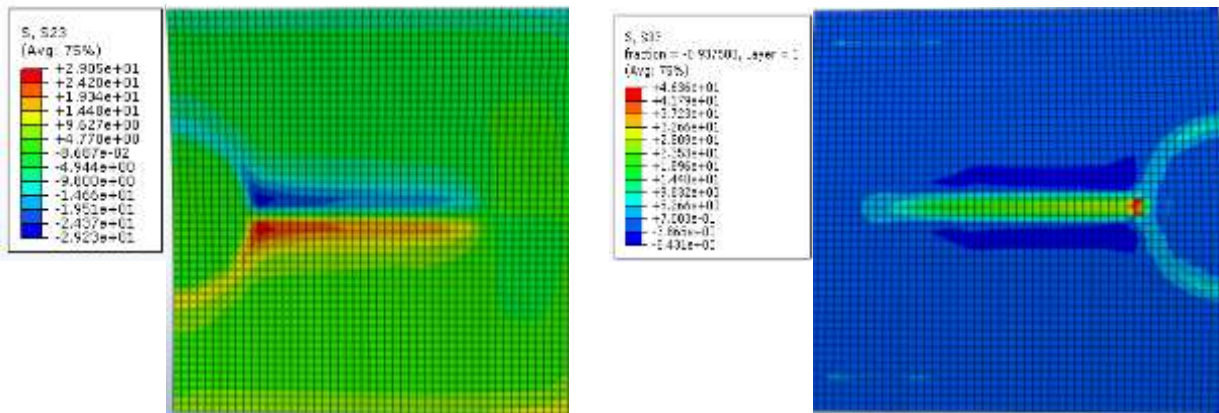
IV.6 Niveaux des contraintes dans le patch et l'adhésif

Afin de nous permettre de voir la répartition des contraintes dans le patch et l'adhésif on a présenté dans les figures suivantes le niveau des contraintes de cisaillement τ_{23} et les contraintes de pelage σ_{33} dans le patch.

A. Sans vieillissement

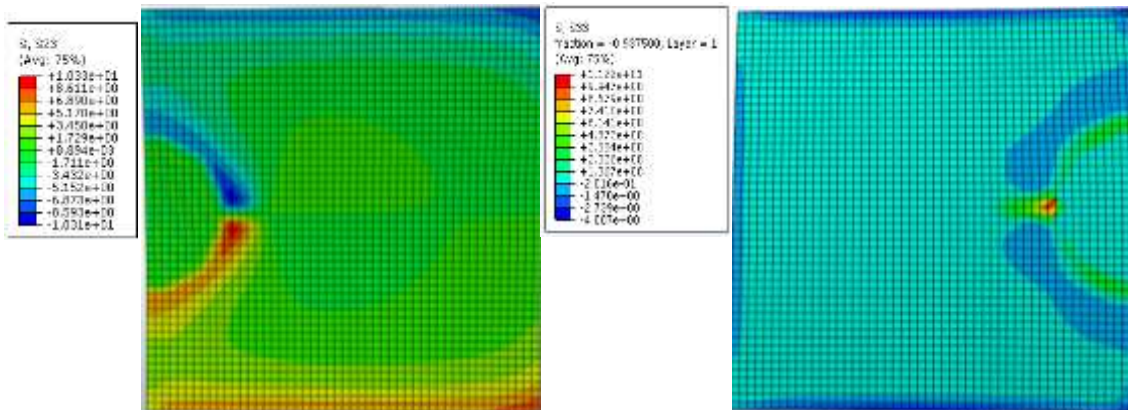


Plaque réparé bore sans vieillissement 5mm a) colle b) patch

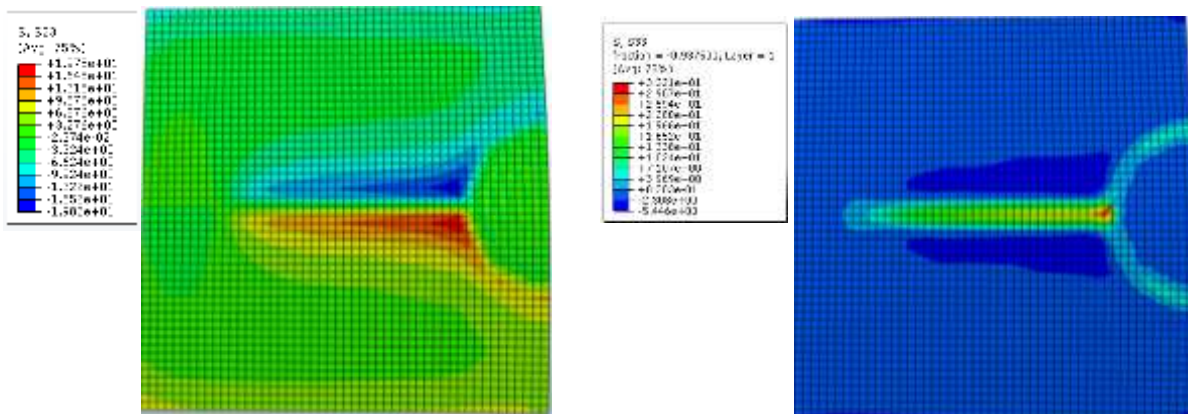


Plaque réparée par patch en bore/epoxyde sans vieillissement, pour une longueur de fissure= 30mm
a) colle b) patch

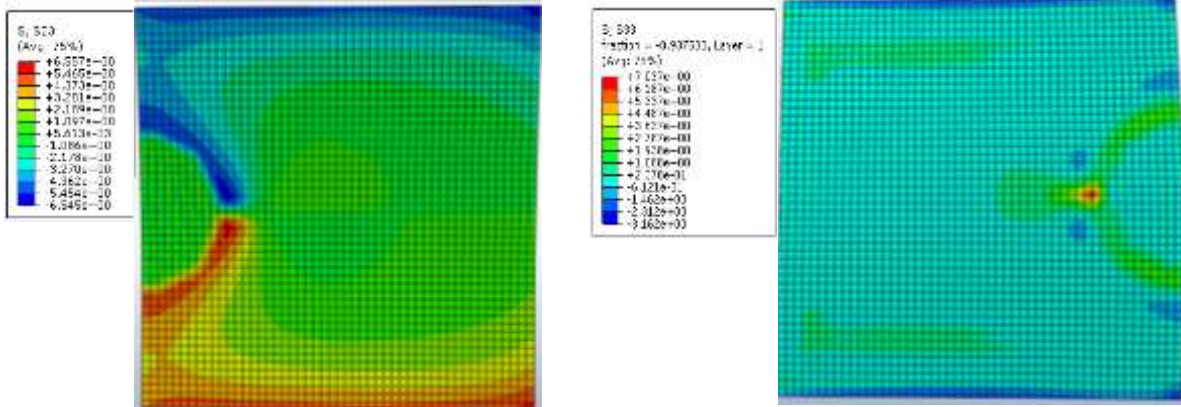
B. Dix (10) semaines de vieillissement



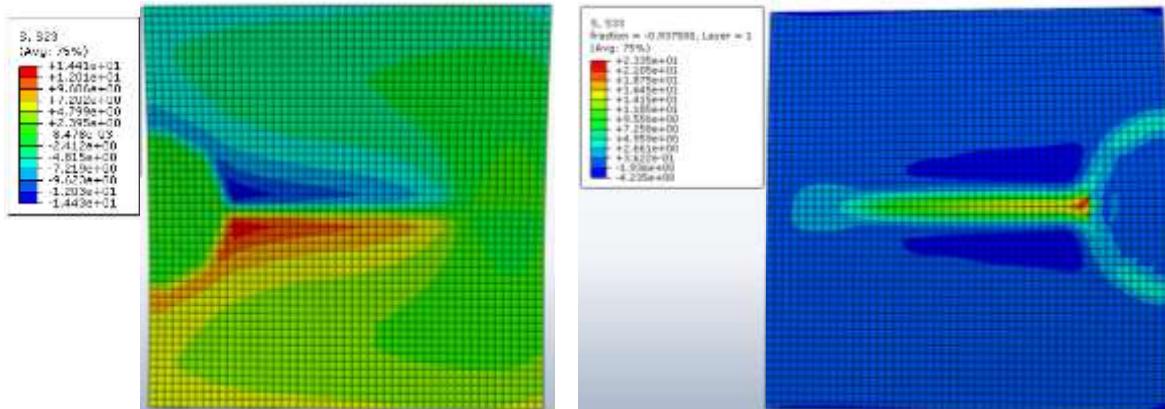
Plaque par patch en bore/epoxyde 10 semaines de vieillissement T=20° pour une longueur de fissure 5mm a) colle b) patch



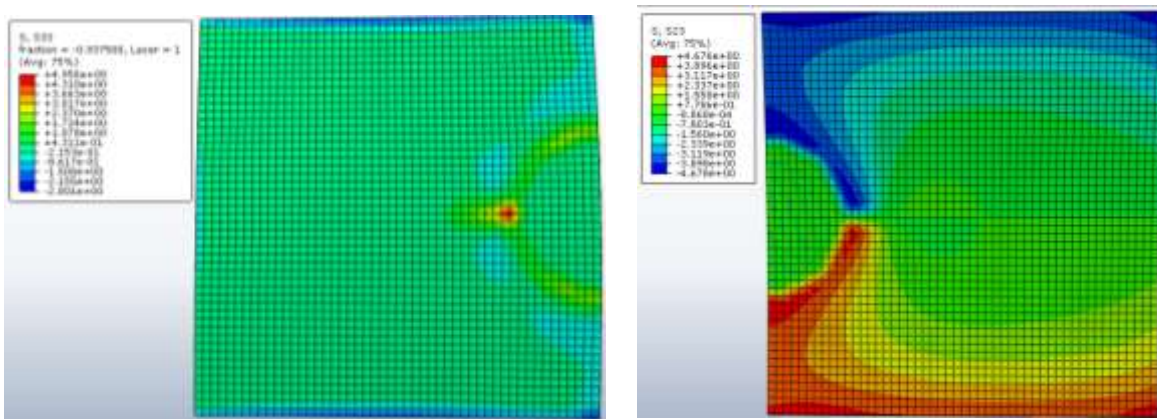
Plaque réparé bore 10 semaines de vieillissement T=20 30mm a) colle b) patch



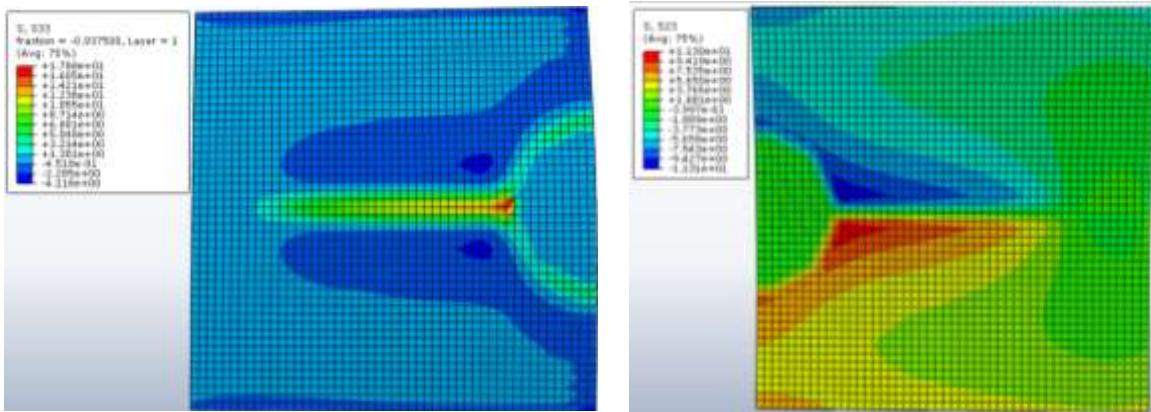
Plaque réparé bore 10 semaines de vieillissement T=40 pour une longueur de fissure 5mm a) colle b) patch



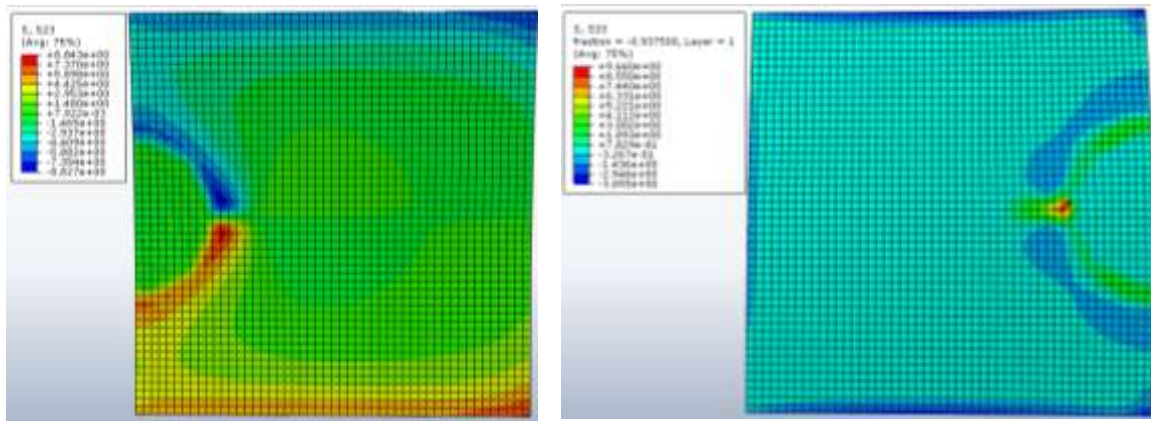
Plaque réparé bore 10 semaines de vieillissement T=40 30mm a) colle b) patch



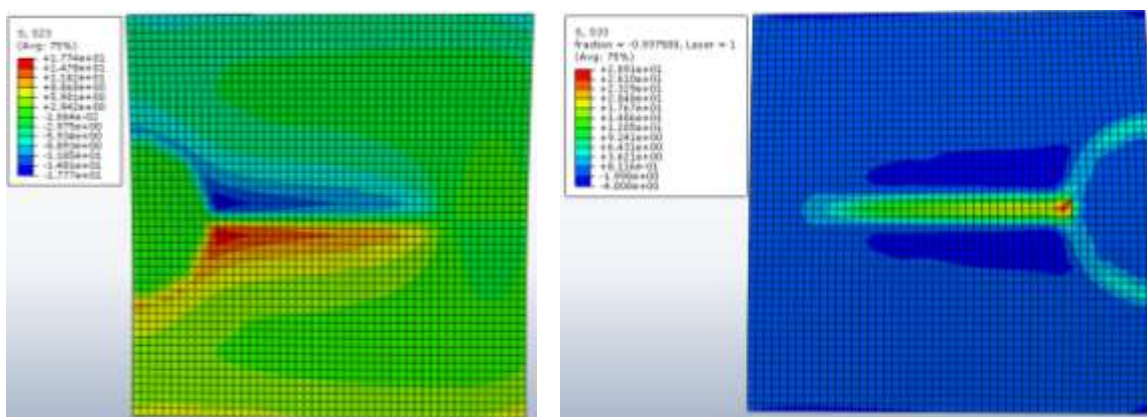
Plaque réparé bore 10 semaines de vieillissement T=60 5mm a) colle b) patch



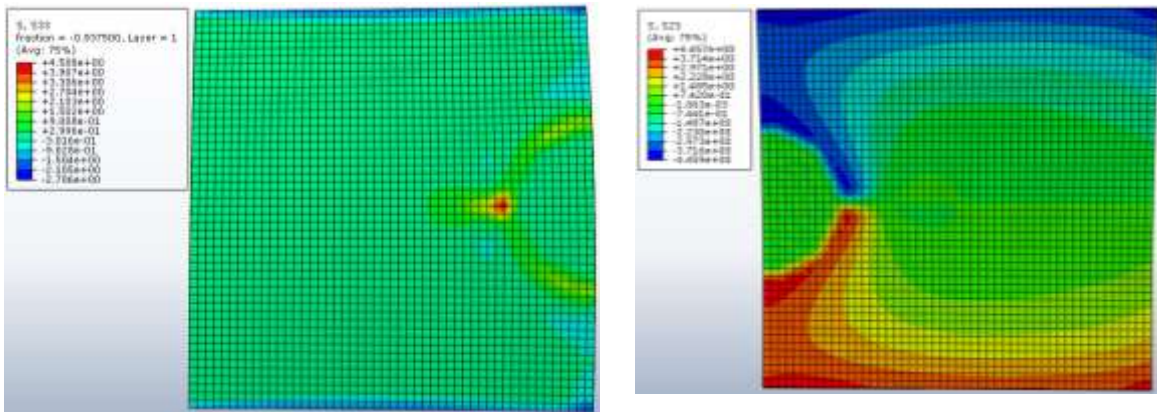
Plaque réparé bore 10 semaines de vieillissement T=60 30 mm a) colle b) patch
24 semaines de vieillissement



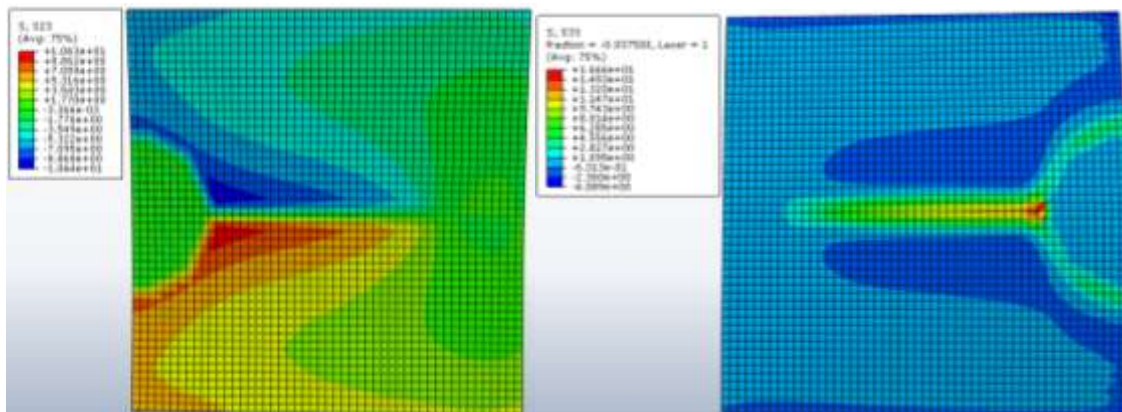
Plaque réparé bore 24 semaines de vieillissement T=20 5mm a) colle b) patch



Plaque réparé bore 24 semaines de vieillissement T=20 30mm a) colle b) patch
T=40

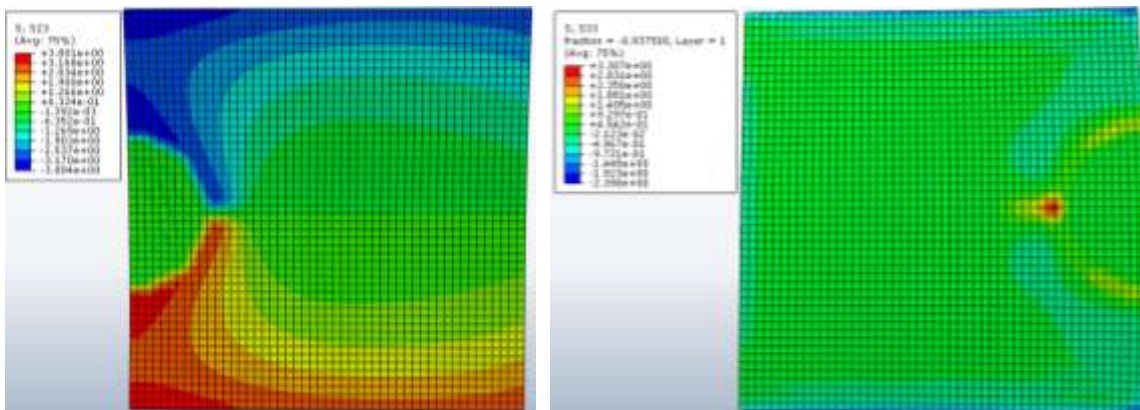


Plaque réparé bore 24 semaines de vieillissement T=40 5mm a) colle b) patch

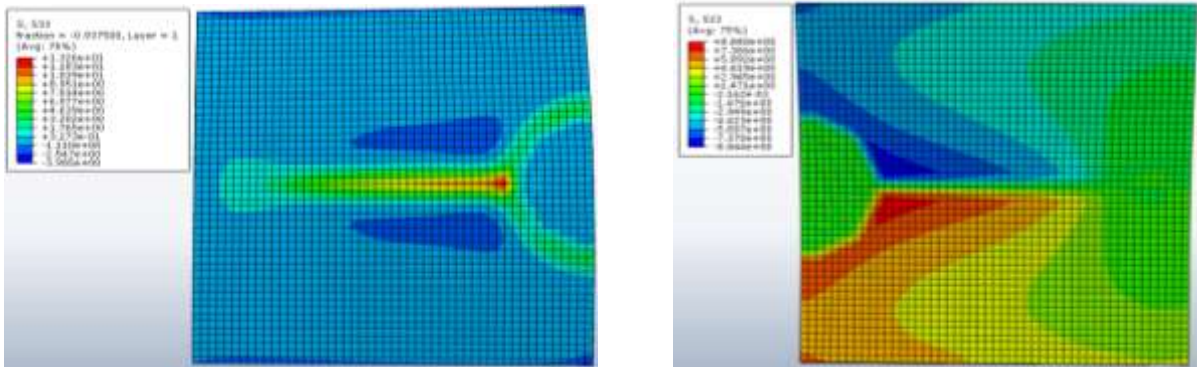


Plaque réparé bore 24 semaines de vieillissement T=40 30mm a) colle b) patch

T=60



Plaque réparé bore 24 semaines de vieillissement, T=60 5mm a) colle b) patch



Plaque réparé par patch bore/époxyde 24 semaines de vieillissement T=60 30mm a) colle b) patch

Fig.IV.13 Exemple de distribution des contraintes au niveau de la plaque la colle et le patch pour des différents périodes d’immersion et à différentes températures et longueurs de fissure.

On remarque clairement que pour une fissure de longueur minimale 5mm, les contraintes se concentrent au niveau de l'entaille vu la concentration élevée des contraintes au niveau de la plaque. Si la longueur de la fissure augmente, on remarque une forte concentration de contrainte toujours en niveau de l'entaille et la fissure avec apparition d'une faible concentration de contrainte au niveau du bord libre de l'adhésif. La valeur des deux contraintes augmentant avec l'augmentation de la longueur de la fissure.

Après 10 semaines de vieillissement, on remarque clairement que vu une grande perte des propriétés mécaniques de l'adhésif, le transfert de charge devient mauvais et l'adhésif se déforme d'une façon considérable avec des valeurs de contraintes élevées. La concentration de contraintes se situe toujours au niveau de l'entaille et en pointe de fissure.

Si la longueur de la fissure augmente, en plus des contraintes situées au niveau de l'entaille et la fissure une partie de ces contraintes se concentrent au niveau du bord de l'adhésif avec des valeurs faibles. En augmentant la longueur de la fissure la valeur des contraintes augmentent brusquement.

Si la température augmente, l'adhésif perd de plus en plus ses propriétés mécaniques, et une grande partie de la surface de l'adhésif sera sollicitée la valeur des contraintes augmentent avec l'augmentation de la longueur de la fissure. et la durée de vieillissement.

IV.7 Effet de vieillissement de la colle :

Afin d’analyser le transfert de charge dans les deux substrats (patch et adhésif) utilisés dans la réparation d’une structures en aluminium 2024-T3 endommagées.

On a pris trois lignes deux mesures par rapport à la surface de l’adhésif (voir figureIV-14)

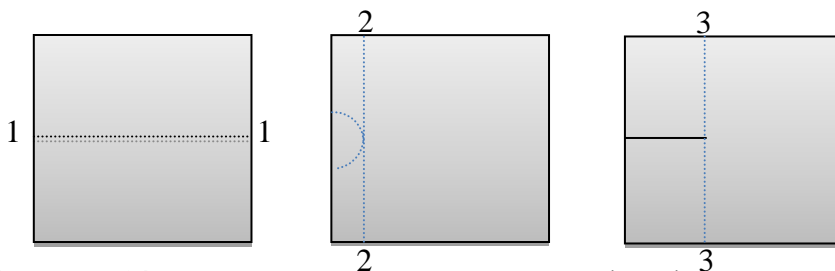


Figure IV.14: Les lignes de mesure utilisé dans l’analyse de transfert de charge pour patch, l’adhésif.

A. Sans vieillissement

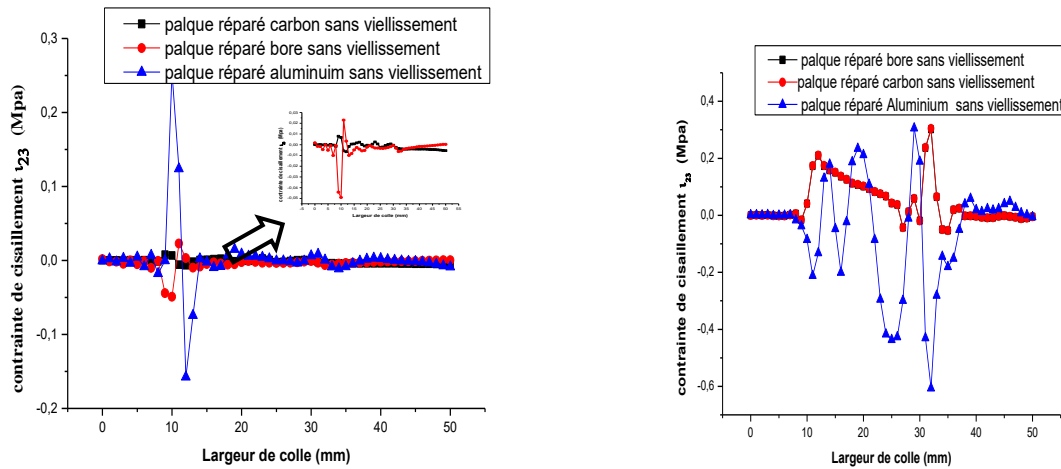


Figure.IV.15 Contrainte de cisaillement dans la colle en fonction largeur pour fissure a=5mm et a=30mm.

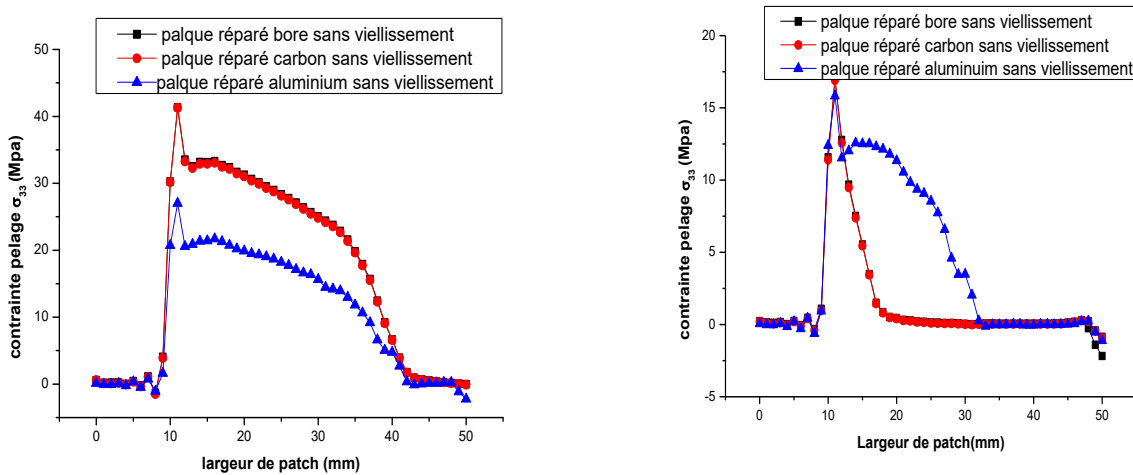


Figure IV.16 Contrainte de pelage dans le patch en fonction largeur pour fissure a=5mm et a=30mm.

IV.7.1 Suivant la ligne 11 : on remarque clairement que les valeurs de contraintes de cisaillement τ_{xy} sont faibles suivant cet endroit de mesure. Les valeurs les plus élevées sont au niveau de la fissure. Loin de la fissure, la valeur de la contrainte est pratiquement négligeable, le patch en bore absorbe plus de contraintes comparées aux autres natures de patch, cependant le patch en aluminium et vu sa rigidité transfère moins de contraintes et la valeur de la contrainte dans l'adhésif est un peu élevée.

B. DIX (10) semaines de vieillissement fissure 5mm

➤ Pour la colle

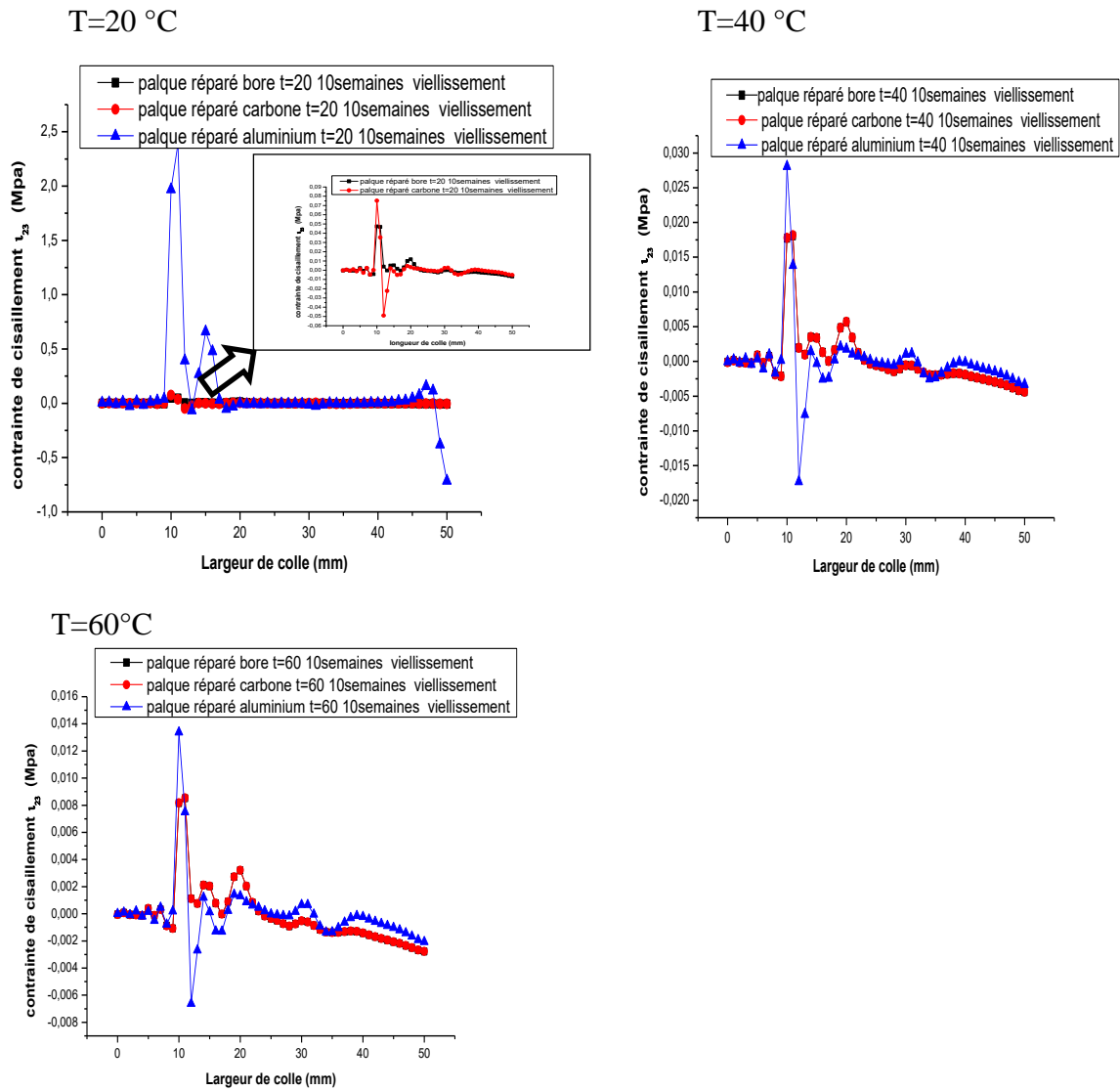


Figure.IV.17 : Contrainte de cisaillement dans la colle en fonction largeur pour fissure $a=5\text{mm}$.

En augmentant la température, la valeur de la contrainte augmente et la dégradation des propriétés de l'adhésif lui procure un mauvais transfert de contrainte mais ces valeurs restent quasiment faibles.

C. Dix semaines de vieillissement fissure de 30mm

$T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$

$T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$

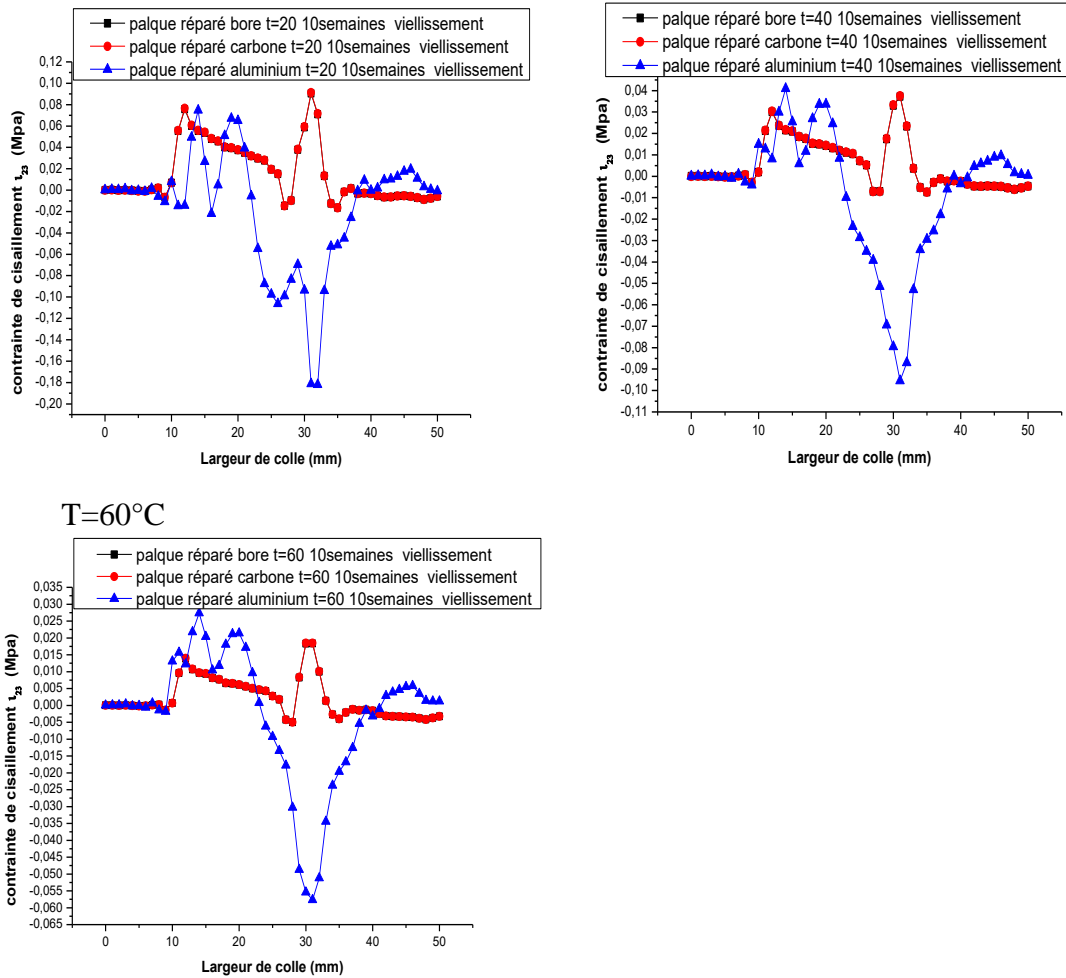


Figure.IV.18 : Variation de la contrainte de cisaillement dans la colle en fonction de sa largeur pour une fissure $a=30$ mm.

En augmentant la longueur de la fissure $a=30$ mm, la concentration de contrainte augmente et la contrainte dans l'adhésif augmente petit à petit.

Les valeurs les plus élevées sont toujours au niveau de la fissure et pour le cas d'une réparation par patch en aluminium.

D. 10 Dix semaines de vieillissement fissure de 5mm

➤ Pour le patch

$T=20^\circ\text{C}$

$T=40\text{mm }^\circ\text{C}$

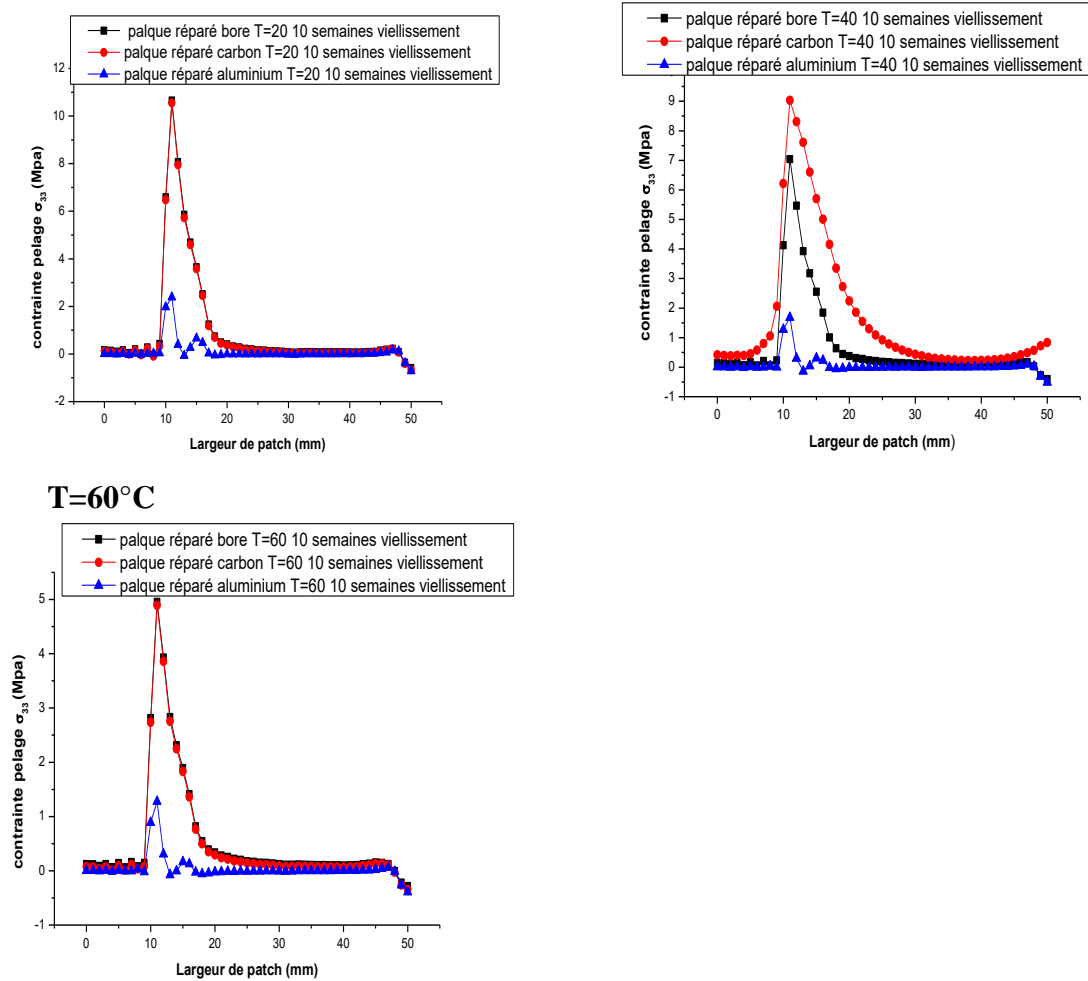


Figure IV.19 : Contrainte de cisailment dans le patch en fonction largeur pour fissure $a=5\text{mm}$.

De même la distribution des contraintes de pelage dans le patch montre clairement que l'absorption des contraintes est de plus en plus efficace si le patch présente des propriétés mécaniques élevées (bore et carbone). Cependant, les contraintes de pelage sont faibles et un mauvais transfert de charge ce qui explique les contraintes élevées dans l'adhésif.

Loin de la zone endommagée (fissure et entaille) les contraintes sont quasiment nulles et ce quel que soit la nature du patch.

En augmentant la température, l'adhésif perd ses propriétés mécaniques et donc n'assure pas un bon transfert de charge ce qui explique les valeurs faibles des contraintes de pelage.

En augmentant la longueur de la fissure la zone endommagée augmente et le transfert de charge vers

➤ **Variation de contrainte de pelage dans le Patch fissure 30mm**
T=20 °C **T=40°C**

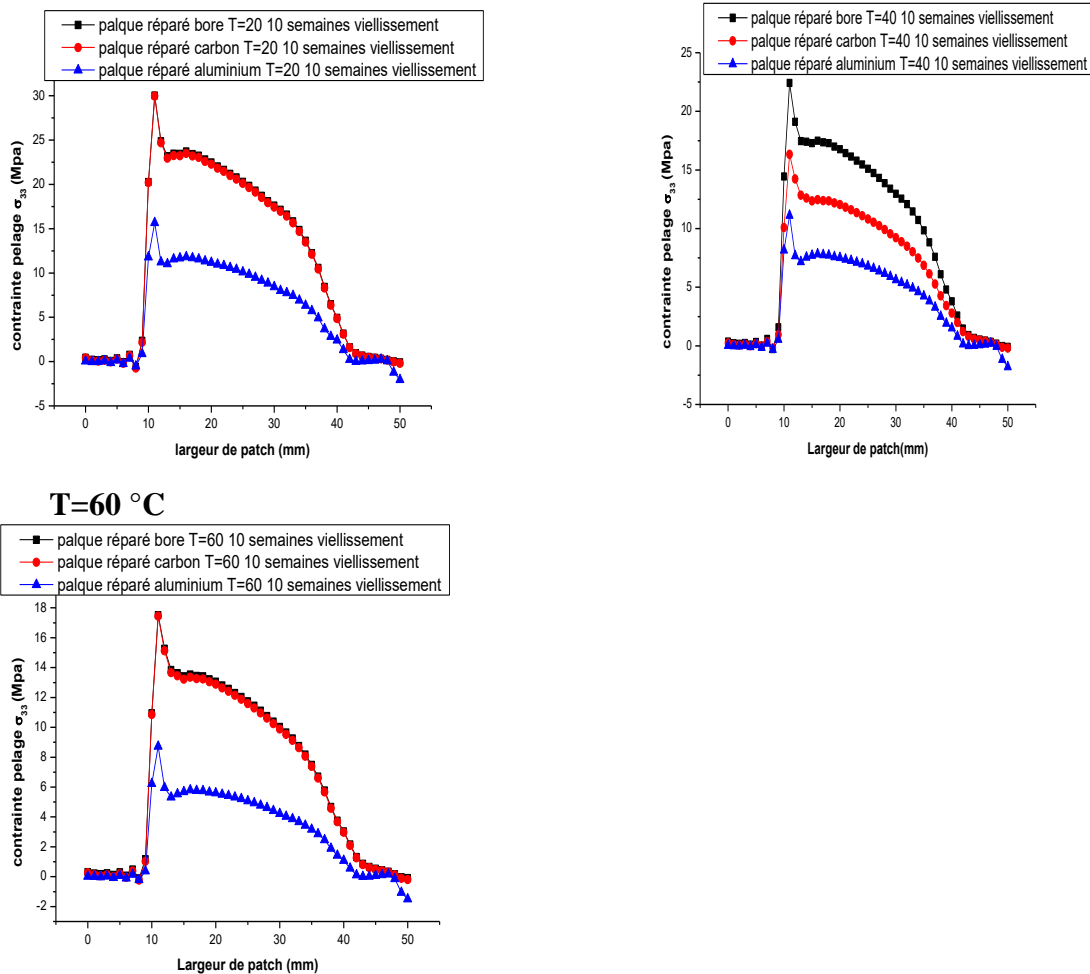


Figure IV.20: Contrainte de pelage dans le patch en fonction largeur pour fissure a=30mm.

Le patch augmente, le patch absorbe plus de contrainte de la zone endommagée et donc des valeurs de contraintes de pelage élevées dans le patch. Les valeurs les plus faibles celles du cas d’une réparation par patch en aluminium, en augmentant la température le transfert de charge diminue suite à la dégradation des propriétés mécaniques de l’adhésif et donc les valeurs les valeurs de pelage faibles dans le patch.

E. 24 semaines de vieillissement

➤ **Variation de contrainte de cisaillement dans l’adhésif pour une fissure 5mm**

T=20°C

T=40 °C

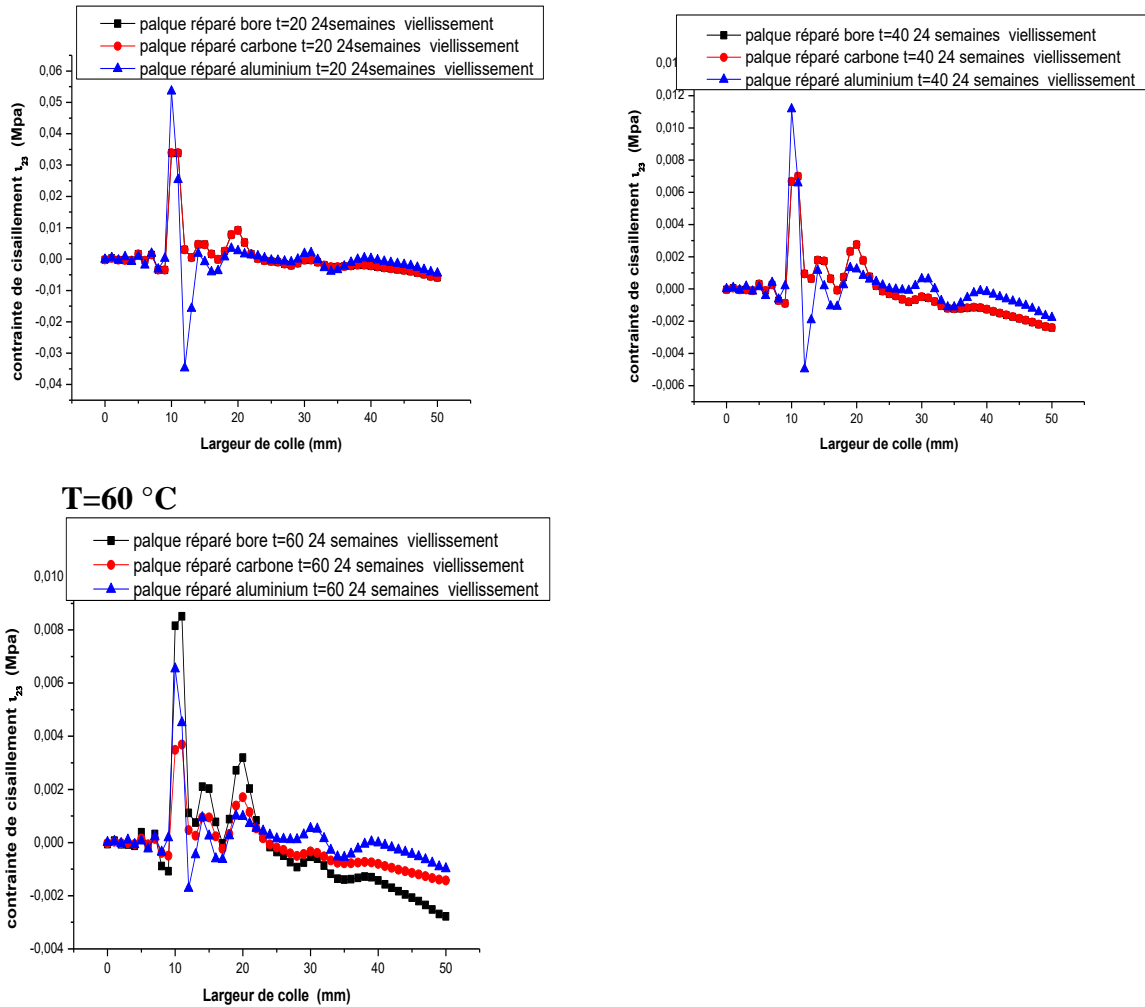
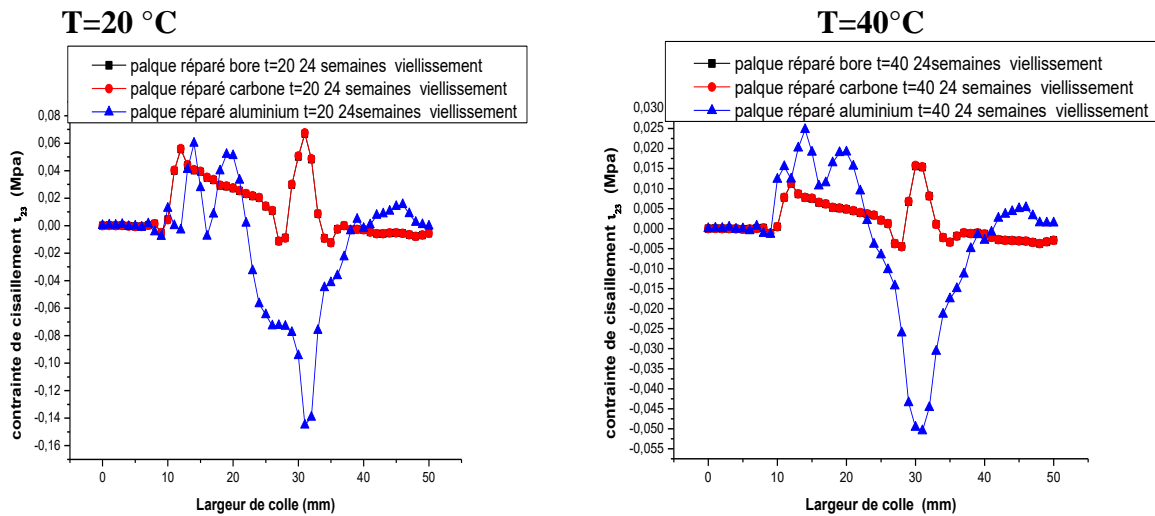


Figure IV.21 : Variation de la contrainte de cisaillement dans l'adhésif suivant sa largeur pour fissure $a=5\text{mm}$.

➤ La Colle 30mm



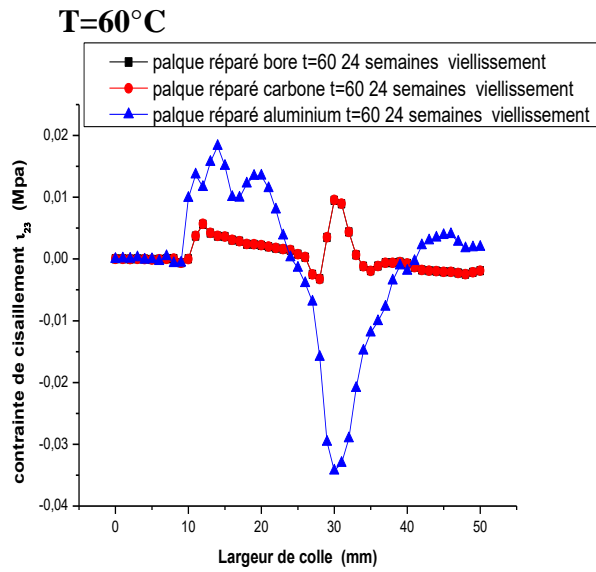
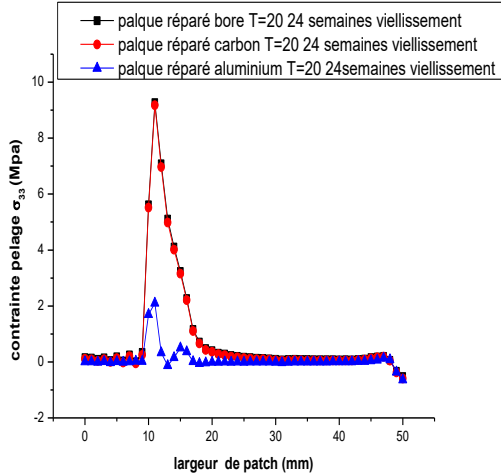


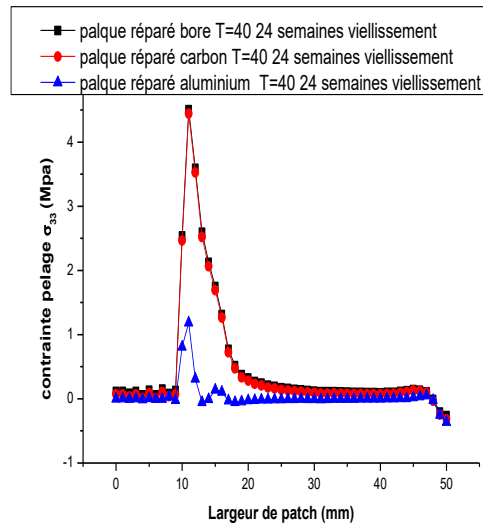
Figure IV.22 : Variation de la contrainte de cisaillement dans l’adhésif suivant sa largeur pour fissure a=30mm.

➤ Variation de contrainte de pelage dans le Patch fissure 5mm

T=20°C



T=40°C



T=60°C

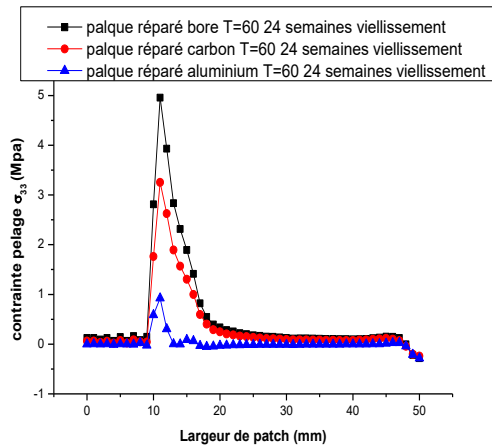
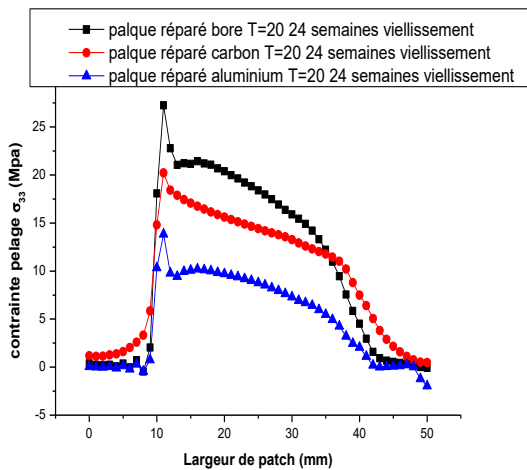
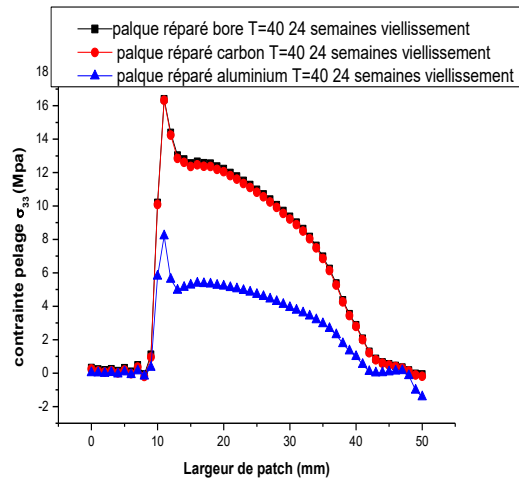


Figure.IV.23 : Variation de la contrainte de pelage dans le patch en fonction de sa largeur pour fissure a=5mm.

➤ Pour le patch 30mm
T=20°C



T=40°C



T=60°C

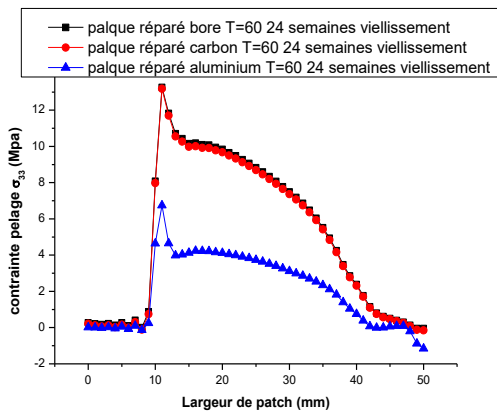


Figure.IV.24 Variation de la contrainte de pelage dans le patch en fonction de sa largeur pour fissure a=30mm.

➤ T= 20°C la colle 5mm

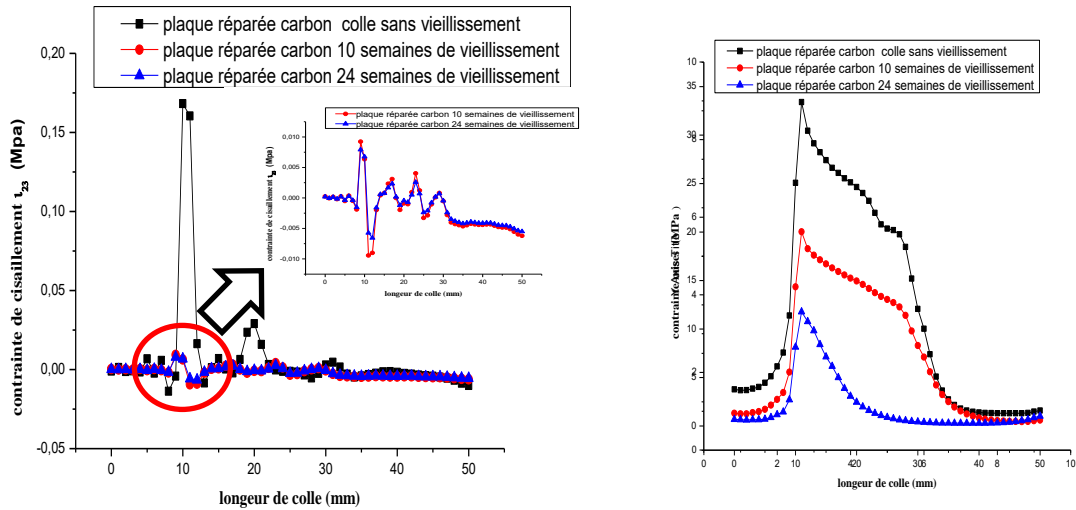


Figure.IV.25 : Variation de la contrainte de cisaillement dans la colle en fonction de sa largeur pour fissure a=5mm.

➤ T=20°C Patch 30mm

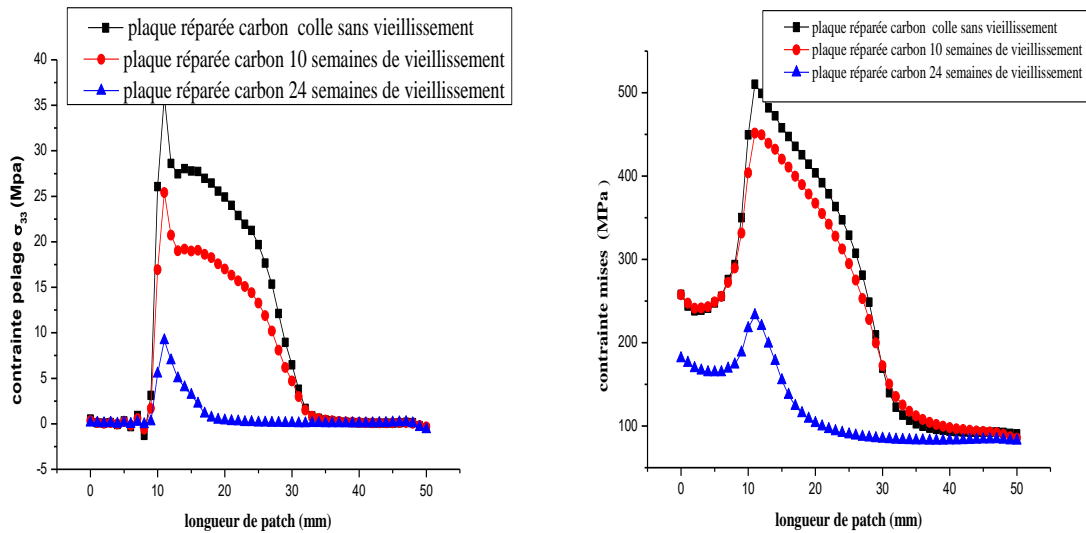


Figure.IV.26 : Variation de la contrainte de pelage dans le patch en fonction de sa largeur pour fissure a=30mm.

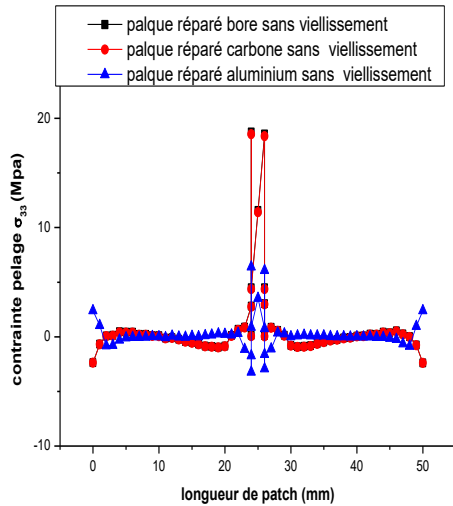
Si la durée de vieillissement augmente (24 semaines), le transfert de charge devient de plus en plus faible et les contraintes dans l'adhésif sont toujours concentrées au niveau de la zone endommagée [entaille + fissure]. Le patch aluminium présente les valeurs les plus élevées dans l'adhésif. En augmentant la longueur des fissures, les contraintes dans l'adhésif et le patch diminuent et après 24 semaines de vieillissement, les contraintes deviennent plus considérables.

IV.7.2 Suivant la ligne 22 et33 :

A. Sans vieillissement

➤ a)

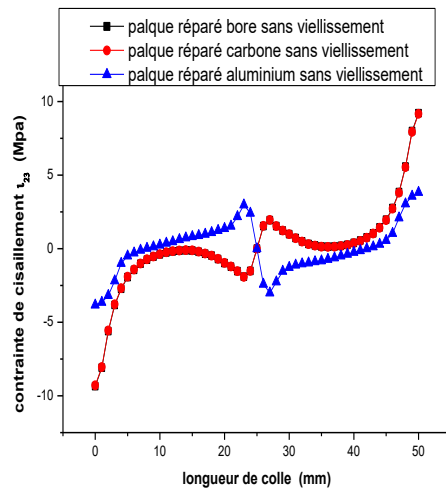
Au niveau d'entaille



➤ b)

5mm

Au niveau d'entaille



Au niveau de fissure

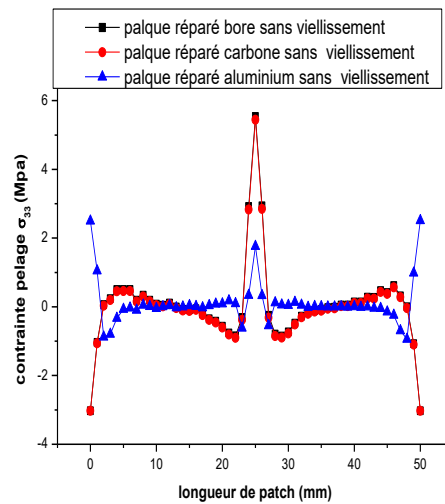


Figure.IV.27 : Variation de contrainte de a) cisaillement b) pelage dans la colle en fonction de longueur pour fissure a=5mm.

Pour une longueur de fissure de 5mm dans la plaque d'aluminium et à l'état sec, les valeurs de la contrainte de cisaillement dans l'adhésif sont peu élevées que suivant la ligne 11, la distribution des contraintes est symétrique par rapport à l'entaille (a).

Les contraintes les plus élevées dans le joint d'adhésif sont celles pour le cas de réparation par patch carbone/époxyde au bore/époxyde, cependant les plus faibles sont celles de la réparation par patch en aluminium.

Par contre, au niveau de la fissure (b) la concentration des contraintes est un peu élevée le patch aluminium n'absorbe pas plus de contraintes. Les contraintes de cisaillement sont élevées dans la couche d'adhésive, le point de la fissure présente une symétrie de la distribution des contraintes.

De même, la distribution de contraintes de pelage au niveau du patch montre clairement une distribution symétrique de part et d'autre de l'entaille (c) et de la fissure (d).

Les valeurs les plus élevées sont celles déterminées au niveau de la ligne qui passe par l'entaille.

Le patch en aluminium présente les plus faibles valeurs ce qui montre un faible transfert de charge de la plaque endommagée. Cependant, au niveau du bord (zone a et b) et vu sa rigidité élevée, le patch aluminium présente des valeurs de contraintes élevées par rapport au patch carbone/ epoxyde et bore/ epoxyde. Ces contraintes sont dû à l'effet de flexion provoquée par la réparation par simple coté.

➤ sans vieillissement 30mm

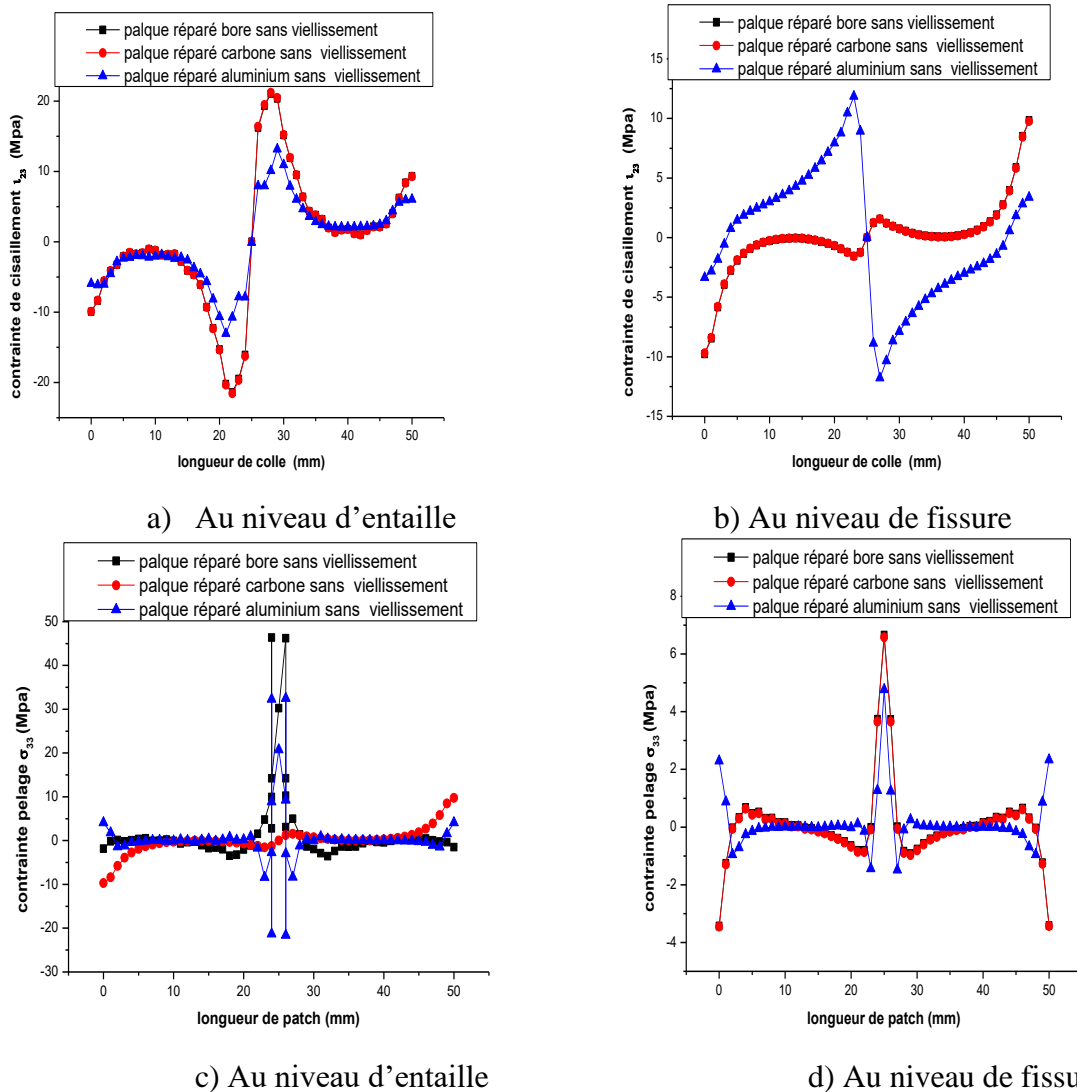


Figure.IV.28 : Variation de contrainte de cisaillement dans la colle en fonction de longueur pour fissure a=5mm.

En augmentant la longueur de la fissure $a=30\text{mm}$ Figure.IV.28, les contraintes augmentent considérablement dans le patch et dans l'adhésive et ce quel que soit la position au niveau de l'entaille et au niveau de la fissure.

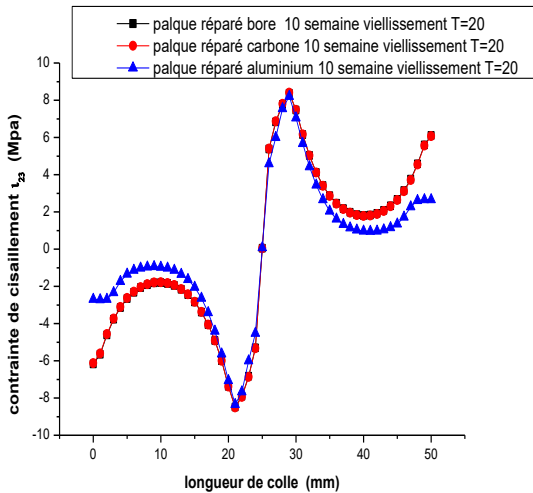
Pour cette longueur de fissure et vu la concentration élevée au niveau de la zone endommagée, le transfert de charge est presque identique dans le patch et ce quel que soit sa nature (c et d).

Au niveau de la fissure, les contraintes de cisaillement sont élevées dans la couche d'adhésif pour une réparation par patch aluminium.

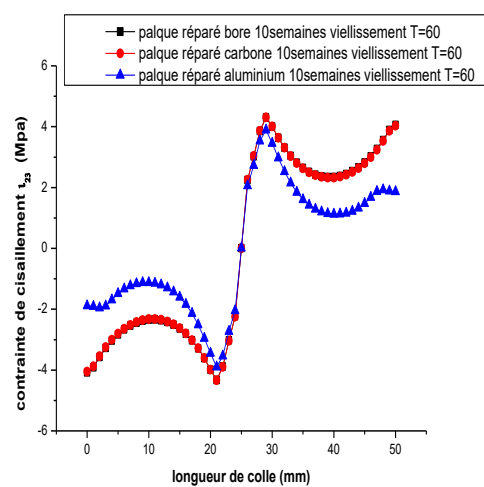
B. 10 semaines de vieillissement 5mm

➤ **Pour la colle**

T=20°C

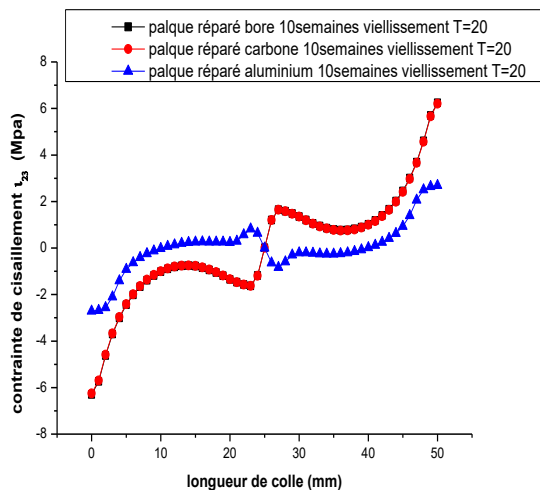


T=60°C

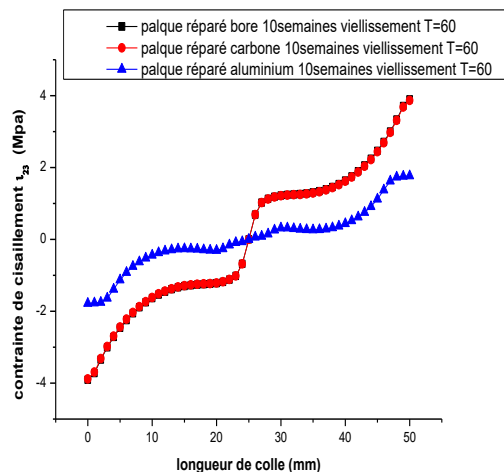


Au niveau d'entaille

T=20°C



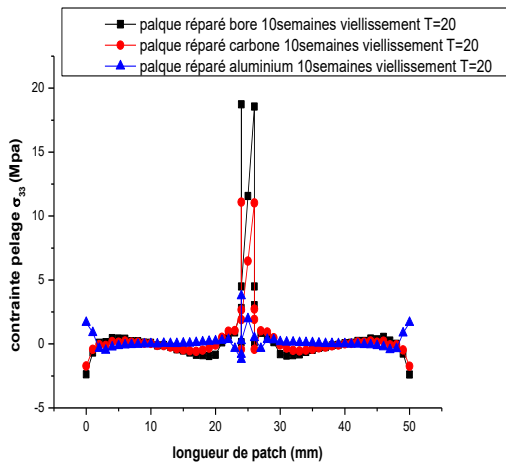
T=60°C



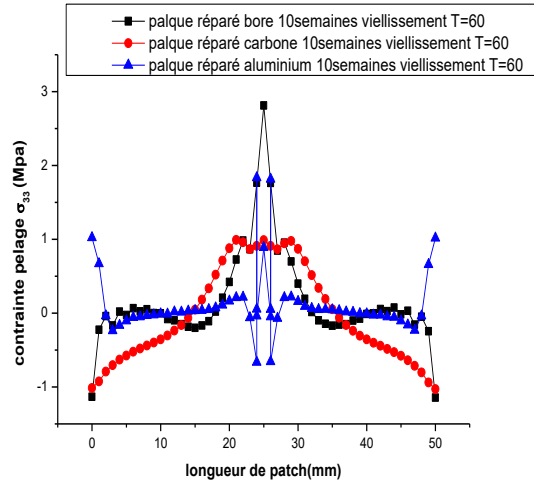
Au niveau de fissure

Figure.IV.29 : Variation de contrainte de cisaillement dans la colle en fonction de longueur pour fissure $a=5\text{ mm}$.

➤ Pour le patch
T=20°C

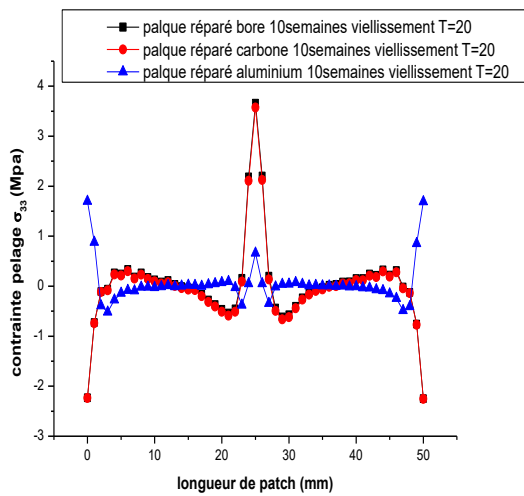


T=60°C

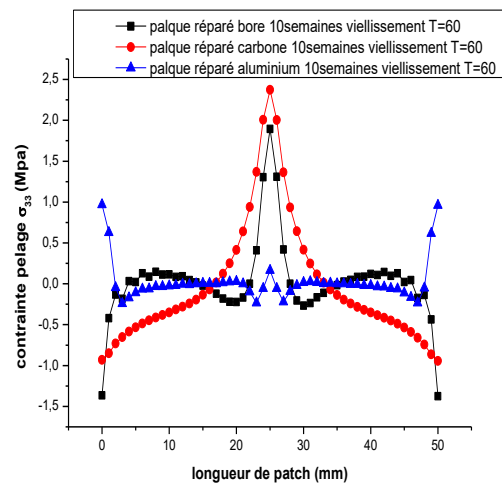


Au niveau d'entaille

T=20°C



T=60°C



Au niveau de fissure

Figure.IV.30: Variation de contrainte de pelage dans le patch en fonction de longueur pour fissure a=5 mm.

C. 10 semaines de vieillissement 30mm

➤ Pour la colle
T=20°C

T=60°C

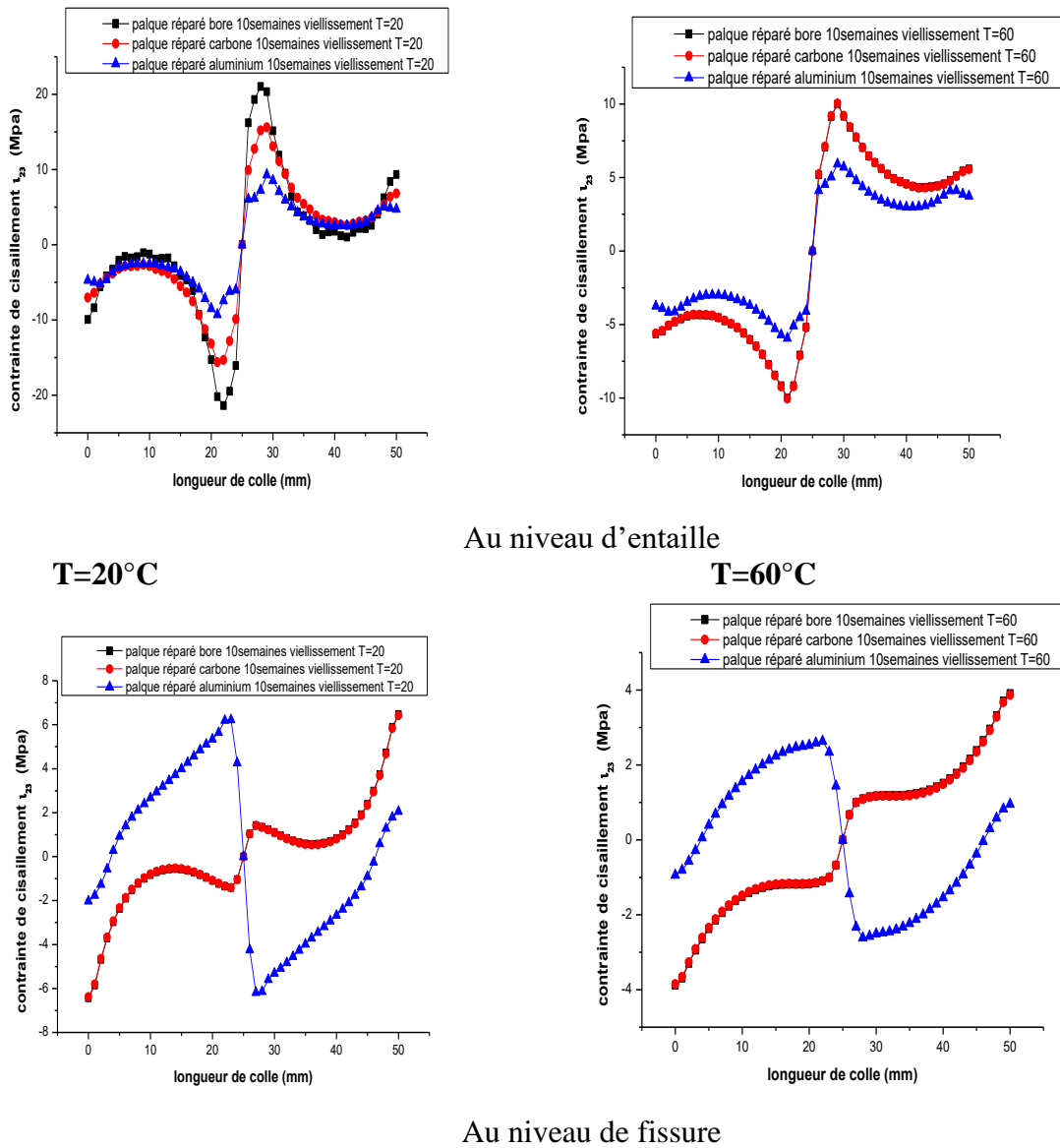
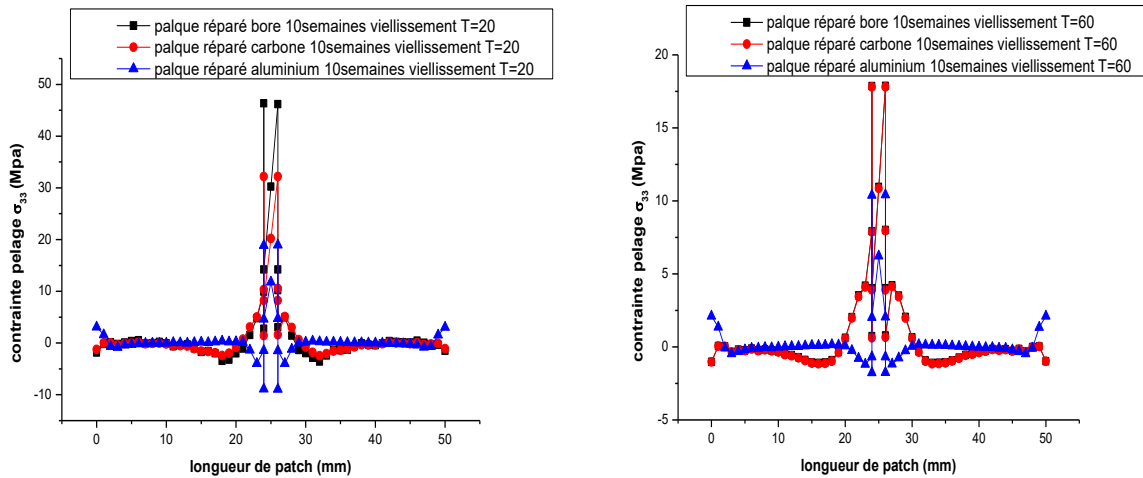


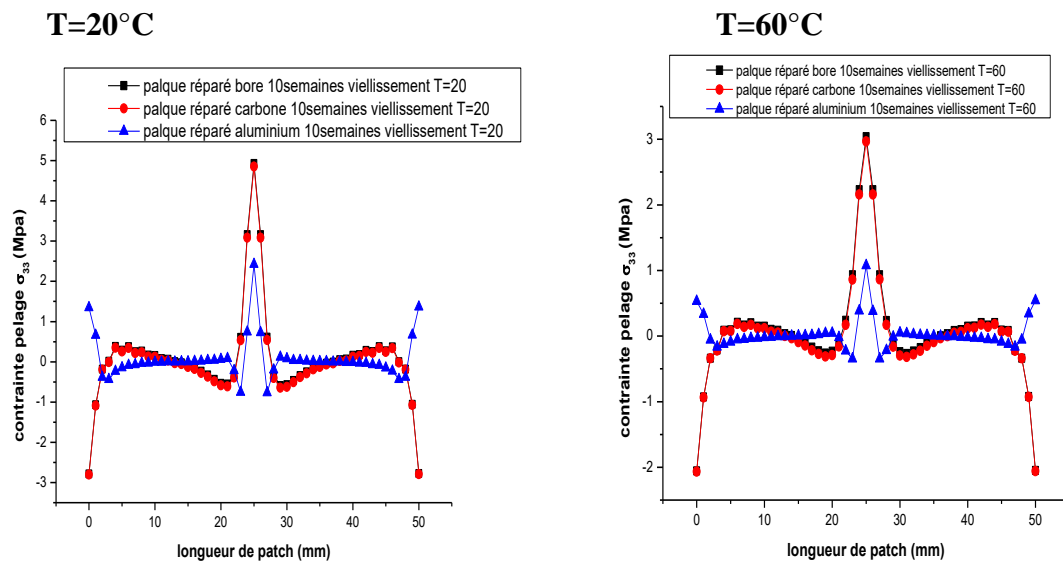
Figure.IV.31 : Variation de contrainte de cisaillement dans la colle en fonction de la longueur pour fissure $a=30\text{mm}$.

➤ Pour le patch
 $T=20^{\circ}\text{C}$

$T=60^{\circ}\text{C}$



Au niveau d'entaille



Au niveau de fissure

Figure.IV.32 : Variation de contrainte de pelage dans le patch en fonction de longueur pour fissure a=5mm.

Après 10 semaines de vieillissement en immersion dans l'eau l'adhésive perd une grande partie de ces caractéristiques mécaniques et donc n'assure pas un bon transfert des charges, les valeurs de la contrainte de cisaillement dans le joint adhésif au niveau de l'entaille et au niveau de la fissure.

En augmentant la température l'adhésive perd de plus en plus ces propriétés mécaniques et donc des contraintes de cisaillement plus faibles (a, b, c et d).

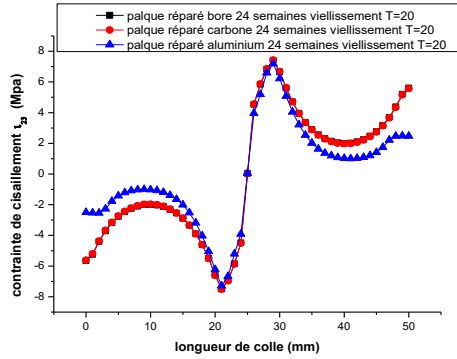
De même la distribution des contraintes de pelage dans le patch est en relation directement avec la position, la durée de vieillissement et la température.

Le patch aluminium présente des contraintes de pelages élevées au niveau de l'entaille contrairement aux autres patches. Cependant au niveau de la fissure les patches en carbone et bore présentent des contraintes de pelage élevées que celui en aluminium ce qui assure un bon transfert de charge.

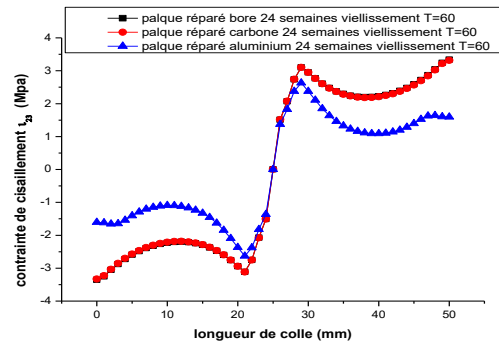
D. 24 semaines de vieillissement 5mm

➤ **Pour la colle**

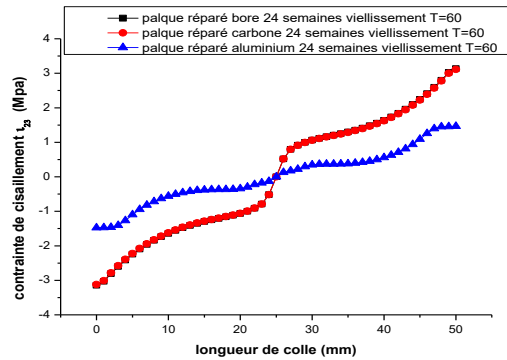
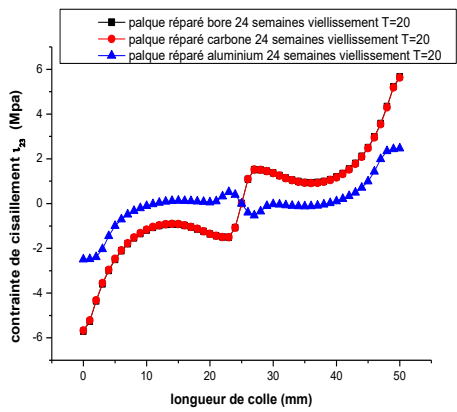
T=20 °C



T=60°C



Au niveau d'entaille

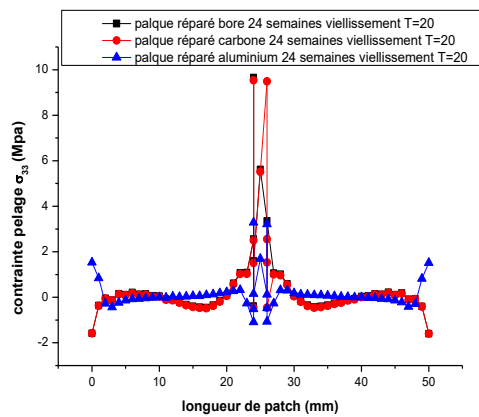


Au niveau de fissure

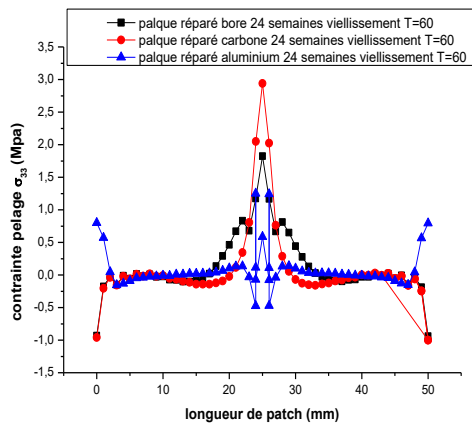
Figure.IV.33 : Variation de contrainte de cisaillement dans la colle en fonction de la longueur pour fissure a=5 mm.

➤ **Pour le patch**

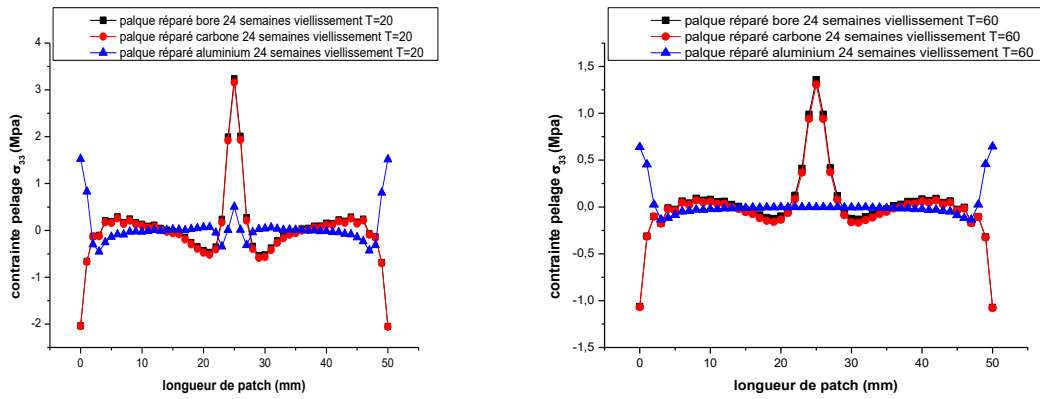
T=20 °C



T=60°C



Au niveau d'entaille



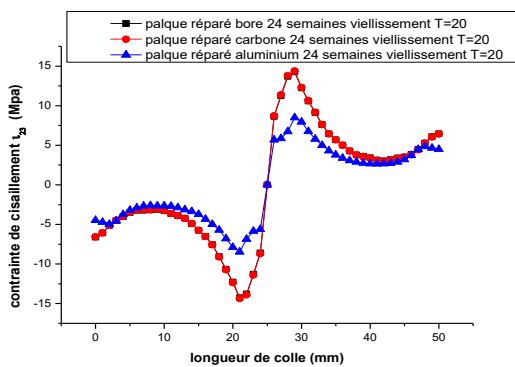
Au niveau de fissure

Figure.IV.34 : Variation de contrainte de pelage dans le patch en fonction de la longueur pour fissure a=5 mm.

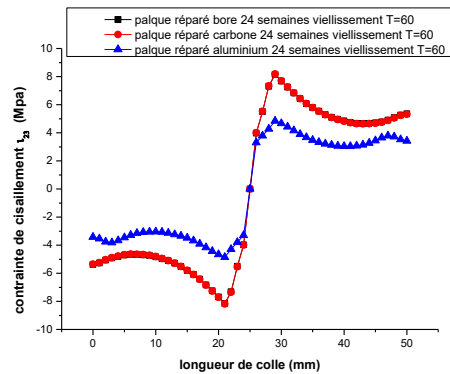
E. 24 semaines de vieillissement 30mm

➤ Pour la colle

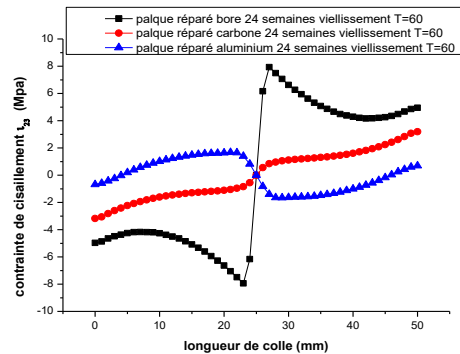
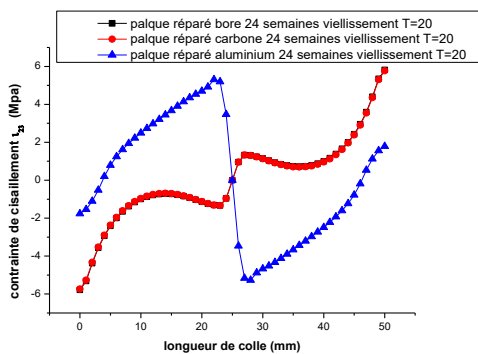
T=20°C



T=60°C



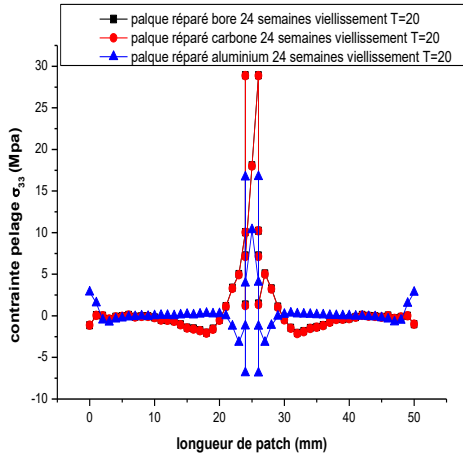
Au niveau d'entaille



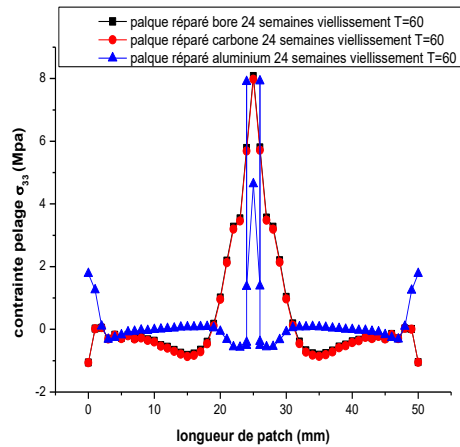
Au niveau de fissure

Figure.IV.35 : Variation de contrainte de cisaillement dans la colle en fonction de la longueur pour fissure a=30 mm.

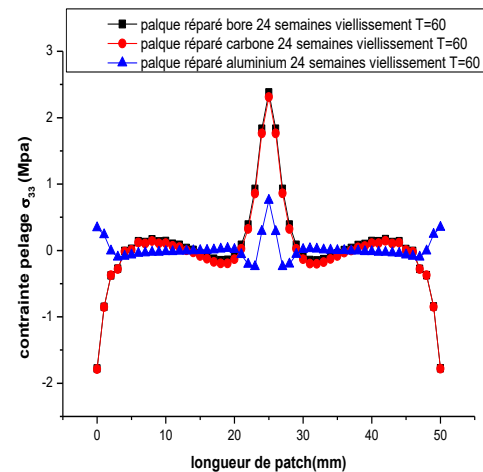
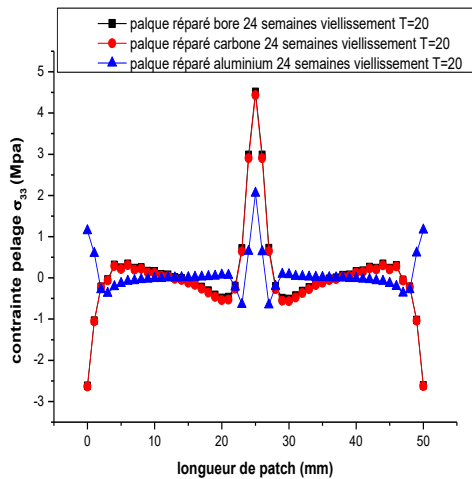
➤ Pour le patch
T=20 °C



T=60°C



Au niveau d'entaille



Au niveau de fissure

Figure.IV.36 : Variation de contrainte de pelage dans le patch en fonction de la longueur pour fissure a=30 mm.

En augmentant la durée de vieillissement la différence de distribution de contrainte est clair si la réparation est en patch en bore, la valeur de la contrainte de cisaillement est la plus élevée que celle qui correspond à une réparation par patch aluminium est la plus faible.

En augmentant la température, la valeur de la contrainte diminue suite a une dégradation des propriétés mécaniques de l'adhésif.

Au niveau de la fissure, la valeur de la contrainte de cisaillement est la plus faible vu que la taille de la fissure est minimale.

De même la variation de la contrainte de pelage est symétrique par rapport à l'entaille ou la fissure, le patch en aluminium présente les plus faibles valeurs de la contrainte de pelage qui dépend de la température de vieillissement.

IV.8 L'effet de perte des propriétés mécaniques de composite :

Dans la 2eme partie de notre travail on considère le cas extrême, vu le patch et l'adhésif subissent en même temps le vieillissement en température et immersion en eau.

Donc une dégradation de leurs propriétés mécaniques et en même temps voir les conséquences sur le transfert de charge de la zone endommagée.

IV.8.1 Composite vieilli / colle non vieilli:

Dans la deuxième partie de notre travail, on a essayé de voir l'effet de la perte des propriétés mécaniques du composite sur la variation de facteur d'intensité des contraintes dans la plaque endommagée, pour cela on a déterminé par des essais de traction les propriétés mécanique du composite suite à son vieillissement en immersion dans l'eau à différentes température, dans ce cas la colle est considérées sans vieillissement.

A. L'analyse des résultats de facteur d'intensité des contraintes :

L'analyse des résultats de la variation de FIC dans la plaque en fonction de différente longueur de la fissure est présentée dans la figure IV.37

Pour le patch métallique Aluminium ses propriétés mécaniques ne sont pas affectées par la durée de vieillissement et la température

➤ $T=20^{\circ}\text{C}$

On remarque clairement, que pour la température 20°C et si on considère que seul le composite sera affecté par le vieillissement, la variation des facteurs d'intensité de contrainte soit la même allure que pour le cas non vieillit.

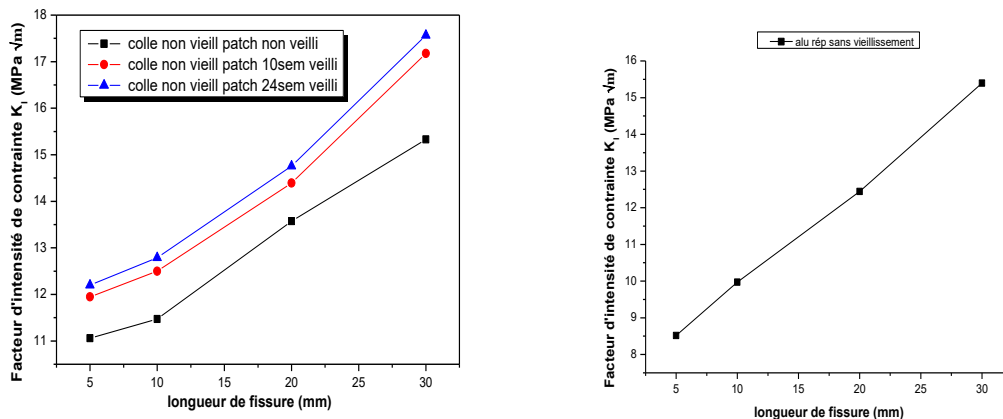


Figure IV.37 : Variation de FIC en fonction de différente longueur de fissure $T=20^{\circ}\text{C}$.

Le FIC augmente avec l'augmentation de la durée de vieillissement de sorte que la réparation par patch métallique devient plus performante que celle d'une réparation par composite.

Ce composite à l'état intact présente des propriétés mécaniques presque semblables que celui de l'aluminium.

Pour de petite longueur de la fissure l'influence du vieillissement du composite n'affecte pas d'une façon considérable la valeur FIC.

➤ **T=40°C et T=60°C**

Si la température augmente, et si on considère que le vieillissement de l'adhésif est accéléré par rapporte au composite.

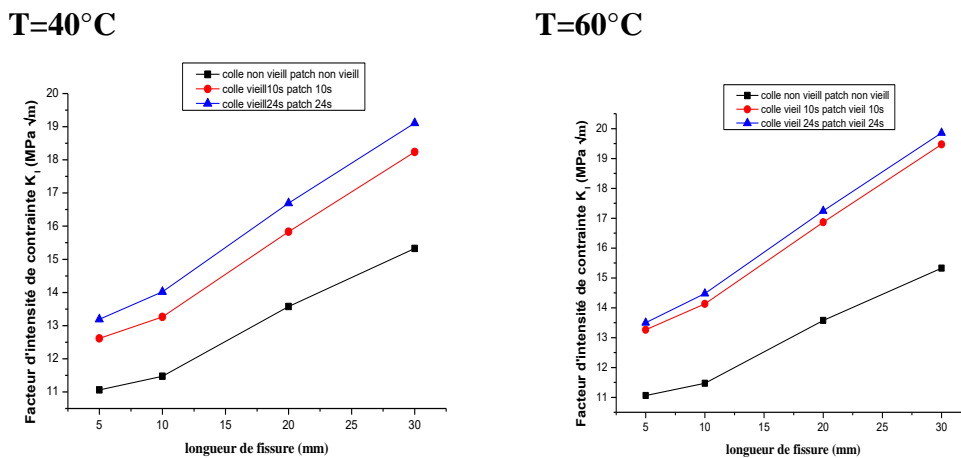


Figure IV.38 : Variation de FIC en fonction de différente longueur de fissure T=40°C et 60°C.

On remarque, clairement que le FIC augmente considérablement de sorte que le patch perd son caractère de transfert de charge et donc une forte zone de concentration de contrainte ce qui engendre un FIC élevé.

B. L'analyse de niveau des contraintes dans le patch et l'adhésif

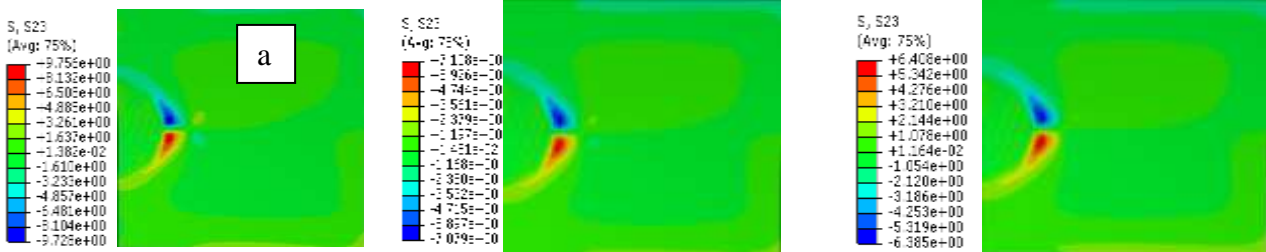
L'analyse de niveau des contraintes dans le patch et l'adhésif est importante pour avoir une idée sur ce qui se passe dans la couche d'adhésif qui présente le maillon faible de la structure. Carbone

➤ **T= 20°C**

Sans vieil

10 s

24s



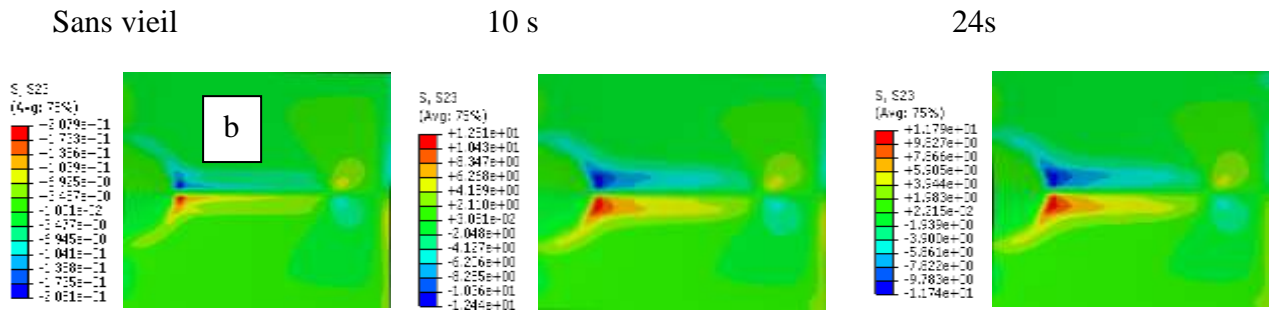


Figure IV.39 : Contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure a) 5mm, b) 30mm pour le cas de réparation par carbone T=20°C.

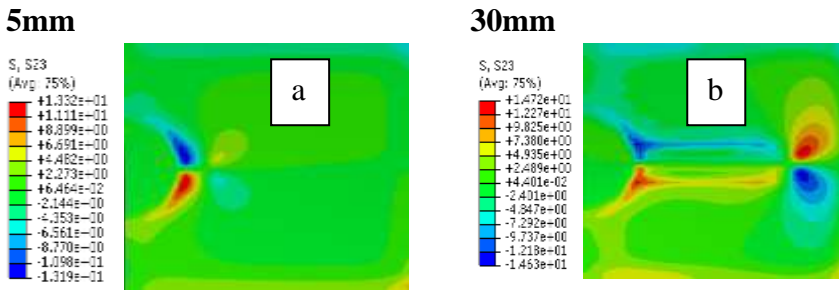


Figure IV.40 : Contrainte de cisaillement dans la couche adhésive sans vieillissement pour une longueur de fissure a) 5mm et b) 30mm pour le cas de réparation par Aluminium.

La figure IV.39/40 présente le niveau de contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure 5mm et 30mm pour le cas de réparation par composite et Aluminium. On remarque clairement que pour la longueur de fissure de 5mm la valeur de la contrainte de cisaillement est de l'ordre de 9.74 MPa, si le patch est vieilli à 10 et 24 semaines le transfert de charge chute de sorte qu'on remarque une diminution de la valeur de contrainte de cisaillement de presque de 30 pour 24 semaines d'immersion ce qui bien pour l'adhésif mais non bénéfique pour la structure endommagée.

Si la longueur de fissure augmente les contraintes dans l'adhésif augmente considérablement de sorte que la valeur augmente de presque deux (2) fois que celle du cas de la fissure de 5mm. Si la durée d'immersion augmente la valeur de contrainte de cisaillement diminue. Les contraintes sont concentrées au niveau de l'entaille et de la fissure.

En augmentant la durée de vieillissement la concentration de la contrainte au niveau de l'entaille augmente.

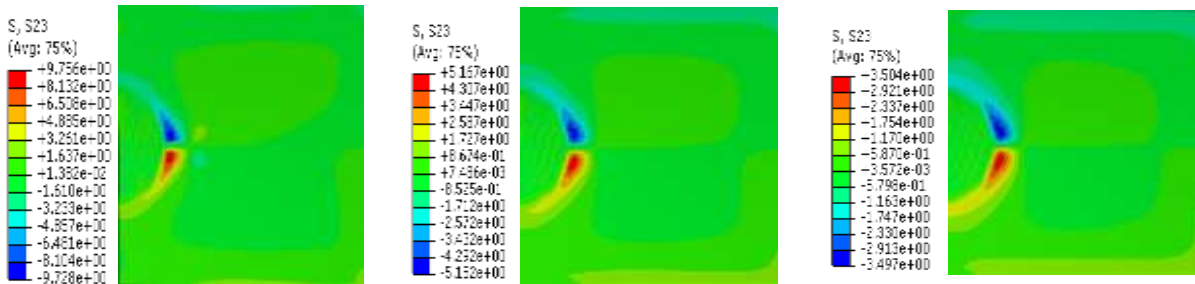
Pour la réparation en Aluminium la valeur de la contrainte de cisaillement est un peu élevée que celle du cas de réparation par composite. Cette valeur augmente avec l'augmentation de la longueur de la fissure. Une forte concentration de la contrainte est à noter au niveau de la fissure.

➤ T=40°C

Composite sans vieil

10 s

24s



Figure

IV.41 : Niveau de la contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure 5mm pour le cas de réparation par carbone T=40°C.

Alu sans vieil

10 s

24s

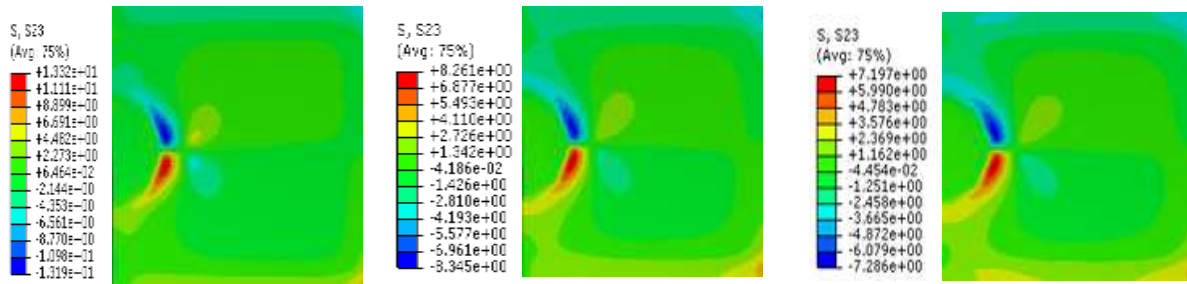


Figure IV.42 : Niveau de la contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure 5mm pour le cas de réparation par Aluminium T=40°C.

Si on augmente la température figure IV.41/42 du vieillissement les propriétés de l'adhésif et du composite le transfert de charge diminue et donc les contraintes dans l'adhésif diminuent progressivement de sorte que l'adhésif perd son rôle principalement et donc un facteur FIC élevé. Une diminution de presque 70% de la contrainte de cisaillement dans la couche adhésive.

Sans vieil

10 s

24s

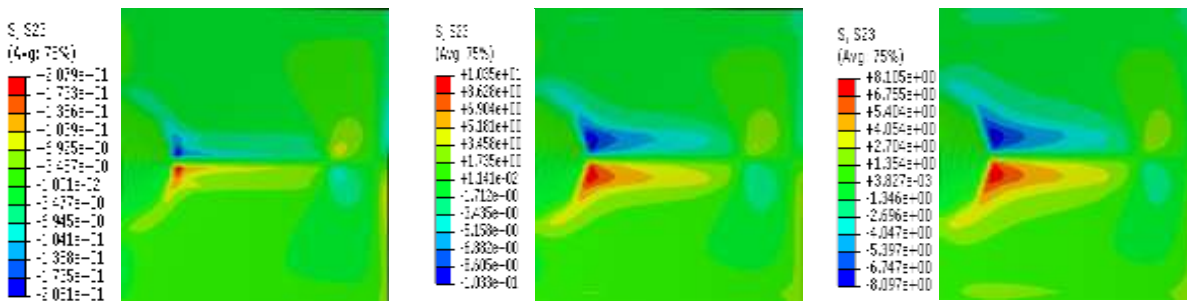


Figure IV.43 : Niveau de la contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure 30 mm pour le cas de réparation par carbone T=40°C.

Alu sans vieil

10s

24s

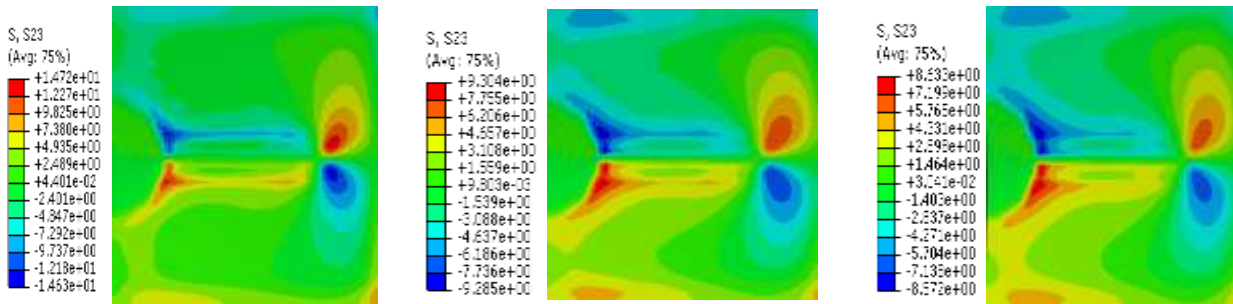


Figure IV.44 : Niveau de la contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure 30mm pour le cas de réparation par Aluminium T=40°C

Cependant si la longueur de la fissure augmente figure IV.43/44 la même remarque est note sauf que les valeurs de la contrainte de cisaillement reste un peu plus élevée que celle du cas de la fissure de 5mm et ce même pour les différents durée d’immersion.

➤ T=60°C

Sans vieil

10s

24s

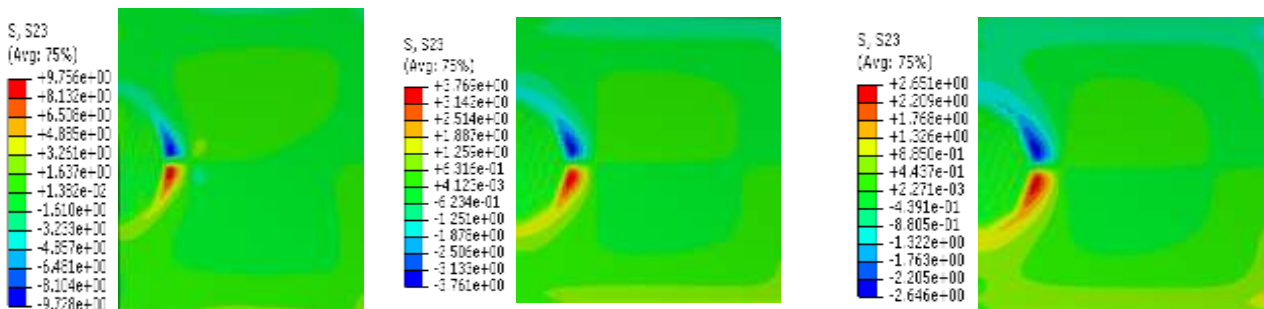


Figure IV.45 : Niveau de la contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure 5 mm pour le cas de réparation par carbone T=60°C

Alu sans vieil

10s

24s

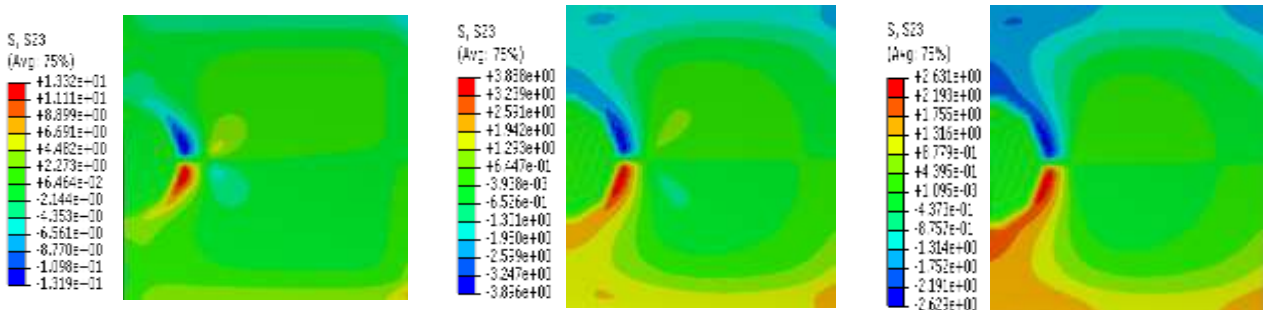


Figure IV.46 : Niveau de la contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure 30 mm pour le cas de réparation par A T=60°C.

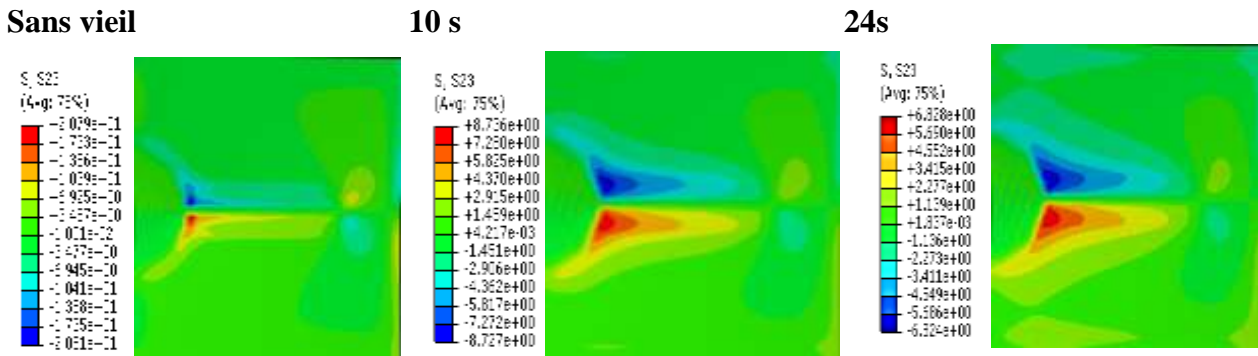


Figure IV.47 : Niveau de la contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure 30 mm pour le cas de réparation par carbone T=60°C.

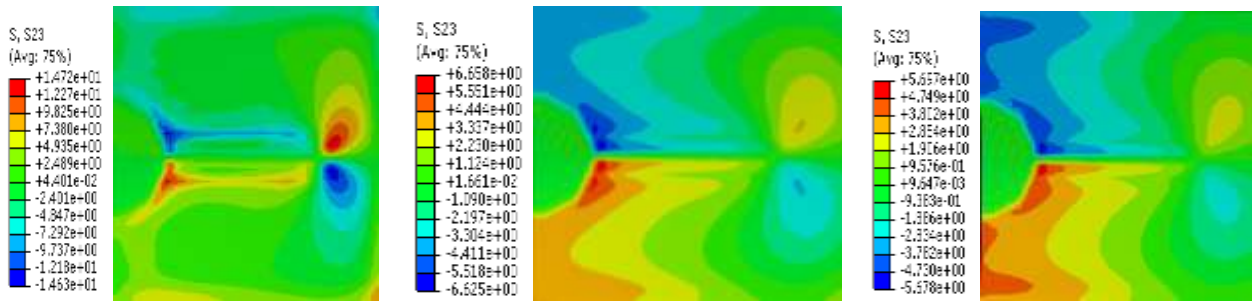


Figure IV.48: Niveau de la contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure 30 mm pour le cas de réparation par Aluminium T=60°C.

Par contre pour le patch composite si le vieillissement (Figure IV.45) affecte en même temps les propriétés du composite et l’adhésif, le transfert de charge sera faible et donc une augmentation considérable du facteur d’intensité de contrainte.

Pour ce cas de vieillissement, le patch métallique apporte une meilleure diminution du FIC que le patch composite si ce dernier sera affecté par le vieillissement.

L’écart de la valeur du FIC augmente avec l’augmentation de la longueur de la fissure (figure IV.47 /48).

Si on augmente la température les propriétés du composite et de l’adhésif diminuent considérablement de sorte que la valeur du FIC augmente considérablement.

IV.8.1.2. si on considère que le vieillissement de l’adhésif et le composite est en même temps :

A. L’analyse des résultats de facteur d’intensité des contraintes

La figure (a, b, c, d) représentant la variation du FIC en fonction de la longueur de la fissure pour deux durée d’immersion en eau T=20°C et T= 40°C.

➤ **T=20°c**

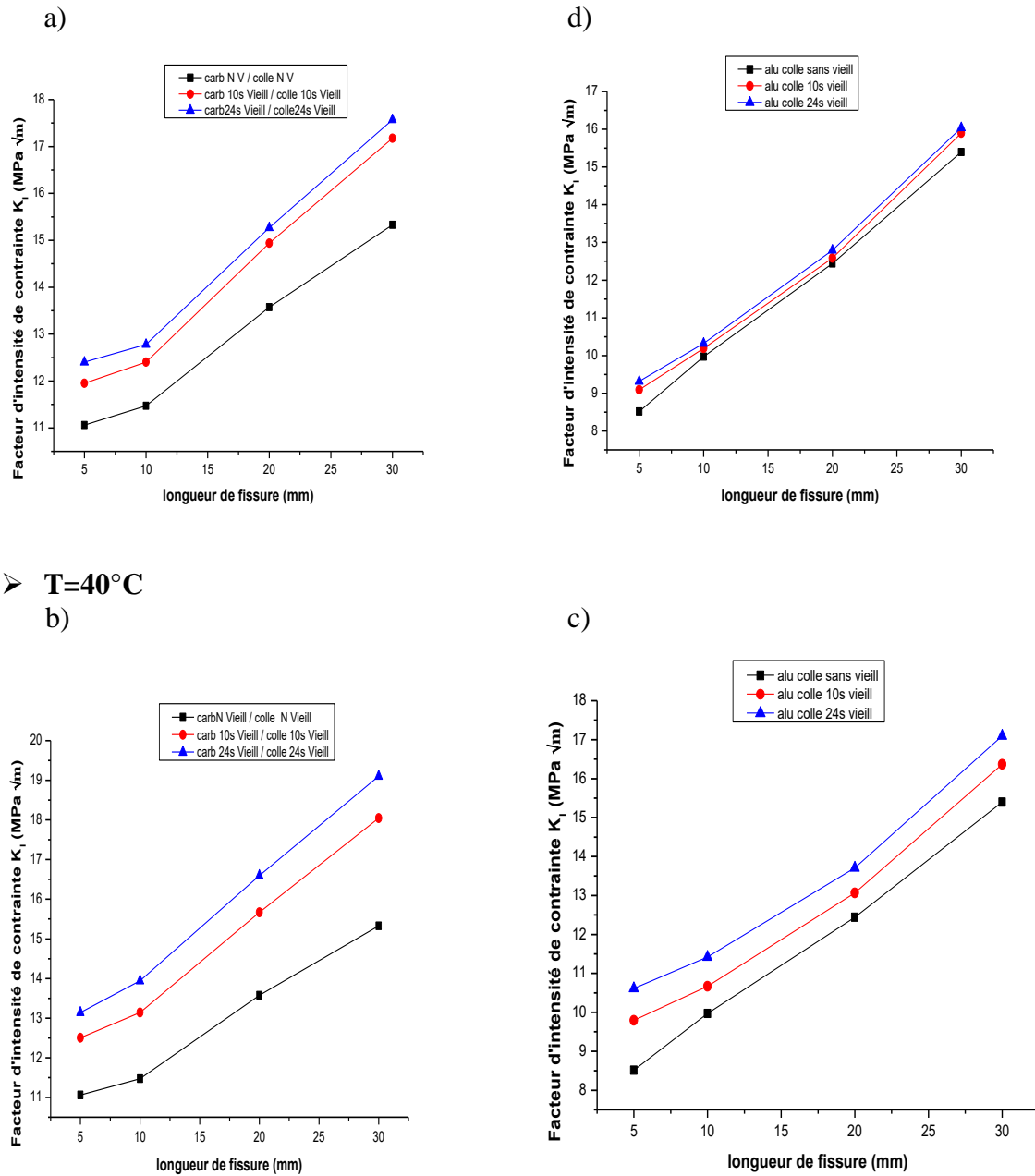


Figure IV.49 : Variation de FIC en fonction des différentes longueurs de la fissure réparée par a) carbone/époxyde d) Aluminium ; pour vieillissement à Température=20°C, et b) carbone/ c) Aluminium ; pour vieillissement T=40°C.

Les allures des courbes ne changent pas si la durée d’immersion et la température augmente. La valeur du facteur d’intensités de contraintes augmente avec l’augmentation et la durée d’immersion.

Pour le cas d’une réparation en composite, les pertes de propriétés mécanique du patch et l’adhésif affecte considérablement sur la qualité de réparation et de même sur le transfert de charge.

Après 10 semaines de vieillissement à température 20°C une augmentation du FIC est à noter que ce soit pour de petites longueur de fissure ou des fissures de longueur importantes.

Si la durée d'immersion augmente, le taux de transfert de charge diminue et donc le FIC augmente.

Si la température augmente, l'écart des valeurs du FIC augmente et on remarque que la structure perd de plus en plus sa rigidité et le patch composite perd sa qualité dans le transfert de contrainte, cette perte est associée aussi à la qualité de l'adhésif qui suite à sa dégradation il assure plus l'assemblage que le transfert de charge.

Cependant pour le cas d'une réparation par patch en aluminium, l'exposition de la structure à la température et à l'eau n'affecte que la couche adhésive et donc la qualité de réparation dépend fortement que des propriétés de l'adhésif.

Avec ces conditions, le patch métallique reste un peu efficace que celui en composite.

➤ T=60°C

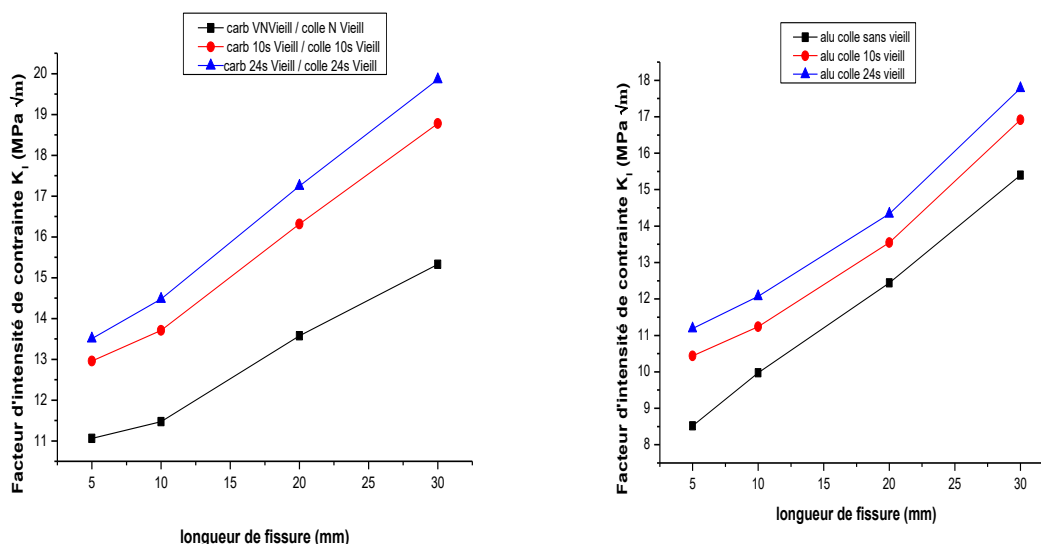


Figure IV.50 : Variation de FIC en fonction de différente longueur de fissure T=60°C
e) Composite f) Alu.

A la température 60°C (Figure.IV.50), un écart important est à noter sur la valeur du FIC au fur et à mesure que la durée d'immersion augmente.

La valeur du FIC est influencé par la durée d'immersion et les deux patches perdent leur qualité suite à leur vieillissement et essentiellement vieillit de l'adhésif.

B. L'analyse de niveau des contraintes dans le patch et l'adhésif

✚ Contrainte de cisaillement

L'analyse de niveau des contraintes dans le patch et l'adhésif est importante pour avoir une idée sur ce qui se passe dans la couche d'adhésif qui présente le maillon faible de la structure.

➤ T=20°C

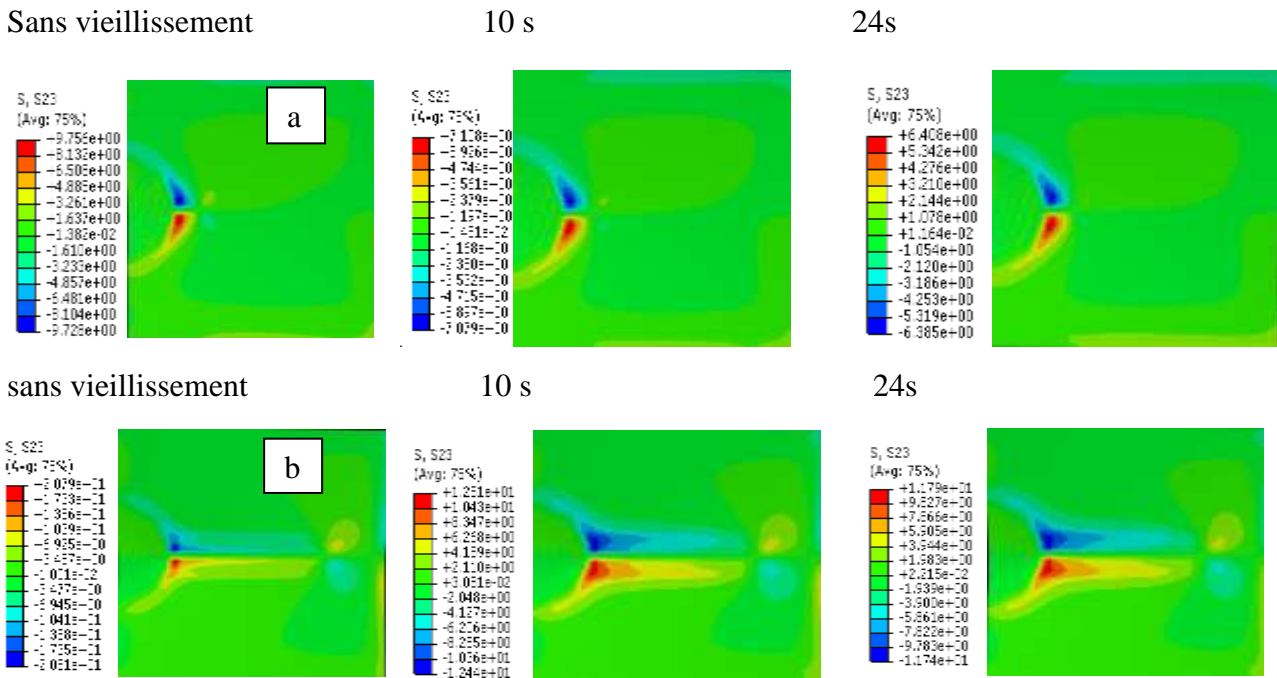


Figure.IV.51 : Contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure a) 5mm, b) 30mm pour le cas de réparation par carbone T=20°C.

Pour le niveau de contrainte de cisaillement dans la couche adhésif on remarque clairement (Figure.IV.51.a) que les contraintes sont concentrées au niveau de l’entaille et sur le contour de la fissure.

Ces contraintes diminuent si la durée du vieillissement augmente de sorte que l’adhésif devient trop sollicité avec des propriétés mécaniques faibles.

Si la fissure augmente (Figure.IV.51.b) pour être importante devant la taille du patch, les contraintes de cisaillement augmentent dans la couche adhésive, après une durée de vieillissement de 10 semaines, la valeur de la contrainte de cisaillement diminue de presque 50% suite à son perte de ses caractéristiques mécaniques. Ce qui montre que si l’adhésif est souple [domaine plastique important] il ne transmet peu de contrainte vers le patch.

Si la durée augmente jusqu’à 24semaines le transfert de charge diminue de plus en plus.

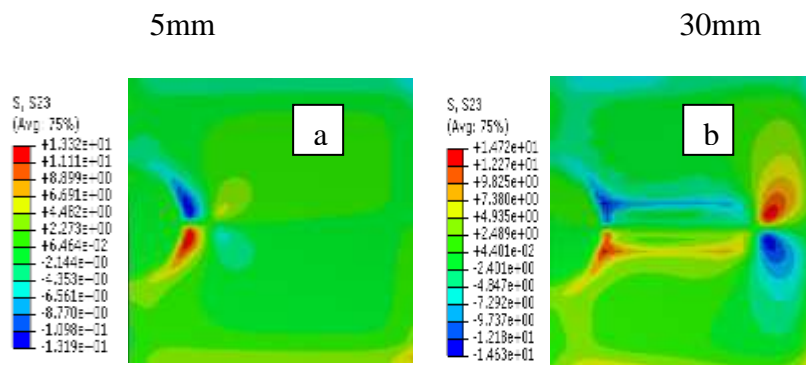


Figure.IV.52 : Niveau de la contrainte de cisaillement dans la couche adhésive sans vieillissement pour une longueur de fissure a) 5mm et b) 30mm pour le cas de réparation par Aluminium T=20°C.

Cependant pour la réparation par patch métallique (figure IV.52.a) Le transfert de charge est notamment meilleur et la concentration de contrainte augmente de plus en plus avec la taille de la fissure.

Si la longueur de fissure est importante (figure IV.52.b) une forte concentration de contrainte est à noter au niveau de la tête de fissure vu qu'il y a une interaction fissure/bord libre.

➤ **T=40°C**

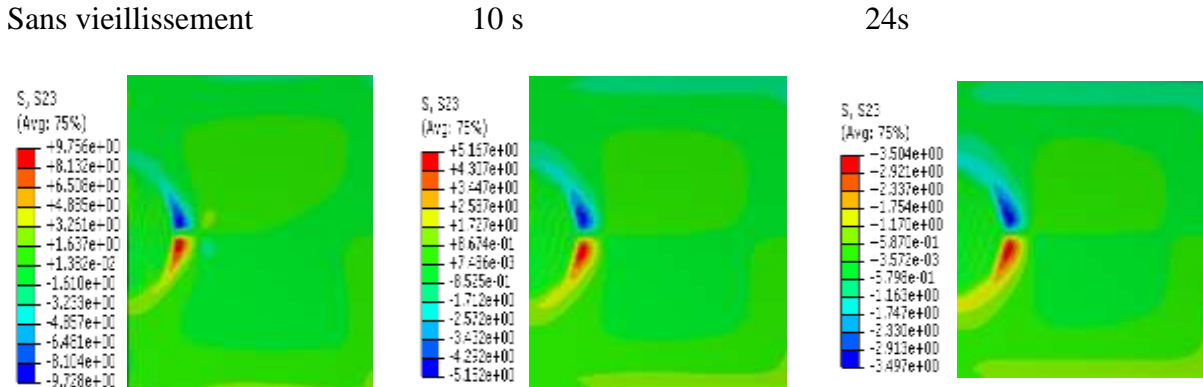


Figure.IV.53 : Niveau de la contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure 5mm pour le cas de réparation par carbone T=40°C.

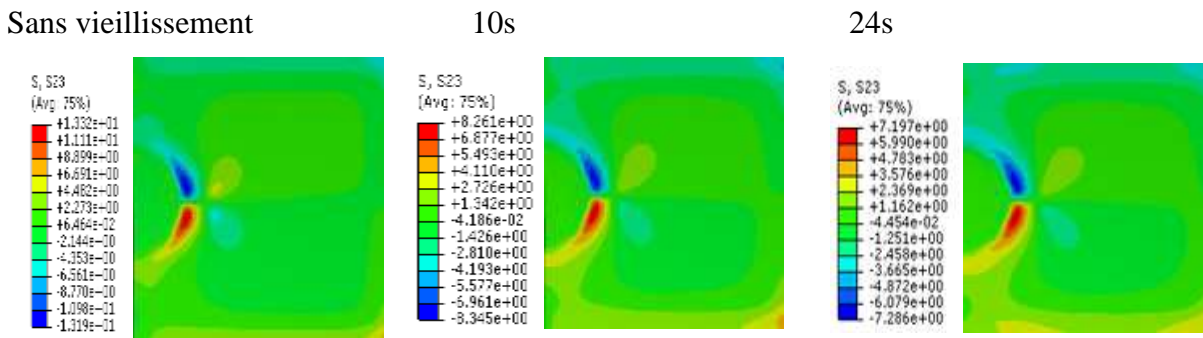


Figure.IV.54 : Niveau de la contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure 5mm pour le cas de réparation par Aluminium T=40°C.

En augmentant la température 40°C (figure IV.53), l'adhésif et le composite perdent de plus leurs propriétés mécaniques et donc n'assurent pas un bon transfert de charge. La contrainte de cisaillement diminue avec l'augmentation de la durée de vieillissement pour être trop faible après 24 semaines de vieillissement.

De même, la concentration de la contrainte de cisaillement est toujours au niveau de l'entaille et la fissure.

Pour la réparation par patch aluminium (figure IV.54), seul l'adhésif perd ses propriétés et donc une légère diminution de la contraintes de cisaillement est à noter.

Les contraintes sont concentrées au niveau de la fissure et l'entaille, et au niveau du bord de l'adhésif vu que le patch métallique n'est pas trop souple.

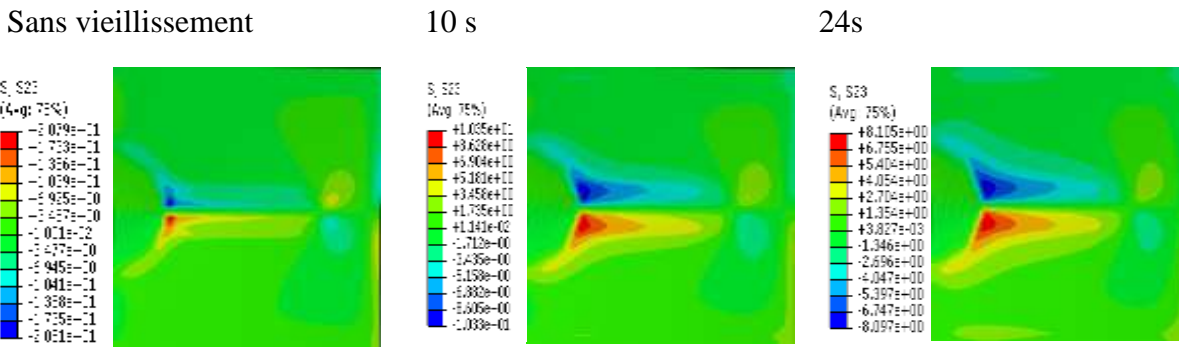


Figure IV.55 : Contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure 30mm pour le cas de réparation par carbone T=40°C.

Si la taille de la fissure augmente (Figure IV.56), les contraintes se localisent de plus en plus près de la fissure et diminuent si la durée de vieillissement augmente.

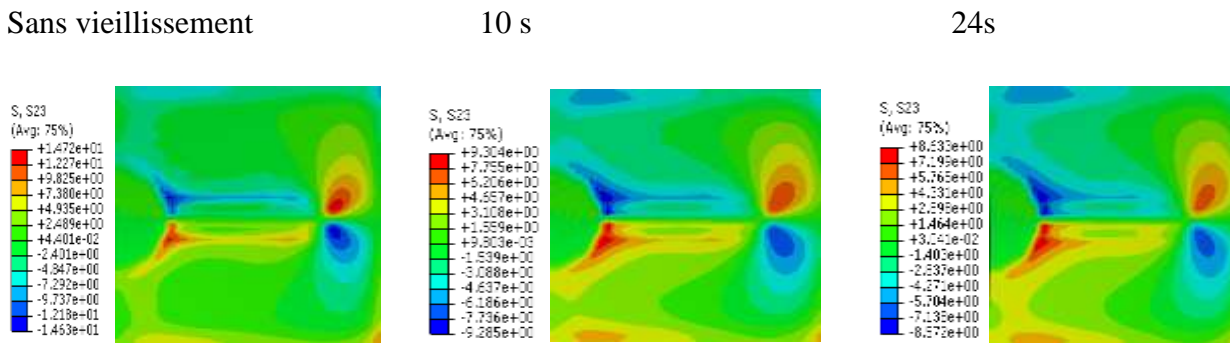


Figure IV.56 : Niveau de la contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure 30mm pour le cas de réparation par Aluminium T=40°C.

Cependant pour le patch métallique, presque toute la surface de l'adhésif devient active et le bord de l'adhésif présente une forte concentration de contraintes au fur et à mesure si la durée de vieillissement augmente.

➤ T=60°C

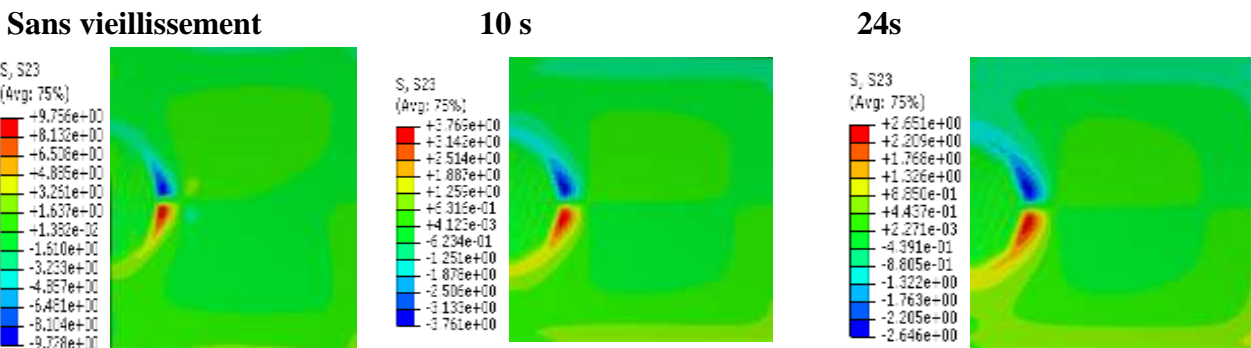


Figure IV.57 : Niveau de la contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure 5mm pour le cas de réparation par carbone T=60°C.

A la température 60°C (Figure IV.57) l'adhésif présente de faible valeur de la contrainte de cisaillement ce qui montre que les propriétés de l'adhésif dégradée n'assure pas une bonne qualité par transféré de plus en plus les contraintes de la zone endommagée et risque d'avoir rupture pour une longueur faible de fissure.

Les contraintes sont toujours localisées au niveau de l'entaille et la fissure avec l'apparition d'un champ supplémentaire de contrainte au niveau du bord de l'adhésif.

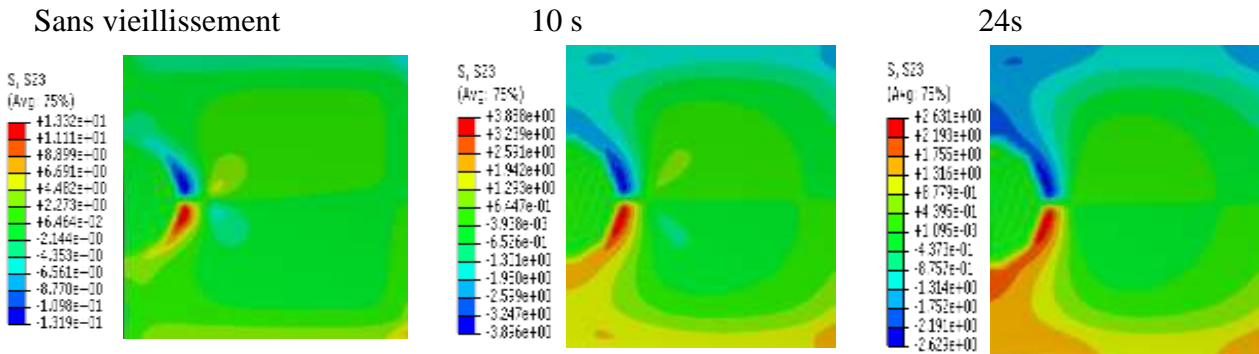


Figure IV.58 : Niveau de la contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure 5mm pour le cas de réparation par Aluminium T=60°C.

Pour le patch métallique Figure IV.58, à cette température de vieillissement l'adhésif devient trop active et avec des propriétés mécaniques faibles, et donc n'assure pas le bon transfert de charge surtout si la durée d'immersion est importante.

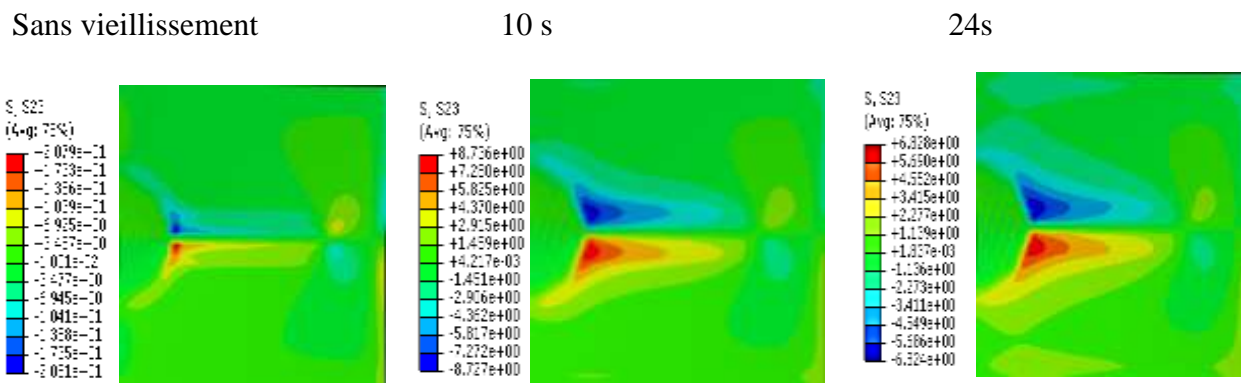


Figure IV.59 : Niveau de la contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure 30mm pour le cas de réparation par carbone T=60°C.

Si on augmente la longueur de la fissure (Figure IV.59), la surface de l'adhésif devient de plus en plus active dans la réparation par patch composite avec une chute considérable de la valeur de la contrainte de cisaillement.

Sans vieillissement

10 s

24s

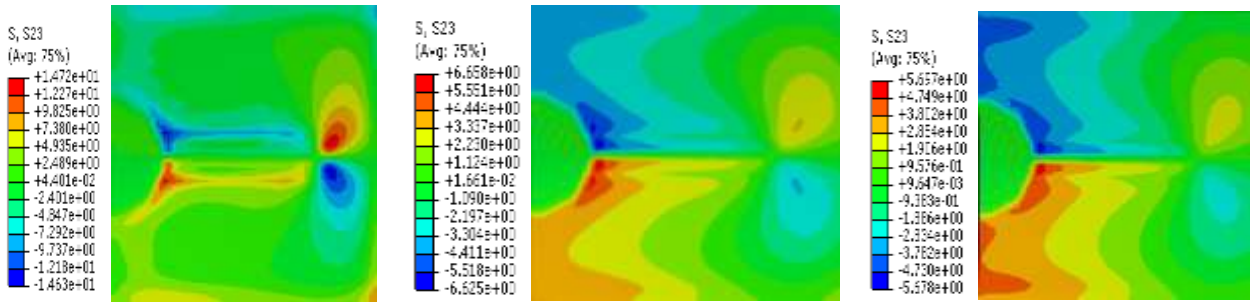


Figure IV.60 : Niveau de la contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure 30mm pour le cas de réparation par Aluminium T=60°C.

Pour la réparation par patch métallique (Figure IV.60), toute la surface devient actif, et le champ de forte concentration de contrainte réparation apparu sur la majorité de la couche de l'adhésif surtout de part et d'autre part de l'entaille et la fissure.

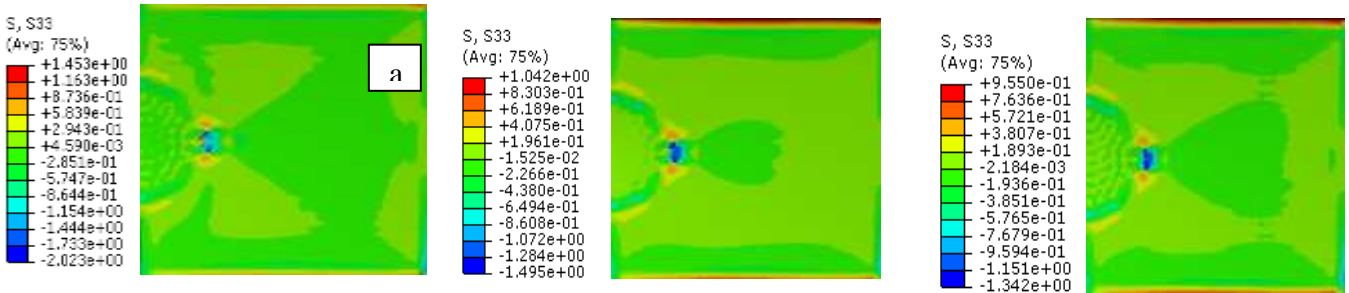
Les contraintes de cisaillement deviennent faibles et chute de presque la moitié comparée au cas non vieillit. Le transfert de charge ne dépend pas que l'adhésif il dépend aussi du patch.

✚ Niveau de la contrainte de pelage dans le patch
T=20°C

Sans vieillissement

10 s

24s



Sans vieillissement

10 s

24s

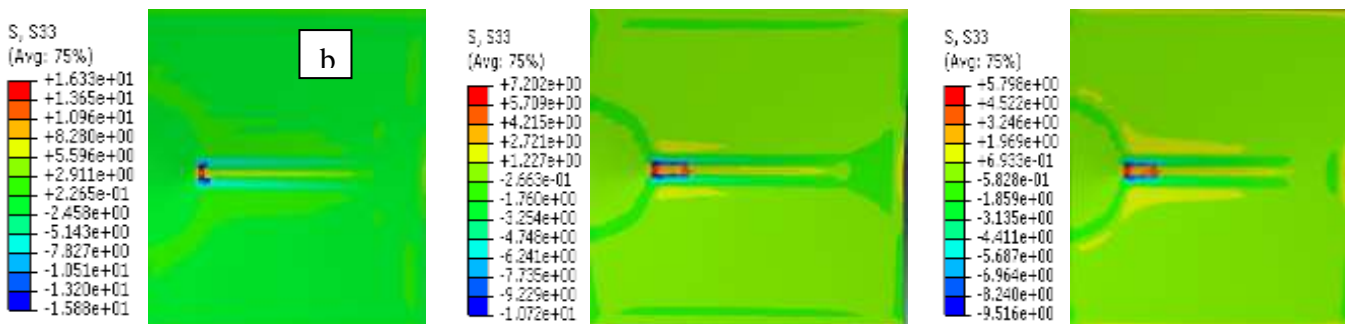


Figure IV.61: Niveau de la contrainte de pelage dans le patch pour une longueur de fissure a) 5mm, b) 30mm pour le cas de réparation par carbone T=20°C.

La figure IV.61.a représente les contraintes de pelage des patchs en fonction de la durée d'immersion à $T=20^{\circ}\text{C}$, pour une fissure de 5mm, la valeur de contrainte de pelage est faible suite au vieillissement de l'adhésif et du patch, cette valeur diminue si la durée d'immersion augmente.

Une faible concentration de contrainte est au niveau de la fissure si le patch et l'adhésif sont à l'état sans vieillissement, par contre après le vieillissement de l'adhésif et le patch les contraintes sont concentrées au niveau de l'entaille, la fissure sur les deux bords du patch.

Si la longueur de la fissure augmente figure IV.61.b, la valeur de la contrainte de pelage augmente considérablement, ce qui montre que le patch montre son efficacité, si l'on y a une forte concentration de contrainte au niveau de la zone endommagée.

Cette valeur de contrainte diminue si la durée d'immersion augmente.

Cette diminution montre que le transfert de charge n'est pas important vers le patch ceci est dû essentiellement à la perte des propriétés mécaniques de l'adhésif.

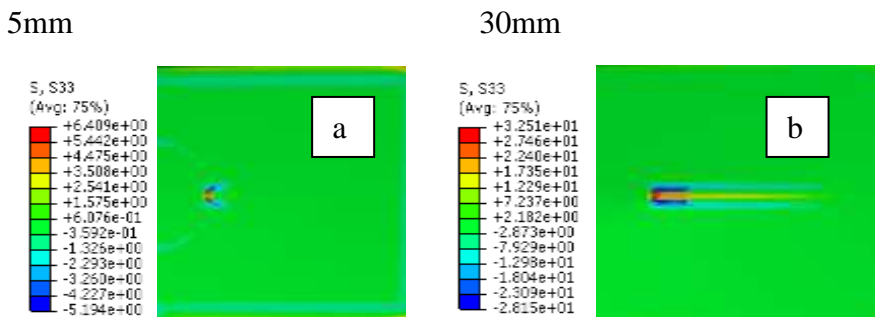


Figure IV.62: Niveau de la contrainte de pelage dans le patch pour une longueur de fissure a) 5mm, b) 30mm pour le cas de réparation par aluminium sans vieillissement $T=20^{\circ}\text{C}$.

La même remarque est à noter pour le cas de la réparation par patch en aluminium Figure IV.62, si la longueur, la valeur de la contrainte de pelage augmente, cette contrainte de pelage est liée directement aux propriétés mécaniques de l'adhésif et du patch.

➤ $T=40^{\circ}\text{C}$

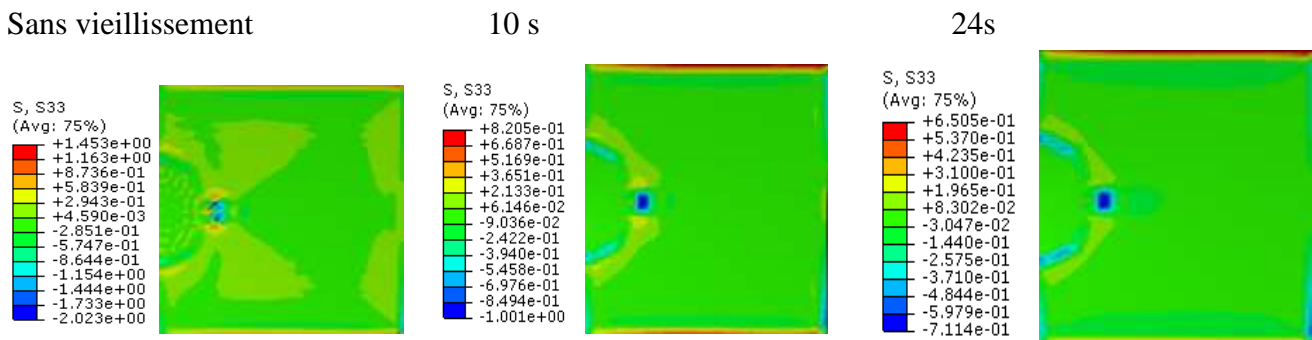


Figure IV.63 : Niveau de la contrainte de pelage dans le patch pour une longueur de fissure 5mm pour le cas de réparation par carbone $T=40^{\circ}\text{C}$.

Si la température augmente à 40°C (figure IV.63) et si la longueur de la fissure est faible, la valeur de la contrainte de pelage reste quasiment faible et ce quel que soit la durée de vieillissement.

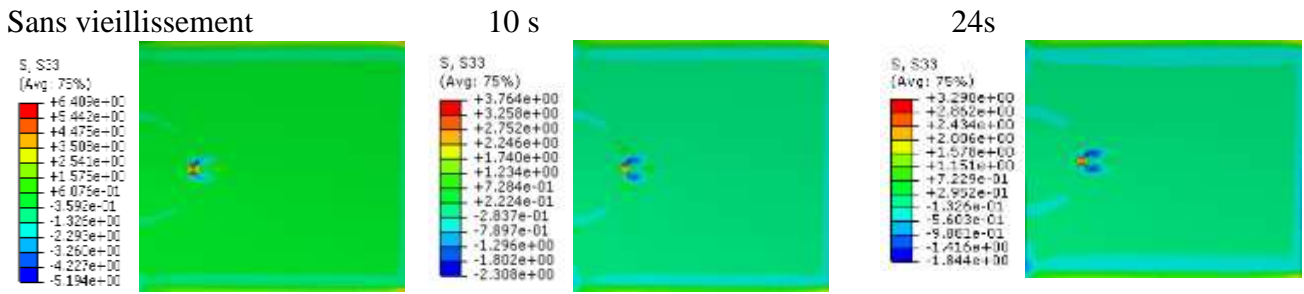


Figure IV.64: Niveau de la contrainte de pelage dans le patch pour une longueur de fissure 5mm pour le cas de réparation par Aluminium T=40°C.

La même remarque est à noter pour le cas de la réparation par patch en aluminium (figure IV.64) si la longueur de la fissure augmente, la valeur de la contrainte de pelage augmente, cette contrainte de pelage est liée directement aux propriétés mécaniques de l'adhésif et du patch.

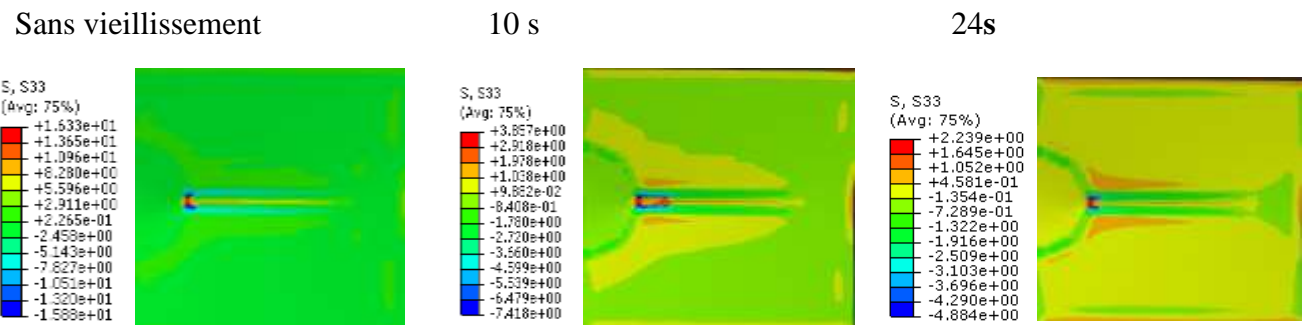


Figure IV.65 : Niveau de la contrainte de pelage dans le patch pour une longueur de fissure 30mm pour le cas de réparation par carbone T=40°C.

Si la longueur de fissure est 30mm (Figure.IV.65), elle sera proche du bord libre et donc un champ de contrainte de plus. La valeur de la contrainte de pelage reste faible vu que l'adhésif vieilli n'assure pas un bon transfert de contrainte vers le patch. Une petite zone de forte concentration de contrainte apparaît au voisinage du bord du patch.

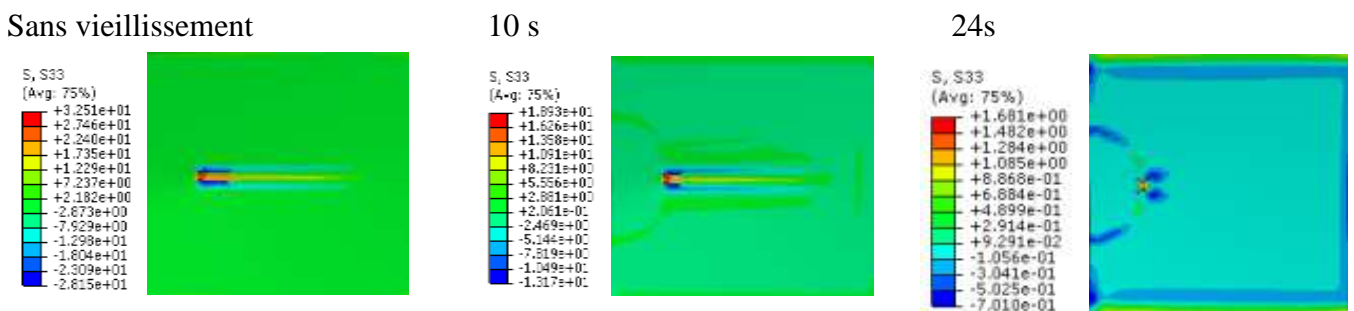


Figure IV.66: Niveau de la contrainte de pelage dans le patch pour une longueur de fissure 30 mm pour le cas de réparation par Aluminium T=40°C.

Pour la réparation par patch en aluminium (Figure IV.66), la valeur de contrainte de pelage est un peu trop élevée à l'état sec.

Si l'adhésif présente des propriétés mécaniques faible suite à son vieillissement, le transfert de charge ne sera pas meilleur et donc des contraintes de pelage faibles.

➤ **T=60°C**

Sans vieillissement

10 s

24s

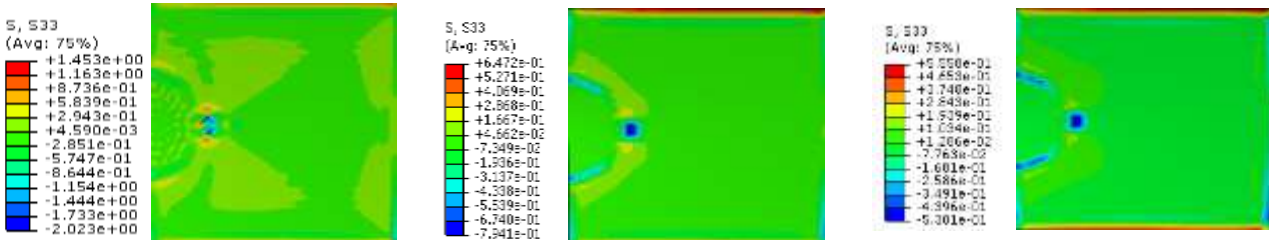


Figure IV.67 : Niveau de la contrainte de pelage dans le patch pour une longueur de fissure 5mm pour le cas de réparation par carbone T=60°C.

Sans vieillissement

10 s

24

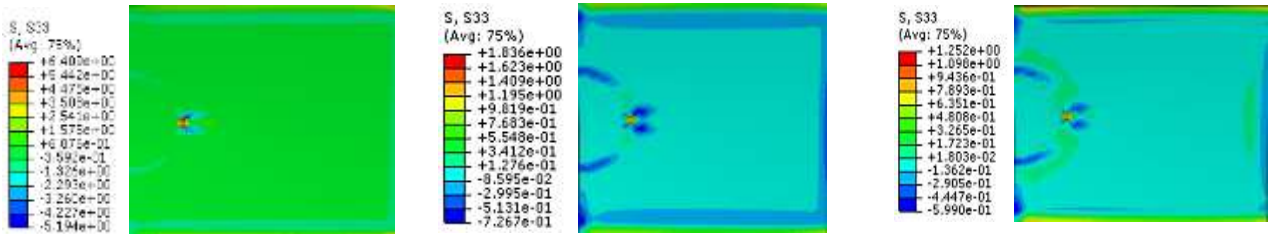


Figure IV.68 : Niveau de la contrainte de pelage dans le patch pour une longueur de fissure 5mm pour le cas de réparation par Aluminium T=60°C.

Sans vieillissement

10 s

24

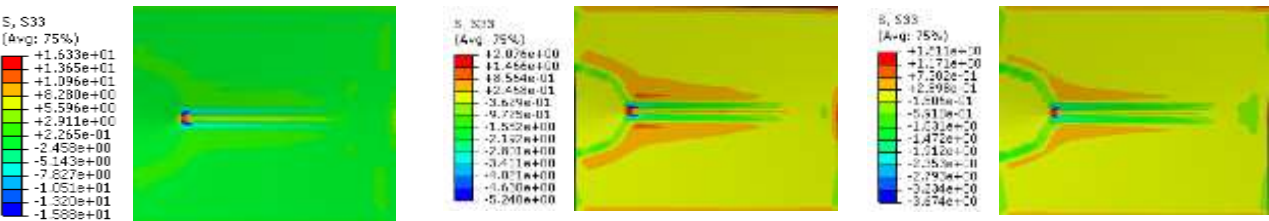


Figure. V.69 : Niveau de la contrainte de pelage dans le patch pour une longueur de fissure 30mm pour le cas de réparation par carbone T=60°C.

Sans vieillissement

10 s

24s

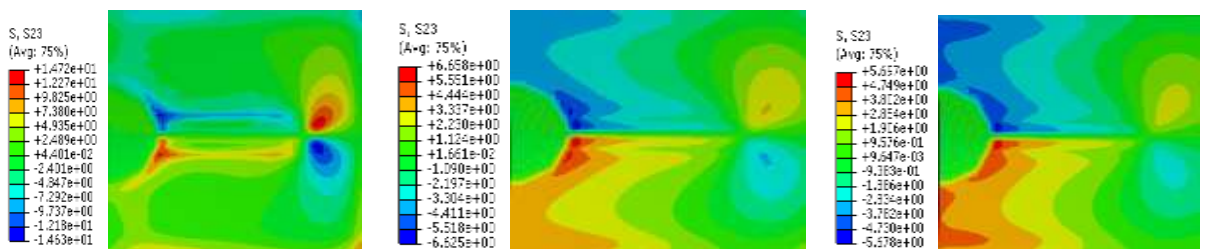


Figure IV.70 : Niveau de la contrainte de pelage dans le patch pour une longueur de fissure 30mm pour le cas de réparation par Aluminium T=60°C.

Si on augmente la température (Figure IV.67 /70) de vieillissement, la valeur de contrainte de pelage diminue considérablement dans les deux cas de réparation [patch aluminium à cette température le patch composite ainsi que l'adhésif perdant un grand parti de leur propriétés mécaniques.

IV.8 L'effet de perte des propriétés mécaniques de composite :

Dans la 2eme partie de notre travail on considère le cas extrême, vu le patch et l'adhésif subissent en même temps le vieillissement en température et immersion en eau. Donc une dégradation de leurs propriétés mécaniques et en même temps voir les conséquences sur le transfert de charge de la zone endommagée.

IV.8.2 Composite vieilli / colle non vieilli:

Dans la deuxième partie de notre travail, on a essayé de voir l'effet de la perte des propriétés mécaniques du composite sur la variation de facteur d'intensité des contraintes dans la plaque endommagée, pour cela on a déterminé par des essais de traction les propriétés mécanique du composite suite à son vieillissement en immersion dans l'eau à différentes température, dans ce cas la colle est considérées sans vieillissement.

A. L'analyse des résultats du facteur d'intensité des contraintes

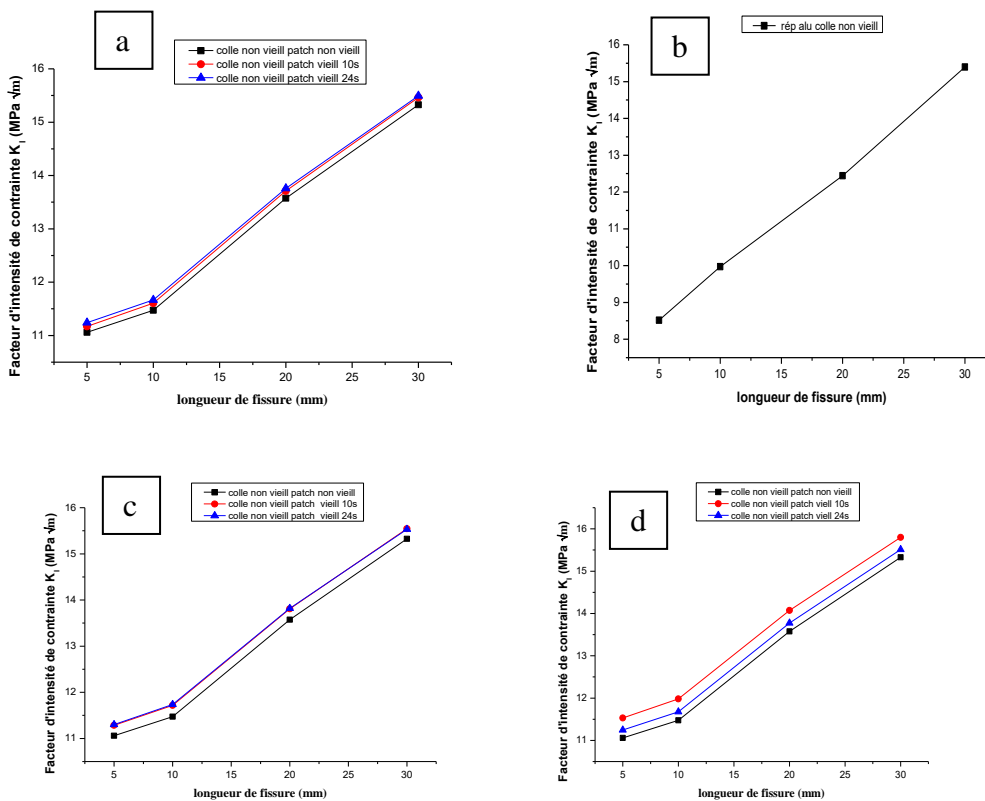


Figure IV.71 : Variation de FIC en fonction de différente longueur de fissure
 a) carbone vieillit T=20°C, b) Alu, c) carbone vieillit T=40°C, d) carbone vieillit T=60°C

Le FIC augmente avec l'augmentation de la durée de vieillissement pour une réparation par patch composite (**Figure IV.71 .a**) de sorte que la réparation par patch métallique (**Figure IV.71.b**) devient plus performante que celle d'une réparation par composite.

Ce composite, à l'état intact, présente des propriétés mécaniques presque semblables que celui de l'aluminium. Le facteur d'intensité de contrainte a les mêmes valeurs pour les deux cas de réparation.

Pour de petites longueurs de la fissure l'influence du vieillissement du composite n'affecte pas d'une façon considérables la valeur FIC.

Après 10 semaines de vieillissement le patch composite perd ses propriétés mécaniques et on note un FIC élevé dans la plaque. Après 24 semaines de vieillissement, le facteur d'intensité de contrainte augmente mais légèrement pour toutes les longueurs de la fissure.

Si la température de vieillissement augmente pour atteindre 40° et 60°C. Le résultat de la variation du FIC en fonction de la longueur de la fissure est représentée dans les figures **Figure IV.71.c et d**.

On remarque, clairement que le FIC augmente considérablement de sorte que le patch composite perd une grande partie de ses propriétés mécaniques et sa performance de transférer les contraintes de la zone endommagée et donc une forte zone de concentration de contrainte dans la plaque ce qui engendre un FIC élevé (température 60°C).

Pour ces températures 40°C et 60°C, une fois la durée d'immersion dépasse 10 semaines, la perte en propriétés mécaniques n'est pas trop importante et donc une légère augmentation des valeurs du FIC pour les différentes longueurs de la fissure. Si la structure endommagée est exposée à de fortes températures, il est préférable de réparer la zone endommagée par patch métallique.

B. L'analyse du niveau des contraintes de cisaillement dans l'adhésif

l'analyse du niveau des contraintes de cisaillement dans la couche d'adhésive est importante afin d'avoir une idée sur le taux de transfert de charge en fonction des propriétés mécaniques du patch composite.

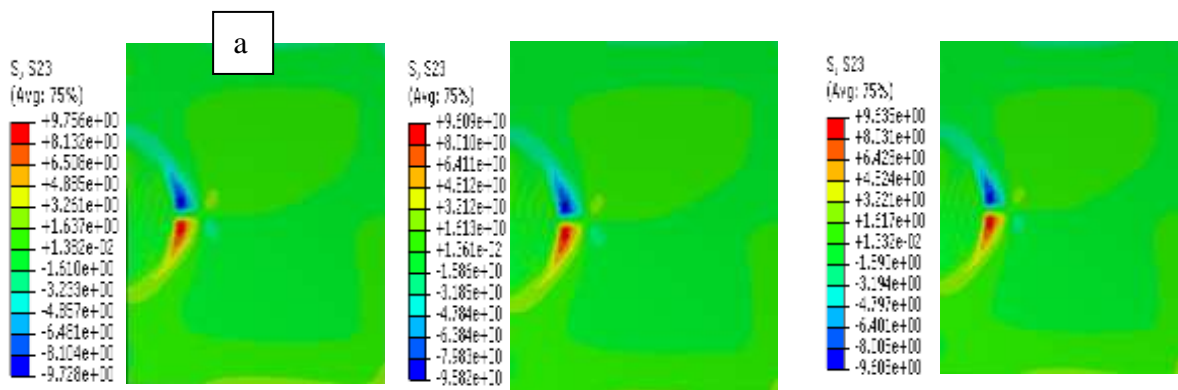
La Figure.IV.72 .a et b présente le niveau de contraintes de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure 5mm et 30mm réparation par composite et pour le cas Aluminium.

➤ **T=20°C**

Sans vieillissement

10 s

24s



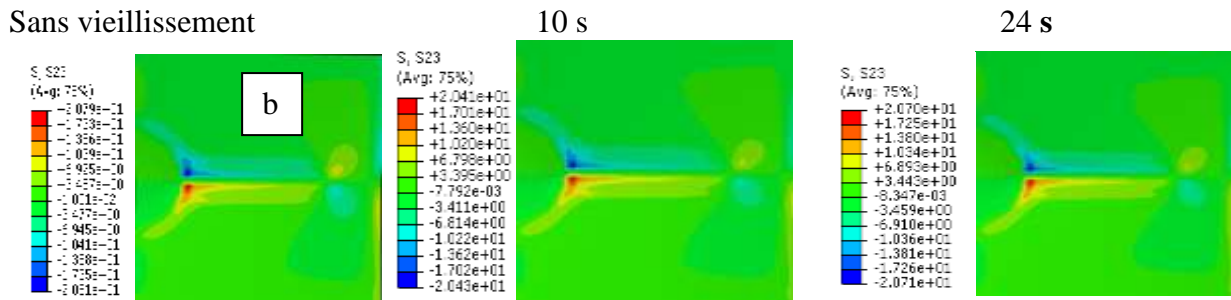


Figure IV.72 : Niveau des contraintes de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure a) 5mm, b) 30mm pour le cas de réparation par patch en carbone/époxyde T=20°C.

On remarque clairement que pour la longueur de fissure de 5mm la valeur de la contrainte de cisaillement est de l'ordre de 9.75 MPa, si le patch est non vieilli. Par contre, si la durée de vieillissement du patch est à 10 ou 24 semaines, le transfert de charge chute de sorte qu'on remarque une diminution de la valeur de contrainte de cisaillement de presque de 1.5%. De même pour 24 semaines d'immersion ce qui bien pour l'adhésif mais non bénéfique pour la structure endommagée. La concentration de contraintes est au niveau de la fissure et de l'entaille, presque tout le reste de la surface de colle présente de faibles concentrations de contraintes.

Si la longueur de fissure augmente vers 30mm, les contraintes de cisaillement dans l'adhésif augmentent considérablement de sorte que la valeur augmente de plus de deux (2) fois que celle du cas de la fissure de 5mm. Si la durée d'immersion augmente la valeur de contrainte de cisaillement diminue légèrement puisque la perte des propriétés du composite n'est pas trop importante. Les contraintes sont concentrées au niveau de l'entaille et de la fissure.

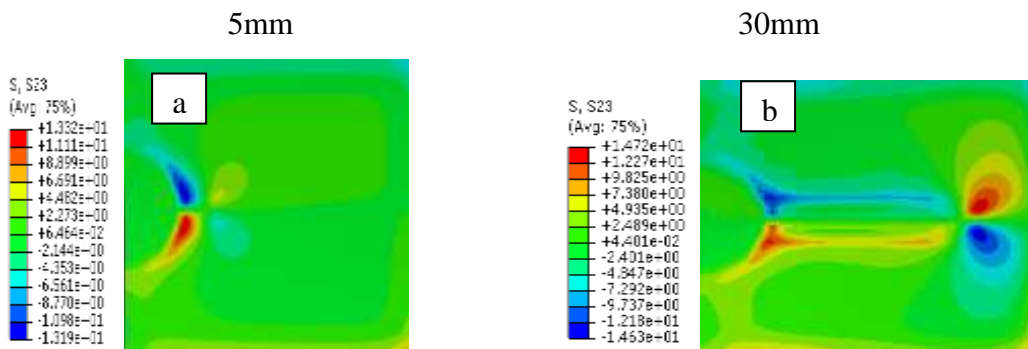
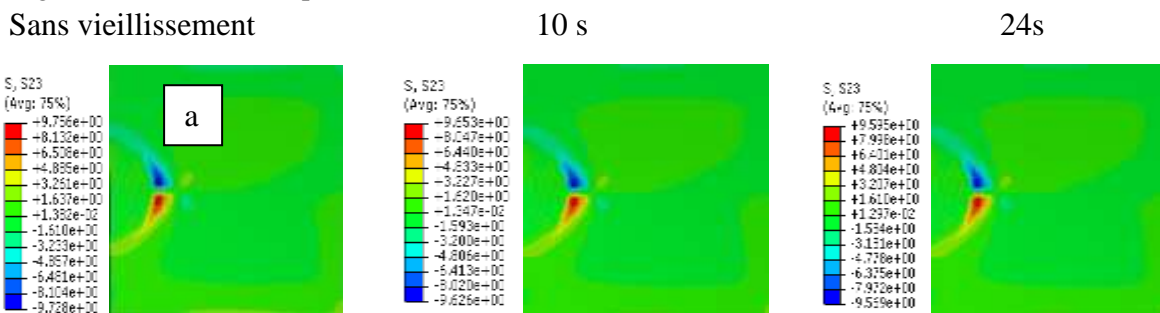


Figure IV.73 : Contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure a) 5mm, b) 30mm pour le cas de réparation par Aluminium T=20°C.

➤ T=40°C

En augmentant la durée de vieillissement, la concentration de la contrainte au niveau de l'entaille augmente. Et s'étend sur plus de zone dans la couche d'adhésif.



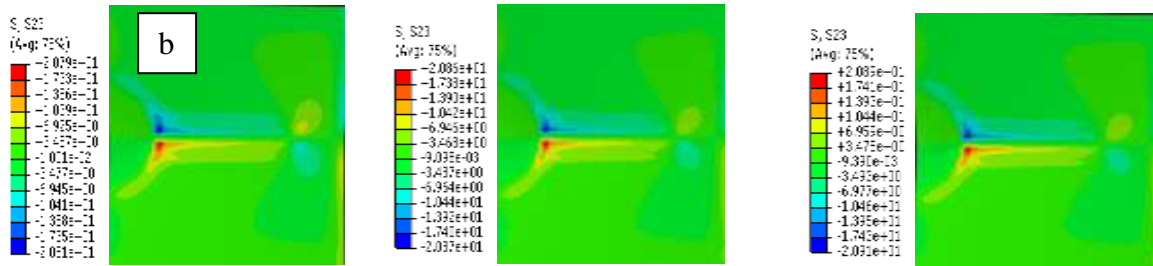


Figure IV.74: Niveau de la contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure a) 5mm, b) 30mm pour le cas de réparation par carbone T=40°C.

Si on augmente la température du vieillissement Figure IV.74.a, les propriétés du composite diminuent de plus en plus et le transfert de charge diminue aussi et donc les contraintes dans l'adhésif diminuent progressivement de sorte que l'adhésif perd son rôle principale et donc un facteur FIC élevé.

Une diminution faible de presque 1% de la contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une faible longueur de la fissure.

Cependant, si la longueur de la fissure augmente Figure.IV.74.b la même remarque est à noter sauf que les valeurs de la contrainte de cisaillement reste un peu plus élevée que celle du cas de la fissure de 5mm et ce même pour les différentes durées d'immersion.

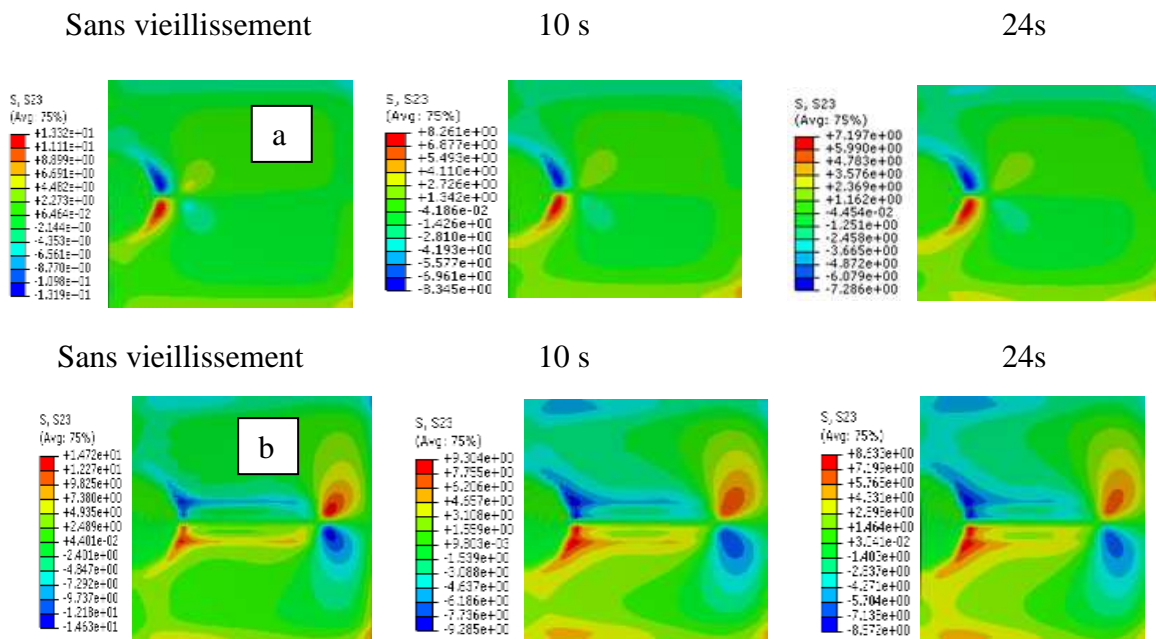


Figure IV.75 : Niveau de la contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure a) 5mm, b) 30mm pour le cas de réparation par Aluminium T=40°C.

Pour la réparation en Aluminium Figure IV.75, la valeur de la contrainte de cisaillement est un peu élevée que celle du cas de réparation par composite non vieillit Figure IV.72. Cette valeur augmente avec l'augmentation de la longueur de la fissure. Pour cette longueur importante de la fissure, la contrainte de cisaillement pour la réparation par patch en aluminium est faible que pour le cas de réparation par patch composite vieilli. Une forte concentration de la contrainte est à noter au niveau de la fissure et de l'entaille.

➤ T=60

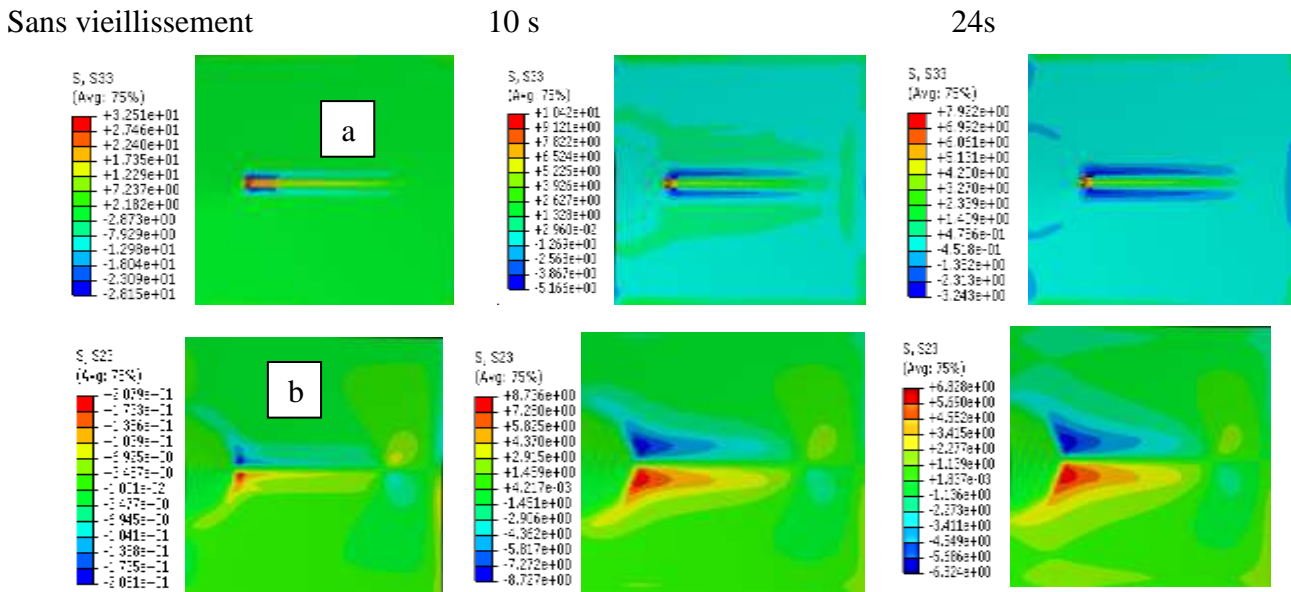


Figure IV.76 : Niveau de la contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure a) 5mm, b) 30mm pour le cas de réparation par carbone T=60°C.

Si la température augmente à 60°C **Figure IV.76** les contraintes de cisaillement diminuent légèrement pour être de presque la même que celle du cas sans vieillissement si la fissure est minimale 5mm **Figure IV.76.a**.

Si la fissure est importante 30mm **Figure IV.77.b**, on aura une concentration de contrainte supplémentaire puis qu’il aura une interaction fissure bord libre.

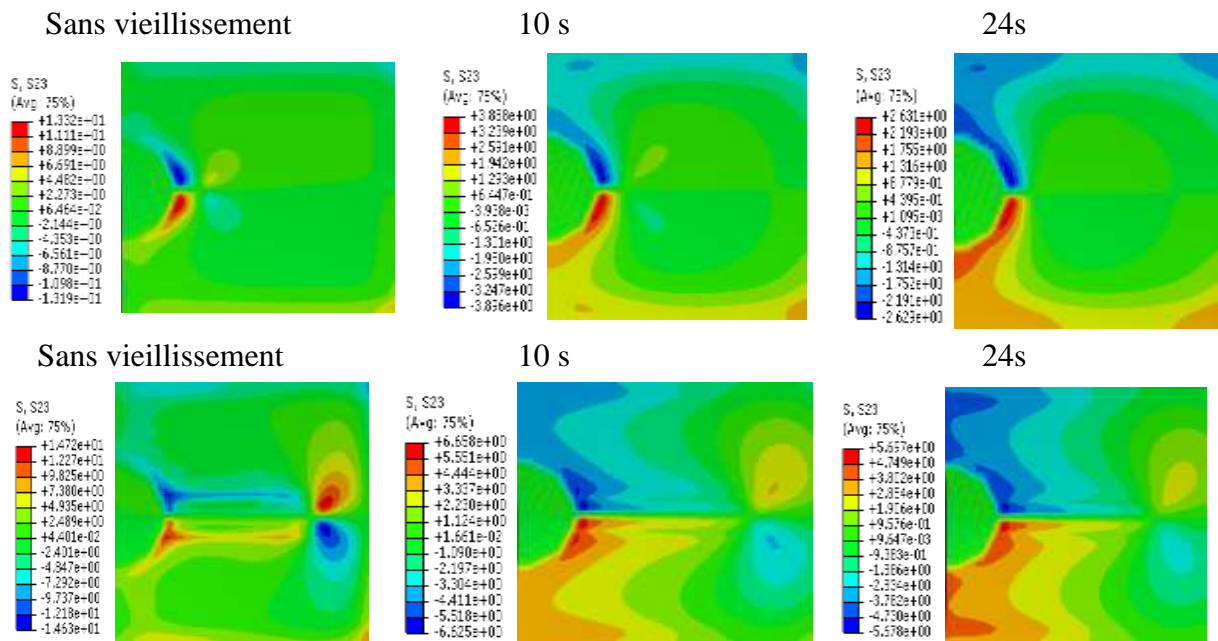


Figure.IV.77 : Niveau de la contrainte de cisaillement dans la couche adhésive pour une longueur de fissure a) 5mm, b) 30mm pour le cas de réparation par Aluminium T=60°C.

Si on considère que seul le patch est exposé au vieillissement dans ce cas la réparation en patch métallique **Figure.IV.76** présente un meilleur transfert de contraintes ce qui présente une diminution du facteur d'intensité de contrainte. Pour ce cas de vieillissement, le patch métallique apporte une meilleure diminution du FIC que le patch composite si ce dernier sera affecté par le vieillissement.

IV.9 Conclusion

L'objectif de ce travail est d'analyser par la méthode des éléments finis l'effet du vieillissement de l'adhésif sur la variation du facteur d'intensité de contraintes d'une plaque avec une fissure émanant d'une entaille latérale réparée par un patch sous l'effet du vieillissement de l'adhésive en immersion dans et l'eau les résultats obtenus permettent de conclure que:

- la réparation par patch composite ou métallique apporte une réduction du facteur d'intensité de contraintes.
- Plus les propriétés mécaniques du patch sont élevées, plus le transfert de charge est meilleure vers le patch et donc une réduction considérable du facteur d'intensité de contraintes.
- Quel que soit la nature du patch, on a toujours une diminution de la valeur du facteur d'intensité des contraintes par rapport à la plaque non réparée.
- Pour des petites longueurs de fissure l'effet de la nature de patch disparaît.
- Le patch de Borone/époxyde présente les plus faibles valeurs du facteur d'intensité des contraintes vu que ses propriétés mécaniques sont les plus élevées.
- si l'orientation des fibres sont à 0° , la modélisation du patch en bloc ou en multicouches n'a pas d'effet la valeur du facteur d'intensité de contraintes. Par contre, si l'orientation des fibres est différente de 0° , la modélisation du patch en bloc ou en multicouches a un effet sur le transfert de charge de la plaque.

- Dans le cas d'un patch multicouches et monobloc. Si l'orientation des fibres dans toutes les couches est 0° , on remarque une faible différence du facteur d'intensité des contraintes. Par contre si la séquence d'empilement est $[0/45/-45/90]$, le patch sous forme multicouches présente les plus faibles valeurs du facteur d'intensité de contraintes qui dépend des propriétés mécaniques de chaque couches alors que le patch composite sous forme bloc présente une seule orientation et donc mauvaise absorption des contraintes.

- Les valeurs du facteur d'intensité des contraintes après dix semaines de vieillissement à la température ambiante. A cette température même si la durée de vieillissement en immersion dans l'eau augmente la valeur de facteur d'intensité des contraintes augmente légèrement et reste toujours inférieure au cas de la plaque non réparée. Le pourcentage de la valeur du facteur d'intensité des contraintes varie en fonction de la longueur de la fissure.

- Le taux d'augmentation de la valeur du facteur d'intensité des contraintes dépend de la température, de la durée de vieillissement et de la nature du patch composite. Plus la longueur de fissure augmente le transfert de charge de la plaque vers l'adhésif diminue et donc un facteur d'intensité des contraintes élevées.

- Les propriétés mécaniques du patch sont élevées, plus l'absorption des contraintes de la zone endommagée sont élevée et donc le transfert de charge est meilleur vers le patch.
La réparation par patch composite augmente la rigidité de la structure endommagée et retarde la propagation de la fissure, assurant ainsi une longue durée de vie de la structure.
Pour de petites longueurs de la fissure et durée minimale de vieillissement, l'effet de la nature de matériau du patch sur la valeur des contraintes dans le patch et l'adhésive disparaît. Si le temps de vieillissement est important, le composite et l'adhésif absorbent plus de quantité de l'eau et donc une dégradation importante de leur propriétés mécaniques, le transfert de charge de la plaque vers le patch à travers l'adhésif est donc moins important dans la zone endommagées.
- L'analyse de contrainte de cisaillement montre Les valeurs les plus élevées sont au niveau de la fissure. Loin de la fissure, la valeur du contrainte est pratiquement négligeable, le patch en bore absorbe plus de contraintes comparées aux autres natures de patch, cependant le patch en aluminium et vu sa rigidité transfère moins de contraintes et la valeur de la contrainte est un peu élevée.

En augmentant la longueur de la fissure $a=30\text{mm}$, la concentration de contrainte augmente et la contrainte dans l'adhésif augmente petit à petit.

Les valeurs les plus élevées sont toujours au niveau de la fissure et pour le cas d'une réparation par patch en aluminium.

- La distribution des contraintes de pelage dans le patch montre clairement que l'absorption des contraintes est de plus en plus efficace si le patch présente des propriétés mécaniques élevées (bore et carbone) cependant les contraintes de pelage sont faibles et un mauvais transfert de charge ce qui explique les contraintes élevées dans l'adhésif.

Loin de la zone endommagée (fissure et entaille) les contraintes sont quasiment nulles et ce quel que soit la nature du patch.

En augmentant la température l'adhésif perd ses propriétés mécaniques et donc n'assure pas un bon transfert de charge ce qui explique les valeurs faibles des contraintes de pelage.

En augmentant la longueur de la fissure la zone endommagée augmente et le transfert de charge vers le patch augmente, le patch absorbe plus de contrainte de la zone endommagée et donc des valeurs de contraintes de pelage élevées dans le patch.

Les valeurs les plus faibles celles du cas d'une réparation par patch en aluminium, en augmentant la température le transfert de charge diminue suite à la dégradation des propriétés mécaniques de l'adhésif et donc les valeurs les faibles de pelage dans le patch.

Si la durée de vieillissement augmente (24 semaines) le transfert de charge devient de plus en plus faible les contraintes dans l'adhésif sont toujours concentrées au niveau de la zone endommagée [entaille + fissure], le patch aluminium présente les valeurs les plus élevées dans l'adhésif.

- **L'effet de perte des propriétés mécaniques de composite :**
- **si on considère que le vieillissement de l'adhésif est accéléré par rapporte au composite**

Pour la température 20°C le FIC augmente avec l'augmentation de la durée de vieillissement de sorte que la réparation par patch métallique devient plus performante que celle d'une réparation par composite.

Le composite à l'état intact présente des propriétés mécaniques presque semblables que celui de l'aluminium.

Pour de petite longueur de la fissure l'influence du vieillissement du composite n'affecte pas d'une façon considérable la valeur FIC.

- Contrainte cisaillement pour la longueur de fissure de 5mm la valeur de la contrainte de cisaillement est de l'ordre de 9.74 MP, si le patch est vieilli à 10 et 24 semaines le transfert de charge chute de sorte qu'on remarque une diminution de la valeur de contrainte de cisaillement de presque de 30 % pour 24 semaines d'immersion ce qui bien pour l'adhésif mais non bénéfique pour la structure endommagée.

Si la longueur de fissure augmente les contraintes dans l'adhésif augmente considérablement de sorte que la valeur augmente de presque deux (2) fois que celle du cas de la fissure de 5mm. Si la durée d'immersion augmente la valeur de contrainte de cisaillement diminue. Les contraintes sont concentrées au niveau de l'entaille et de la fissure.

En augmentant la durée de vieillissement la concentration de la contrainte au niveau de l'entaille augmente.

Pour la réparation en Aluminium la valeur de la contrainte de cisaillement est un peu élevée que celle du cas de réparation par composite. Cette valeur augmente avec l'augmentation de la longueur de la fissure. Une forte concentration de la contrainte est à noter au niveau de la fissure.

Si on augmente la température du vieillissement les propriétés de l'adhésif et du composite le transfert de charge diminue et donc les contraintes dans l'adhésif diminuent progressivement de sorte que l'adhésif perd son rôle principalement et donc un facteur FIC élevé. Une diminution de presque 70% de la contrainte de cisaillement dans la couche adhésive.

Par contre pour le patch composite si le vieillissement affecte en même temps les propriétés du composite et l'adhésif, le transfert de charge sera faible et donc une augmentation considérable du facteur d'intensité de contrainte.

Pour ce cas de vieillissement, le patch métallique apporte une meilleure diminution du FIC que le patch composite si ce dernier sera affecté par le vieillissement.

L'écart de la valeur du FIC augmente avec l'augmentation de la longueur de la fissure

Si on augmente la température les propriétés du composite et de l'adhésif diminuent considérablement de sorte que la valeur du FIC augmente considérablement.

- **si on considère que le vieillissement de l'adhésif et le composite est en même temps**
Pour le cas d'une réparation en composite, les pertes de propriétés mécanique du patch et l'adhésif affecte considérablement sur la qualité de réparation et de même sur le transfert de charge.
Après 10 semaines de vieillissement à température 20°C une augmentation du FIC est à noter que ce soit pour de petites longueur de fissure ou des fissures de longueur importantes.
Si la durée d'immersion augmente, le taux de transfert de charge diminue et donc le FIC augmente.

Si la température augmente, l'écart des valeurs du FIC augmente et on remarque que la structure perd de plus en plus sa rigidité et le patch composite perd sa qualité dans le transfert de contrainte, cette perte est associée aussi à la qualité de l'adhésif qui suite à sa dégradation il assure plus l'assemblage que le transfert de charge.

Cependant pour le cas d'une réparation par patch en aluminium, l'exposition de la structure à la température et à l'eau n'affecte que la couche adhésive et donc la qualité de réparation dépend fortement que des propriétés de l'adhésif. Avec ces conditions, le patch métallique reste un peu efficace que celui en composite.

- Un écart important est à noter sur la valeur du FIC au fur et à mesure que la durée d'immersion augmente la température 60°C.
La valeur du FIC est influencé par la durée d'immersion et les deux patches perdent leur qualité suite à leur vieillissement et essentiellement vieillit de l'adhésif

- Pour le niveau de contrainte de cisaillement dans la couche adhésif on remarque clairement que les contraintes sont concentrées au niveau de l'entaille et sur le contour de la fissure. Ces contraintes diminuent si la durée du vieillissement augmente de sorte que l'adhésif devient trop sollicité avec des propriétés mécaniques faibles.

Si la fissure augmente pour être importante devant la taille du patch, les contraintes de cisaillement augmentent dans la couche adhésive, après une durée de vieillissement de 10 semaines, la valeur de la contrainte de cisaillement diminue de presque 50% suite à son perte de ses caractéristiques mécaniques. Ce qui montre que si l'adhésif est souple [domaine plastique important] il ne transmet peu de contrainte vers le patch.

Si la durée augmente jusqu'à 24 semaines le transfert de charge diminue de plus en plus.

- En augmentant la température 40°C, l'adhésif et le composite et perd de plus leurs propriétés mécanique et donc n'assure pas un bon transfert de charge la contrainte de cisaillement diminue avec l'augmentation de la durée de vieillissement pour être trop faible après 24 semaines de vieillissement.

De même de la concentration de la contrainte de cisaillement est toujours au niveau de l'entaille et la fissure.

Pour la réparation par patch aluminium, seul l'adhésif perd ses propriétés et donc une légère diminution de la contraintes de cisaillement est à noter.

Les contraintes sont concentrées au niveau de la fissure et l'entaille, et au niveau du bord de l'adhésif vu que le patch métallique n'est pas trop souple.

- A la température 60°C l'adhésif présente de faible valeur de la contrainte de cisaillement ce qui montre que les propriétés de l'adhésif dégradée n'assure pas une bonne qualité par transféré de plus en plus les contraintes de la zone endommagée et risque d'avoir rupture pour une longueur faible de fissure.

Les contraintes sont toujours localisées au niveau de l'entaille et la fissure avec l'apparition d'un champ supplémentaire de contrainte au niveau du bord de l'adhésif.

Si on augmente la longueur de la fissure, la surface de l'adhésif devient de plus en plus active dans la réparation par patch composite avec une chute considérable de la valeur de la contrainte de cisaillement.

- Pour la réparation par patch métallique, toute la surface devient active, et le champ de forte concentration de contrainte réparation apparu sur la majorité de la couche de l'adhésif surtout de part et d'autre part de l'entaille et la fissure.

Les contraintes de cisaillement deviennent faibles et chute de presque la moitié comparée au cas non vieillit. Le transfert de charge ne dépend pas que l'adhésif il dépend aussi du patch.

- Si on considère que seul le patch est exposé au vieillissement dans ce cas la réparation en patch métallique présente un meilleur transfert de contraintes ce qui présente une diminution du facteur d'intensité de contrainte. Pour ce cas de vieillissement, le patch métallique apporte une meilleure diminution du FIC que le patch composite si ce dernier sera affecté par le vieillissement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] 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.
- [2] AA. Baker, & R.J. Chester, Recent advances in composite repair technology for metallic aircraft components. In: *Advanced composites 93*. Chandra T, Dhingra AK, editors. Proceedings of the Int. Conf. on Ad. Comp. Mat. pp 45-9, (1993).
- [3] Hollaway, L., and Leeming, M. *Strengthening of reinforced concrete structures*. Woodhead Publishing Limited, (1999).
- [4] Volkersen, O. Die niekraft in zugbeanspruchten mit konstanten laschenquerschnitten. *Luftfahrtforschung* 15, 41–47;(1938).
- [5] Goland, and Reissner. The stress in cemented joints. *Journal of Applied Mechanics* 11, A17–A27;(1944).
- [6] Adams, R., and Wake, W. *Structural adhesive joints in engineering*. Elsevier, (1984).
- [7] Oplinger, D. Effects of adherent deflection in single lap joints. *International Journal of Solids and Structures* 31, 18, 2565–2587;(1994).
- [8] Davis, M., and Bond, D. Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 19, 91–105;(1999).
- [9] Xiong, Y., and Raizenne, D. Stress and failure analysis of bonded composite-to-metal joints. Tech. rep., Institute for aerospace research, Canada;(2010).
- [10] Kumar, A., and Hakeem, S. Optimum design of symmetric composite patch repair to centre cracked metallic sheet. *Composite Structures* 49, 285– 292;(2000).
- [11] Hosseini-Toudeshky, H. and Mohammadi, B. “Thermal residual stresses effects on fatigue crack growth of repaired panels bounded with various composite materials”, *Compos. Struct.*, 89(2), 216-223;(2009).
- [12] Ayatollahi, M.R. and Hashemi, R. “Computation of stress intensity factors (KI, KII) and Tstress for cracks reinforced by composite patching”, *Compos. Struct.*, 78(4), 602-609;(2007).
- [13] Bureau of Accident Investigation, Aircraft Accident Report: Aloha Airlines Flight 243, Boeing 737-200, N73711, Near Maui, Hawaii, April 28, 1988. Report No. NTSB/AAR-89/o3, National Transportation and Safety Office, Washington, 14 June 1989.
- [14] Madani, K., Touzain, S., Feugas, X., Roy, A. and Cohendoz, S. “Analyze of the notch effect on the distribution of the stresses in the adhesive layer between two bonded aluminum 2024-T3 plates”, *J. Mater. Technol.*, 97(5), 315-324;(2009).
- [15] AA. Baker, & R.J. Chester, Recent advances in composite repair technology for metallic aircraft components. In: *Advanced composites 93*. Chandra T, Dhingra AK, editors. Proceedings of the Int. Conf. on Ad. Comp. Mat. pp 45-9, (1993).
- [16] Baker, A. Bonded composite repair of fatigue-cracked primary aircraft structure. *Composite Structures* 47, 431–443;(1999).
- [17] Belhouari, M., Bouiadjra, B.B., Megueni, A. and Kaddouri, K., “Comparison of double and single bonded repairs to symmetric composite structures: a numerical analysis”, *Compos. Struct.*, 65(1), 47-53;(2004).
- [18] Madani K, Touzain S, Feugas X, Roy A, et Cohendoz S. Analyze of the notch effect on the distribution of the stresses in the adhesive layer between two bonded aluminum 2024-T3 plates. *J Mater Technol*;97:315-24;(2009).
- [19] Madani K, Touzain S, Feugas X, Cohendoz S, Ratwani M. Experimental and numerical study of repair techniques for panels with geometrical discontinuities. *Comput Mater Sei*: 48:83;(2010).
- [20] L. Hollaway, A. Romhi, M. Gunn, *Comp. Stuct.* 19;125–170;(1990).
- [21] R. Long, *J. Comp. Mater.* 25;391–415;(1991). [22] ABAQUS/CAE (2015), Ver 6.14 User’s Manual
- [23] M. mokhtari, K.Madani, M. Belhouari , S.Touzain, Effects of composite adherend properties on stresses in double lap bonded joints. . nt *J Materials and Design* 44;633-639;(2013).

[24] Yana Zhan-Mou, You Min, Yi Xiao-Su, Zheng Xiao-Ling, Li Zhi. A numerical study of parallel slot in adherend on the stress distribution in adhesively bonded aluminum single lap joint. *Int J Adhes Adhes*;27(8):687-95;(2007).

[25] Laid Rezgani, K.Madani F. Xavier, S.Touzain Influence of water ingress onto the crack propagation rate in a AA2024-T3 plate repaired by a carbon/epoxy patch. *Aerospace Science and Technology* 55 359-365;(2016).

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'étude menée dans ce travail a pour objectif est d'analyser par la méthode des éléments finis le comportement en rupture d'une plaque endommagée et réparée par patch en aluminium 2024-T3.

L'étude bibliographique sur la technique de collage les différents types de réparation nous a permis d'approfondir nos connaissances sur ce procédé qui a dominé la plupart des secteurs industriels surtout dans le domaine de l'aéronautique Il nous a paru utile de présenter les techniques de réparation par patch composite et l'effet du vieillissement de ces patches.

- La réparation par patch composite ou métallique apporte une réduction du facteur d'intensité de contraintes.
- Plus les propriétés mécaniques du patch sont élevées, plus le transfert de charge est meilleure vers le patch et donc une réduction considérable du facteur d'intensité de contraintes.
- Quel que soit la nature du patch, on a toujours une diminution de la valeur du facteur d'intensité des contraintes par rapport à la plaque non réparée.
- Pour des petites longueurs de fissure l'effet de la nature de patch disparaît.
- Le patch de Borne/époxyde présente les plus faibles valeurs du facteur d'intensité des contraintes vu que ses propriétés mécaniques sont les plus élevées.
- si l'orientation des fibres sont à 0° , la modélisation du patch en bloc ou en multicouches n'a pas d'effet la valeur du facteur d'intensité de contraintes. Par contre, si l'orientation des fibres est différente de 0° , la modélisation du patch en bloc ou en multicouches a un effet sur le transfert de charge de la plaque.
- Le taux d'augmentation de la valeur du facteur d'intensité des contraintes dépend de la température, de la durée de vieillissement et de la nature du patch composite. Plus la longueur de fissure augmente le transfert de charge de la plaque vers l'adhésif diminue et donc un facteur d'intensité des contraintes élevées.
- L'analyse de contrainte de cisaillement montre Les valeurs les plus élevées sont au niveau de la fissure. Loin de la fissure, la valeur du contrainte est pratiquement négligeable, le patch en bore absorbe plus de contraintes comparées aux autres natures de patch, cependant le patch en aluminium et vu sa rigidité transfert moins de contraintes et la valeur de la contrainte est un peu élevée.

CONCLUSION GENERALE

- En augmentent la longueur de la fissure $a=30\text{mm}$, la concentration de contrainte augmente et la contrainte dans l'adhésif augmente petit à petit. Les valeurs les plus élevées sont toujours au niveau de la fissure et pour le cas d'une réparation par patch en aluminium.
- La distribution des contraintes de pelage dans le patch montre clairement que l'absorption des contraintes est de plus en plus efficace si le patch présente des propriétés mécaniques élevées (bore et carbone). Cependant les contraintes de pelage sont faibles et un mauvais transfert de charge ce qui explique les contraintes élevées dans l'adhésif. Loin de la zone endommagée (fissure et entaille)
- les contraintes sont quasiment nulles et ce quel que soit la nature du patch. En augmentent la température l'adhésif perd ses propriétés mécaniques et donc n'assure pas un bon transfert de charge ce qui explique les valeurs faibles des contraintes de pelage.

Effect of Behavior Patch and Aging Adhesive Exposed with Temperature in Modeling of a Damaged and Repaired Plate in Aluminum (2024-T3)

Belghoul Hakima^{1,a*}, Madani Kouider^{1,b}, Merdaci Slimane^{2,c*}, Rezgani Laid³

¹Laboratory of Elaboration and Characterization of Materials (LECM), University of Djillali Liabes, BP city Ben M 'Hidi, Sidi Bel Abbes, Algeria

²Structures and Advanced Materials in Civil Engineering and Public Works Laboratory, University of Sidi Bel Abbes, Faculty of Technology, Civil Engineering and Public Works Department, Algeria

³Department of Civil Engineering & Hydraulic, University of Saida, BP138 cite Ennacer, 20000 Saida, Algeria

^ahakoum_ing@hotmail.fr, ^bkoumad10@yahoo.fr, ^c*slimanem2016@gmail.com

Keywords: composite patch; adhesive; damaged; crack; intensity factor; temperature.

Abstract. This work consists of the study is to analysis by the finite element method the effect of the ageing of the adhesive exposed simultaneously to the temperature and water on the degradation of its mechanical properties and consequently on the transfer of loads from the plate to patch. The stress intensity factor was evaluated according to immersion time and temperature. Several parameters have been taken into consideration, namely the properties of the composite patch, temperature, water absorption, rate and length of crack, the distribution of maximum shear stresses in the adhesive and peel in the patch were also analyzed.

Introduction

Bonding technology is gaining more and more importance in various fields namely Aeronautics, Aerospace, Civil Engineering, Automotive....etc. This technology is becoming more and more efficient and cost-effective for damaged structures in order to repair and extend their service life against repeated mechanical and thermal stress. Various existing methods for repairing defects or cracks in structures including bolted or riveted patch placement. However, the disadvantage of these methods lies in the concentration of constraints that appears at the level of the links. Glued joints are more preferable to mechanical joints in structural repair especially for composite materials [1].

In order to avoid stress concentrations, one possible solution is to stick a composite patch on the damaged area. Most of the failures of these repairs are due to the appearance of a shear peak in the adhesive caused by the high transfer of forces from the damaged area to the composite patch [2]. To extend the life of such structures, there are several alternatives that depend on the level of such damage as an example, the composite patch can be glued to the vicinity of the damaged area to reinforce it preventively if the cracks have not appeared yet. This technique is the best prospective solution considered.

Numerous studies have been devoted to the theoretical study of the stresses in the composite patch and in the glue since the latter is often the weak link in the repaired structure [3-7]. Indeed, it is often the cause of repair failures [8]. Because it is its rupture or decohesion that causes the detachment of the composite patch. To optimize the shape of the patch in the anchoring zone, some studies have been carried out on the shape of the free edge of the patch to limit the peak of shear stress in the glue. Xiong, Y, and Raizenne [9] have shown that patches with a decreasing thickness reduce the stresses in the glue because the geometrical singularity is then less marked. For example, they optimized the angle and the length of the thickness reduction of the composite patch. Other work has been done on optimizing the shape of the composite patch [10].

By adopting the optimal shape patch, the stress intensity factor can be reduced to about 50% compared to that associated with a simple shape patch (square or rectangular). Many geometric, material, and load parameters affect the effectiveness of composite patch repair. Some of the studies

have examined the effects of patch size, some of the studies have examined the effects of the size patch and the thickness, that's essentially in the strength of repaired structures [11].

The orientation effect of the composite layer was studied by [12-13].

Their work showed that the composite patches stopping the crack propagation at best are the rectangular and unidirectional composite patch, the zero orientation compared to the tensile load has better load transfer [14-18].

The choice of reinforcement is a sensitive issue. The two types of reinforcement mainly used in aeronautics are carbon/epoxy [19] and boron/epoxy [16]. Report Aircraft Accident Flight (RAAF) used this last type of reinforcement successfully in the 1980s [13]. The directorate general of armament in France (DGA) has, for the moment, opted for a reinforcement of carbon / epoxy type in its preliminary studies. The main disadvantage of this type of reinforcement is that its coefficient of thermal expansion is very low in the direction of the fibers ($2.25 \times 10E-8^{\circ}C$), which causes quite significant thermal stresses.

In order to validate or not theoretical or numerical models, several experimental studies on the repair by composite patches were carried out. The study presented by Baker et al [16] consists in studying the fatigue behavior of a cracked structure, then reinforced by a composite patch.

Determination of factor intensity stress by the finite element method in the case of reinforced crack plates was performed by adopting the optimal patch form, the stress intensity factor can reduce to around 50% compared to that associated with a simple patch (square or rectangular). A study has been carried out on the repair of a crack emanating from semicircular lateral notch by a semicircular composite patch [13] [18], have shown the influence of the delamination on the amplification of the stress concentrations at the notches and the factor intensity stress (FIS) at crack points [19]. The criteria for failure were applied at one point to predict cohesive [20] and out of plane failure to predict adhesive failure [21] using the finite element method.

This work allows us to understand the mechanisms that come into play when a structure is repaired by a composite patch. Our work is part of this context, the objective is to analyze by the method of the finished elements the behavior breaking of a plate damaged and repaired by patch. Four type of composite materials were used to see the effect of its rigidity on load transfer, while comparing them with a metal patch (Aluminum type). The effect of the influence of adhesive aging was taken into account according to immersion time and temperature. The results clearly show that the stress intensity factor varies depending on the duration of aging and temperature and secondly by the effect of the orientation of the fibers in the composite patch.

Geometric Model and Mechanical Properties

An aluminum plate rectangular shape 2024-T3 with Young's modulus $E = 70000$ MPa and poisson coefficient $\nu = 0.3$ is considered with the presence of a semicircular lateral notch of diameter $D = 10$ mm. The plate has the following dimensions: length $H_p = 250$ mm, width $W_p = 100$ mm and the thickness $e_p = 2$ mm.

Consider a crack of variable length emanating from notch and perpendicular to the direction of stress propagated in opening mode most dangerous mode. The mechanical and geometrical characteristics of the patch plate and the adhesive are respectively de noted by the indices r, c (Fig.1.a). The patch has dimensions: length $h_r = 50$ mm, width $w_r = 50$ mm and the thickness $e_r = 2$ mm is supposed perfectly by adhesive type ADEKIT A140 of thickness $e_c = 0.2$ mm (fig.1.b) with Young's modulus $E = 2690$ MPa and poisson coefficient $\nu = 0.3$.

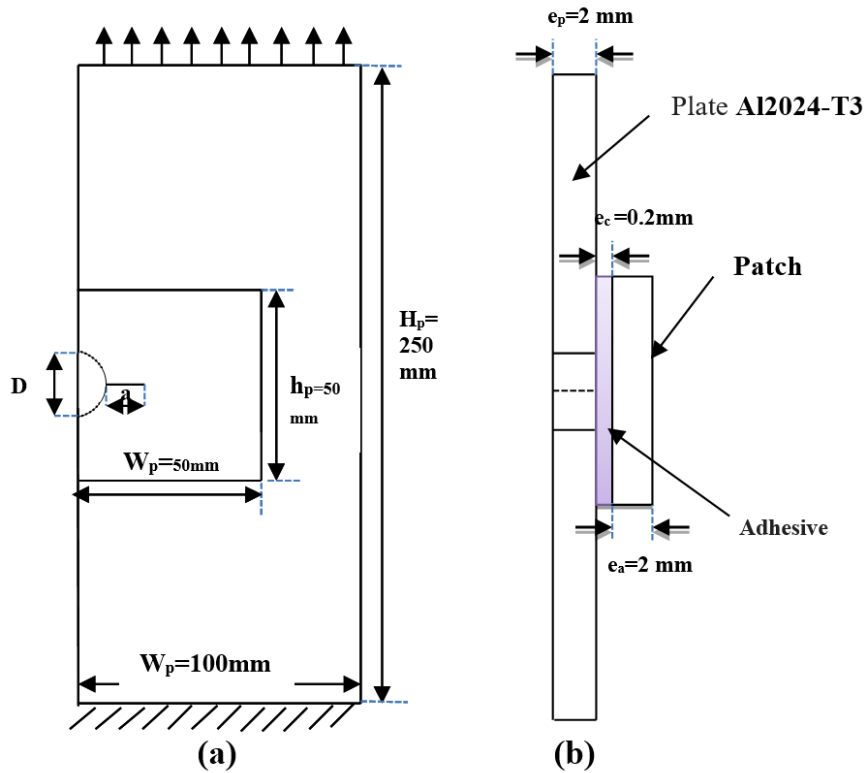


Fig.1. Geometric model of the structure (a) repaired plate and (b) patch stuck on the crack.

The plate is subjected to uniaxial traction under stress $\sigma = 70$ MPa as presented in fig.2. The other end of the plate is supposed to be embedded.

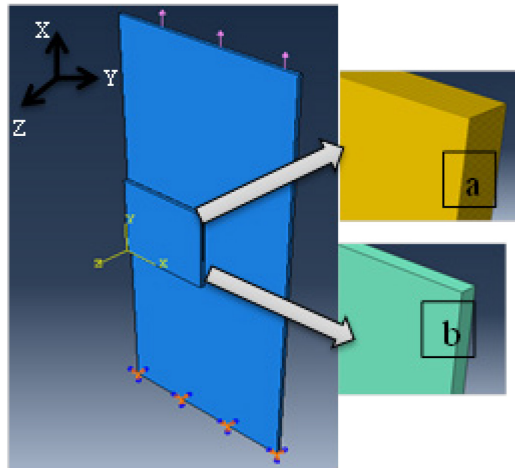


Fig.2. Plate subjected to uniaxial traction (a) patch modeled in multi-layer (b) patch modeled in mon-layer

The plate cracked and repaired with patch type composite and metal, this patch was modeled in mon-layer (bloc) in this part the modeling provided satisfactory results, but we wanted more scrutiny if we divide the composite part in sixteen parts to be completely to the models used in the experimental parts. So we restored the modeled in multi-layer. In multi-layer the thickness of each layers is identical and noted by e_{rl} , $e_{rl} = 0.125$ mm this part it's necessary for introduce the real characteristic for each composite

The composite patch has been modeled as successive multilayer with different orientations. This modeling will allow us to introduce the mechanical properties real for each layer based on the directions of the fibers, which is more real.

For the nature of the three composite, namely carbon / epoxy, boron / epoxy, and aramid / epoxy, and for the metal patch, the aluminum (2024-T3) was chosen. The properties of the materials used in this study are listed in Table 1. The adhesive using is adhesive type ADEKIT A-140 was chosen because of its use in aerospace structures see Table.1.

Table 1. Properties of different composite laminates used in the study [23].

Material	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	E_3 (GPa)	G_{12} (GPa)	G_{13} (GPa)	G_{23} (GPa)	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
Adekit A140	2.690	2.690	2.690	0.99	0.99	0.99	0.35	0.35	0.35
Carbon-epoxy	109.000	8.819	8.819	4.315	4.315	3.200	0.342	0.342	0.38
Boron-epoxy	193.06	18.617	18.617	5.516	5.516	7.757	0.21	0.21	0.2
Aramid-epoxy	76	5.5	5.5	2.3	2.3	2.3	0.34	0.34	0.34

Tow sequence of ply orientations of the composite adherent are considered in this study to investigate their effect is taken from the longitudinal direction of the structure (x-axis) and varied to 0° and 45° (Fig.3).

By modeling the composite patch in block and multilayer this will allow us to introduce the real characteristics for each layer, if the orientation of the layers is at (0°), the simulation of the patch in block and multilayer will have no influence on the overall properties of the composite, however if the orientation of the layers of the composite is different (0°), the effect is more noticeable.

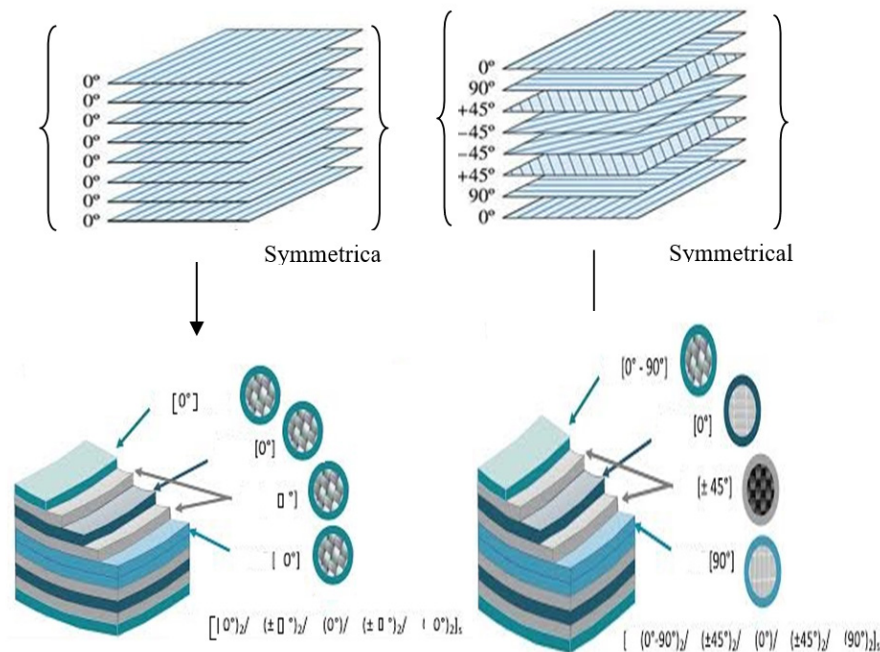


Fig. 3. The sequences of the plies.

By modeling the multilayer composite, this will allow us to introduce the actual mechanical characteristics of the composites depending on the orientation of the fibers for which we have chosen two stacking sequences which are shown in Table.2.

Table 2. The sequences of the plies used in analyses.

Composite	Sequences pils
1	(0 _s) _s
2	(0 ₂ /45 ₂ /-45 ₂ /90 ₂) _s

Finite Element Modeling

A three-dimensional finite element model of such a structure involves several degrees of complexity. As we know the mesh has a presiding role on the determination of the values of the constraints or the factor of stress intensity, the first step is to choose the type of element, the most adapted to the problem studied, and then we divide the structure into a number of elements (Fig. 4.a). The structure has been meshed globally using elements of the type C3D8 (An 8-node linear brick) (Fig.4.b).

The choice of the types and sizes of elements Finite element modeling to be used especially in the crack tip depends on the fundamental parameters, to control the strong gradients of stresses and deformations in the vicinity of the crack tip to obtain a correct representation of the displacement field near the crack (Fig.4.c)

The mesh of the crack tip was exclusively refined using this special type element shows the configuration of the crack position in the present model (fig.4). The total number of elements is shown in Table.3.

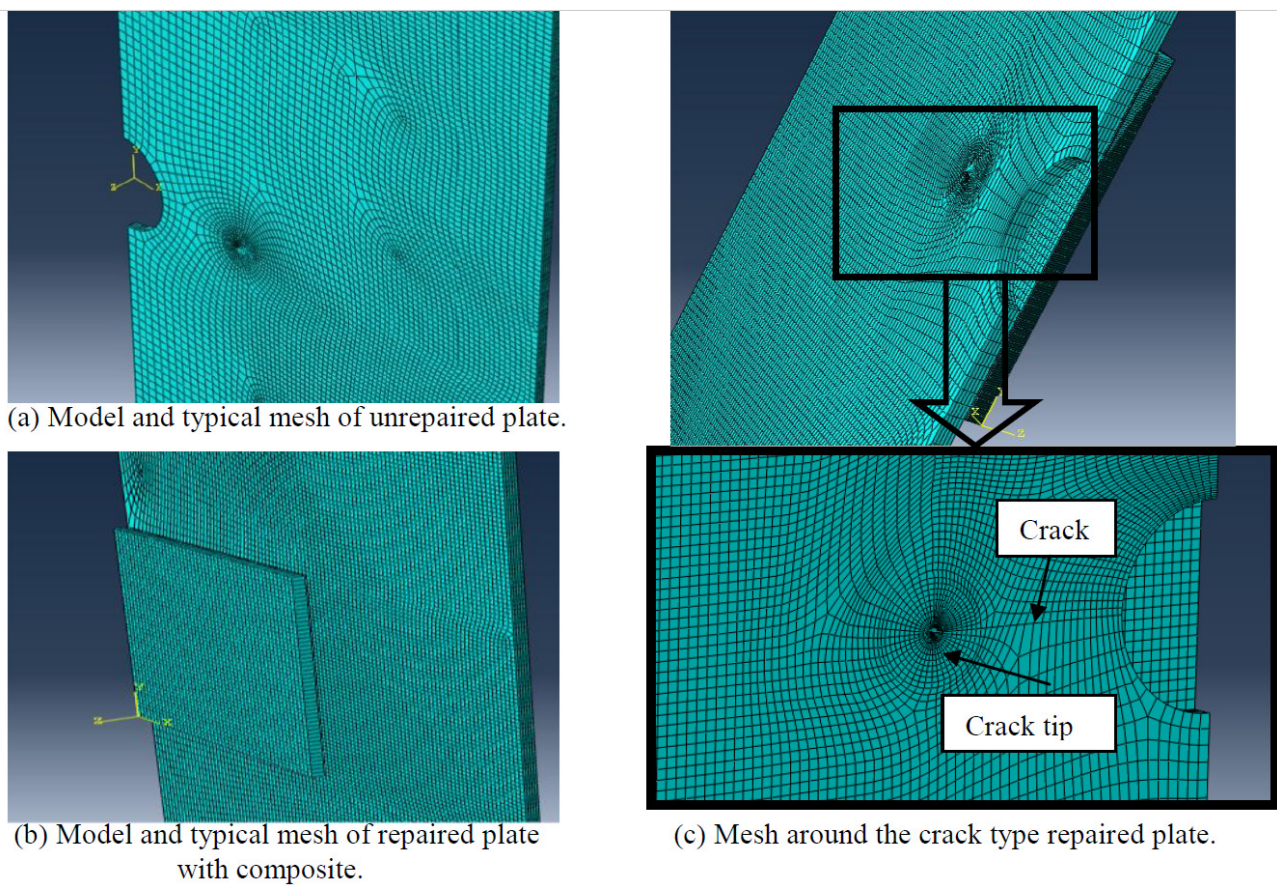


Fig. 4. FEM model of repaired plate.

Table 3. Number and type of element.

Mesh global	Numbers of elements	Type
Mesh of the structure	112395	C3D8
Mesh of the structure mon-layer and refined	140928	C3D8+ C3D8R
Mesh of the structure multi-layer and refined	178770	C3D8+ C3D8R

The interaction between adhesive and the cracked plate area, firstly, and between the composite patch and adhesive, secondly is considered perfectly, the boundary conditions imposed on the plate analyzed are represented as follows (Fig. 5):

- Embedding the lower face of the plate $u1=u2=u3=UR1=UR2=UR3=0$
- Traction to the other face of $F=70$ MPa

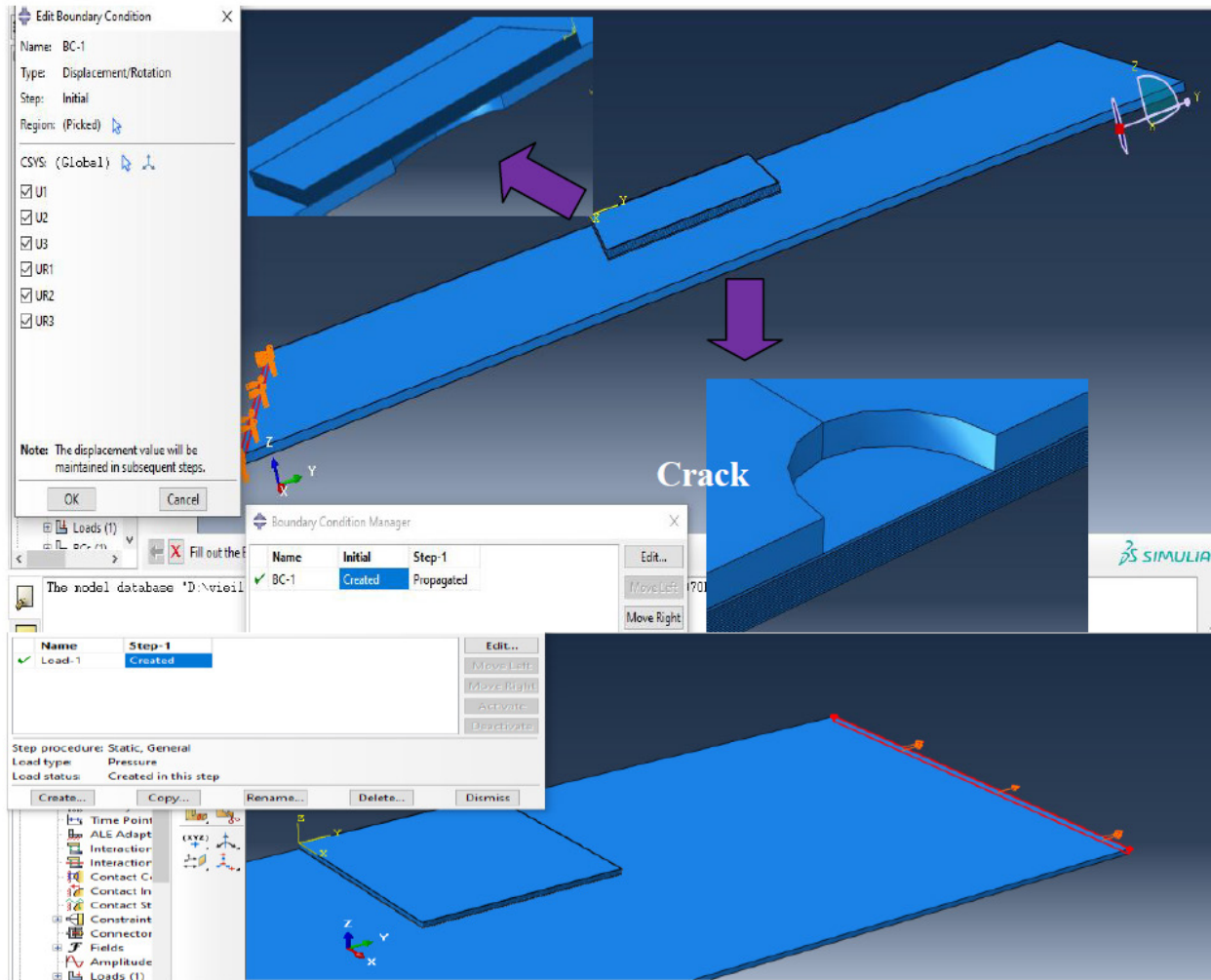


Fig. 5. Boundary conditions imposed on the structure.

Analysis and Results

Effect of the nature of the patch

A comparative analysis has been made between plate damaged and plate repaired by fore type of patch without aging.

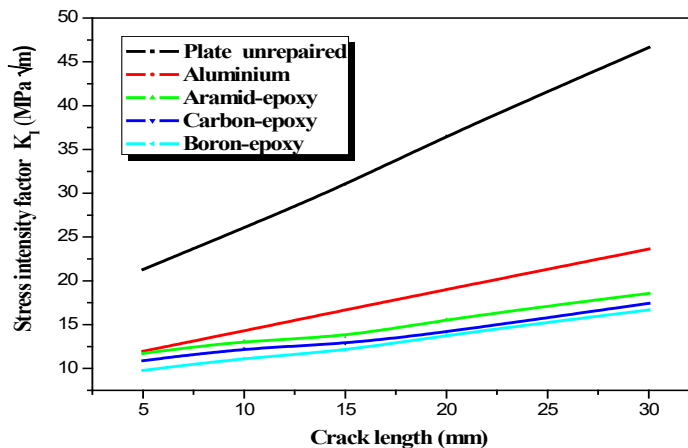


Fig. 6. Variation in stress intensity factor as a function of crack length for different types materials.

Fig.6. shows the variation of the stress intensity factor as a function of the length of the crack for different natures of the patch, we notice that the curves are the same regardless of the nature of the patch and has slopes according to the crack length. The higher the mechanical properties of the patch, the better the load transfer from the plate to the patch whatever the nature of the patch, there is always a decrease in the value of the stress intensity factor relative to the unrepaired plate.

For short lengths of crack the effect of the patch nature disappears. The Boron / Epoxy patch has the lowest values of the stress intensity factor since its mechanical properties are the highest.

-However, the metal patch has the highest values of stress intensity factor.

-The patch was considered in block form where mechanical properties were introduced in constant engineers for calculated through the Abaqus calculation code.

- On the other hand for the second simulation, the composite was considered in multilayer form which more real, the mechanical properties were introduced the engineers' constants according for each layer by calculating to the law of homogenization.

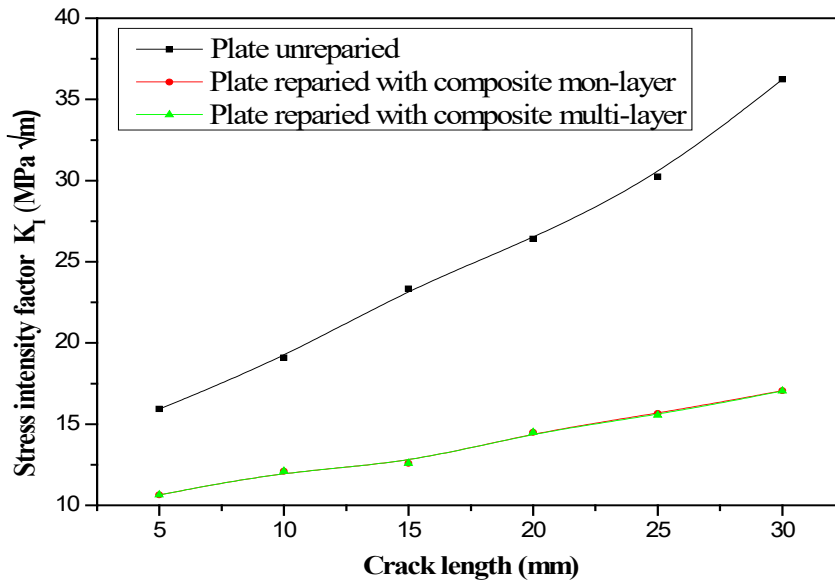


Fig. 7. Variation of the stress intensity factor for different types of mon-layer and multi-layer patch with stacking sequence at $[0_8]_s$ as a function of the length of the crack.

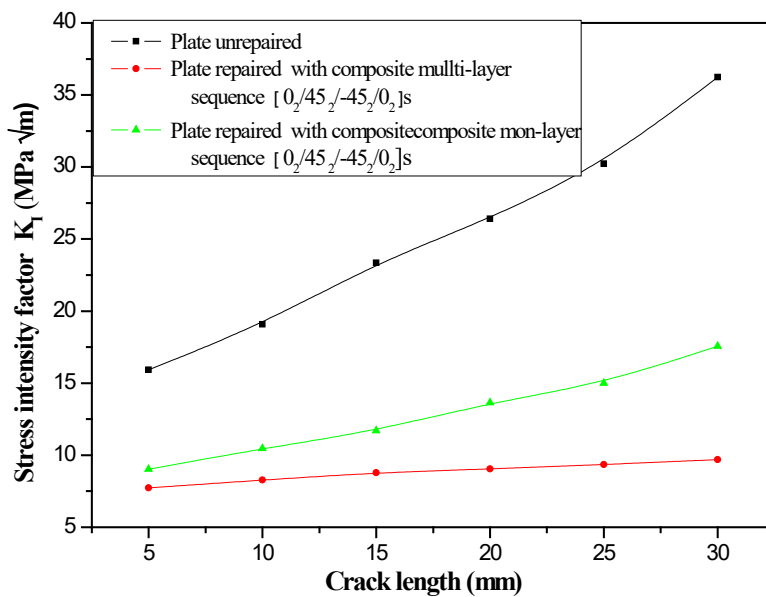


Fig. 8. Variation of the stress intensity factor for different types of mon-layer and multi-layer patch with stacking sequence at $[0_2/45_2/-45_2/0_2]_s$ as a function of the length of the crack.

Figure 7 shows the variation in the stress intensity factor depending on the length of the crack in the case of a multilayer and monoblock patch. If the orientation of the fibers in all layers is 0° degrees, there is a small difference in the factor intensity stress. On the other hand if the stacking sequence is $[0_2/45_2/-45_2/90_2]_s$ in Figure.8. The multilayer patch has the lowest factor intensity stress values that depend on the mechanical properties of each layer while the composite patch in block form has a single orientation and therefore poor absorption of stresses.

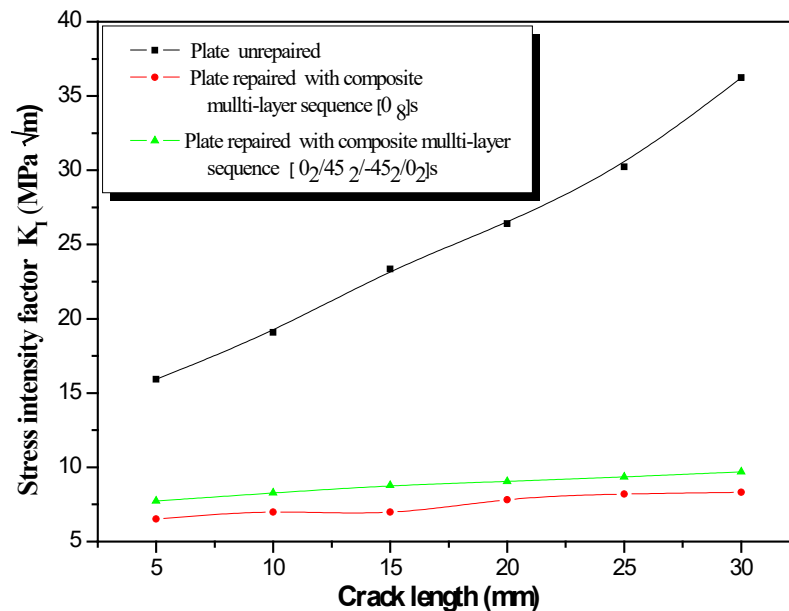


Fig.9. Variation of the stress intensity factor for different types of patch multi-layer with stacking sequence at $[0_8]_s$ et $[0_2/45_2/-45_2/90_2]_s$ as a function of the length of the crack.

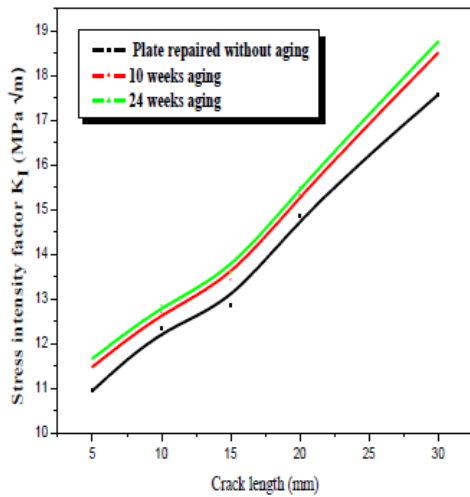
Figure 9 shows variation in stress intensity factor based on the length of the crack for two stacking sequences $[0_8]_s$ and $[0_2/45_2/-45_2/90_2]_s$. Considering a multilayer patch, the lowest stress intensity factor values are for a patch repair with the stacking sequence $[0_8]_s$ which has high mechanical properties and ensures a good charge transfer of the damaged area, however if the patch presents the sequence $[0_2/45_2/-45_2/90_2]_s$, these mechanical properties become weak and therefore a poor transfer of the load of the damaged area and consequently a factor of high stress intensity.

Aging Effect of the Adhesive on the Stress Intensity Factor

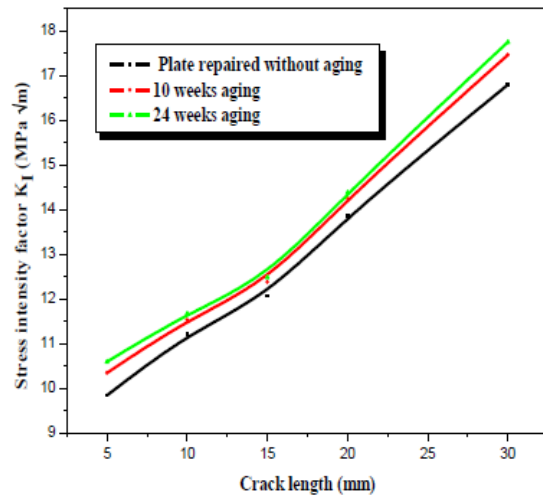
So we can see the stress distribution in the patch and adhesive one presented in the following figure the levels of the shear stresses τ_{23} and the peel stresses σ_{33} .

Temperature of 20 °C

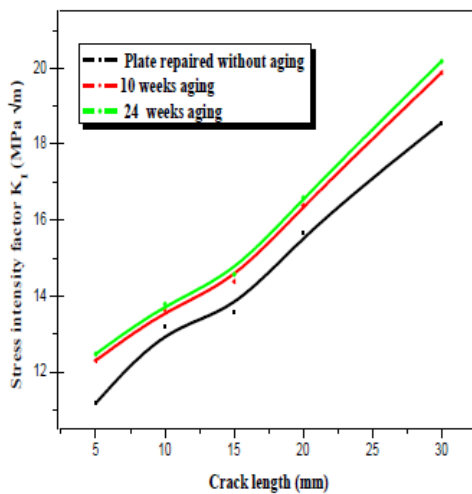
It is considered that only the adhesive that will be exposed to water and room temperature.



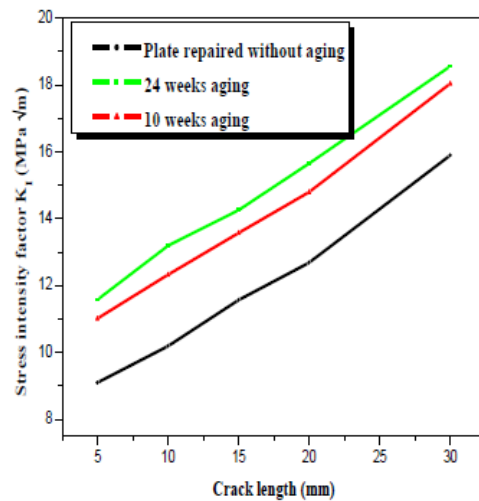
(a) Carbon / epoxy patch repair



(b) Boron / epoxy patch repair



(c) Aramid / epoxy patch repair



(d) Aluminum patch repair

Fig. 10. Variation of stress intensity factor as a function of crack length for different immersion times at 20° C [orientation $[0_8]_s$].

We consider that only the adhesive which will be exposed to water and temperature. Noted the curves are identical (fig.10.), the aging effect of the adhesive appears clearly on the values of the stress intensity factor after ten weeks of aging at room temperature. At this temperature, even though the immersion time in water increases the value of the stress intensity factor increases slightly and remains always lower than the case of the unrepaired plate. The percentage of the value of the stress intensity factor varies with the length of the crack.

Temperature of 40° C

It is considered that only the adhesive will be exposed at 40°C. The temperature accelerates the aging of the adhesive and causes significant plasticization of the polymer.

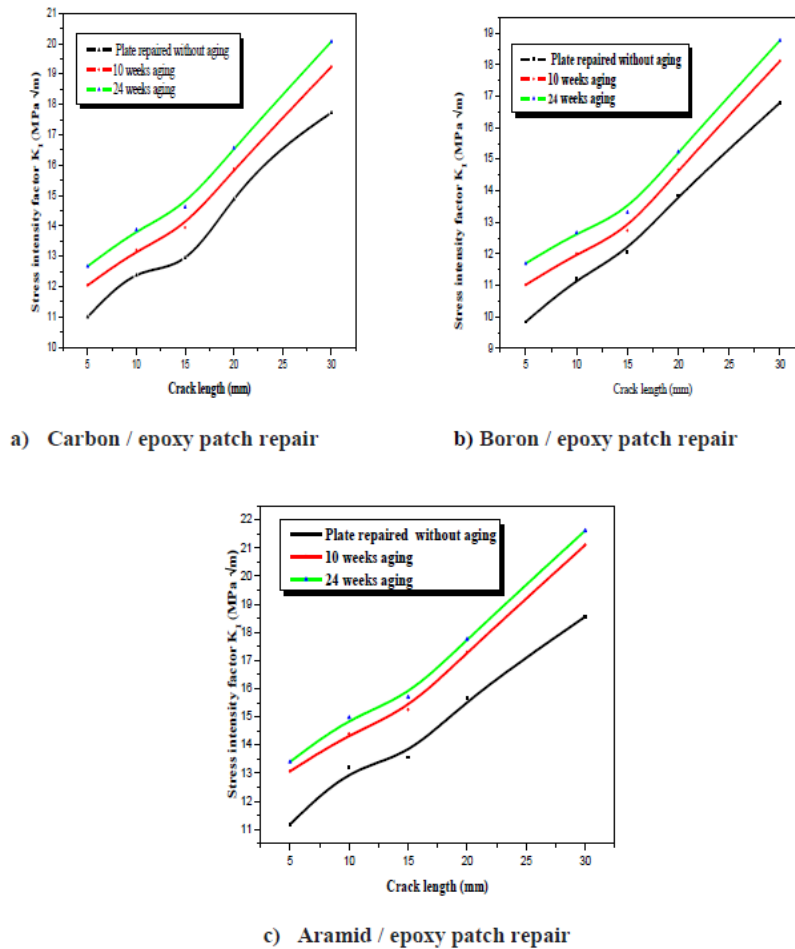


Fig. 11. Variation of stress intensity factor as a function of crack length for different immersion times at 40°C $[[0_8]_s$ orientation].

By increasing the temperature (fig.11), the water diffusion process accelerates and thus the water absorption becomes fast and therefore the degradation of the properties of the adhesive continues. As a result, there is a considerable drop in Young's modulus. This subsequently causes a bad charge transfer from the plate to the patch and therefore a factor of stress intensity slightly higher than that at temperature 20 ° C.

Temperature of 60 °C

In the first ageing week, the plastic behavior domain increases considerably. On the other side, the elasticity decreases which is due to the physical and chemical changes of the aged adhesive.

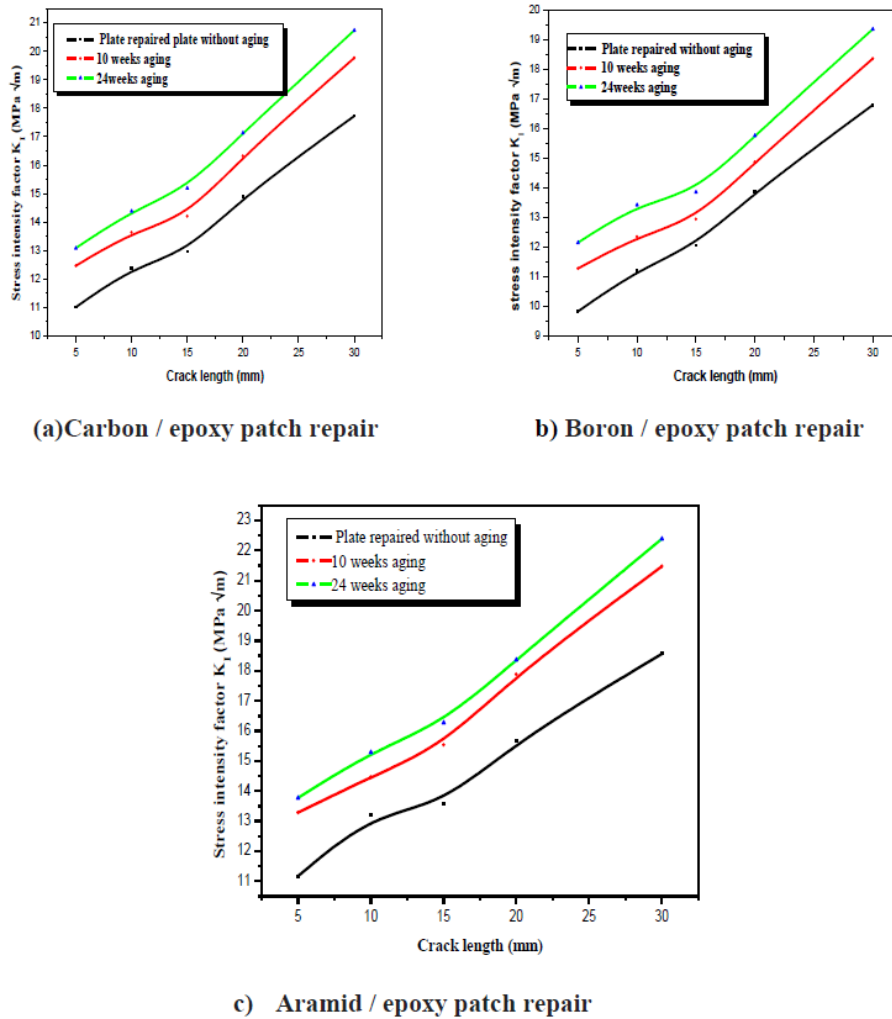
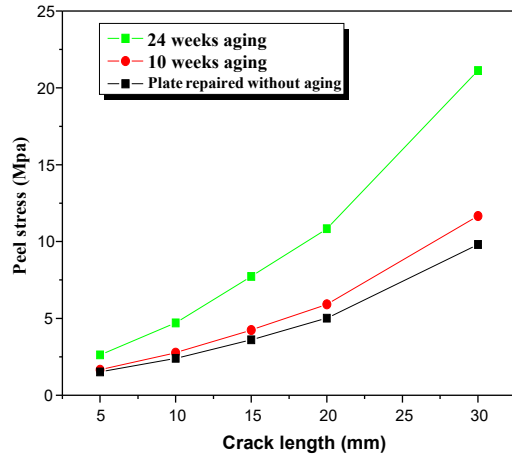
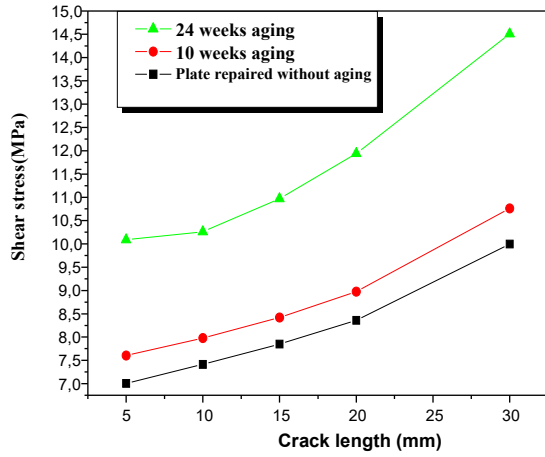


Fig. 12. Variation of stress intensity factor as a function of crack length for different immersion times at 60°C [stacking sequence $[O_8]_s$].

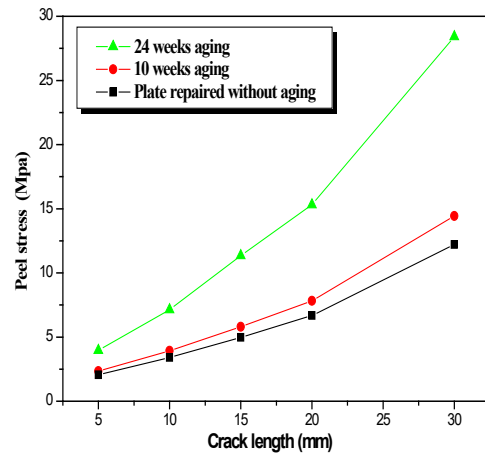
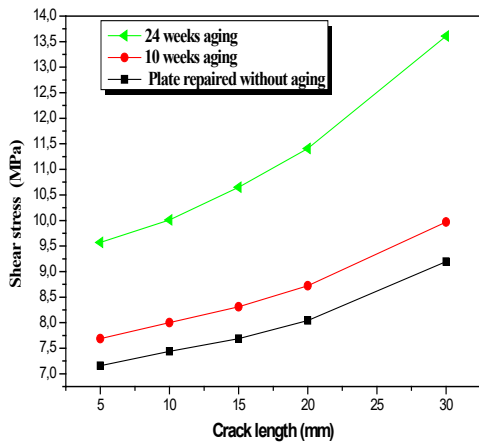
The fig.12. clearly shows that the stress intensity factor values considerably at this temperature and as a function of the aging time, unlike the temperature of 20°C. The aging effect of the adhesive appears even for short lengths of crack. The rate of increase of the value of the stress intensity factor depends on the temperature, the duration of aging and the nature of the composite patch. The longer the crack length increases the charge transfer from the plate to the adhesive decreases and therefore a high stress intensity factor.

Analysis of the stresses in the adhesive and the patch

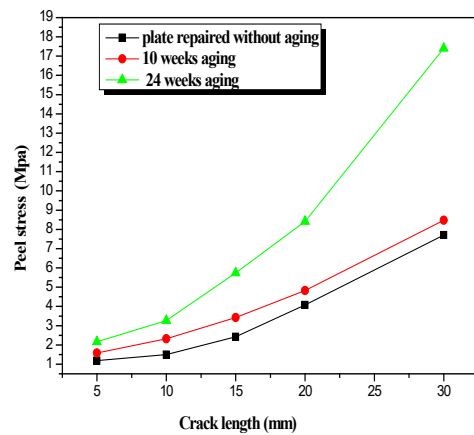
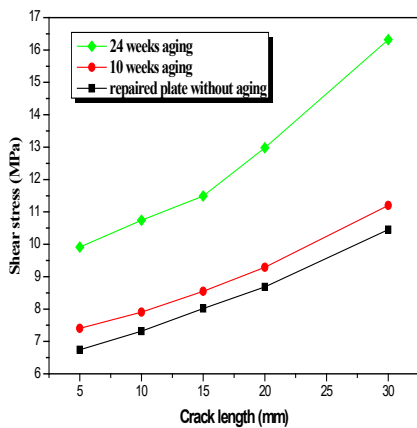
The distribution of shear stress and peel stress as a function of the length of the crack for the plate repaired without adhesive aging and plate repaired by patch with the adhesive aging to one day for 24 weeks.



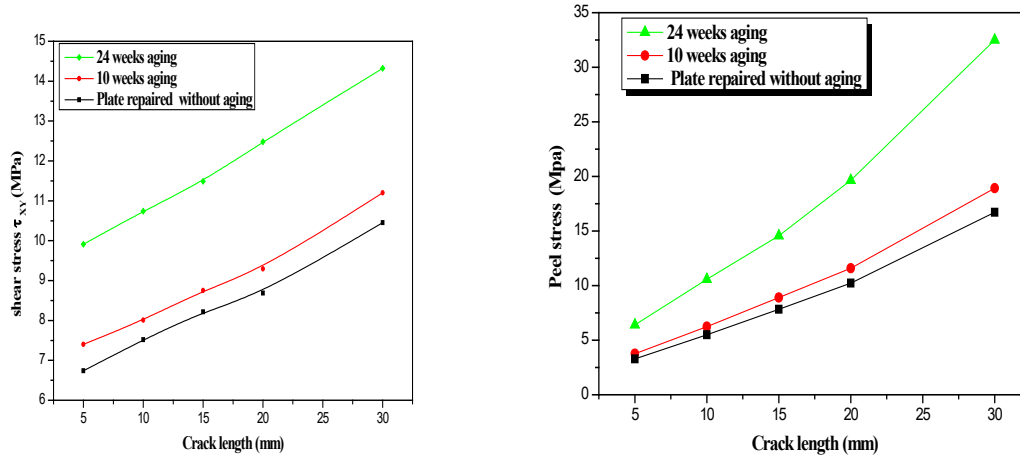
a) Carbon / epoxy patch repair



b) Boron / epoxy patch repair



c) Aramid / epoxy patch repair

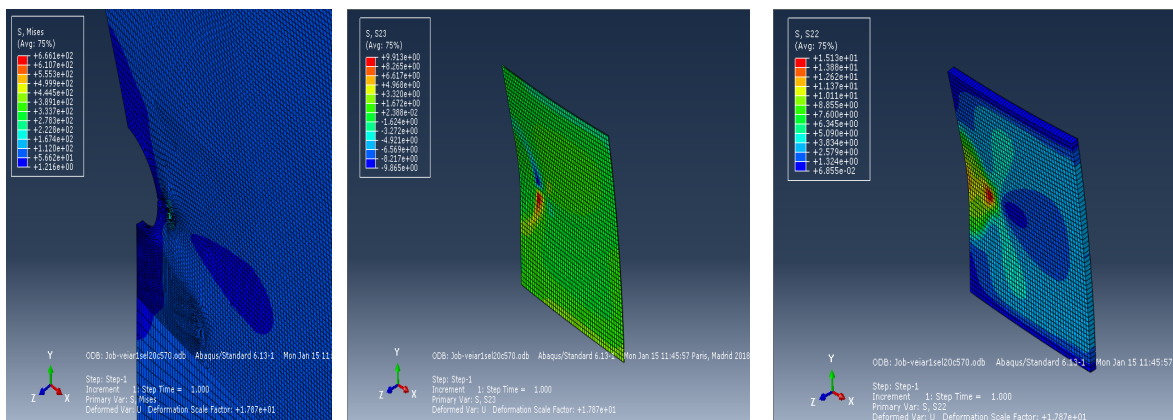


d) Aluminum patch repair

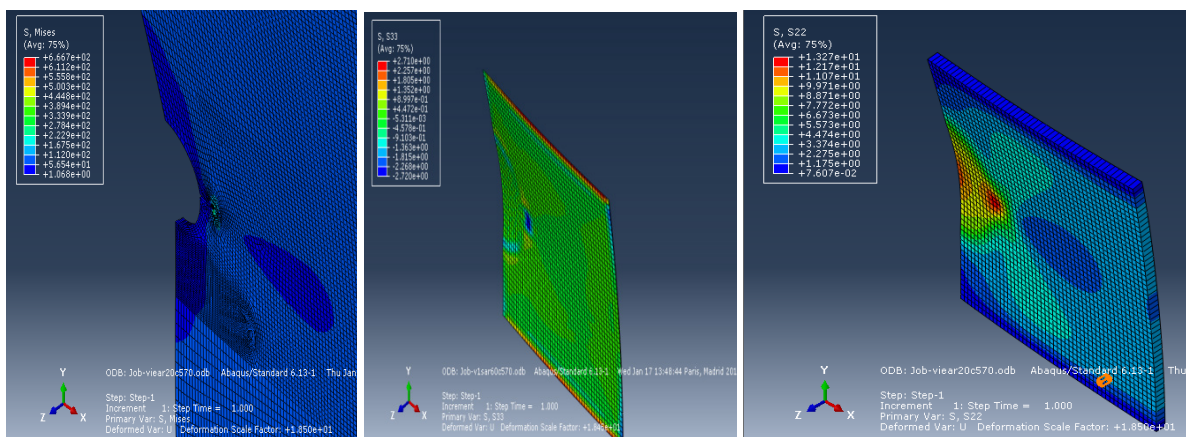
Fig. 13. Variation of shear stresses a temperature of 20° C.

The figure 13 clearly shows that more the mechanical properties are high, more the stresses absorption of damaged area is high and so load transfer is better towards the patch. Repair by composite patch increases the rigidity of the damaged structure, also ensuring along structural life of structure.

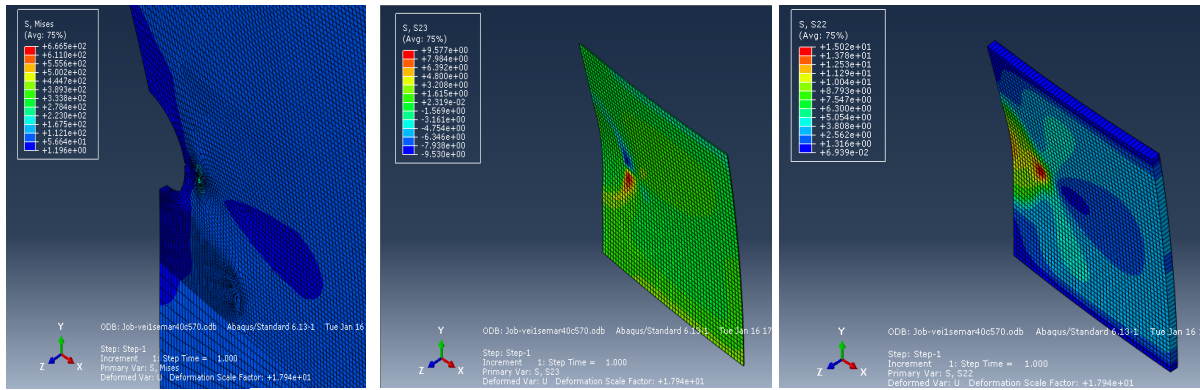
For short crack lengths and minimum aging time, the effect of type of patch material on the value of the constraints in the patch disappears. If aging time is imported the composite and adhesive absorb more water and therefore a significant degradation of their mechanical properties, charge transfer from plate to the patch through adhesive and therefore less important in the damage area.



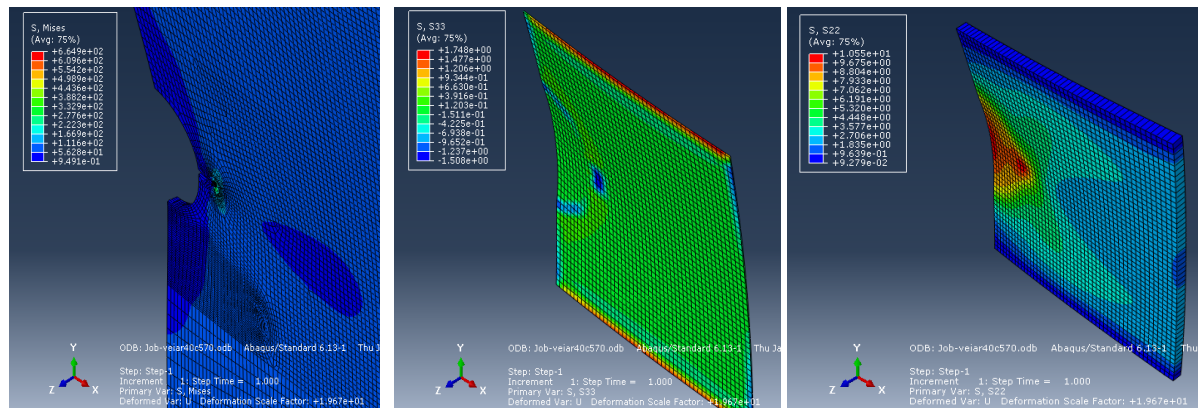
(a) Plate without aging a = 5mm at a temperature of 20° C



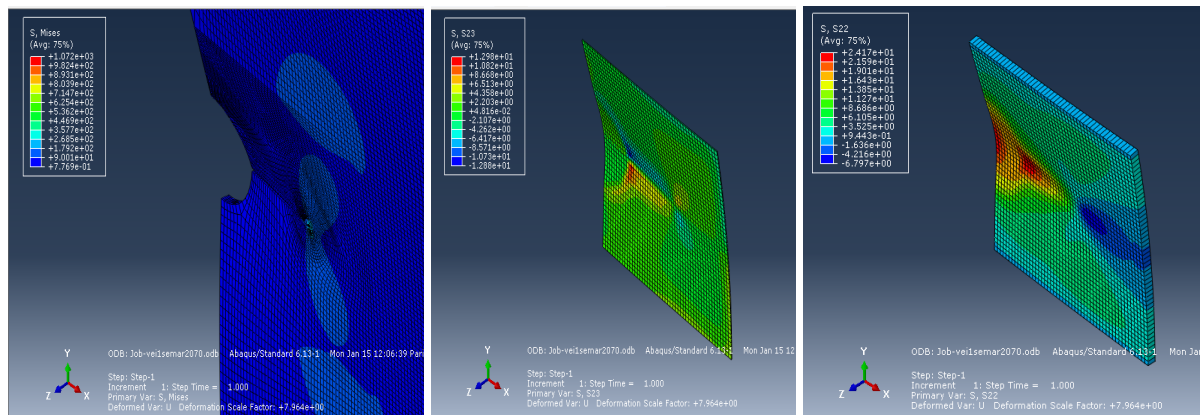
(b) Plate repaired 24 weeks of aging a = 5mm at 20° C



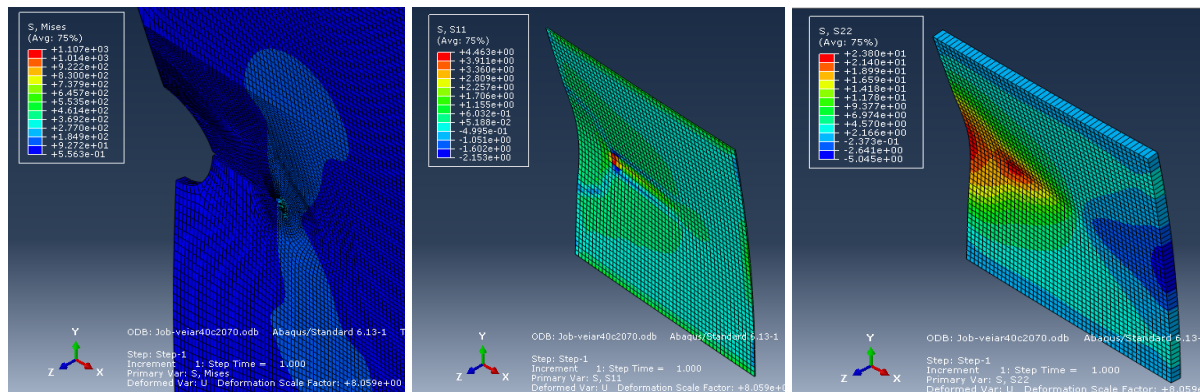
(c) Without aging $a = 5\text{mm}$ at 40°C



(d) 24 weeks of aging $a = 5\text{mm}$ at 40°C



(e) Without aging $a = 20\text{mm}$ at temperature 40°C



(f) 24 weeks of aging $a = 20\text{mm}$ at 40°C

Fig. 14. Example of stress distribution at adhesive and patch for different immersion periods and different temperatures and different lengths crack.

Figure.14 clearly shows that for length crack minimum 5mm the stresses are concentrated at the level of the notch given the high concentration of the stresses on the plate if the length of cracks increases, we notice a high concentration of stresses always in the notch level and crack with appearance of a low concentration of stresses at the free edge of the adhesive. The stress values increases with the increase in the length of the crack.

After 10 weeks aging us clearly notice that saw a great loss of mechanical properties of the adhesive, load transfer become badly. The stress concentration is always located at the level of notch and points of the crack.

If the length of the crack increases, more the stress constraints located at the level of the notch and crack some of these constraints are centered at the free edge of adhesive with low values. By increasing the stress values increases suddenly.

If temperature rises, the adhesive loses more and more these mechanical properties, and large part of the surface of the adhesive will be stressed the values of stresses increases with the increase in the length of the duration of aging.

Conclusion

From the general results obtained of the investigation the following conclusion can be drawn:

- Nature of the patch, there is always a decrease in the value of the stress intensity factor with respect to the unrepaired plate.
- The boron/epoxy patch has the lowest values of the stress intensity factor since its mechanical properties are the highest.
- Stacking sequence $[0_8]_s$ ensures a good charge transfer of the damaged area.
- the aging effect of the adhesive appears clearly on the values of the stress intensity factor after ten weeks of aging at room temperature
- The patch models by a multi-layer material posads values closer than only modeled by a single-layer block.
- Composite patch repair increases the stiffness of the damaged structure and retards crack propagation, thereby ensuring a long structural life.
- The aging effect of the adhesive on the stress intensity factor appears even for short crack lengths as the temperature increases.
- The water diffusion process accelerates and thus the water absorption becomes fast and therefore the degradation of the properties of the adhesive continues.
- If aging time is imported the composite and adhesive absorb more water and therefore a significant degradation of their mechanical properties, charge transfer from plate to the patch through adhesive, and therefore less important in the damage area
- More the stresses absorption of damaged area is high and so load transfer is better towards the patch.

References

- [1] 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.
- [2] AA. Baker, & R.J. Chester, Recent advances in composite repair technology for metallic aircraft components. In: Advanced composites 93. Chandra T, Dhingra AK, editors. Proceedings of the Int. Conf. on Ad. Comp. Mat. pp 45-9, (1993).
- [3] Hollaway, L., and Leeming, M. Strengthening of reinforced concrete structures. Woodhead Publishing Limited, (1999).
- [4] Volkersen, O. Die niekraft in zugbeanspruchten mit konstanten laschenquerschriften. Luftfahrtforschung 15, 41–47;(1938).

-
- [5] Goland, and Reissner. The stress in cemented joints. *Journal of Applied Mechanics* 11, A17–A27; (1944).
- [6] Adams, R., and Wake, W. *Structural adhesive joints in engineering*. Elsevier, (1984).
- [7] Oplinger, D. Effects of adherent deflection in single lap joints. *International Journal of Solids and Structures* 31, 18, 2565–2587; (1994).
- [8] Davis, M., and Bond, D. Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 19, 91–105; (1999).
- [9] Xiong, Y., and Raizenne, D. Stress and failure analysis of bonded composite-to-metal joints. Tech. rep., Institute for aerospace research, Canada; (2010).
- [10] Kumar, A., and Hakeem, S. Optimum design of symmetric composite patch repair to centre cracked metallic sheet. *Composite Structures* 49, 285– 292; (2000).
- [11] Hosseini-Toudeshky, H. and Mohammadi, B. “Thermal residual stresses effects on fatigue crack growth of repaired panels bounded with various composite materials”, *Compos. Struct.*, 89(2), 216-223; (2009).
- [12] Ayatollahi, M.R. and Hashemi, R. “Computation of stress intensity factors (KI, KII) and T-stress for cracks reinforced by composite patching”, *Compos. Struct.*, 78(4), 602-609; (2007).
- [13] Bureau of Accident Investigation, Aircraft Accident Report: Aloha Airlines Flight 243, Boeing 737-200, N73711, Near Maui, Hawaii, April 28, 1988. Report No. NTSB/AAR-89/o3, National Transportation and Safety Office, Washington, 14 June 1989.
- [14] Madani, K., Touzain, S., Feugas, X., Roy, A. and Cohendoz, S. “Analyze of the notch effect on the distribution of the stresses in the adhesive layer between two bonded aluminum 2024-T3 plates”, *J. Mater. Technol.*, 97(5), 315-324; (2009).
- [15] AA. Baker, & R.J. Chester, Recent advances in composite repair technology for metallic aircraft components. In: *Advanced composites 93*. Chandra T, Dhingra AK, editors. Proceedings of the Int. Conf. on Ad. Comp. Mat. pp 45-9, (1993).
- [16] Baker, A. Bonded composite repair of fatigue-cracked primary aircraft structure. *Composite Structures* 47, 431–443; (1999).
- [17] Belhouari, M., Bouiadjra, B.B., Megueni, A. and Kaddouri, K., “Comparison of double and single bonded repairs to symmetric composite structures: a numerical analysis”, *Compos. Struct.*, 65(1), 47-53; (2004).
- [18] Madani K, Touzain S, Feugas X, Roy A, et Cohendoz S. Analyze of the notch effect on the distribution of the stresses in the adhesive layer between two bonded aluminum 2024-T3 plates. *J Mater Technol*; 97:315-24; (2009).
- [19] Madani K, Touzain S, Feugas X, Cohendouz S, Ratwani M. Experimental and numerical study of repair techniques for panels with geometrical discontinuities. *Comput Mater Sei*; 48:83; (2010)-
- [20] L. Hollaway, A. Romhi, M. Gunn, *Comp. Stuct.* 19; 125–170; (1990).
- [21] R. Long, *J. Comp. Mater.* 25; 391–415; (1991).
- [22] ABAQUS/CAE (2015), Ver 6.14 User’s Manual
- [23] M. mokhtari, K. Madani, M. Belhouari, S. Touzain, Effects of composite adherend properties on stresses in double lap bonded joints. *Int J Materials and Design* 44; 633-639; (2013).
- [24] Yana Zhan-Mou, You Min, Yi Xiao-Su, Zheng Xiao-Ling, Li Zhi. A numerical study of parallel slot in adherend on the stress distribution in adhesively bonded aluminum single lap joint. *Int J Adhes Adhes*; 27(8):687-95; (2007).
- [25] Laid Rezgani, K. Madani F. Xavier, S. Touzain Influence of water ingress onto the crack propagation rate in a AA2024-T3 plate repaired by a carbon/epoxy patch. *Aerospace Science and Technology*, 55, 359-365; (2016).