

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Thèse

Pour

L'obtention du diplôme de

Doctorat en Sciences

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Mécanique de construction

Présentée Par : **BERRAHOU Mohamed**

Etude de l'effet de l'endommagement de la couche adhésive sur la réparation des structures par patch en composite.

Soutenue : Décembre 2016 devant la commission d'examen :

Président	BENALI BOUTABOUT	Professeur	UDL. SBA
Examineur	MOHAMED BELHOUARI	Professeur	UDL. SBA
Examineur	ABDELKRIM AID	Professeur	U. Mascara
Examineur	MOHAMED MOKHTAR BOUZIANE	M.C.A	U. Mascara
Examineur	IBRAHIM ZIDANE	M.C.A	U. Khmis miliana
Directeur de thèse	BELABBES BACHIR BOUIADJRA	Professeur	UDL.SBA



Remerciements

Nous tenons à remercier notre dieu tout puissant pour la réalisation de ce travail.

Nos remerciements s'adressent à toutes les personnes qui nous ont soutenus à

L'élaboration de ce travail,

Nos très vifs remerciements sont destinés à :

Mr M.SALEM et Pr. BACHIR BOUIDJRA Bel Abbès pour leurs orientations continuelles, leurs encouragements et conseils.

Nous adressons également nos remerciements à tous les enseignants qui ont été généreux dans notre formation et auprès d'eux nous avons beaucoup appris.

Nous tenons aussi à remercier tous les membres du jury qui ont présidé notre modeste travail.

Enfin, nous exprimons nos remerciements à nos amis qui nous ont accompagnés durant tout Le long chemin de nos études.

DEDICACE

*A mes parents
A mes frères.*

RESUME

L'objectif de ce travail porte l'analyse, de l'effet de l'endommagement de la couche adhésive sur la réparation des plaques en alliages d'aluminium Al 2024 par simple patch en composite numérique en utilisant la méthode des éléments finis tridimensionnelle. Nous avons étudié les effets de plusieurs paramètres sur l'efficacité de la réparation dont celui du chargement mécanique, de l'épaisseur de l'adhésif et du patch ainsi que l'effet du module de cisaillement de l'adhésif. L'étude a porté sur une structure corrodée et non fissurée ainsi que sur des structures corrodées et fissurées en mode (I) et en mode mixte (I+II). Les résultats obtenus montrent que la forme elliptique du patch donne un risque de rupture de l'adhésion minimale. Le patch de forme rectangulaire donne une efficacité de réparation meilleure.

Mots-clés : Patch, Réparation, Facteur d'intensité de contrainte, Corrosion, Rapport de la zone endommagée (D_R), Méthode des éléments finis (MEF).

ABSTRACT

The objective of this work focuses on numerical analysis by the method of three-dimensional finite element, the effect of the adhesive damage on repair of plates in AL alloys 2024 by simple composite patch. We studied the influence of several parameters on the repair efficiency such as the effects of mechanical loading, the thicknesses of the adhesive and the patch of the patch as well as the effect of the adhesive shear modulus. The study treated the repair of non corroded structure and corroded structures with crack in mode I and mixed mode (I+II). The obtained results show that the elliptical patch shape gives lower risk of adhesive failure. The rectangular patch gives the best repair efficiency.

Keywords: Patch, Composite Repair, Stress intensity factor (SIF), Corrosion, Damage ratio, Finite element method (FEM).

هدف هذا العمل هو دراسة تأثير إتلاف الطبقة الغراء على إصلاح ألواح من سبائك الألومنيوم Al 2024 أحادية (simple patch) باستخدام طريقة العناصر المنتهية ثلاثية الأبعاد. درسنا تأثير المتغيرات المختلفة على فعالية الإصلاح بما في ذلك الضغوط الميكانيكية، سمك الغراء المادة المركبة (patch) وتأثير معامل القطع. وركزت الدراسة على هيكل فيه صدأ بدون شق وكذلك بوجود شق في الحالتين (I+II). أظهرت النتائج أن الشكل البيضاوي يعطي خطر تمزق عضوية الحد الأدنى. أما الشكل المستطيل يوفر أفضل إصلاح.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	01
CHAPITRE I - LES ALLIAGES D'ALUMINIUM ET CORROSION	06
I.1 LES ALLIAGES D'ALUMINIUM DE LA SERIE 2000	07
I.1.1 Généralités	07
I.1.2 Propriétés d'aluminium et ses alliages	09
I.1.3 Corrosion de l'aluminium et de ses alliages	12
I.1.3.1 principes généraux	12
I.1.3.2 films d'oxyde d'aluminium	13
I.1.3.3 différentes formes de corrosion localisée	14
I.2 METHODES LOCALES D'ETUDE DE LA CORROSION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM	17
I.2.1 Introduction	17
I.2.2 Caractérisation électrochimique locale	18
I.2.2.1 microcellule électrochimique à capillaire	18
I.2.2.2 microélectrode a PH	19
I.2.2.3 microscope électrochimique (SECM)	20
I.2.2.4 technique de l'électrode vibrante (SVET)	21
I.2.2.5 spectroscopie d'impédance électrochimique locale (SIEL)	21
I.2.3 Caractérisation morphologique locale	22
I.2.3.1 microscope laser confocale (CLSM)	22
I.2.3.2 microscope optique en champ (SNOM)	22
I.2.3.3 microscope à force atomique (AFM)	23
I.2.4 Analyse chimique de surface	23
I.2.5 Techniques permettant le couplage des méthodes	24
I.2.5.1 couplage AFM-SECM	24
I.2.5.2 AFM en mode KELVIN, (SKPFM OU KFM)	25
CHAPITRE II-TECHNOLOGIE DE REPARATION DES STRUCTURES COLLEES PAR PATCHS	30
II.1. EFFICACITE DES ADHESIFS STRUCTURAUX	31
II.1.1 Adhésion et Cohésion	31
II.1.2 Mécanismes de l'adhésion	32
II.1.2.1 L'Ancrage Mécanique	32
II.1.2.2 Théorie de la diffusion	33
II.1.2.3 Théorie électrostatique	33
II.1.2.4 Formation de liaisons covalentes	33
II.1.2.5 Théorie de l'adsorption ou du mouillage	34
II.1.2.6 Couche de faible cohésion	37

II.1.2.7	Confinement	37
II.1.2.8	Énergie de liaison	37
II.1.3	Assemblages collés [23]	39
II.1.4	Défauts dans les assemblages collés	41
II.2	OPTIMISATION DE LA FORME DU PATCH EN ZONE D'ANCRAGE	42
II.3	MECANISME DE COLLAGE	43
II.4	PRESENTATION DU CODE DE CALCUL «ABAQUS» [26]	46
II.4.1	structure et taches	48
II.4.2	l'arbre du modèle	49
II.4.3	méthodologie	49
<hr/>		
CHAPITRE III-	ANALYSE DE LA REPARATION DES PLAQUES CORRODEES	51
	<i>NON FISSUREES</i>	
<hr/>		
III.1	INTRODUCTION	52
III.2	MODELES GEOMETRIQUES	53
III.3	MODELISATION NOMINALE ELEMENTS FINIS	54
III.4	MODELE DE LA ZONE ENDOMMAGEE	56
III.5	RESULTATS ET DECISIONS	57
III.5.1	Effet de la charge sur la variation de la zone endommagée de l'adhésif	58
III.5.1.1	<i>patch rectangulaire</i>	58
III.5.1.2	<i>patch trapézoïdale</i>	59
III.5.1.3	<i>patch circulaire</i>	60
III.5.1.4	<i>patch ellipsoïdale</i>	62
III.5.1.5	Comparaison entre les différents D_R en fonction de la charge pour les différentes formes de patch	63
III.5.2	Effet de l'épaisseur de l'adhésif sur la variation de la zone endommagée de l'adhésif	63
III.5.2.1	<i>patch rectangulaire</i>	64
III.5.2.2	<i>patch trapézoïdale</i>	65
III.5.2.3	<i>patch circulaire</i>	66
III.5.2.4	<i>patch ellipsoïdale</i>	67
III.5.2.5	Comparaison entre les différents D_R en fonction de l'épaisseur de l'adhésif pour les différentes formes de patch	68
III.5.3	Effet de l'épaisseur de patch sur la variation de la zone endommagée de l'adhésif	69
III.5.3.1	<i>patch rectangulaire</i>	69
III.5.3.2	<i>patch trapézoïdale</i>	70
III.5.3.3	<i>patch circulaire</i>	71
III.5.3.4	<i>patch ellipsoïdale</i>	72
III.5.3.5	Comparaison entre les différents D_R en fonction de l'épaisseur de patch pour les différentes formes de patch	73
III.5.4	Effet de module de cisaillement de l'adhésif sur la variation de la zone endommagée de l'adhésif	74

III.5.4.1	<i>patch rectangulaire</i>	75
III.5.4.2	<i>patch trapézoïdale</i>	76
III.5.4.3	<i>patch circulaire</i>	77
III.5.4.4	<i>patch ellipsoïdale</i>	78
III.5.4.5	Comparaison entre les différents D_R en fonction de module de cisaillement de l'adhésif pour les différentes formes de patch	79
CHAPITRE IV- ANALYSE DE LA REPARATION DES PLAQUES CORRODEES AVEC FISSURE HORIZONTALE (MODE I)		81
IV.1 INTRODUCTION		82
IV.2 MODELE GEOMETRIQUE ET MAILLAGE DU CAS EN MODE I PUR		83
IV.3 RESULTATS ET DECISIONS		84
IV.3.1 Effet de la longueur de fissure sur la variation de la zone endommagée de l'adhésif		84
IV.3.1.1	<i>patch rectangulaire</i>	84
IV.3.1.2	<i>patch trapézoïdale</i>	86
IV.3.1.3	<i>patch circulaire</i>	87
IV.3.1.4	<i>patch ellipsoïdale</i>	88
IV.3.1.5	Effet de la longueur de fissure sur la variation de rapport de zone endommagée de l'adhésif	89
IV.3.1.6	Effet de la longueur de fissure sur la variation FIC	90
IV.3.1.7	Facteur d'intensité de contrainte en fonction du rapport de la zone endommagée D_R pour les différentes formes du patch	91
IV.3.2 effet de la charge sur l'endommagement de l'adhésif		91
IV.3.2.1	<i>patch rectangulaire</i>	92
IV.3.2.2	<i>patch trapézoïdale</i>	93
IV.3.2.3	<i>patch circulaire</i>	94
IV.3.2.4	<i>patch ellipsoïdale</i>	95
IV.3.2.5	Effet de la charge appliquée sur la variation de rapport de zone endommagée de l'adhésif	96
IV.3.2.6	Effet de la charge appliquée sur la variation FIC	97
IV.3.2.7	Facteur d'intensité de contrainte en fonction du rapport de la zone endommagée D_R pour les différentes formes du patch	98
IV.3.3 Effet de l'épaisseur de l'adhésif sur son l'endommagement		99
IV.3.3.1	<i>patch rectangulaire</i>	99
IV.3.3.2	<i>patch trapézoïdale</i>	101
IV.3.3.3	<i>patch circulaire</i>	102
IV.3.3.4	<i>patch ellipsoïdale</i>	103
IV.3.3.5	Effet de l'épaisseur de l'adhésif sur la variation de rapport de zone	104

endommagée de l'adhésif :	
IV.3.3.6	Effet de l'épaisseur de l'adhésif sur la variation FIC 105
IV.3.3.7	Facteur d'intensité de contrainte en fonction du rapport de la zone endommagée D_R pour les différentes formes du patch 105
IV.3.4	Effet de l'épaisseur de patch sur l'endommagement de l'adhésif 106
IV.3.4.1	<i>patch rectangulaire</i> 106
IV.3.4.2	<i>patch trapézoïdale</i> 108
IV.3.4.3	<i>patch circulaire</i> 109
IV.3.4.4	<i>patch ellipsoïdale</i> 110
IV.3.4.5	Effet de l'épaisseur de patch sur la variation de rapport de zone endommagée de l'adhésif 111
IV.3.4.6	Effet de l'épaisseur de patch sur la variation FIC 112
IV.3.4.7	Facteur d'intensité de contrainte en fonction du rapport de la zone endommagée D_R pour les différentes formes du patch 113
IV.3.5	Effet de module de cisaillement de l'adhésif sur l'endommagement de l'adhésif 114
IV.3.5.1	<i>patch rectangulaire</i> 114
IV.3.5.2	<i>patch trapézoïdale</i> 115
IV.3.5.3	<i>patch circulaire</i> 116
IV.3.5.4	<i>patch ellipsoïdale</i> 118
IV.3.5.5	Effet de module de cisaillement de l'adhésif sur la variation de rapport de zone endommagée de l'adhésif 119
IV.3.5.6	Effet de module de cisaillement de l'adhésif sur la variation FIC 120
IV.3.5.7	Facteur d'intensité de contrainte en fonction du rapport de la zone endommagée D_R pour les différentes formes du patch 121
<hr/>	
CHAPITRE V- ANALYSE DE LA REPARATION DES PLAQUES CORRODEES	123
AVEC FISSURE INCLINEE (MODE II)	
<hr/>	
V.1	INTRODUCTION 124
V.2	MODELE GEOMETRIQUE EN MODE II (MIXTE) 124
V.3	RESULTATS ET DECISIONS 125
V.3.1	Effet de l'inclinaison de fissure sur l'endommagement de l'adhésif 125
V.3.1.1	<i>patch rectangulaire</i> 126
V.3.1.2	<i>patch trapézoïdale</i> 127
V.3.1.3	<i>patch circulaire</i> 128
V.3.1.4	<i>patch ellipsoïdale</i> 130
V.3.1.5	Effet de l'inclinaison de fissure sur la variation de rapport de zone endommagée de l'adhésif 131
V.3.1.6	Effet de l'inclinaison de fissure sur la variation FIC 131
V.3.2	Effet de la charge sur l'endommagement de l'adhésif 133
V.3.2.1	<i>patch rectangulaire</i> 133

V.3.2.2	<i>patch trapézoïdale</i>	134
V.3.2.3	<i>patch circulaire</i>	135
V.3.2.4	<i>patch ellipsoïdale</i>	136
V.3.2.5	Effet de la charge sur la variation de rapport de zone endommagée de l'adhésif	138
V.3.2.6	Effet de la charge sur la variation FIC	139
V.3.2.7	Facteur d'intensité de contrainte en fonction du rapport de la zone endommagée D_R pour les différentes formes du patch	139
V.3.3	Effet de l'épaisseur de l'adhésif sur l'endommagement de l'adhésif	140
V.3.3.1	<i>patch rectangulaire</i>	141
V.3.3.2	<i>patch trapézoïdale</i>	142
V.3.3.3	<i>patch circulaire</i>	143
V.3.3.4	<i>patch ellipsoïdale</i>	144
V.3.3.5	Effet de l'épaisseur de l'adhésif sur la variation de rapport de zone endommagée de l'adhésif	145
V.3.3.6	Effet de l'épaisseur de l'adhésif sur la variation FIC	146
V.3.3.7	Facteur d'intensité de contrainte en fonction du rapport de la zone endommagée D_R pour les différentes formes du patch	147
V.3.4	effet de l'épaisseur de patch sur l'endommagement de l'adhésif	148
V.3.4.1	<i>patch rectangulaire</i>	148
V.3.4.2	<i>patch trapézoïdale</i>	149
V.3.4.3	<i>patch circulaire</i>	150
V.3.4.4	<i>patch ellipsoïdale</i>	151
V.3.4.5	Effet de l'épaisseur de patch sur la variation de rapport de zone endommagée:	153
V.3.4.6	Effet de l'épaisseur de patch sur la variation FIC	153
V.3.4.7	Facteur d'intensité de contrainte en fonction du rapport de la zone endommagée D_R pour les différentes formes du patch	154
V.3.5	Effet de module de cisaillement de l'adhésif sur l'endommagement de l'adhésif	155
V.3.5.1	<i>patch rectangulaire</i>	155
V.3.5.2	<i>patch trapézoïdale</i>	156
V.3.5.3	<i>patch circulaire</i>	158
V.3.5.4	<i>patch ellipsoïdale</i>	159
V.3.5.5	Effet de module de cisaillement de l'adhésif sur la variation de rapport de zone endommagée de l'adhésif	160
V.3.5.6	Effet de module de cisaillement de l'adhésif sur la variation FIC	161
V.3.5.7	Facteur d'intensité de contrainte en fonction du rapport de la zone endommagée D_R pour les différentes formes du patch	162
<hr/> CONCLUSION GENERALE		164
<hr/> ANNEXES		169
<hr/>		

INTRODUCTION GENERALE

La corrosion est un phénomène de dégradation des matériaux (métalliques en général) par l'environnement. Il s'agit donc d'un phénomène qui concerne la plupart des secteurs industriels notamment l'industrie aéronautique, le secteur nucléaire, l'automobile et les industries chimique et pétrochimique. Les enjeux économiques sont donc considérables. La NACE rapporte qu'aux états unis, les coûts directs et indirects de la corrosion ont été estimés à environ 300 milliards de dollars. Dans le contexte de l'allègement des structures pour les secteurs du transport, aérien notamment, les alliages d'aluminium restent une valeur sûre malgré le fait que, ces dernières années, le nombre de travaux de recherche autour des matériaux composites ait fortement progressé. A la différence du dernier Boeing (B787) composé à 50 % de matériaux composites et ne contenant quasiment plus d'alliages d'aluminium, l'Airbus A380 est encore composé à 60 % de ces alliages.

Pour l'industrie aéronautique, les contraintes en termes de résistance mécanique sont prépondérantes. Les alliages d'aluminium utilisés pour ces applications sont majoritairement des alliages de la série 2000 (avec le cuivre comme élément d'alliage principal). L'alliage d'aluminium 2024 est traditionnellement utilisé pour le fuselage des avions civils entre autres applications. Cependant, la microstructure de cet alliage le rend particulièrement sensible à certains phénomènes de corrosion localisée comme la corrosion par piqûres ou la corrosion intergranulaire. Pour ces raisons, cet alliage n'est jamais employé nu mais traité (anodisé, colmaté puis revêtu). Les principales raisons de cette sensibilité à la corrosion localisée de l'alliage 2024 sont liées à la présence de particules intermétalliques de composition et donc de propriétés électrochimiques très différentes de celles de la matrice d'aluminium. Ces différentes phases induisent des phénomènes de microcouplage, bien souvent à l'origine de la corrosion localisée.

Le critère de la zone endommagée a été proposé par [1-2] pour analyser l'endommagement dans l'adhésif. Ce critère suppose que le matériau se rompe une fois que la contrainte mesurée dépasse la résistance ultime du matériau. Sheppard et al. [2] ont introduit la notion de la zone endommagée pour une plaque d'aluminium réparée avec un simple et double recouvrement. Cette zone est définie par une surface, où les déformations de Von Mises dépassent la déformation maximale admissible et la charge de rupture des joints de colle a été déterminée expérimentalement. L'endommagement dans la couche adhésive se produit lorsque les déformations ou les contraintes dans l'adhésif sont localement plus grandes que les propriétés ultimes des matériaux. La rupture dans l'adhésif ne se produit pas par la propagation des fissures dans le substrat, mais plutôt par l'initiation et la propagation de

la zone endommagée dans la couche contenant des défauts tels que les microfissures ou les vides [3]. Récemment, Hossein Hosseini [4] a établi qu'à mesure que l'épaisseur de patch est augmentée, la propagation de fissure en fatigue de la plaque réparée augmente également. La corrosion dans les organes en acier exposés particulièrement dans l'environnement salin peut également mener à la réduction de facteur d'estimation. La perte de capacité dans la poutre en acier d'un pont dû à la corrosion a été étudiée pour la charge statique par Kayeser et Nowak [5, 6]. Nous pouvons citer plusieurs auteurs, qui discutent ce phénomène de renforcement Fahad et autres, Congqi et autres, Kurklu et autres, Faiz et autres. [7, 8, 9,10], et nous notons également (Fournel et autres, Bo Dao et autres.) [11,12] parlent de l'effet de l'eau sur la structure. Apalak et al [13] ont utilisé la théorie de la zone endommagée pour analyser les effets des contraintes thermiques dans le joint de colle. Ils ont montré que l'endommagement peut être prévu dans les composites ainsi que dans l'adhésif lors d'utilisation des adhésifs trempés. Ban et al. [14] ont introduit des modifications sur le modèle de la zone d'endommagement de Sheppard et al. [2]. Le rapport de la zone endommagée a été suggéré pour la prédiction de la charge de rupture du joint de colle. Pour l'adhésif époxy FM 73, il a été montré que le rapport de la zone endommagée correspondant à la défaillance de cet adhésif est de 0,247.

Ce mémoire de thèse s'articule autour de six chapitres :

Le chapitre I présente une synthèse bibliographique permettant de faire un état des connaissances concernant les différents points abordés lors de ce travail : l'aluminium et ses alliages, propriétés d'aluminium et ses alliages, Corrosion de l'aluminium et de ses alliages et les différentes formes de corrosion localisée et en fin Méthodes locales d'étude de la corrosion des alliages d'aluminium.

Le chapitre II est consacré à la présentation de la Technologie de réparation des structures collées par patches et les Mécanismes de l'adhésion et ensuite présentation de logiciel «**ABAQUS**».

Le chapitre III porte sur la corrosion de l'alliage d'aluminium 2024 en absence de fissure. Ce chapitre consiste à présenter les principaux résultats de simulation sur la caractérisation de l'alliage 2024 en corrosion et évolution de la zone endommagée de l'adhésif pour des différentes formes de patch sous les effets suivants. L'influence du

chargement mécanique sans fissure est d'abord considérée, puis celle des épaisseurs de l'adhésif et du patch seront analysées dans ce chapitre. En fin on a étudié l'effet du module de cisaillement de l'adhésif sur la variation de sa zone endommagée.

En chapitre IV l'étude a été conduite en vue d'analyser le comportement d'une structure fissurée et réparée par patch en composite. Plusieurs paramètres ont été mis en évidence sur la qualité de réparation à savoir les propriétés mécaniques de la plaque, du patch et de l'adhésif ainsi que leurs épaisseurs. Dans cette partie le même modèle géométrique considéré est celui de la plaque en aluminium 2024 T3 avec une même corrosion mais avec une fissure de longueur (a) horizontale (en mode I), en gardant les mêmes propriétés mécaniques et géométriques du patch ainsi que celles de l'adhésif. L'influence des propriétés mécaniques du patch, de l'adhésif, ainsi que leurs épaisseurs, et la taille de la fissure sont mises en évidence sur les variations de l'étendue de la zone endommagée de l'adhésif. Enfin l'étude de la variation du facteur d'intensité de contraintes sous les effets précédents et la comparaison du rapport de la zone endommagée de l'adhésif pour les différentes formes de patch (rectangle, trapèze, cercle et ellipse) sont faites.

Le chapitre V porte sur une analyse numérique par la méthode des éléments finis tridimensionnelle, de la réparation par patch en composite d'une structure métallique fissurée avec une fissure inclinée (en mode mixte). L'influence de l'inclinaison de la fissure, de l'épaisseur du patch et de l'adhésif, ainsi que son module de cisaillement sont mis en évidence sur les variations du facteur d'intensité de contrainte en pointe de fissure réparée par patch. On a étudié le comportement de la zone endommagée et le rapport de la zone endommagée.

Les points forts de l'étude sont rappelés en conclusion de ce mémoire et le choix de la forme optimale pour la réparation de la fissure et diminution de la zone endommagée entre les différentes formes de patch.

CHAPITRE I

LES ALLIAGES D'ALUMINIUM ET CORROSION

Même si, à l'heure actuelle, l'industrie aéronautique lance de nombreux travaux de recherche autour des matériaux composites, les alliages métalliques et notamment les alliages d'aluminium, restent incontournables. Dans l'objectif de réaliser de nouveaux alliages répondant à des critères de durabilité toujours plus drastiques, une compréhension approfondie des mécanismes d'endommagement est indispensable. Les alliages d'aluminium de la série 2000 sont largement utilisés pour des applications mécaniques, l'alliage 2024 étant un des précurseurs pour les applications aéronautiques. La microstructure de cet alliage sera détaillée, ainsi que les aspects généraux concernant sa sensibilité à la corrosion localisée. Les techniques électrochimiques classiques permettent d'avoir accès au comportement global du matériau. Elles restent cependant relativement limitées quant à la dissociation des phénomènes locaux associés à la corrosion. Les études concernant ces phénomènes semblent à la fois s'orienter vers des techniques de caractérisation électrochimique et morphologique avec une résolution de plus en plus haute, mais aussi vers l'étude de matériaux modèles permettant d'isoler et de simuler un ou plusieurs phénomènes associés à la corrosion localisée tels que les phénomènes de microcouplage galvanique.

Ce chapitre présente donc les alliages d'aluminium et l'alliage 2024 en particulier, avant de détailler les principales techniques d'étude de la corrosion localisée ainsi que les moyens mis en œuvre de manière à simuler les phénomènes de microcouplage galvanique au sein de l'alliage 2024.

I.1 LES ALLIAGES D'ALUMINIUM DE LA SERIE 2000 :

I.1.1 Généralités :

L'aluminium est présent en grande quantité dans la croûte terrestre, avec une masse de minerai représentant 8% de la masse de cette dernière. Cependant, il a fallu attendre la généralisation de l'électricité pour voir la production d'aluminium se développer réellement. En effet, les procédés d'électrolyse de l'alumine, issue de la bauxite, sont relativement coûteux en énergie. A l'heure actuelle, l'aluminium est utilisé dans de nombreux secteurs comme les transports, l'emballage, la construction ou encore les biens de consommation. Sa généralisation vient des propriétés remarquables du métal mais aussi de la variété de ses alliages. Sans être exhaustif,

quelques unes de ses propriétés peuvent tout de même être rappelées. Sa masse volumique est de 2700 kg/m^3 , il est donc environ 3 fois plus léger que l'acier. Il possède une bonne conductivité électrique (environ deux tiers de celle du cuivre), et peut donc être utilisé comme câblage électrique aérien. L'aluminium et ses alliages, suivant leur composition, ont une bonne conductivité thermique (60% de celle du cuivre). Cette propriété est mise à profit par les équipementiers de l'automobile pour les échangeurs thermiques. Enfin, une autre propriété remarquable, qui lui vaut certainement son renom avec sa légèreté, est sa tenue à la corrosion dans son état pur ou faiblement allié. Cette propriété lui vient des caractéristiques de l'oxyde d'aluminium, l'alumine. Cet oxyde est l'un des plus stables (son enthalpie de formation est très négative contrairement à celle de l'oxyde de fer), il se forme donc quasi instantanément. De plus l'alumine forme une couche compacte et peu conductrice, jouant le rôle de véritable protecteur du métal contre la corrosion. La résistance à la corrosion est cependant très dépendante du type d'alliage (voir paragraphe I.1).

Les éléments d'alliage (de teneurs pondérales de 1 à 7%) donnent les propriétés générales de l'alliage communes au sein de chaque famille d'alliage. Des éléments supplémentaires « d'addition » sont utilisés, dans des teneurs moindres, de manière à donner de nouvelles propriétés ou à en renforcer certaines.

Il existe huit systèmes d'alliages dits de corroyage par opposition aux alliages de moulage en raison des produits ou demi-produits (tôle, barre...) obtenus par déformation. Ils sont désignés de 1000 à 8000, le premier chiffre étant associé à un élément d'alliage, comme on peut le voir dans le **Tableau I.1**.

Tab I.1 : Désignation des alliages de corroyage [106].

	Durcissement par écrouissage				structural			
Famille	1000	3000	5000	8000	2000	4000	6000	7000
Eléments d'alliage	Aucun	Mn	Mg	autres (Si+Fe)	Cu	Si	Mg+Si	Zn+Mg
Etendue de la teneur (% mass.)	∅	0,5-1,5	0,5-5	Si : 0,3-1 Fe : 0,6-2	2-6	0,8-1,7	Mg : 0,5-1,5 Si : 0,5-1,5	Zn : 5-7 Mg : 1-2
Eléments d'addition	Cu	Mg, Cu	Mn, Cu	divers	Si, Mg		Cu, Cr	Cu
Résistance mécanique R _m (MPa)	50-160	100-240	100-340	130-190	300-480	150-400	200-320	310-600

Les alliages aluminium-cuivre (de la série 2000) sont des alliages à durcissement structural par opposition aux alliages à durcissement par écrouissage. Le cuivre donne, de manière générale, une bonne résistance mécanique, caractéristique de cette série d'alliage. Ces propriétés mécaniques viennent d'une microstructure particulière, obtenue par traitements thermomécaniques. Ce sont ces traitements thermomécaniques qui définissent donc d'une certaine manière les propriétés notamment mécaniques, des alliages de la série 2000.

I.1.2 Propriétés d'aluminium et ses alliages :

L'utilisation de l'aluminium est en plein devenir grâce à ses nombreux atouts:

Légèreté

L'aluminium est léger et de plus présente des caractéristiques mécaniques très élevées. Il constitue de ce fait 80% du poids des avions actuels. Il est très utilisé aussi dans les transports terrestres rapides TGV et maritimes, et de plus en plus dans l'automobile. Bien que, en tonnage, la production d'aluminium ne représente qu'un peu plus de 2% de celles des aciers, ce métal (et les alliages qui en dérivent) arrive en seconde position en ce qui concerne la production et l'utilisation des matériaux

métalliques. L'expérience montre que l'allégement obtenu avec une structure en alliage d'aluminium peut atteindre 50% par rapport à une structure équivalente en acier ordinaire ou en acier inoxydable.

Conductivité électrique et thermique

L'aluminium offre une excellente conductivité électrique pour un poids inférieur à celui du cuivre. C'est pour cela qu'on le retrouve de plus en plus pour les lignes à haute tension.

A l'instar du cuivre, l'aluminium, en plus d'une bonne conductivité électrique procure également un fort pouvoir caloporteur ce qui explique par exemple sa présence dans les dispositifs de refroidissements [106].

Tenue à la corrosion

L'aluminium et les alliages ont en général une bonne tenue à la corrosion atmosphérique, en milieu marin, urbain, industriel. L'aluminium est utilisé de façon courante par les architectes, aussi bien dans les édifices publics (Grande Arche de la Défense, Pyramide du Louvre..) que pour les habitations individuelles. Tout en offrant de nombreuses possibilités de formes et de traitements de la surface, les structures de bâtiment en aluminium demandent peu d'entretien et résistent bien dans le temps. Cette bonne tenue à la corrosion alliée à sa faible densité lui a permis un développement des applications de l'aluminium dans le bâtiment. Les utilisateurs disposent ainsi:

I. d'une durée de vie des équipements accrue. Il n'est pas rare en effet de trouver intacts des toitures, des bardages, des équipements de ports de plaisance, des bateaux..., vieux de plusieurs décennies.

J. d'un entretien facilité, même sans protection ad hoc (ni peint, ni anodisé)

K. d'une esthétique pérenne. Les produits de corrosion de l'aluminium sont blancs et propices à l'enduction d'une peinture [107].

Aptitude aux traitements de surface

Les traitements de surface sur l'aluminium ont plusieurs objectifs parmi lesquels:

➤ la protection de certains alliages, quand leur résistance à la corrosion « naturelle » est jugée insuffisante,

- la pérennité de l'aspect en évitant la corrosion par piqûres ou le noircissement,
- la modification des propriétés de surface comme la dureté superficielle,
- la décoration du métal par anodisation puis colmatage pigmentaire,

Diversité des alliages d'aluminium

Les progrès permanents de la métallurgie de l'aluminium ont abouti à proposer une gamme étendue de nuances, bien adaptée aux utilisations envisagées [108]. Tellement nombreux, les alliages d'aluminium sont regroupés conformément à une nomenclature rigoureuse et complexe. Ainsi le métal pur non allié constitue la série 1000 et les autres séries dépendent de la nature de l'élément d'alliage principal (2000 pour le Cu, 3000 pour le Mn, 4000 pour le Si, 5000 pour le Mg, 6000 pour le Mg et le Si, 7000 pour le Zn) [106]. D'une famille à une autre les propriétés caractéristiques sont très variables : les alliages de la famille 5000 sont soudables résistants à la corrosion tandis que ceux de la famille 2000 ont des caractéristiques mécaniques plus élevées, mais sans possibilité de soudage par les procédés classiques, et avec une sensibilité marquée à la corrosion atmosphérique [109].

Les alliages de la série 3000 (composant du radiateur de chauffage automobile) se caractérisent par [110] :

- une résistance mécanique faible mais qui peut être augmentée par écrouissage, ou addition de magnésium,
- une bonne aptitude à la mise en forme, au soudage et au brasage,
- une excellente résistance à la corrosion dans des conditions normales.

Recyclage

L'aluminium est un des métaux dont le recyclage est le plus attractif tant sur le plan énergétique que sur le plan économique. La refusion de l'aluminium ne représente que 5% de l'énergie nécessaire à l'élaboration du métal à partir du minerai. L'expérience de plusieurs dizaines d'années de récupération des « vieux métaux » montre que les déchets d'aluminium ont toujours une valeur marchande supérieure à celle des ferrailles [111].

I.1.3 Corrosion de l'aluminium et de ses alliages :

I.1.3.1 principes généraux :

La corrosion est un processus interfacial, de manière générale entre un métal et son environnement. La corrosion aqueuse met en jeu des réactions hétérogènes entre le métal et l'électrolyte en contact avec celui-ci. Il s'agit dans la plupart des cas de processus électrochimiques. Le potentiel standard de l'aluminium est très électronégatif. Il vaut -1.66 V/ENH (Volt par rapport à l'électrode normale à hydrogène). Il s'agit donc d'un des métaux les plus faciles à oxyder. En contact avec un environnement oxydant tel que l'air ou l'eau, l'oxyde d'aluminium se forme de manière quasi instantanée. Cet oxyde étant très stable (compact et peu conducteur), il fait de l'aluminium un métal très peu sensible à la corrosion généralisée. Le diagramme de Pourbaix ou diagramme d'équilibre potentiel-pH (*Figure I.1*), donne une information sur l'état d'équilibre de l'aluminium dans l'eau chimiquement pure à 25°C en fonction du pH et de son potentiel.

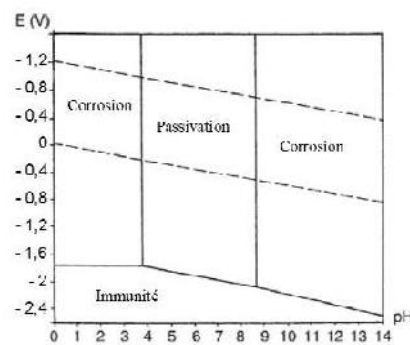
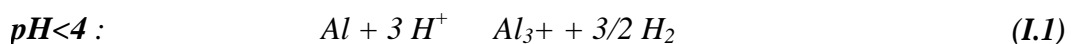


Fig. I.1 : Diagramme de Pourbaix du système Al-H₂O à 25°C.

Il apparaît quatre domaines définissant trois états possibles de l'aluminium dans l'eau à 25°C :

➤ La corrosion ou dissolution de l'aluminium, correspondant à un degré d'oxydation +III. Ce domaine est défini pour des valeurs de pH inférieures à 4 et supérieures à 9. L'importante concentration en H⁺ ou en OH⁻ permet respectivement les réactions électrochimiques (I-1) et (I-2) :



La concentration en espèces dissoutes est par définition supérieure à 10^{-6} M.

➤ Le domaine de passivation est compris entre les pH 4 et 9, et est déterminé par la stabilité de l'oxyde ou hydroxyde d'aluminium au degré d'oxydation +III. Les faibles concentrations en H^+ et OH^- ne permettant pas les réactions (I-1) et (I-2),

➤ L'immunité est le domaine de stabilité de l'aluminium au degré d'oxydation zéro. Il correspond à des potentiels très négatifs, qu'il n'est pas possible d'atteindre en solution aqueuse. La concentration en espèces dissoutes est par définition inférieure à 10^{-6} M.

Les diagrammes de Pourbaix ne tiennent compte que des équilibres thermodynamiques et en aucun cas des aspects cinétiques. Ils ne rendent donc pas compte des vitesses de corrosion.

I.1.3.2 films d'oxyde d'aluminium :

L'aluminium est un métal actif qui se recouvre en quelques millisecondes de son oxyde [106]. Cette première couche correspond, comme il est représenté en *Figure I.2*, à la couche dite barrière pour ses propriétés peu conductrices (semi-conducteur). Il s'agit de la forme native, alumine corindon de formule chimique Al_2O_3 , formée à l'air et non hydratée. D'après la réaction II.3, c'est la réduction de l'oxygène dissout qui favorise la croissance de ce film d'oxyde. Une deuxième couche peut donc se former « au dessus » de la précédente ; elle correspond à une couche d'oxyde hydratée. L'hydratation par une molécule d'eau correspond à la boehmite ($Al_2O_3 \cdot H_2O$). La bayerite et hydrargillite (ou gibbsite), sont elles trihydratées ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$) et correspondent aux formes les plus stables en solution aqueuse [112].

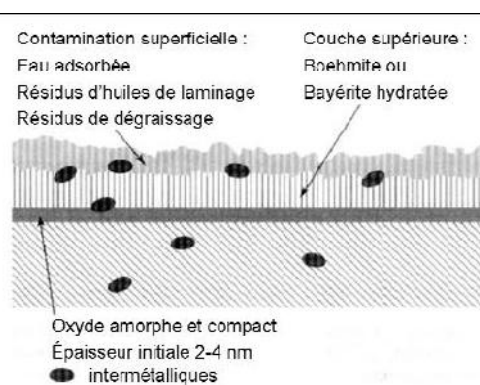


Fig. I.2 : Couches et adsorption sur le film d'oxyde d'aluminium [113].

Le comportement électrochimique de l'aluminium est donc lié à celui de son oxyde et notamment à sa stabilité. Il en va de même pour les alliages d'aluminium, dont le film d'oxyde peut présenter certaines hétérogénéités induites ou non par les éléments d'alliages. Dans les domaines de pH inférieurs à 4 et supérieurs à 9, on parle de corrosion généralisée ou uniforme, qui se caractérise par une perte uniforme d'épaisseur sur toute la surface. En revanche, dans le domaine de pH compris entre 4 et 9, dit de passivation, l'expérience montre que l'aluminium et notamment ses alliages peuvent subir une autre forme de corrosion dite « localisée ».

I.1.3.3 différentes formes de corrosion localisée :

La corrosion est dite localisée lorsque les zones cathodiques et anodiques sont physiquement séparées, ce qui n'est pas le cas pour la corrosion généralisée. Elle peut être induite par des hétérogénéités de microstructure du matériau, par certaines espèces agressives présentes dans le milieu électrolytique ou encore par des phénomènes de dépôts ou de confinement de l'électrolyte à la surface du matériau. Sont exposées ici les principales formes de corrosion localisée, à l'origine de la majorité des cas.

➤ **La corrosion galvanique** est une forme de corrosion localisée dans la zone de contact entre deux matériaux de potentiels électrochimiques différents. Ce phénomène, pour survenir, nécessite outre un contact électrique entre les deux matériaux (courant électronique), un contact électrolytique (courant ionique). Ceci peut être observé par mise en contact de l'aluminium avec un métal plus noble comme l'acier par exemple, au sein d'un électrolyte ou atmosphère humide. C'est aussi le cas en général des alliages, contenant des phases intermétalliques de potentiel électrochimique différent de celui de la matrice. On parle alors de phénomènes de microcouplage galvanique. La corrosion galvanique provoque la dissolution accélérée de l'élément le moins noble du couple, par polarisation anodique de ce dernier.

➤ **La corrosion par piqûres** des métaux passivables est déclenchée par la présence d'ions halogénures associés à des espèces oxydantes telles que les protons ou l'oxygène dissous de la solution. Elle a été décrite comme un mécanisme en dix étapes [114]. La *Figure I.3* est une représentation schématique de la corrosion par piqûres influencée par une particule intermétallique, siège de la réduction de l'oxygène.

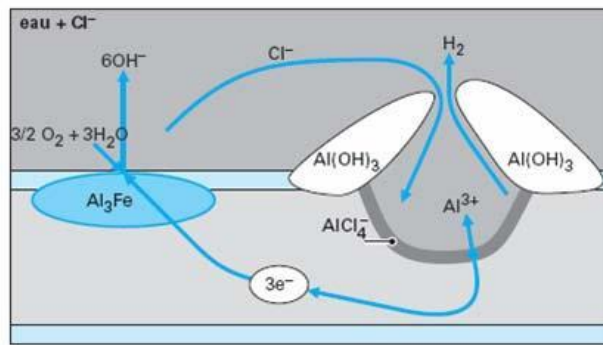


Fig. I.3 : Propagation autocatalytique d'une piqûre [115].

Etape 1 : Adsorption des ions chlorures au niveau des défauts du film d'oxyde puis migration dans le film.

Etape 2 : Réduction du dioxygène dissous et charge de la capacité de double couche.

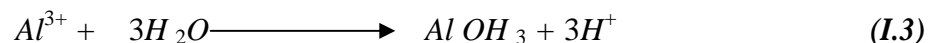
Etape 3 : Rupture du film aux niveaux de défauts.

Etape 4 : Oxydation de l'aluminium et formation de complexes chlorurés (AlCl_4^-) et hydroxychlorurés ($\text{Al}(\text{OH})_2\text{Cl}$).

Etape 5 : Dissolution des complexes chlorurés et repassivation de la piqûre.

Etape 6 : Enrichissement en chlorure en fond de piqûre et formation d'une couche stable de chlorures, oxychlorures.

Etape 7 : Hydrolyse des chlorures d'aluminium et acidification du fond de la piqûre jusqu'à des valeurs de pH inférieures à 3. La réaction peut être simplifiée ainsi :



Etape 8 : Diffusion des ions Al^{3+} depuis le fond de la piqûre vers l'ouverture et précipitation en $\text{Al}(\text{OH})_3$ au contact du milieu plus alcalin (sur les parois latérales sièges de la réaction cathodique et donc d'une certaine alcalinisation).

Etape 9 : Entretien de la piqûre par dissolution de l'aluminium dans la solution acide de chlorure d'aluminium et production d'hydrogène limitant l'accumulation des chlorures et repoussant les produits de corrosion vers l'ouverture de la piqûre.

Etape 10 : Repassivation de la piqûre par obstruction ou perte de stabilité de la couche de chlorure (retour à l'étape 5).

➤ **La corrosion filiforme** peut être observée pour les matériaux revêtus (protection par peinture) ou recouvert d'un film épais et peu adhérent, comme c'est le

cas pour le magnésium par exemple. Elle s'initie au niveau d'un défaut du revêtement et progresse sous forme de filaments. La propagation est due à une hétérogénéité du milieu entre la tête active et la queue inerte d'un filament. Elle est expliquée soit par des processus de dissolution anodique soit de délaminage cathodique.

➤ **La corrosion caverneuse** est due à la formation d'une pile à aération différentielle entre un milieu confiné (appelé « crevasse » ou « caverne ») et la solution extérieure. L'aluminium et en général les alliages d'aluminium sans cuivre sont peu sensibles à la corrosion caverneuse.

➤ **La corrosion intergranulaire** est, au même titre que la corrosion exfoliante et sous contrainte, une forme de corrosion structurale. Ce sont les hétérogénéités de microstructure qui en sont le moteur. En ce qui concerne les alliages de la série 2000, la sensibilité à la corrosion intergranulaire peut être induite par la précipitation aux joints de grains de particules riches en cuivre. Cette précipitation, se faisant à partir des atomes de cuivre de la solution solide, va induire une diminution de la concentration en cuivre de la zone adjacente aux joints de grains. Cette zone est dépourvue en cuivre et a donc un potentiel plus cathodique que les particules riches en cuivre des joints de grains mais aussi plus cathodique que la matrice d'aluminium elle-même. Un couplage galvanique peut donc avoir lieu, et aura donc comme conséquence la dissolution préférentielle et accélérée de cette zone adjacente aux joints de grains. Cette zone est par ailleurs appelée PFZ (Precipitate Free Zone) ou « dilute free zone ». En effet lors des étapes de précipitation structurale suivant la trempe, cette zone est dépourvue en soluté cuivre et ne sera donc pas le siège de la précipitation durcissante caractéristique de ces alliages.

➤ **La corrosion exfoliante** ou feuilletante peut, dans le cas des alliages d'aluminium de la série 2000, venir dans la continuité de la corrosion intergranulaire. En effet, pour les produits transformés (laminés ou filés) la structure granulaire forme des plans parallèles à la direction de transformation. Ces plans peuvent être écartés par l'expansion volumique dû aux produits de corrosion, comme des feuillets se délaminant.

➤ **La corrosion sous contrainte** est un mode d'endommagement de matériaux exposés à un environnement corrosif et soumis à une contrainte mécanique. Ce mode

de corrosion est caractérisé par la propagation de fissures perpendiculairement à la contrainte mécanique et en général le long des joints de grains dans le cas des alliages d'aluminium. La propagation de ces fissures de corrosion sous contrainte peut être décrite selon deux mécanismes [115] : la propagation électrochimique et la fragilisation par l'hydrogène. Le premier mécanisme est relativement intuitif, la contrainte jouant le rôle d'accélérateur de la corrosion intergranulaire détaillée précédemment. La dissolution anodique des joints de grains où zones adjacentes est accentuée par la contrainte mécanique qui empêcherait notamment une repassivation en pointe de fissure par concentration des contraintes [116] et déformation plastique. Un second mécanisme mettrait en jeu la fragilisation par l'hydrogène [117, 25]. Les réactions de dissolution de l'aluminium (I-1) et (I-2) et de tout métal dans l'eau, produisent de l'hydrogène (produit de la réaction cathodique de réduction de l'eau). En pointe de fissure, l'hydrogène peut s'insérer dans le métal sous forme atomique, diffuser et s'accumuler dans les zones de déformation plastique où il est plus soluble. L'hydrogène va ensuite accentuer la décohésion intergranulaire et favoriser la propagation des fissures de corrosion sous contrainte.

I.2 METHODES LOCALES D'ETUDE DE LA CORROSION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM :

I.2.1 Introduction :

L'objectif de ce chapitre est multiple. Il s'agira de présenter l'état de l'art des résultats concernant la réactivité des particules intermétalliques de l'alliage 2024, en particulier les particules de phase S, mais aussi de manière indirecte d'exposer les différentes méthodologies et techniques d'études de manière à envisager les techniques les plus judicieuses. Deux grands axes seront présentés:

- les méthodes locales de caractérisation morphologique et électrochimique,
- Les matériaux modèles de simulation des phénomènes locaux.
-

La littérature est très riche de travaux concernant la corrosion localisée de l'alliage 2024, et les phénomènes sont étudiés par de nombreuses techniques apportant des points de vue différents. Les techniques locales présentées seront divisées en trois groupes : celles apportant une caractérisation électrochimique, celles permettant

l'acquisition de la morphologie de surface à haute résolution et enfin celles associant les deux caractérisations.

La problématique de la corrosion localisée par microcouplages galvaniques au niveau des particules intermétalliques est commune non seulement aux alliages d'aluminium mais aussi à d'autres alliages tels que certains aciers. Pour cette raison, certains résultats concernant des alliages autres que l'alliage 2024 lui-même, mais présentant un intérêt d'ordre méthodologique, pourront être présentés ici.

I.2.2 Caractérisation électrochimique locale :

La caractérisation de l'électrochimie locale est un réel enjeu scientifique, technologique et économique dans de nombreux domaines tels que l'énergie (les matériaux d'électrodes), la santé (puces à ADN) mais aussi dans le domaine de la durabilité des matériaux. La compréhension des mécanismes d'endommagement permettrait de mieux les parer. Une telle caractérisation des phénomènes de corrosion localisée peut être abordée de manières différentes. Une des voies entreprises consiste à localiser l'électrolyte à la surface de l'échantillon de manière à n'exposer que la zone désirée et à pouvoir mettre en place la majorité des techniques électrochimiques classiques. Les barrières technologiques repoussées grâce aux avancées en microscopie en champ proche ont permis d'envisager de nouvelles solutions de miniaturisation de sondes locales permettant de caractériser des objets de plus en plus petits.

I.3.2.1 microcellule électrochimique à capillaire :

L'objectif de la microcellule électrochimique à capillaire est de localiser l'électrolyte aux endroits désirés. Après avoir été utilisées par les biologistes pour des mesures de potentiels intra et extra cellulaires, les techniques utilisant un microcapillaire ont été introduites dans les années 90 pour des applications à la corrosion. Il s'agissait au départ de placer une goutte d'électrolyte à la surface d'un échantillon et d'y placer les électrodes de mesures. Les évolutions ont abouti à la localisation de l'électrolyte à la surface de l'échantillon par l'intermédiaire d'un microcapillaire muni d'un joint en silicone, comme on peut le voir sur la *Figure I.4*.

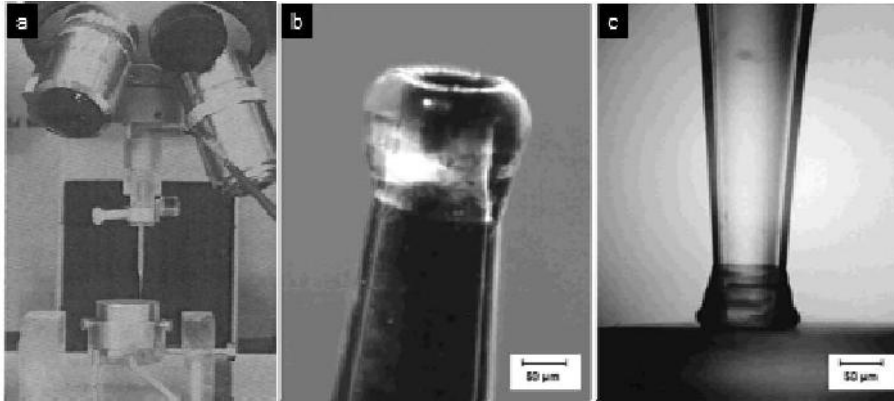


Fig. I.4 : Microcellule électrochimique de Suter et al. [101], vue générale (a), extrémité du microcapillaire de 100 µm recouverte d'un joint en silicone (b-c).

Les auteurs ont étudié le rôle des particules intermétalliques de l'alliage 2024-T3 et notamment les mécanismes d'initiation de la corrosion par piqûres [15]. Ils ont montré, que ce soit pour l'aluminium pur ou pour l'alliage 2024, que le potentiel de piqûre d'une surface de l'ordre d'un cm² était 300 mV plus négatif que celui d'une surface de 100 µm². Ils attribuent ce résultat pour l'aluminium pur, à la probabilité de présence de défauts dans le film d'oxyde (origine de la corrosion par piqûres) plus faible pour une petite surface que pour une plus grande.

Cette technique permet donc d'étudier la réactivité de particules intermétalliques, et l'influence de la taille de la zone étudiée. Une plus grande dispersion des potentiels de piqûre est observée pour des surfaces exposées plus petites. Ceci peut s'expliquer par la représentativité des surfaces en termes de défauts à l'origine du phénomène d'initiation de la piqûre. Ceci pose donc un problème de reproductibilité de la mesure des potentiels de rupture.

I.2.2.2 microelectrode a PH :

La caractérisation d'un alliage d'aluminium 6061 a été réalisée par la méthode de la microélectrode à pH [16]. Les auteurs ont montré que le pH augmentait fortement à l'aplomb d'une inclusion de Al₃Fe. Ils ont attribué cette augmentation de pH à la réduction de l'oxygène, générant des ions OH⁻.

I.2.2.3 microscope électrochimique (SECM) :

Le microscope électrochimique (SECM) a été développé par Bard *et al.* en 1989 [17] (trois ans après l'arrivée du microscope à force atomique). Il est depuis, une des techniques incontournables de l'électrochimie locale. Son application à la corrosion n'est cependant pas triviale. En effet dans son mode « feedback », l'utilisation d'un médiateur redox est nécessaire, de manière à amplifier le signal en courant. Cette technique a tout de même été utilisée pour caractériser le comportement en corrosion de l'alliage 2024 [18] (**Figure I.5**). Les auteurs ont pu observer une activité hautement cathodique de la surface de l'alliage 2024. La comparaison des cartographies SECM avec des observations MEB leur a permis d'attribuer ces sites cathodiques aux particules intermétalliques. Ils envisagent donc la possibilité de mesurer le courant cathodique local associé à une seule particule. Les auteurs ont attiré l'attention sur la complémentarité de leurs travaux avec les travaux du groupe de Smyrl, couplant SECM et SNOM [19].

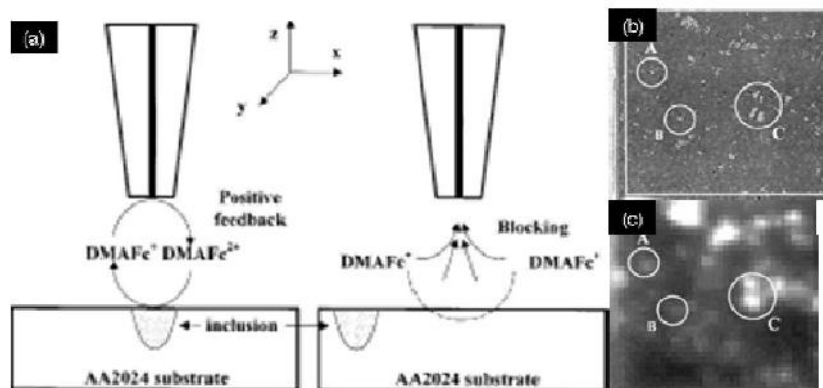


Fig. I.5 : Cartographie SECM, mécanisme par « feed back » positif ou bloquant (a), micrographie MEB (b) et SECM (c) d'un échantillon d'alliage 2024, $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ [18].

La limitation de cette technique tient entre autre à l'impossibilité de connaître le stade de corrosion des particules ainsi qu'à une résolution limitée par la mesure de courants très faibles. De plus cette technique est relativement intrusive ; il est en effet difficile de connaître l'influence du médiateur redox sur les inclusions ainsi que l'influence du confinement de l'électrolyte entre l'échantillon et la microélectrode.

I.2.2.4 technique de l'électrode vibrante (SVET) :

Cette technique permet la mesure de densités de courant locales en trois dimensions à la surface d'un système immergé dans une solution électrolytique. Elle a été utilisée par le groupe de Bierwagen pour caractériser les défauts de revêtement polymère conducteur en polypyrrole sur l'alliage 2024-T3 [20, 21, 22]. Cette technique a permis à ce même groupe de caractériser le comportement en corrosion de l'alliage 2024 [23]. La SVET a aussi permis d'étudier le couplage galvanique entre particules intermétalliques et matrice, et ce notamment pour les particules MnS de l'acier inox [24].

I.2.2.5 spectroscopie d'impédance électrochimique locale (SIEL) :

Il existe différentes manières de pouvoir réaliser des mesures locales d'impédance électrochimique. La première consiste en l'adaptation de la SVET à la polarisation AC [25]. La seconde utilise une sonde biélectrode [26, 27]. La résolution de l'ordre du cm^2 tient à la difficulté de mesurer de très faibles courants et à la nécessité d'utiliser des électrolytes de faible conductivité. Pour des raisons de résolution, il est donc exclu de pouvoir observer des particules individuelles d'alliages commerciaux. Cependant la technique a pu être utilisée pour caractériser des phénomènes de corrosion localisée sur du magnésium pur et des alliages de magnésium [28, 29]. La SIEL a aussi permis de caractériser le comportement électrochimique de zones soudées sur un acier [30]. Cette technique est aussi tout à fait adaptée à l'étude de matériaux modèles simulant le couplage galvanique. Seront présentés au paragraphe I.4.2.2, au sujet de la simulation des phénomènes de couplage au sein de l'alliage 2024, les résultats [31] concernant l'étude du couplage entre Al pur et Cu pur simulant le couplage galvanique entre les particules intermétalliques riches en cuivre et la matrice d'aluminium des alliages de la série 2000.

Il est à noter que, dernièrement, des spectres d'impédance ont pu être réalisés de manière localisée par l'intermédiaire d'un microcapillaire [32]. Les auteurs parlent alors de microimpédance. Cependant, la résolution est limitée par la taille du microcapillaire.

I.2.3 Caractérisation morphologique locale :

Sont décrits ici les résultats obtenus par des techniques permettant de réaliser l'acquisition de la topographie locale *in situ* ou *ex situ*, à l'échelle des particules intermétalliques.

I.2.3.1 microscope laser confocale (CLSM) :

La microscopie laser confocale est basée sur l'envoi d'une onde laser sur la surface d'un échantillon. Cette technique peut être utilisée en mode fluorescent, réfléchissant ou topographique. Dans ce dernier mode, Ilevbare *et al.* [33] ont montré que les particules de phase S de l'alliage 2024 se dissolvaient. Les mêmes auteurs ont étudié le phénomène de dissolution de la matrice adjacente aux particules [34]. Ils ont montré que ce phénomène avait lieu autour des particules de phase S mais aussi, dans une moindre mesure, autour des particules Al-Cu-Mn-Fe. La présence des ions chlorures ayant une influence sur la profondeur de la tranchée, les auteurs remettent en doute la seule explication de ce phénomène par réduction de l'oxygène induisant une alcalinisation. Ils attribuent le mécanisme au couplage galvanique induisant la rupture du film passif.

I.2.3.2 microscope optique en champ (SNOM) :

Le microscope optique en champ proche (SNOM pour « Scanning Near-field Optical Microscope ») fait partie de la famille des microscopes en champ proche [35, 36, 37]. Il est basé sur le balayage d'un échantillon par une fibre optique placée dans le champ proche de ce dernier et montée sur un piézoélectrique. La fibre optique permet de focaliser le rayonnement laser (monochromatique) en le faisant passer par l'ouverture d'une fibre optique étirée, de diamètre inférieur à la longueur d'onde du rayonnement laser (de l'ordre de la centaine de nanomètres), de manière à s'affranchir des phénomènes de diffraction qui limitent la résolution de la microscopie optique. Cette technique permet non seulement d'obtenir des images optiques simples ou par fluorescence, mais aussi de faire l'acquisition de la topographie de l'échantillon avec une résolution de l'ordre de la centaine de nanomètres. La fluorescence est directement liée aux profils topographiques associés aux produits de corrosion ayant précipité ; elle est donc associée aux zones de dissolution anodique. Malgré son possible usage *in situ* [38], et pour des raisons de complexité de mise en œuvre, cette technique est souvent utilisée *ex situ* [39].

Alodan *et al.* [39] ont étudié les phénomènes de corrosion localisée des alliages 6061 et 2024. Ils ont utilisé le SNOM de manière *ex situ*, couplé à la microscopie laser confocale (CSLM) en mode fluorescence et réflexion de manière à avoir des images de la surface en solution. Le SNOM leur a permis de mettre en évidence un anneau de produits de corrosion autour des inclusions riches en magnésium de l'alliage 2024. Les auteurs précisent qu'une inversion de comportement depuis un comportement anodique vers un comportement cathodique des particules de phase S est en général avancée mais qu'ils n'ont pas pu mettre en évidence ce phénomène.

I.2.3.3 microscope à force atomique (AFM) :

La microscopie à force atomique permet l'acquisition de la topographie d'un échantillon à l'air mais aussi en milieu liquide avec une résolution latérale décanométrique. Cette technique a donc trouvé de nombreuses applications dans l'étude de la corrosion localisée d'alliages métalliques [40]. Krawiec *et al.* se sont notamment intéressés à l'influence des inclusions de MnS sur le comportement en corrosion de l'acier 304L [24]. Les auteurs ont pu suivre la dissolution de ces particules au cours du temps en milieu NaCl 1M (pH=3). La résolution de l'AFM (et notamment la résolution verticale inférieure à l'angström) a permis à F. Martin d'étudier *in situ* les phénomènes de corrosion localisée d'un acier 304L [25]. Dans ces travaux, l'initiation de piqûres ainsi que de fissures de corrosion sous contrainte a pu être observée. Les auteurs rapportent cependant la difficulté d'étudier des phénomènes stochastiques tels que la corrosion par piqûres par des techniques de microscopie à sonde locale.

I.2.4 Analyse chimique de surface :

La microscopie à force atomique dans son mode « fondamental », c'est-à-dire permettant l'acquisition de la topographie souffre d'une lacune au niveau de la caractérisation de la chimie locale. Blanc *et al.*, dans le cadre de l'étude des mécanismes de corrosion localisée de l'alliage 2024 en milieu nitrate [41], ont couplé les observations AFM à des analyses chimiques de surface par SIMS (Spectrométrie de masse en ions secondaires). Les auteurs ont ainsi pu montrer qu'un redépôt de cuivre avait lieu pour des potentiels cathodiques, autour des particules riches en cuivre de l'alliage 2024. Il n'a en effet été observé aucun redépôt de cuivre pour des potentiels plus anodiques, les ions nitrates protégeant l'alliage.

I.2.5 Techniques permettant le couplage des méthodes :

Est présenté ici un certain nombre de techniques permettant à la fois d'obtenir une information sur la topographie de l'échantillon étudié ainsi que de caractériser la chimie de surface.

I.2.5.1 couplage AFM-SECM :

De manière à apporter une caractérisation chimique ou électrochimique au mode topographique *in situ* de l'AFM, certains travaux ont cherché à coupler ce dernier à un microscope électrochimique (SECM) [42, 43].

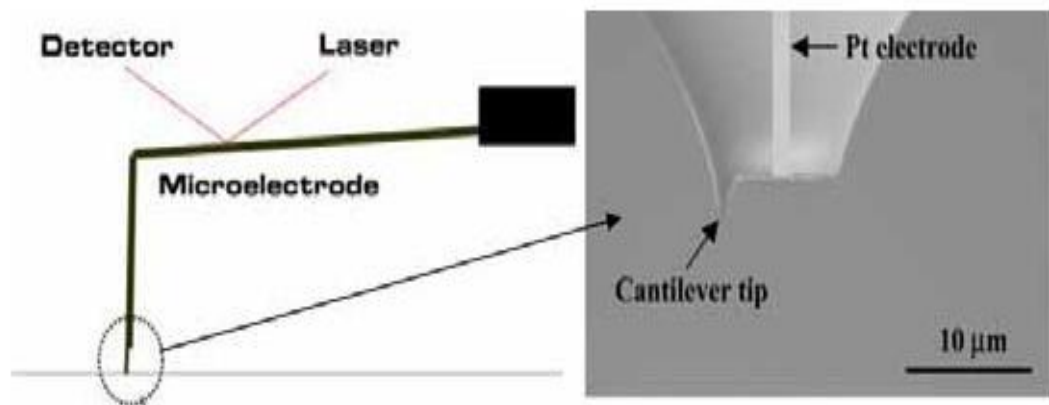


Fig. I.6 : Schéma de la sonde intégrant EC-AFM et SECM et micrographie de la pointe de la sonde [42].

Le groupe de Pan et Leygraf a particulièrement étudié la corrosion localisée d'acier duplex [44] et de l'alliage d'aluminium 3003 [42, 43] par des techniques couplant microscopie en champ proche (STM ou AFM) et SECM. Cependant, la modification de la sonde AFM de manière à pouvoir l'utiliser comme microélectrode pour le SECM diminue fortement la résolution de la mesure de topographie.

I.2.5.2 AFM en mode KELVIN, (SKPFM OU KFM) :

Très rapidement après l'arrivée du microscope à force atomique [45], dédié dans un premier temps à la mesure de la topographie, Martin *et al.* [46] ont utilisé cet outil pour des mesures de potentiel de surface. C'est en mode non-contact que l'information sur la topographie ainsi que sur la répartition du potentiel de contact est alors obtenue. Cependant Nonnenmacher *et al.* [47, 48] introduisent de nouveaux concepts de base de la mesure de potentiel de contact, il parle de « scanning contact potentiel microscope » ou de « Kelvin probe force microscope ». Cette technique permet la mesure simultanée (au cours d'un même balayage) de la topographie et de la différence de potentiel de contact. En 1997, Jacobs *et al.* [49] ont utilisé le mode « lift » (« LiftModeTM ») de Digital Instruments® et réalisent de cette manière la mesure de la topographie et du potentiel de manière non plus simultanée mais séquentielle, c'est-à-dire lors de deux balayages différents de la même ligne. C'est à peine un an après, que P. Schmutz et G. Frankel utilisèrent cette même technique, non pas pour des applications à la microélectronique mais à la corrosion localisée des alliages d'aluminium et notamment de l'alliage 2024 [50].

Cette technique sera largement détaillée, dans son mode de fonctionnement, au chapitre 2. Elle permet la mesure de la différence de travaux de sortie entre la pointe et l'échantillon, à l'air. Les auteurs réalisent une calibration de la mesure à l'aide de métaux stables et de travail de sortie connu tel que le nickel. Les valeurs de potentiel sont ensuite données par rapport à cette référence, en considérant le travail de sortie de la pointe invariant sur une série de mesures. Ainsi les auteurs démontrent la corrélation entre le potentiel de Volta mesuré à l'air par SKPFM et le potentiel de corrosion pour différents métaux, dans l'eau désionisée ou dans une solution de NaCl 0,5 M (**Figure I.7**). Ils démontrent notamment l'existence d'une relation linéaire entre ces deux grandeurs, avec une pente de 0,9 et 0,94 dans les cas de l'eau désionisée et de la solution de NaCl 0,5 M respectivement. Le potentiel de Volta est donné en référence au nickel et est mesuré sur les métaux purs après leur immersion pendant 30 minutes dans l'eau désionisée ou dans la solution de NaCl 0,5 M, au cours de laquelle la mesure de potentiel de corrosion est réalisée.

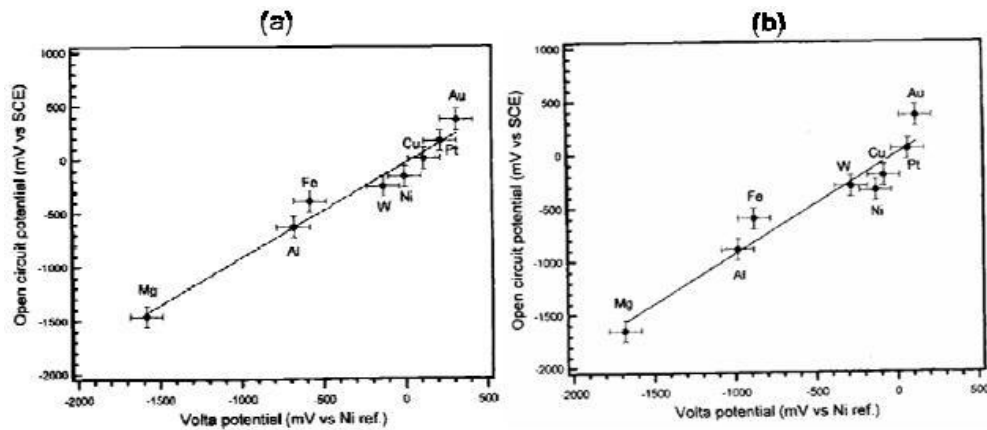


Fig. 1.7 : Corrélation entre le potentiel Volta mesuré à l'air par SKPFM et le potentiel de corrosion mesuré pour différents métaux dans l'eau désionisée (a) et dans la solution de NaCl 0,5 M (b) [50].

Les auteurs reconnaissent l'aspect intéressant de la relation sachant que les mesures de potentiel sont réalisées dans différents environnements. Ils se basent entre autres sur les travaux théoriques de Trasatti concernant la signification du potentiel absolu d'électrode [51, 52, 53], ainsi que sur les travaux de Stratmann qui en pratique ont démontré la corrélation entre le potentiel Volta mesuré par sonde de Kelvin classique, et le potentiel de corrosion du même échantillon [54]. Dans ces travaux, le potentiel Volta est mesuré au dessus d'un fin film d'électrolyte. Il est à noter que Schmutz *et al.* inversent le signal brut mesuré par l'AFM de manière à faire correspondre le sens de variation de l'échelle des potentiels mesurés avec l'échelle des potentiels de corrosion attendus pour les particules intermétallique de l'alliage 2024. Ainsi une phase plus noble et donc de potentiel électrochimique supérieur à la matrice, apparaît en contraste positif. De cette manière, les particules de phases Al-Cu-Mn-Fe apparaissent avec un contraste positif sur les cartographies en potentiel, comme ce qui est suggéré par le potentiel de corrosion de cette phase [55]. Les travaux traitant de corrosion se placent souvent dans ce cadre, sans parfois rappeler cette modification du signal brut. Dans leurs travaux concernant la caractérisation de l'alliage 2024 par SKPFM, Schmutz *et al.* mettent en évidence l'influence du film d'extrême surface sur la mesure de potentiel [50]. En effet, ils montrent que les particules de phase S d'un échantillon poli mécaniquement se révèlent avec un contraste positif de $+ 280 \pm 50$ mV par rapport à la matrice, correspondant à un potentiel plus noble contrairement à ce qui est attendu. Le potentiel des particules Al-Cu-Mn-Fe est de $+ 300 \pm 50$ mV par rapport à la matrice. Les particules de phase S sont pourtant considérées moins nobles,

avec un potentiel 100 mV plus actif que la matrice d'aluminium [56]. Schmutz *et al.* ont attribué ce phénomène à des modifications de surface survenant lors du polissage mécanique [50]. Leblanc *et al.* [57] ont développé cette idée et ont réalisé l'abrasion de la surface au moyen d'un spectroscope Auger (AES), tel que l'avait fait Guillaumin *et al.* [58]. Les auteurs ne donnent pas de valeurs de la différence de potentiel entre particule et matrice. Ils ont cependant montré qu'il existait une épaisseur critique d'abrasion pour laquelle il y avait inversion du contraste des particules de phase S, ce contraste n'évoluant pas après une exposition à l'air d'une semaine. Ils ont montré que cette épaisseur pouvait être de l'ordre de 3 à 6 nm mais que les mesures réalisées sur différents échantillons n'étaient pas reproductibles. Ils confirment cependant l'hypothèse d'une couche relativement épaisse ayant été modifiée par le polissage mécanique et ne correspondant pas simplement à une couche d'oxyde. Les mêmes auteurs observent qu'après un temps d'amorçage dans une solution chlorurée, les particules de phase S se dissolvent [57]. Ils attribuent ce phénomène à la dissolution du film d'oxyde recouvrant les particules de phase S. Dans ces mêmes travaux, l'importance de la répartition surfacique des particules de phase S par rapport à celles de type Al-Cu-Mn-Fe a été étudiée. Pour ce faire, les auteurs ont utilisé une encre protectrice, qu'ils peuvent « retirer » aux endroits voulus par « scratching », c'est-à-dire en imposant une force relativement importante à la pointe AFM en mode contact sur l'échantillon. Ils montrent que si la fraction de particules AlCuMnFe est faible, les particules Al₂CuMg se dissolvent préférentiellement à la matrice. En revanche, si la fraction de AlCuMnFe est élevée, alors le phénomène de dissolution de la matrice adjacente est important. D'autres auteurs ont étudié le comportement en corrosion de l'alliage 2024 traité par des silanes [59]. Ils ont caractérisé l'alliage 2024 par SKPFM avant traitement. Ils observent une différence de potentiel entre une particule de phase S et la matrice de - 378 mV. Les auteurs ne font référence à aucune inversion du potentiel. Les résultats sont donc en accord avec ceux de Schmutz *et al.* [50].

Certains auteurs ont étudié les « applications et limitations du SKPFM pour l'analyse de surface des alliages d'aluminium » [60]. Ils ont rappelé certains aspects techniques et pratiques, notamment concernant la nécessité d'une acquisition « optimale » de la topographie de manière à ne pas obtenir d'artéfacts sur la mesure de potentiel. Les auteurs ajoutent qu'une topographie trop « rugueuse » est source d'erreurs. D'autres auteurs se sont intéressés à la comparaison entre la sonde de Kelvin classique (SKP) et le SKPFM en termes de mesure de potentiel [61]. Ils ont montré

que cette dernière technique était plus encline aux artefacts de mesure que le SKP. Ils ont notamment montré en prenant l'exemple d'un couplage entre le fer et le niobium, que la relation entre les potentiels mesurés par SKPFM et le potentiel de corrosion, n'était pas valable de manière générale mais devait être vérifiée. En ce qui concerne les potentiels après immersion, Femenia *et al.* ont étudié la corrosion localisée d'aciers duplex par SKPFM [44], ils concluent leurs travaux en affirmant que l'interprétation des potentiels Volta d'échantillons après immersion est complexe et nécessite une étude approfondie.

CHAPITRE II

***TECHNOLOGIE DE REPARATION DES STRUCTURES
COLLEES PAR PATCHS***

Cette partie porte sur la réparation par patch composite. Elle s'inscrit dans un contexte de maintenance des structures aéronautiques dont le but est d'assurer des conditions de vol optimales pour les avions militaire ou civile. Actuellement, de nouvelles techniques sont développées dans le but de réduire la vitesse de propagation de la fissure augmentant ainsi la durée de vie des structures. Comme Celle du double patch qui prend place à coté de la réparation par un simple patch. Actuellement la Technologie de réparation des structures collées par patchs largement exploitée surtout en aéronautique de par les avantages qu'elle fournit. Le but poursuivi dans ce chapitre est de décrire brièvement la technique de réparation et de renforcement des structures aéronautiques par collage structural de plaque en composite.

À cet effet, une définition des mécanismes d'adhésion, des problèmes structuraux du vieillissement des structures des avions et des conditions de réparations est nécessaire. Il sera procédé également à une comparaison entre la technique de collage et celle de l'attache mécanique des assemblages afin de mettre en évidence la performance du patching.

II.1. EFFICACITE DES ADHESIFS STRUCTURAUX :

L'expression "collage structural" est aujourd'hui utilisée pour rendre compte de la haute performance mécanique d'un assemblage collé. De manière plus générale, nous pouvons dire qu'un collage est structural lorsqu'il permet d'obtenir des assemblages de structures durables dont la solidité est comparable à celle des matériaux constitutifs.

II.1.1 Adhésion et Cohésion :

Quelle que soit son origine, l'efficacité d'une colle repose sur deux propriétés fondamentales :

- une propriété d'adhésion relative à des mécanismes d'interface,
- une propriété de cohésion au sein de l'adhésif qui rend compte des forces d'attraction entre les molécules.

Alors que la cohésion de la matière est une notion commune à tous les matériaux, l'adhésion ne subsiste qu'entre deux corps. Les mécanismes d'adhésion sont complexes et plusieurs théories ont été avancées pour tenter d'en décrire les phénomènes. Ces théories relèvent en fait d'approches très différentes et dépendent des échelles d'observation. Pour les chimistes, l'adhésion est due à des interactions moléculaires entre l'adhésif et le substrat. Les

physiciens considèrent davantage les dissipations d'énergie pour rendre compte des phénomènes observés. Appréhender le phénomène d'adhésion nécessite donc de faire appel à plusieurs domaines scientifiques. Cependant, à l'heure actuelle, aucune théorie ne permet de rendre compte de la globalité des phénomènes observés.

II.1.2 Mécanismes de l'adhésion :

Pour que l'assemblage soit performant et durable, il est nécessaire d'obtenir un niveau d'adhésion satisfaisant entre adhérent et adhérent. Cette condition implique une bonne compréhension des mécanismes qui sont à l'origine du phénomène d'adhésion [62,63]. Il n'existe pas en effet une unique théorie qui explique les mécanismes de l'adhésion, mais plusieurs qui font intervenir la rhéologie des matériaux, la mécanique de la rupture de ces matériaux, la physico-chimie des polymères ainsi que celle des surfaces et des interfaces. Certains auteurs ont cherché à classer les mécanismes envisagés par grands principes. Ainsi, A.J. Kinloch [64] et M.E.R. Shanahan [63] proposent l'adhésion par ancrage mécanique, l'adhésion massique et l'adhésion spécifique.

II.1.2.1 L'Ancrage Mécanique :

La théorie mécanique est la plus ancienne de toutes les théories concernant l'adhésion. Elle a été proposée par M. Bain et Hopkins en 1925 [65].

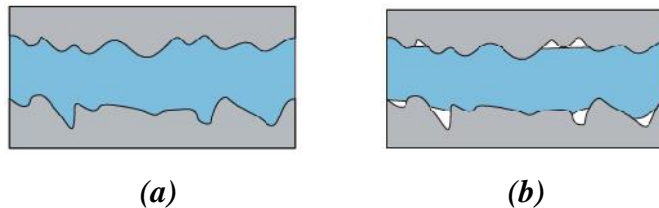


Fig. II.1 : Exemple d'un mouillage pour l'ancrage mécanique [63]

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

L'adhésion serait due à un ancrage mécanique de l'adhésif qui pénètre dans les microcavités et irrégularités de surface du substrat avant sa solidification. Cette idée a été reprise [65] dans les années 70 afin d'expliquer, du moins partiellement, la bonne adhésion par des substrats d'aluminium. Plus la rugosité du substrat augmente, plus la surface de contact réelle entre adhésif et donc le nombre de liaisons interfaciales seront importants. Il est cependant nécessaire que la colle mouille parfaitement les surfaces afin de ne pas piéger de

bulles d'air dans les porosités, ce qui induirait des concentrations de contraintes et fragiliserait le joint. Il existe donc une rugosité optimale des substrats à assembler (**figure II.1**).

II.1.2.2 Théorie de la diffusion :

La théorie de la diffusion a été proposée initialement par Voyutskii [66]. L'adhésion intrinsèque des polymères entre eux et avec eux-mêmes serait due à la diffusion des molécules de polymère à l'interface, selon un mécanisme appelé reptation, qui concerne les longues chaînes polymères, qui sera décrit plus tard par de Gennes [67]. La zone interfaciale est appelée interphase. Cette théorie ne peut s'appliquer que pour des matériaux ayant une solubilité mutuelle et une mobilité suffisante des macromolécules ou des segments de chaînes.

II.1.2.3 Théorie électrostatique :

Deryagin et Krotova [68] ont observé des phénomènes électrostatiques lors de la séparation d'assemblages ce qui les a amenés à proposer une théorie électrique de l'adhésion. Ils supposent que : l'adhésif et le substrat ayant des structures électroniques différentes, il y a transfert d'électrons et formation d'une double couche de charge électrique à l'interface. L'adhésion est présumée due à l'existence des forces attractives à travers la double couche électrique.

II.1.2.4 Formation de liaisons covalentes :

La théorie de la liaison chimique est fondée sur l'idée que l'adhésion entre deux solides est d'autant plus forte que ces deux surfaces développent à leurs interfaces des réactions chimiques donnant lieu à des liaisons de valence (notamment covalentes). De nombreux auteurs s'accordent à penser que ces liaisons primaires améliorent considérablement la force du joint étant donné l'énergie qu'elles développent (typiquement de 200 à 400 kJ/mol). Ces liaisons chimiques sont difficiles à mettre en évidence étant donnée la très faible épaisseur des interfaces. Cependant, dès 1946, des liaisons primaires ont été mises en évidence. Buchan et Rae [69] ont montré que des liaisons de valence se forment entre le caoutchouc et le laiton à travers le composé soufre-cuivre. Plus récemment, des agents de couplage ont été utilisés pour former des liaisons entre le substrat et le revêtement. Les organosilanes ont été largement utilisés comme promoteurs d'adhésion entre la résine et les fibres de verre des composites.

Les agents à base de silanes sont également utilisés dans l'adhésion métal-polymère afin d'augmenter la durabilité des joints par formation de liaisons chimiques O-Si-métal. Dans le cas des joints époxy-métal, la mise en contact de l'adhésif avec le substrat peut entraîner une réaction chimique entre l'adhésif et la surface du métal. Des observations indirectes en photoémission X ont permis à Boulouri et al [70] de proposer un mécanisme réactionnel qui consisterait en l'élimination d'une molécule d'eau entre les groupements hydroxyles situés à la surface du métal (espèces OH) et la terminaison alcool de l'adhésif (**figure II.2**).

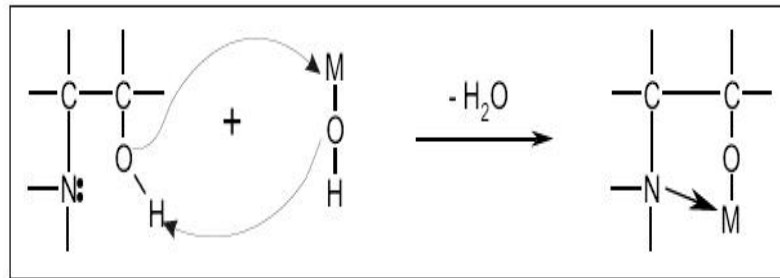


Fig. II.2 : Mécanisme réactionnel entre un adhésif époxyde et un métal [71].

D'autre part, selon Randall et Brockman, l'adhésion résine époxyde/métal se produit par l'intermédiaire de groupes hydroxyles. A l'air libre, il se forme en général une couche d'oxyde à la surface du métal. En présence d'eau, les molécules H₂O se greffent aux oxydes pour former des groupes hydroxyles. Il y a donc en surface une molécule contenant un atome d'hydrogène et un atome oxygène électronégatif. La surface se présente comme fortement polarisée et va pouvoir interagir avec les groupes polaires de la résine époxyde.

II.1.2.5 Théorie de l'adsorption ou du mouillage :

Cette théorie est reliée aux forces secondaires, initialement proposées par van der Waals, qui gouvernent essentiellement les phénomènes de mouillage et d'absorption. Ces liaisons secondaires ou physiques sont d'énergie relativement faible (10 à 20 kJ/mole). Elles peuvent être complétées d'interactions spécifiques moins efficaces que les liaisons de valence mais probablement plus souvent présentes : les liaisons hydrogène et les interactions acide-base de Lewis. Les forces secondaires sont directement liées aux énergies libres de surface et d'interface des surfaces de contact. Ces énergies libres sont impliquées directement dans le

travail thermodynamique d'adhésion w_A entre l'adhésif et le substrat, et peuvent être caractérisées par des mesures de mouillabilité.

Lorsqu'une goutte liquide est déposée sur une surface, elle s'étale et forme un angle θ avec la surface solide (**figure II.3**). Les énergies libres interfaciales γ_{SV} , γ_{LV} et γ_{SL} (S, L et V représentent le solide, le liquide et la vapeur respectivement) interviennent dans les équations de Young et de Laplace ; elles décrivent l'équilibre thermodynamique de la goutte dans son environnement :

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta \quad (\text{II.1})$$

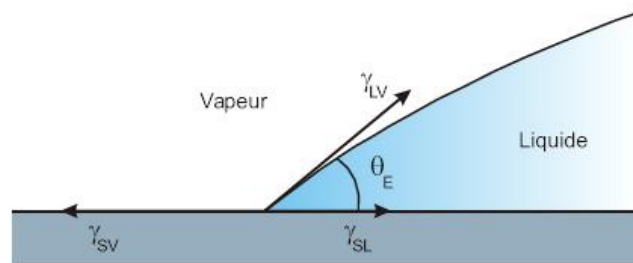


Fig. II.3 : Mouillage : modèle de Young [71].

Le travail thermodynamique réversible d'adhésion w_A , requis pour séparer une unité de surface de deux phases formant une interface, peut être relié aux énergies libres de surface par l'équation de Dupré.

En l'absence d'adsorption d'interdiffusion et d'interactions mécaniques, w_A en milieu inerte s'écrit comme la différence d'énergie entre les deux surfaces séparées ($\gamma_x + \gamma_y$) et les surfaces assemblées (γ_{xy}) :

$$w_A = \gamma_x + \gamma_y - \gamma_{xy} \quad (\text{II.2})$$

Où γ_x et γ_y sont les énergies libres de surface de chaque phase et γ_{xy} l'énergie libre d'interface.

L'importance du mouillage apparaît aussi très clairement quand la surface est rugueuse. Plus la surface est rugueuse, plus la surface de contact sera faible si le mouillage est mauvais. Ainsi, la combinaison d'une énergie de surface faible et d'une rugosité conduit à des angles

de contact très élevés, **figure II.4**. En revanche, dans de bonnes conditions de mouillage, la surface de contact sera bien plus importante.

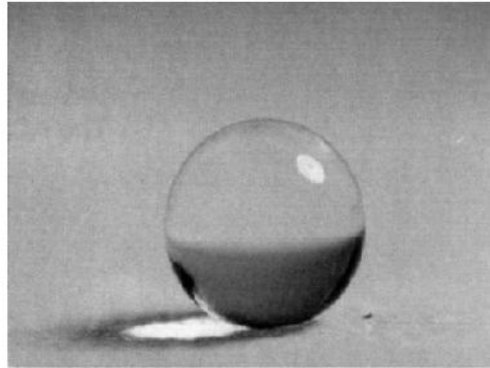


Fig. II.4 : Goutte d'eau millimétrique sur une surface de polytétrafluoréthylène (PTFE) rugueux [71].

Une des principales théories avancées pour expliquer les différences d'adhésion entre substrats est fondée sur des considérations thermodynamiques. Le travail thermodynamique d'adhésion w_A , défini par l'équation I.1, quantifie la qualité de l'adhésion entre deux matériaux. Si $w_A > 0$, l'adhésion sera favorisée thermodynamiquement. Si $w_A < 0$, l'adhésion ne sera pas favorable. Généralement, le signe de w_A est positif en atmosphère inerte. Ainsi Gledhill et Kinloch trouvent une énergie d'adhésion d'un adhésif époxyde de 90 mJ/m^2 et de 291 mJ/m^2 sur des substrats aluminium et acier respectivement. Les traitements de surface utilisés peuvent modifier les énergies libres de surface des substrats à encoller [71], (**Fig.II.5**).

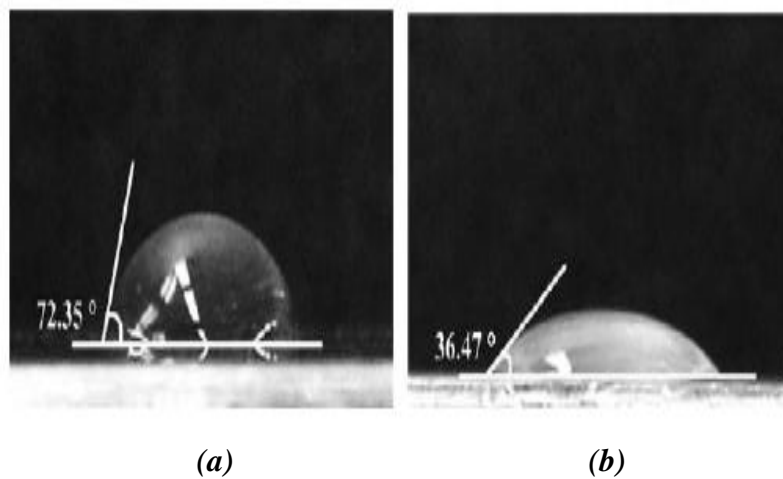


Fig. II.5 : Angle de contact d'une goutte d'eau déposée sur une surface d'Aluminium [71].
(a) Surface non traitée, (b) surface traitée au plasma.

II.1.2.6 Couche de faible cohésion :

Il s'agit plus ici d'une théorie de la rupture des interfaces que d'un modèle d'adhésion. Dans le cas d'une forte cohésion de l'assemblage, la rupture n'a généralement pas lieu à l'interface, mais dans une couche voisine. Bikerman postule, dans les années soixante, l'existence d'une interphase d'épaisseur finie entre les deux matériaux. Cette couche de faible cohésion, due à la présence d'imperfections provenant de la mise en œuvre (bulles d'air,...) et à la discontinuité entre les phases, constitue une zone de transition et présente des gradients de propriétés et de structure. Cette théorie permet de se placer à une échelle très fine car elle décrit l'interface en termes d'interactions moléculaires.

II.1.2.7 Confinement :

Un film adhésif fait typiquement un dixième de millimètre d'épaisseur (100 μm). Les longueurs de recouvrement des objets à coller, au contraire, sont souvent un ou plusieurs centimètres. C'est en ce sens que l'adhésif est mince, c'est-à-dire qu'il est peu épais en regard de ses dimensions latérales. Du fait de cette minceur, l'adhésif résiste fortement, au début du décollement lorsqu'il est soumis à un effort. En effet, un tel matériau polymère est presque incompressible, c'est-à-dire qu'il est très difficile de faire augmenter son volume. Quand on tire sur les objets collés, pour éviter de créer du volume, le matériau se déforme de manière à ramener de la matière depuis les bords de la zone de contact avec les objets. Cela est d'autant plus difficile que les bords se trouvent loin, c'est-à-dire que le film est mince.

II.1.2.8 Énergie de liaison :

Les différents mécanismes d'adhésion présentés ci-dessus mettent en jeu des types de liaison très différents, mais ne permettent pas, pris séparément, de décrire la globalité des mécanismes de l'adhésion. Le processus de collage est plus complexe et fait intervenir successivement ou simultanément plusieurs de ces mécanismes, **figure II.6**.

Les énergies des différents types de liaison mis en jeu dans les phénomènes d'adhésion sont très variées. Il faut noter que les liaisons intermoléculaires sont beaucoup plus faibles que les liaisons chimiques, **tableau II.1**.

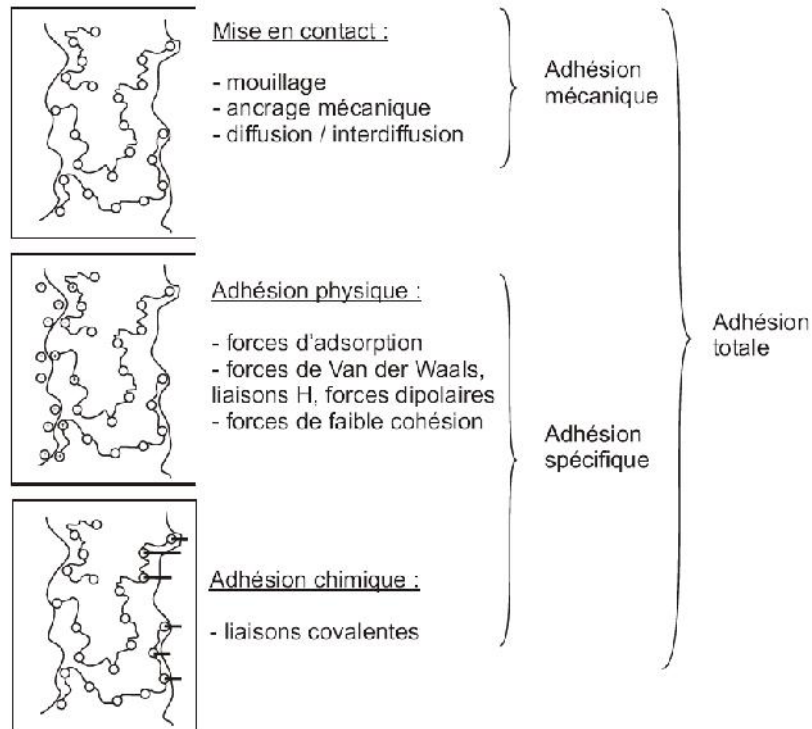


Fig. II.6 : Décomposition du processus de collage suivant les principaux mécanismes d'adhésion mis en jeu [71].

Type de liaison	Energie (en KJ/mol)
Liaison chimiques primaires (interatomique) : fortes	
• Ionique	580 à 1050
• Covalente	60 à 720
• métallique	110 à 350
Liaison secondaires (intermoléculaires) : faible	
• hydrogène	50
• dipôle – dipôle de Keesom (force d'orientation)	21
• dipôle – dipôle induit de Debye (force d'induction)	42
• dipôle induit – dipôle instantané de London (force de dispersion)	2

Tab. II.1 : Énergies des différents types de liaisons intermoléculaires.

II.1.3 Assemblages collés

Le concept d'utilisation des matériaux composites collés en tant que moyen de maintenir contre le vieillissement des structures aéronautiques a été institué en Australie il y a approximativement trente ans. Depuis ce temps, il a été appliqué avec succès dans de nombreuses situations exigeant des réparations. Ces applications n'ont pas été limitées en Australie. Le Canada, le Royaume-Uni, les Etats-Unis, et la France ont également bénéficié de l'utilisation de cette technologie.

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. En raison des contraintes de sécurité qui amènent à utiliser les avions dans de bonnes conditions de fiabilité, maîtrisées aussi longtemps que possible, des inspections sont périodiquement mises en place pour détecter les défauts ou les dommages. Cependant, le coût du remplacement des parties importantes de la structure ou de grands composants tels que la voilure est très souvent rédhibitoire. Une alternative consiste à utiliser des patches 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.

De nombreux types d'assemblages collés ont été étudiés afin de tester leurs propriétés mécaniques et donc la résistance des adhésifs en situation réelle. Citons par exemple les joints à simple et double recouvrement "single and double lap joints" en anglais, les joints massiques et annulaires en torsion "torsion butt joint and napkin ring test" et les joints massiques sollicités en traction "butt joints"[72]. Le choix de la géométrie utilisée correspond à un compromis entre la simplicité d'élaboration, le type de sollicitation envisagé, la nature des résultats souhaités, qualitative ou quantitative. Ainsi, on s'attachera moins aux problèmes de répartition de contraintes si on ne souhaite faire que du comparatif. Le choix du type d'assemblage peut aussi être dicté par l'utilisation, soit d'une méthodologie industrielle, soit d'une méthode standardisée et référencée par "the American Society for Testing and Materials (ASTM)", par exemple [72].

L'évaluation des performances et de la durabilité d'un assemblage collé s'effectue :

soit par des tests mécaniques destructifs. Il s'agit alors de mesurer un paramètre de force ou de déplacement maximal à la rupture. Le paramètre mesuré sera représentatif de l'adhérence (force ou travail qu'il faut fournir au système pour en séparer les deux constituants). La rupture peut être adhésive, c'est-à-dire si elle se produit à l'interface adhésif/substrat. Elle peut être cohésive, c'est-à-dire si elle survient au sein de l'adhésif (ou du substrat). la valeur mesurée de la rupture est caractéristique des propriétés intrinsèques du matériau dans laquelle a eu lieu Les principales sollicitations mécaniques sont la traction, le cisaillement, le clivage ou le pelage, **figure II.7**.

soit par des Contrôles Non Destructifs (CND) qui, du fait de l'intérêt que leurs portent les industriels, se développent considérablement même s'ils ne sont pas encore totalement fiables. Citons, par exemple, la caractérisation d'assemblages collés par ultrasons.

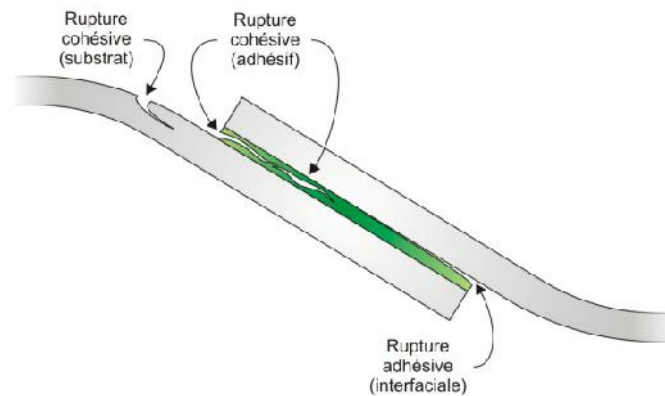


Figure I.12. Différents modes de ruptures [73]

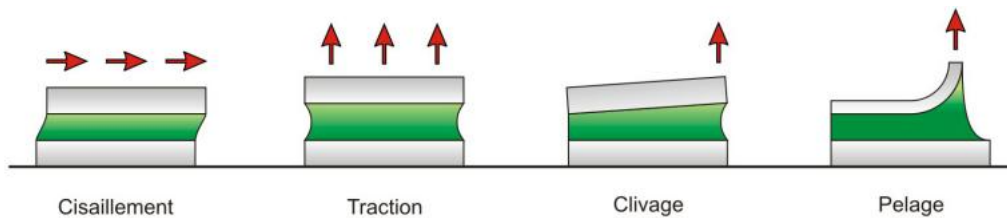


Fig. II.7 : Différents modes de sollicitations mécaniques [73]

Un des éléments importants de la réalisation d'assemblages collés est le traitement de surface du substrat. De nombreuses études ont porté sur l'influence du traitement de surface sur la tenue mécanique des assemblages collés [74,75]. Le but des traitements est multiple, il s'agit :

de dégraisser la surface du substrat.

- d'éliminer les couches de contamination en surface qui sont faiblement adhérentes.
- de changer la composition chimique superficielle pour former une couche de haute réactivité chimique.
- de modifier la morphologie de la surface en augmentant la rugosité.

Il ressort de ces études que le traitement de surface est primordial pour obtenir une bonne tenue mécanique. Les traitements de surface les plus couramment utilisés sont l'ablation mécanique tel le sablage, les traitements chimiques et/ou électrochimiques, les dépôts plasma ou l'utilisation de primaire d'adhérence.

II.1.4 Défauts dans les assemblages collés

Lors de la réalisation d'un assemblage collé, de nombreux types de défauts sont susceptibles d'être créés. Ces défauts sont évidemment des sites préférentiels pour l'amorçage de la rupture.

La **figure II.8** représente les défauts typiques d'un assemblage collé.

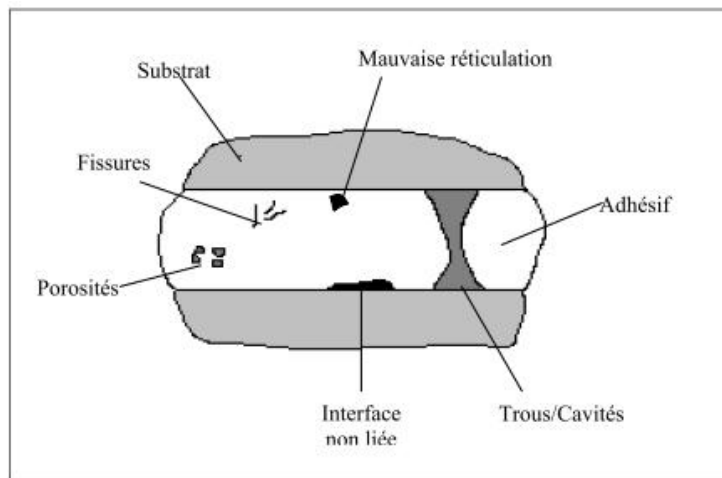


Fig. II.8 : Défauts typiques d'un assemblage collé [72]

La porosité est causée par le départ de produits volatils et l'existence de bulles d'air au cours de la réticulation. La mise sous pression de l'adhésif au cours du cycle de cuisson est censée réduire ce phénomène. De même, la formulation des adhésifs modernes permet de réduire la quantité de volatils créés au cours de la réticulation avec, par exemple, moins de 0.30% pour l'EA 9689 et 0.15% pour une autre colle à base de DGEBA, DDA et DDS. La

concentration, en une région donnée, de porosités peut conduire à la création de trous ou cavités. Ces trous peuvent aussi s'expliquer par une quantité insuffisante d'adhésif. Si elles sont localisées à l'interface, les cavités créent des interfaces non liées qui peuvent aussi s'expliquer par une mauvaise préparation de surface du substrat. Il est évident que ces types de défauts sont des zones privilégiées pour la dégradation de l'interface par l'eau ou par l'oxygène. Les fissures au sein de l'adhésif sont dues à l'action de contraintes thermiques au cours de la réticulation. Enfin, les zones de mauvaise réticulation peuvent s'expliquer soit par un temps de réticulation insuffisant, soit par une composition inhomogène de l'adhésif. On obtient alors des zones plus faiblement réticulées au sein de l'assemblage collé.

De nombreuses études ont été consacrées à l'étude théorique des contraintes dans le patch composite et dans la colle [83] [79] [77] [81] [80] [82], car cette dernière est souvent le point faible dans une réparation. En effet, elle est souvent à l'origine des défaillances du patch composite [88] et c'est sa rupture ou sa décohésion qui provoque le détachement du renfort composite.

II.2 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 [84]. Ces travaux ont pour but d'évaluer l'influence de la forme des bords libres du patch composite sur la diminution de ces pics. Xiong et Raizenne [84] ont montré que des patches présentant une épaisseur dégressive amoindrissaient 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 [85]. La **Figure II.10** présente ainsi plusieurs formes de patches étudiées [85]. Ces travaux ont montré que les patches composites arrêtant au mieux la propagation des fissures sont les patches composites en forme d'étoile.

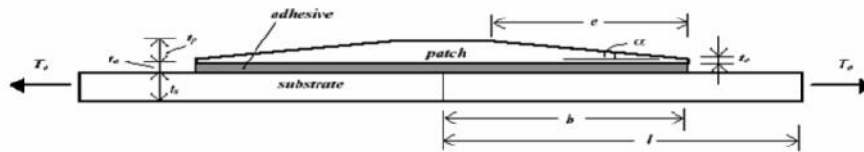


Figure 1. 3 Patch composite avec une épaisseur dégressive [62].

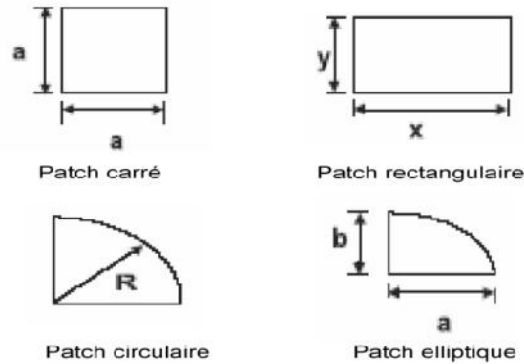


Fig. II.10 : Diverses formes de patches composites d'après [85].

II.3 MECANISME DE COLLAGE:

L'expérience de la Royal Australien Air Force (RAAF) dans le renforcement de structures aéronautiques par patches collés a montré que 53% des défaillances significatives étaient associées à des défaillances liées au joint de colle (**Figure II.11**). L'utilisation d'adhésifs structuraux implique donc une bonne compréhension des mécanismes qui sont à l'origine du phénomène d'adhésion et de cohésion [86, 87] :

- L'adhésion est la force s'exerçant à la surface des matériaux en contact (entre les molécules ou les atomes de l'adhésif et des substrats). Cette adhésion est due en partie aux forces de Van de Waals [88].
- L'adhérence est la mesure de l'énergie nécessaire pour rompre les forces d'adhésion.
- La cohésion est la force exercée par les liaisons entre les molécules ou atomes à l'intérieur d'un même matériau (adhésif ou substrat).

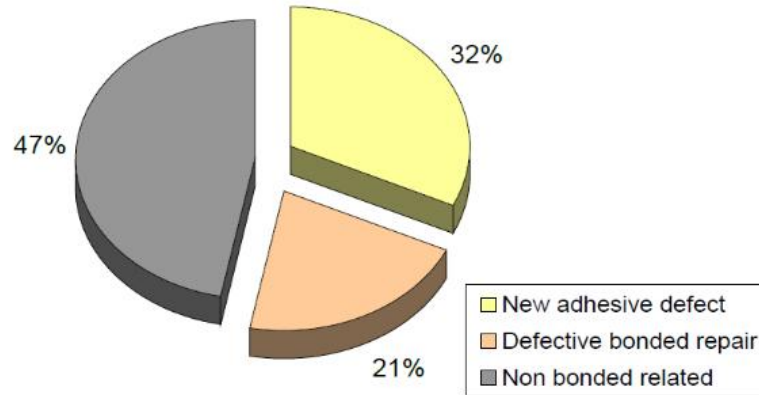
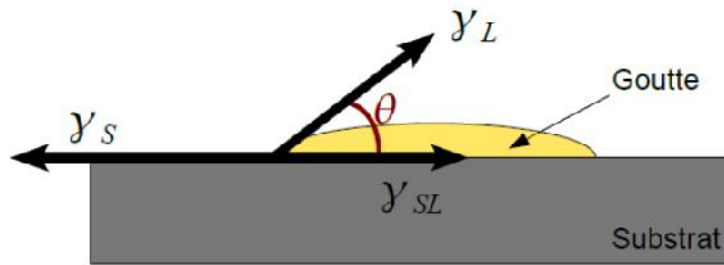


Fig. II.11 : Répartition des causes de défaillance d'un renfort collé [86].

Dans la littérature, le mécanisme de collage se résume par trois étapes principales [89] :

➤ **Préparation de surface** : L'adhésif est à l'état naturel sous forme de liquide, de pâte ou de solide. Les surfaces sont préparées pour optimiser l'adhésion [90, 91, 92]. Les méthodes industrielles de préparation de surface peuvent être mécaniques (sablage, abrasion, ultrasons), chimiques (nettoyage aux solvants, nettoyage alcalin, décapages chimiques, primaires) ou physico-chimiques (flamme, traitement corona, traitement plasma, exposition aux ultraviolets) [93].

➤ **Mouillage** : L'adhésif est appliqué sous forme liquide. Cette étape est appelée "mouillage". Elle permet l'adhésion par contact entre le substrat et l'adhésif (**Figure II.12**). Pour que le mouillage d'une surface soit de bonne qualité, il faut que l'adhésif ait une bonne mouillabilité (faible tension superficielle γ_L) et que la surface ait une bonne mouillabilité (grande énergie de surface γ_S) γ_{SL} correspond à l'énergie interfaciale adhésif/substrat. Des exemples d'énergies de surface sont présentées tableau II.2.



Equilibre: $\cos(\theta) = \frac{\gamma_S - \gamma_{SL}}{\gamma_L}$ (Equation d'Young 1805)

Mouillage parfait: $\begin{cases} \theta \rightarrow 0 \\ \cos(\theta) \rightarrow 1 \end{cases}$

$\gamma_S > \gamma_L$

Fig. II.12 : Qualité du mouillage d'une surface.

Matériau	Energie de surface (m.J.m ⁻²)
Fer	2000
Aluminium	840
Composite carbon-époxy	58
Polytétrafluoréthylène PTFE (téflon, viton)	18
Adhésifs	20 à 35

Tab. II.2 : Énergies de surface pour quelque matériau [95].

Ce tableau fait apparaître que pour certains matériaux comme le téflon, le collage n'est pas possible sans une préparation permettant d'augmenter l'énergie de surface

➤ **Durcissement** : C'est la phase de durcissement ou de réticulation pour les thermodurcissables. Pendant cette étape, les forces de cohésion apparaissent pour rendre l'assemblage solide. Le durcissement est obtenu par voie physique (évaporation d'un solvant, pression, fusion, refroidissement) ou par voie chimique (mélange de plusieurs composants, apport de chaleur, action de l'humidité, absence d'air, activation par rayonnement UV). Un durcissement par traitement thermique plus long mais moins élevé en température génère moins de contraintes résiduelles dans l'époxy qu'un traitement élevé en température et court [94]. Lors de la cuisson de certaines colles, il est nécessaire d'exercer une pression pour éviter que la vapeur dégagée par l'adhésif ne repousse les adhérents [96].

II.4 PRESENTATION DU CODE DE CALCUL «ABAQUS» [76] :

Il faut savoir que les outils de conception et de calculs assistés par ordinateur sont très nombreux sur le marché. Les plus utilisés sont *Abaqus*, *Nastran*, *Catia*, *SolidWorks*, ... etc.

Tous ces outils effectuent les mêmes tâches, c'est à dire qu'ils génèrent des structures, leurs caractéristiques et celles du problème étudié ; ensuite ils calculent le comportement de cette structure (déformations, ruptures, plastification, ... etc.) et enfin ils permettent de traiter ces résultats afin d'en sortir des données utilisables et exploitables.

La plupart des entreprises utilisent un assortiment de logiciels qui sont plus ou moins performants dans l'une ou l'autre de ces tâches, par exemple, dessiner avec *SolidWorks*, calculer avec *Abaqus* et faire du post-traitement avec *Nastran*. Il sera donc certainement demandé dans le monde de l'entreprise une maîtrise de plusieurs de ces outils.

Dans notre étude, pour l'analyse de la structure fissurée et réparée par patch composite, nous utilisons les performances du logiciel *Abaqus* version 6.12. Toutes les applications destinées aux calculs par éléments finis nécessitent d'importantes connaissances dans le domaine du calcul alors qu'*Abaqus* est conçu pour être utilisé par tous sans qu'il y ait besoin de formation préalable sur les éléments finis.

Grâce à son interface intuitive, il permet une prise en main très rapide du logiciel avec l'option d'automatisation de la reconnaissance des zones de contacts et la génération du maillage.

Le programme *Abaqus* a de nombreuses capacités d'analyse des éléments finis, allant d'une simple analyse statique linéaire à une analyse statique complexe non linéaire. Les guides d'analyse de sa documentation décrivent les procédures à suivre pour effectuer des analyses pour différentes disciplines de l'ingénierie.

Le but ultime d'une analyse par éléments finis est de recréer mathématiquement le comportement d'un véritable système d'ingénierie. En d'autres termes, l'analyse doit être basée sur un modèle mathématique précis d'un prototype physique. Au sens le plus large, ce modèle se compose de tous les nœuds, les éléments, les propriétés des matériaux, de véritables constantes, des conditions aux limites et d'autres caractéristiques qui sont utilisées pour représenter le système physique.

Abaqus est considéré parmi les logiciels de simulation les plus puissants actuellement. C'est un outil basé sur la méthode des éléments finis, qui peut résoudre des problèmes allant des analyses linéaires relativement simples aux simulations non linéaires très complexes. Il possède une librairie riche d'éléments permettant de modéliser virtuellement n'importe quelle géométrie. Il possède également un nombre très important de modèles de matériaux permettant de simuler les comportements de la plupart des matériaux typiques de technologie comprenant les métaux, le caoutchouc, le polymère, les composés, ... etc.

Le logiciel *Abaqus* a été développé par Hibbit, Karlsson & Sorensen (HKS) depuis 30 ans. Il a été amélioré au fur et à mesure pour intégrer toutes les nouveautés de la théorie des éléments finis et les besoins des entreprises, jusqu'à ce que l'entreprise soit rachetée par *Dassault industries* en Octobre 2005.

Le cœur du logiciel est appelé *moteur de calcul* et c'est qu'à partir d'un fichier de donnée caractérisé par le suffixe *.inp*, qui décrit l'ensemble du problème mécanique, le logiciel analyse les données, effectue les simulations demandées et fournit les résultats dans un fichier *.odb*. Deux tâches restent à accomplir : générer le fichier de données (prétraitement), et exploiter les résultats contenus dans le fichier *.odb* (post-traitement). La structure du fichier de données peut se révéler rapidement complexe : elle doit contenir toutes les définitions géométriques, les descriptions des maillages, des matériaux, des chargements, ... etc., suivant une syntaxe précise. Il faut savoir que le prétraitement et le post-traitement peuvent être effectués par d'autres logiciels. *Abaqus* propose le module *Abaqus CAE*, interface graphique qui permet de gérer l'ensemble des opérations liées à la modélisation :

- La génération du fichier de données,
- Le lancement du calcul proprement dit,
- L'exploitation des résultats.

II.4.1 structure et taches :

Abaqus est divisé en unités fonctionnelles appelées modules. Chaque module contient les outils qui sont propres à une partie de la tâche de modélisation.

➤ **Module « PART »** Le module *Part* permet de créer tous les objets géométriques nécessaires à un problème donné, soit en les dessinant dans *Abaqus*, soit en les important d'un logiciel de dessin.

➤ **Module « PROPERTY »** Le module *Property* permet, comme son nom l'indique, de définir toutes les propriétés d'un objet géométrique ou d'une partie d'un objet.

➤ **Module « ASSEMBLY »** Ce module permet d'assembler les différents objets géométriques créés dans un même repère de coordonnées globales.

➤ **Module « STEP »** Ce module permet de définir toutes les étapes et les requêtes pour le post-traitement ; autrement dit, le moment à partir duquel une force est appliquée et jusqu'à quand (temps). *Step* permet également de créer des forces ou des conditions limites qui s'activent à des moments donnés.

➤ **Module « INTERACTION »** Grâce à ce module, il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, qu'elles que soient mécaniques, thermiques ou autres. Il faut savoir qu'*Abaqus* ne prend en compte que les interactions explicitement définies, la proximité géométrique n'étant pas prise en compte automatiquement.

➤ **Module « LOAD »** Le module *Load* permet de spécifier tous les chargements mécaniques et thermiques, et les conditions limites. Il faut savoir que les chargements et les conditions limites sont dépendants des *Steps*. Par exemple, une force est appliquée au *Step 1* mais inactive au *Step 2*.

➤ **Module « MESH »** Ce module contient tous les outils nécessaires permettant de générer un maillage par éléments finis sur un assemblage. *Abaqus* permet un nombre important de types de maillages.

➤ **Module « JOB »** Une fois toutes les tâches de définition du modèle réalisées, le module *Job* est appelé pour analyser ce modèle. *Abaqus* effectue alors les calculs nécessaires pour en tirer les résultats.

➤ **Module « VISUALIZATION »** Ce module permet de visualiser le modèle et les résultats, comme les courbes des contraintes et déformations, ... etc.

➤ **Module « SKETCH »** Ce module permet de créer des formes bidimensionnelles qui ne sont pas associées à un objet. Il peut être utilisé pour des extrusions par exemple.

II.4.2 l'arbre du modèle :

L'arbre donne une description visuelle de la hiérarchie des objets du modèle. Tous les objets sont indiqués par de petites icônes, avec en parenthèses, le nombre de ces objets. L'ordre de l'arbre reflète l'ordre classique d'élaboration du modèle. A partir de cet arbre il est possible de retrouver la plupart des fonctionnalités de la barre de menu principale. Par exemple, double cliquer sur *Part* permet de créer un nouvel objet géométrique.

II.4.3 méthodologie :

Résumons dans cette section les actions principales permettant de créer un modèle *Abaqus*:

- *Création du modèle* : Dessiner le profil 2D de la forme voulue, le développer en 3D et rajouter les détails qui peuvent être manquants.
- *Affectation des propriétés aux objets* : Créer le matériau, créer les sections sur lesquelles appliquer les matériaux, et affecter les matériaux aux sections correspondantes.
- *Assemblage du modèle* : Créer les instances et les positionner dans le repère général.
- *Définition des pas d'analyse*.
- *Création des interactions entre les instances* : Créer les surfaces, définir les types de contacts, et associer des surfaces avec des types de contact.
- *Application des conditions aux limites et des chargements* : Définir les pas d'application et définir les types des conditions aux limites ou des chargements.
- *Maillage du modèle* : Partitionner le modèle, choisir les techniques de maillage et choisir les types de maillage.

CHAPITRE III

***ANALYSE DE LA REPARATION DES PLAQUES CORRODEES
NON FISSUREES***

III.1 INTRODUCTION :

Le problème du vieillissement des structures aéronautiques est l'un des défis sérieux aux exploitants des avions commerciaux et militaires. Les coûts d'acquisition élevés associés à l'achat d'avions modernes, couplés avec les budgets augmentés dans l'acquisition de nouveaux avions. Une réparation ou le renforcement de la structure pour restaurer l'efficacité de la structure et donc assurer le maintien de l'aptitude de l'avion est devenu un problème important ces dernières années. Le matériau composite donne de nombreux avantages comme une haute résistance spécifique et la rigidité, légèreté, résistance à la corrosion, dépendance directionnelle des propriétés des matériaux, capacité d'être formé pour se conformer des formes et surfaces complexes pour répondre aux conditions de rigidité variable. La technique de réparation de structures aéronautiques avec une corrosion utilisant de matériaux composites avancés de haute résistance. Nous pouvons citer plusieurs auteurs, qui discutent de ce phénomène,. A. Chukwujekwu Okafor et Hari Bhogapurapu [97] montrent que la contrainte maximale de la peau diminue de manière significative et change de la zone endommagée après l'application du matériau composite (patch). La capacité de charge de l'échantillon réparé par patch considérablement augmenté au cours de celui de l'échantillon non réparé. M.M. Salle Jr [98] a montré l'effet de taux de déplacement et d'ouverture de fissure cyclique sur la vitesse de fissure de fatigue à la corrosion et transitions de mode de fracture pour les alliages Al-Zn-Mg-Cu et HP Seifert [99] sont discutées et résumées. Le comportement en fatigue de corrosion observée est comparé avec les procédures d'évaluation de la fatigue dans les codes et les directives réglementaires. Récemment, plusieurs documents décrivant la théorie de la zone endommagée publiaient. M.fari et F.benyahia [10] a estimé les zones endommagées d'adhésif et le décollage dans la réparation composite aux structures d'aéronefs utilisant la théorie de la zone de endommagée, et il ya des expositions que la zone endommagée de l'adhésif est principalement située sur les bords libres du patch et plus à la région de fissure. F.benyahia et A.albedah [14] ont analysé quatre formes différentes (rectangulaire, trapézoïdale, circulaires et elliptiques) ont montré, le patch rectangulaire offre une grande sécurité par rapport aux autres formes de patch mais il réduit les performances de réparation Le patch elliptique peut-être considéré comme la forme optimale car elle améliore en même temps l'efficacité de la réparation et de la durabilité de réparation.

Ce chapitre présente les principaux résultats de simulation sur la caractérisation de l'alliage 2024 en corrosion et évolution de la zone endommagée de l'adhésif pour des différentes formes de patch sous les effets suivants. L'influence du chargement mécanique

sans fissure est d’abord considérée, puis l’influence de l’épaisseur de l’adhésif, l’influence l’épaisseur de patch seront analysés dans ce chapitre.

Enfin on a étudié effet du module de cisaillement de l’adhésif sur la variation de sa zone endommagée.

III.2 MODELES GEOMETRIQUES:

La géométrie de la structure considérée dans cette étude est illustrée sur la **Figure III.1**. Indiquer une plaque mince rectangulaire en aluminium 2024-T3 avec les dimensions suivantes: (hauteur $H_{pl} = 254$ mm, largeur $W_{pl} = 254$ mm et une épaisseur $e_{pl} = 5$ mm) avec une corrosion de forme aléatoire. La plaque a été réparé avec un simple patch carbone/époxyde d’épaisseur $e_p = 1.5$ mm, les plis dans le patch ont unidirectionnel empilement où les fibres sont orientées suivant la direction de longueur de l’éprouvette (parallèle à la direction de charge). Les propriétés mécaniques des différents matériaux sont données dans le **tableau III.1**.

Propriétés	aluminium	carbone/époxyde	Adhésif(FM73)
▪ Module de Young longitudinal E_1 (GPa)	72	210	4.2
▪ Module de Young transversal E_2 (GPa)		19.6	
▪ Module de Cisaillement G_r		5.460	
▪ Coefficient de Poisson longitudinal ν_{12}	0.33	0.3	0.32
▪ Coefficient de Poisson transversal ν_{13}		0.2	

Tab. III.1 : Propriétés élastiques des différents matériaux [14].

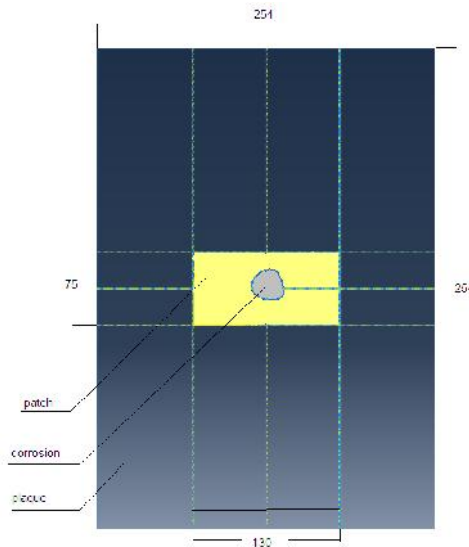


Fig.III.1: Géométrie de la structure analysée.

Afin d'analyser l'effet de la forme de patch, quatre formes ont été choisies dans cette étude: rectangulaire, trapézoïdale, circulaire et elliptique. Les tailles de ces patches sont données dans la **figure III.2**. Le patch est collé avec $e_a=0,15$ mm d'épaisseur d'adhésif époxy FM73.

La plaque est soumise à une charge de traction uniaxiale d'amplitude $\sigma=200$ MPa. La courbe contrainte-déformation de l'adhésif époxy FM 73 est présentée sur la **Figure III.4**.

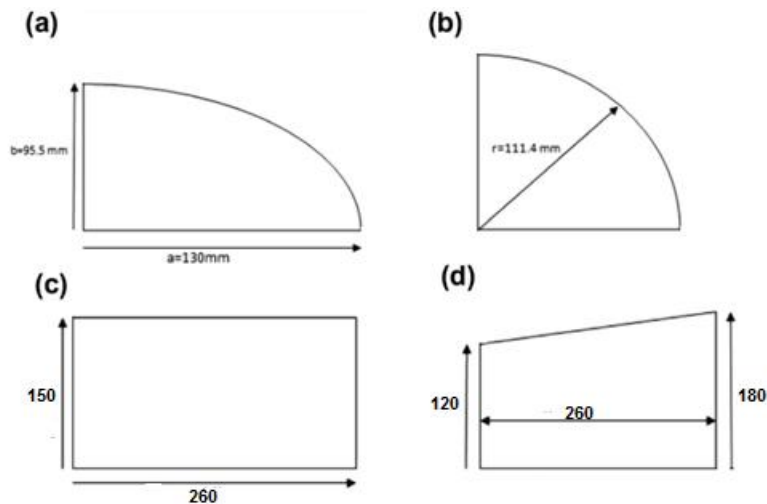


Fig. III.2 : Dimensions des patches (a) elliptique, (b) circulaire, (c) rectangulaire, (d) trapézoïdale.

III.3 MODELISATION NOMINALE ELEMENTS FINIS :

L'analyse implique une méthode des éléments finis à trois dimensions en utilisant le code éléments finis ABAQUS [102]. Le modèle est composé de trois sous-sections pour une plaque avec une corrosion, l'adhésif, et la pièce composite (patch). La plaque a quatre couches d'éléments dans la direction de l'épaisseur, l'adhésif n'avait qu'une seule couche d'éléments à travers l'épaisseur et le patch a deux couches d'éléments à travers l'épaisseur. Le maillage a été raffiné près de la zone de la corrosion avec une dimension de l'élément de 0,05 mm en utilisant au moins vingt de ces éléments fins autour de la corrosion. La **figure III.3** montre le maillage global du spécimen et l'affinement du maillage dans la zone de la corrosion.

Le mode opératoire utilisé dans l'analyse par éléments finis est le suivant: la contrainte de traction a été appliquée à l'échantillon saisi. Général statique " STEP " - option a été utilisée pour l'analyse avec ABAQUS. Incrémentation automatique de l'étape a été utilisée avec le nombre maximal d'incrément de 200. La taille de l'incrément minimum était 10^{-5} . La taille maximale de l'incrément vaut l'unité. Néanmoins, le code de solveur ABAQUS pourrait remplacer matrice choix du solveur selon le " STEP " - option.

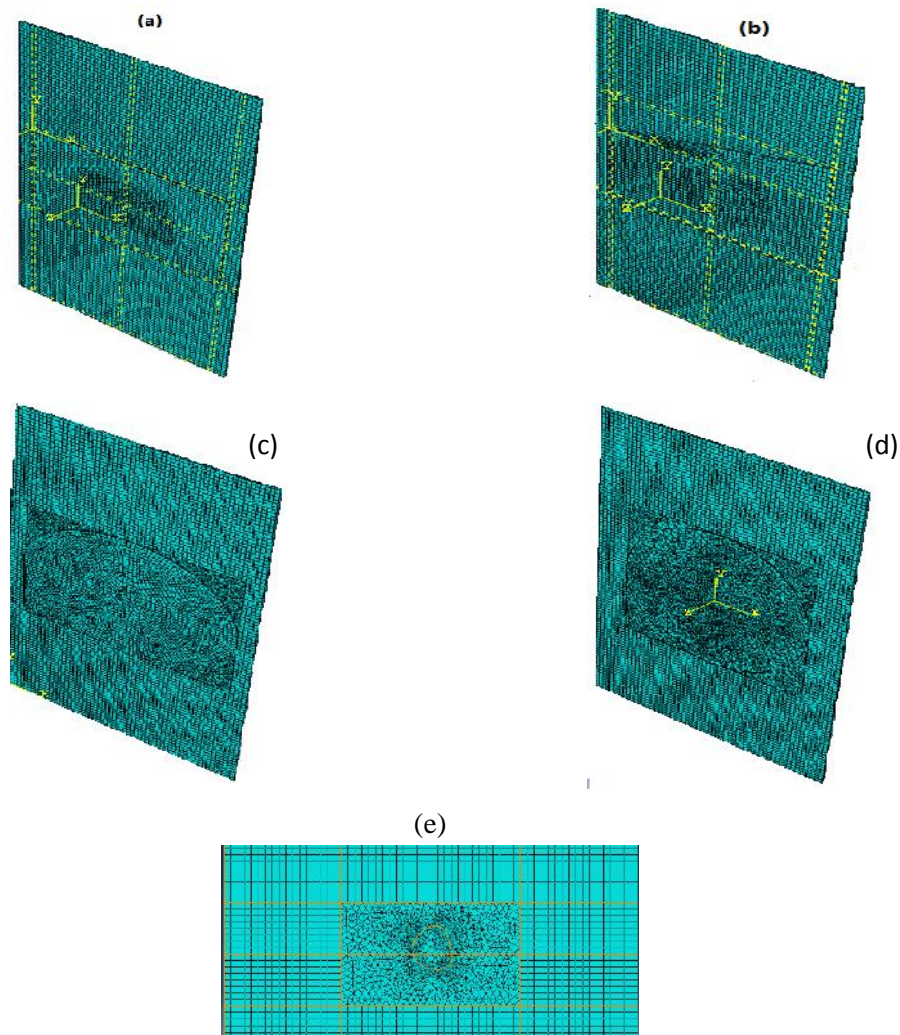


Fig. III.3 : Maillage de Plaque avec un patch de forme (a) rectangulaire, (b) trapézoïdale, (c) elliptique, (d) circulaire. (e) près de corrosion.

La forme géométrique de la corrosion utilisée est aléatoire en 3D avec une épaisseur $e=0.05\text{mm}$. Avant la réparation de la structure, la surface corrodée est nettoyée pour enlever le film de corrosion et garder les mêmes propriétés mécaniques.

III.4 MODELE DE LA ZONE ENDOMMAGEE :

L'hypothèse principale de la théorie a été élaborée après réparation par patch et développement d'une zone endommagée. Sous faible amplitude de charge, les endommagements localisés se développent aux bords du patch. Cet endommagement se produit parce que le matériau est soumis localement à des déformations plus élevées que la déformation finale de matériau. Sous l'amplitude de la charge moyenne, les zones endommagées se développent si la taille et la concentration des points des zones endommagées augmentent. Comme la charge de rupture est atteinte, la zone endommagée dans l'adhésif devient critique et les composants individuels des endommagements fusionnent et forment une fissure. Numériquement, la zone endommagée est identifiée par le marquage des éléments pour lesquels un critère de rupture est dépassé. Par conséquent, le critère de rupture utilisé pour les endommagement de cohésion de la couche adhésive est équivalent au critère de déformation de Von Mises:

$$V_{equiv} = \frac{1}{\sqrt{2(1+\nu)}} X \sqrt{(V_{p1} - V_{p2})^2 + (V_{p2} - V_{p3})^2 + (V_{p3} - V_{p1})^2} \quad (III.2)$$

Quand V_{equiv} est la déformation équivalent, V_{pi} sont les déformations plastiques dans les différentes directions et ν le coefficient de Poisson.

Ce critère est satisfait lorsque la déformation principale maximale dans le matériau atteint la déformation principale ultime. Pour chaque critère de rupture d'une déformation ultime sera définie et la taille correspondante de la zone endommagée à la rupture est déterminée. Pour la colle époxy FM 73, la zone endommagée est définie comme un domaine dans lequel la déformation dépasse la déformation ultime de 7,87% [103] voir **Figure III.4**.

Dans la théorie de la zone endommagée, le joint de colle est supposé décollé lorsque la zone endommagée atteint une valeur critique donnée. La zone endommagée peut être définie soit par une contrainte ou un critère de déformation. Le critère de déformation est plus approprié quand l'adhésif présente une non-linéarité significative. Il existe deux modes de rupture des joints adhésifs: rupture d'interface et cohésives. Dans le mode interfaciale, la charge de rupture critique du joint de colle est liée à la contrainte interfaciale entre l'adhésif et la partie à coller [103]. Par conséquent, l'adhésif décolle lorsque le critère de rupture cohésive est atteint dans le joint adhésif. Sachant que les défaillances de cohésion se produisent dans le joint de colle, le critère de rupture adhésive pour la zone endommagée doit être utilisé. Pour les matériaux isotropes, critères de rupture tels que les critères de Von-Mises et Tresca peuvent être utilisés pour mieux comprendre le décollement de l'adhésif. De plus, le

décollement de joints de colle peut être prédit en utilisant la méthode du rapport de la zone endommagée. Le rapport de la zone endommagée

$$D_R = \frac{\sum A_i}{A} \quad (\text{III.3})$$

D_R est le rapport de la zone endommagée, A_i est la surface sur laquelle la déformation équivalente est supérieure à 7,87%, A est la surface totale de l'adhésif. Il a été démontré que la colle époxy FM 73 échoue lorsque le rapport D_R atteint la valeur de 0,2474 [103].

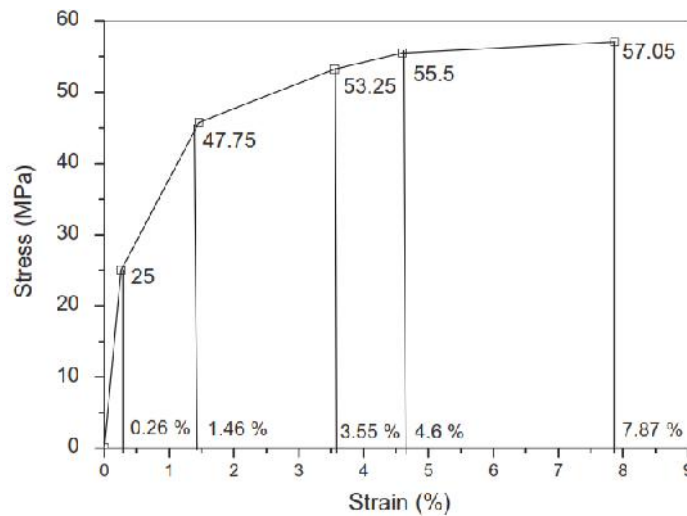


Fig. III.4 : Courbe contrainte-déformation de l'adhésif époxy FM 73.

III.5 RESULTATS ET DISCUSSIONS:

Cette partie a été effectuée afin de déterminer l'évolution de la zone endommagée dans la couche adhésive due à la corrosion sans fissure. La théorie de la zone endommagée a été employée pour atteindre les objectifs de l'analyse. La surface de la zone endommagée d'une plaque avec une corrosion de forme aléatoire et sans fissure a été calculée pour différents effets (de la charge, de l'épaisseur adhésive, de l'épaisseur de patch et du module de cisaillement de l'adhésif), avec différentes formes de patch (rectangulaire, trapézoïdal, circulaire et elliptique). La théorie de la zone endommagée a été employée pour évaluer la progression des endommagements dans la couche adhésive pendant l'analyse. La surface des zones endommagées est représentée en gris.

III.5.1 Effet de la charge sur la variation de la zone endommagée de l'adhésif :

Cet effet a été effectué afin de déterminer l'évolution de la zone endommagée dans la couche adhésive. D'abord, la surface de la zone endommagée a été calculée pour différentes valeurs de chargement σ (200,220,240,...,300)MPa avec un adhésif FM73 d'épaisseur $e_a=0.15$ mm et de module de cisaillement $G_a=4200$ MPa, pour des différentes formes de patch.

Après le tracé des différents graphes du rapport de la zone endommagée on effectue une comparaison entre les différentes formes.

III.5.1.1 patch rectangulaire

La **figure III.5** représente la répartition de la zone endommagée dans l'adhésif de patch de forme rectangulaire avec une épaisseur de 1.5mm et une colle d'épaisseur de 0.15mm et un module de cisaillement $G_a = 4200$ MPa. On voit clairement d'après ces figures que la taille des zones endommagées de l'adhésif augmente en fonction de l'augmentation de la charge appliquée. Dans le cas de la charge 200MPa (**Fig. III.5.a**) on remarque une faible apparition de la zone endommagée au niveau des angles (coins) de la colle. Pour une charge de 240MPa (**Fig. III.5.b**) on observe que la zone endommagée apparaît au alentour de la corrosion et sur les cotés (supérieurs et inférieurs) de patch. Et enfin dans le cas de 300MPa (**Fig. III.5.c**) la zone endommagée est très grande et elle occupe toute la surface de la corrosion.

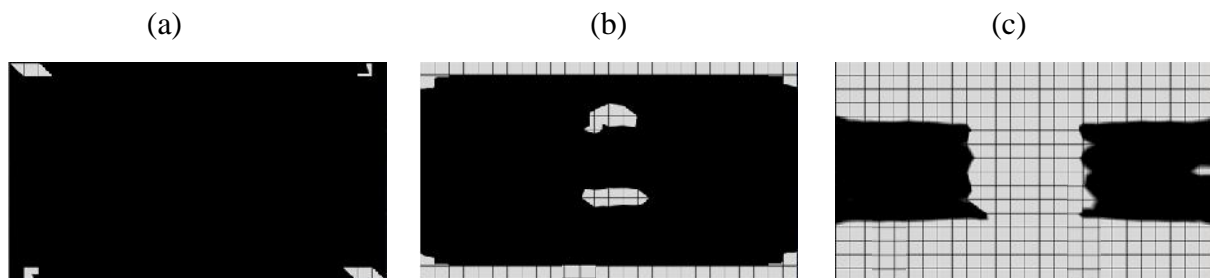


Fig. III.5 : Zone endommagée pour un patch de forme rectangulaire (a) $\sigma=200$ MPa, (b) $\sigma=240$ MPa et (c) $\sigma=300$ MPa.

Le graphe de la **Figure III.6** représente de la variation de la zone endommagée D_R en fonction des différentes valeurs de la charge appliquée. On remarque que D_R le rapport de la zone endommagée augmente de 0.03 jusqu'à 0.12 dans l'intervalle des charges $\sigma=200$ MPa et $\sigma=220$ MPa. Puis la courbe prend une forme asymptotique horizontale de valeur constante de D_R égale de 0.13 jusqu'à la charge de $\sigma=260$ MPa et au-delà de cette charge la courbe augmente brutalement et atteinte la valeur de 0.37. On peut dire aussi que la valeur critique du rapport de la zone endommagée est atteinte pour la charge $\sigma=280$ MPa qui vaut 0.247.

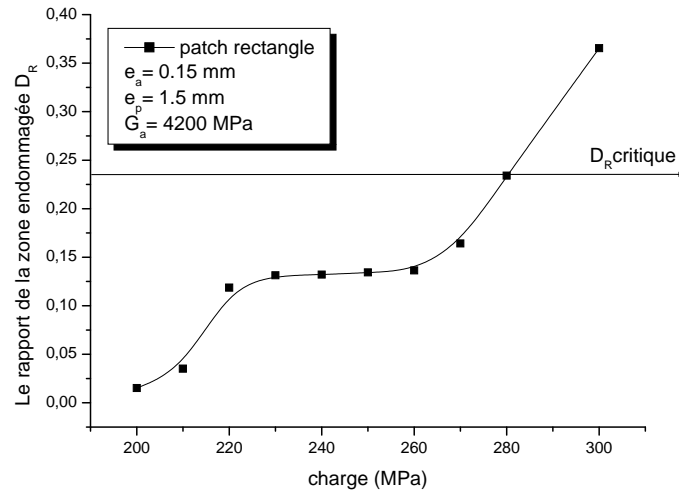


Fig. III.6 : Rapport de la zone endommagée en fonction de la charge.

III.5.1.2 patch trapézoïdale

La **Figure III.7** montre la variation de la zone endommagée en fonction de la charge σ (200, 240 et 300) MPa pour un patch de forme de trapèze avec les mêmes propriétés que dans le cas du patch rectangulaire. On constate dans le cas de 200MPa la zone endommagée existe sur le coté inférieur (bas) du trapèze et une petite zone au niveau d'un seul angle mais aucune zone au niveau de la corrosion. Dans le cas de $\sigma=240$ MPa la zone endommagée est très claire et très étendue, il apparait une zone au niveau de la corrosion, et aussi aux cotés supérieurs et inférieurs de trapèze. Pour le cas de la charge de 300MPa la zone endommagée augmente au niveau de la zone de corrosion et occupe presque tous les cotés inférieur et supérieur du trapèze.

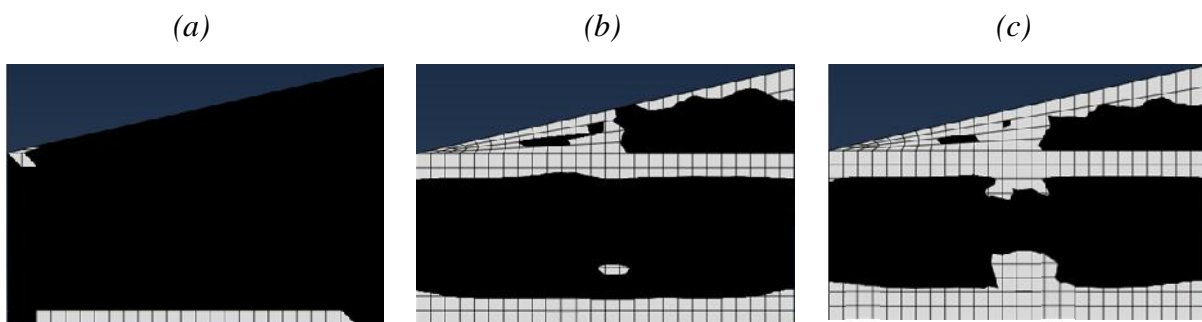


Fig. III.7 : zone endommagée pour un patch de forme trapézoïdale (a) $\sigma=200$ MPa, (b) $\sigma=240$ MPa et (c) $\sigma=300$ MPa.

Le graphe de la (**Fig. III.8**) met en valeur le rapport de la zone endommagée en fonction de la charge σ . Il comporte en deux parties, la première entre $\sigma=200\text{MPa}$ et $\sigma=230\text{MPa}$ la courbe reste presque stable avec un petit changement de la zone endommagée et l'autre partie entre $\sigma=230\text{MPa}$ et $\sigma=300\text{MPa}$ le graphe augmente progressivement, plus la charge augmente plus le rapport de la zone endommagée augmente. On remarque aussi que la valeur critique du rapport de la zone endommagée ($D_{Rc} = 0.247$) est atteinte après la valeur de $\sigma=270\text{MPa}$.

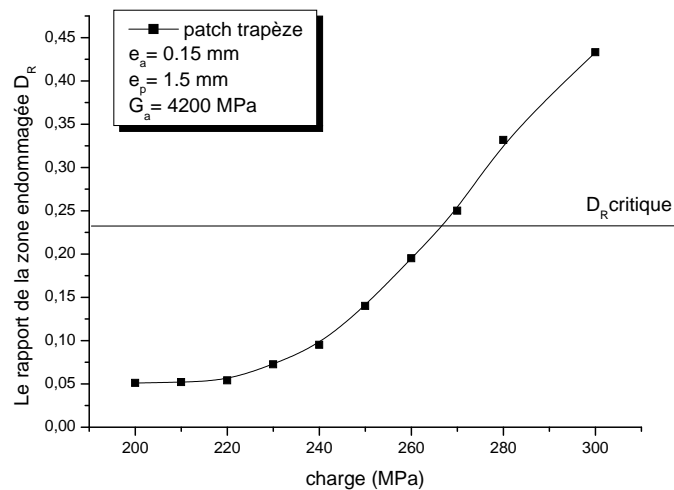


Fig. III.8 : Rapport de la zone endommagée en fonction de la charge pour.

III.5.1.3 patch circulaire

Cet effet a été réalisé afin de déterminer l'évolution de la zone endommagée dans la couche de l'adhésif illustré dans la **Figure III.9**. Tout d'abord on observe une surface endommagée dans l'entourage du patch mais aucune apparition de l'endommagement au niveau de la corrosion dans le cas de $\sigma=200\text{MPa}$. Dans le cas de $\sigma=240\text{MPa}$ on remarque une petite zone endommagée au niveau du bord supérieur et inférieur de la corrosion et augmente au niveau de la périphérie du patch relativement au cas précédent. Enfin dans le cas de $\sigma=300\text{MPa}$ on observe que la zone endommagée occupe toute la surface de la corrosion et s'étend sur le périmètre de la colle.

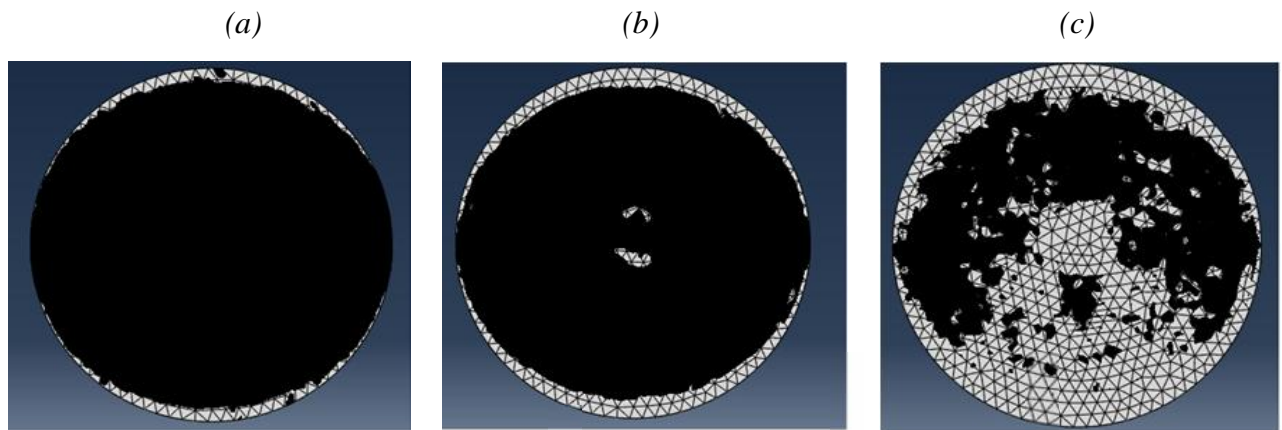


Fig. III.9 : zone endommagée pour un patch de forme circulaire (a) $\sigma=200$ MPa, (b) $\sigma=240$ MPa et (c) $\sigma=300$ MPa.

Le graphe de la **figure III.10** montre la variation du rapport de la zone endommagée de l'adhésif de forme circulaire en fonction de différentes charges. A partir de ce graphe on peut dire qu'il comporte une seule phase croissante, plus la charge augmente plus le rapport de la zone endommagée augmente, on peut voir aussi que la valeur de D_{Rc} est atteinte après la valeur de la charge $\sigma=270$ MPa.

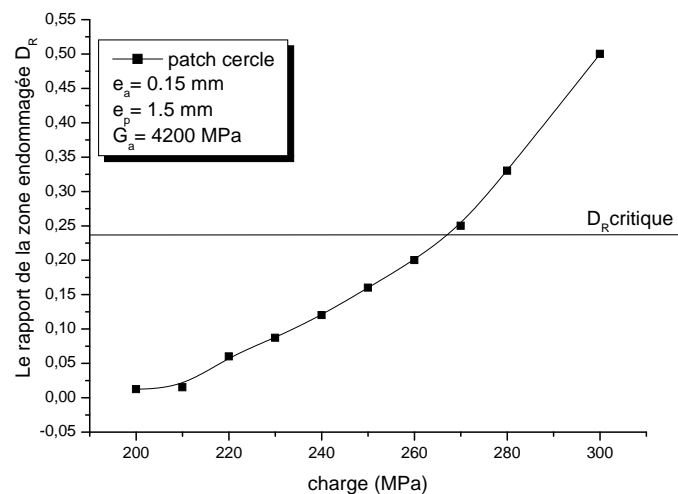


Fig. III.10 : Rapport de la zone endommagée en fonction de la charge.

III.5.1.4 patch ellipsoïdale

La variation de la zone endommagée avec l'utilisation du patch de forme elliptique en fonction de différentes valeurs de charges σ variant entre 200MPa et 300MPa. La **figure III.11** montre que la zone endommagée augmente avec l'augmentation de la charge. On constate que la zone endommagée dans le cas de $\sigma=200$ MPa est située au niveau du périmètre de l'ellipse avec une petite aire. Concernant la charge $\sigma=240$ MPa cette zone se développe aux

extrémités et une apparition au niveau des bords de la corrosion, et enfin dans le cas de $\sigma=300\text{MPa}$ la zone endommagée occupe une grande partie de l'adhésif presque dans toutes les directions de la colle et occupe toute la surface de la corrosion.

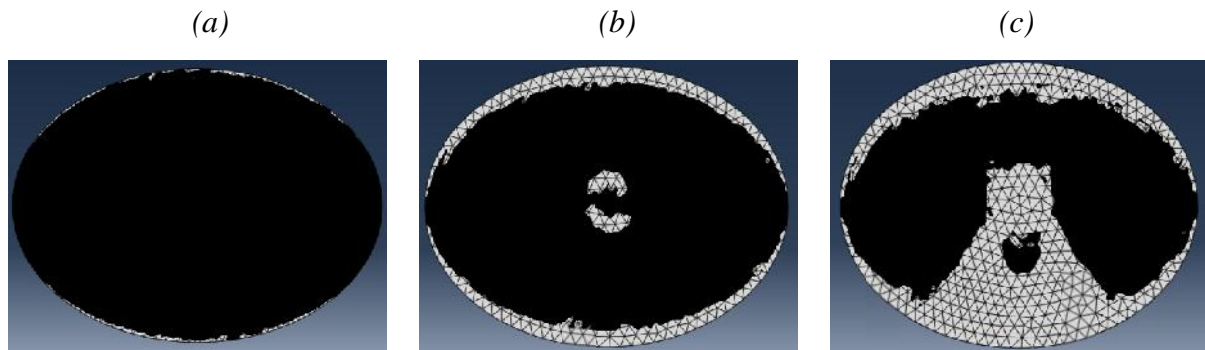


Fig. III.11 : Zone endommagée pour un patch de forme ellipsoïdale (a) $\sigma=200\text{ MPa}$, (b) $\sigma=240\text{MPa}$ et (c) $\sigma=300\text{ MPa}$.

Les résultats obtenus montrent dans la courbe de la **figure III.12** la variation du rapport de la zone endommagée. À partir de celle-ci on constate que le rapport de la zone endommagée (D_R) augmente en fonction de l'augmentation de la charge. Lorsque la charge appliquée est supérieure à $\sigma=270\text{MPa}$ le rapport de la zone endommagée est supérieur à D_{Rc} critique qui entraîne une dégradation de l'état de la colle qui entraîne automatiquement la détérioration puis décollement du patch.

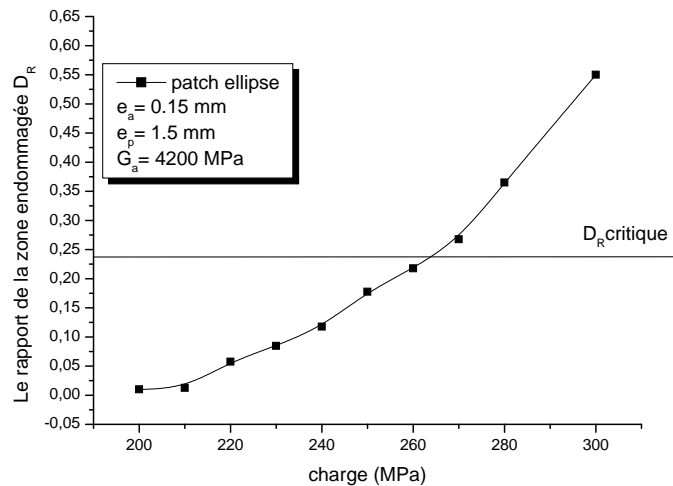


Fig. III.12 : Rapport de la zone endommagée en fonction de la charge.

III.5.1.5 Comparaison entre les différents D_R en fonction de la charge pour les différentes formes de patch :

Pour une meilleure illustration de l'effet de la charge sur la variation de la zone endommagée de l'adhésif nous avons essayé de calculer l'étendue de cette zone en fonction de différentes valeurs de la charge afin d'évaluer le rapport de la zone endommagée. Nous avons tracé la **figure III.13** celle-ci montre la variation du rapport de la zone endommagée. L'augmentation de la charge σ entraîne donc une augmentation de D_R puis il est noté que la réparation de la corrosion par l'utilisation du patch de forme rectangle est meilleure que les autres formes (trapèze, cercle et ellipse) car la valeur critique du rapport de la zone endommagée n'est atteinte qu'à $\sigma=280\text{MPa}$ contrairement pour les autres cas D_{Rc} est atteinte pour $\sigma=270\text{MPa}$.

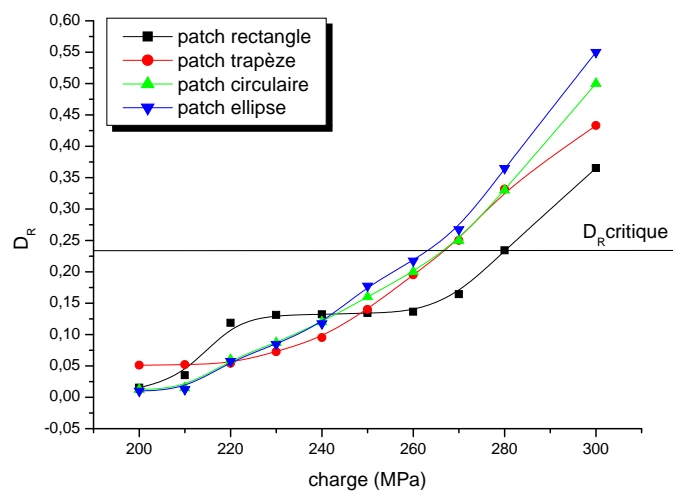


Fig. III.13 : Rapport de la zone endommagée vs charge pour les différentes formes de patch.

III.5.2 Effet de l'épaisseur de l'adhésif sur la variation de la zone endommagée de l'adhésif :

L'étude de l'effet de l'épaisseur de l'adhésif permet d'estimer le risque de rupture dans la couche adhésive. Les figures suivantes montrent la distribution de la zone endommagée pour les différentes formes de patch dans la couche adhésive. Pour déterminer cet effet il faut tout d'abord fixer l'amplitude de la charge $\sigma=200\text{MPa}$, puis on garde l'épaisseur de patch constante $e_p=1.5\text{mm}$ et le module de cisaillement de l'adhésif $G_a=4200\text{MPa}$. On varie les valeurs de l'épaisseur de l'adhésif entre 0.05mm et 0.5mm avec un pas de 0.05mm , afin de pouvoir étudier une comparaison entre le rapport de la zone endommagée pour les différentes formes du patch.

III.5.2.1 patch rectangulaire

Le comportement de la couche de l'adhésif en fonction de son épaisseur est montré sur la **figure III.14**. Pour l'épaisseur de l'adhésif $e_a=0.05\text{mm}$ on remarque que la zone endommagée apparaît au niveau des longueurs du rectangle et négligeable aux angles du patch. Dans le cas $e_a=0.2\text{mm}$ on observe une diminution de la zone endommagée jusqu'à la disparition de cette zone pour l'épaisseur de l'adhésif de 0.5mm .

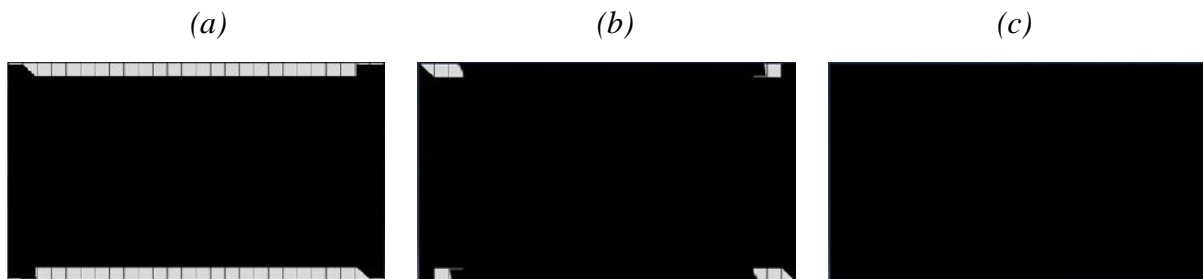


Fig. III.14 : Zone endommagée pour un patch de forme rectangulaire (a) $e_a=0.05\text{mm}$, (b) $e_a=0.2\text{mm}$ et (c) $e_a=0.5\text{mm}$.

L'effet de l'épaisseur de l'adhésif sur la zone endommagée pour un patch de forme rectangulaire est représenté sur la courbe de la **figure III.15**. En début on remarque que le rapport de la zone endommagée diminue brutalement de 0.05 jusqu'à 0.005 respectivement pour les épaisseurs de l'adhésif de 0.05mm jusqu'à l'épaisseur 0.25mm, et au delà de cette épaisseur la valeur de D_R est presque constante est vaut 0.005, jusqu'à son annulation ce qui explique la disparition de la zone endommagée de l'adhésif. On remarque que pour toutes les valeurs de l'épaisseur de l'adhésif prises la valeur critique de la zone endommagée n'est pas atteinte ($D_{Rc}=0.247$).

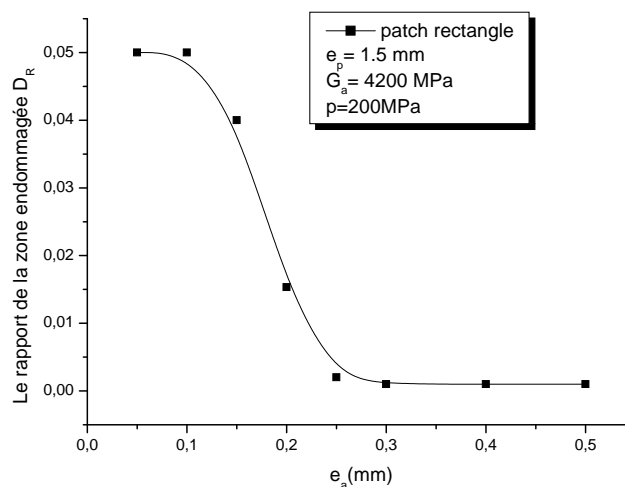


Fig. III.15 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif.

III.5.2.2 patch trapézoïdale

La variation de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif pour un patch de forme trapézoïdale est représentée sur la **figure III.16**. Pour l'épaisseur de 0.05mm il y a apparition de la zone endommagée au niveau de la base et du côté incliné du trapèze, puis diminution de cette zone pour $e_a=0.2\text{mm}$ jusqu'à sa disparition totale pour l'épaisseur de l'adhésif de 0.5mm.

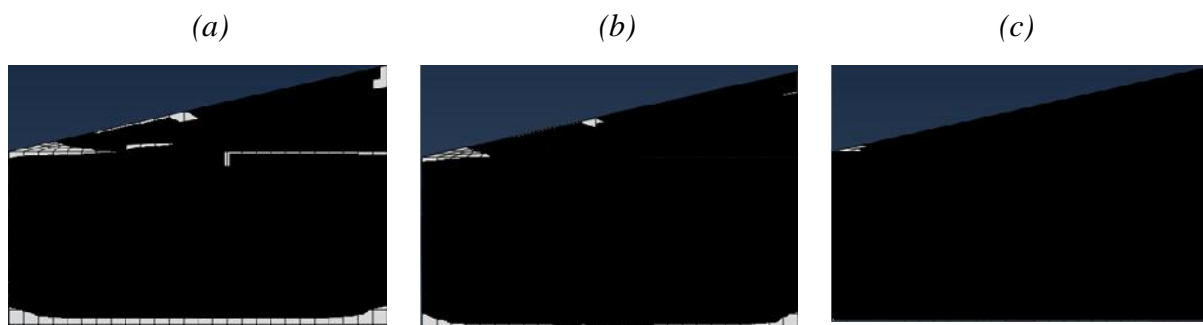


Fig. III.16 : Zone endommagée pour un patch de forme trapézoïdale (a) $e_a=0.05\text{mm}$, (b) $e_a=0.2\text{mm}$ et (c) $e_a=0.5\text{mm}$.

La **figure III.17** met en valeur la variation du rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif. Le graphe descend progressivement de la valeur de D_R à partir de 0.035 jusqu'à atteindre 0.002 pour les épaisseurs comprises entre 0.05mm et 0.2mm. Puis on remarque une quasi-stabilité en comportement de l'adhésif jusque-là dernière valeur de l'épaisseur $e_a=0.5\text{mm}$.

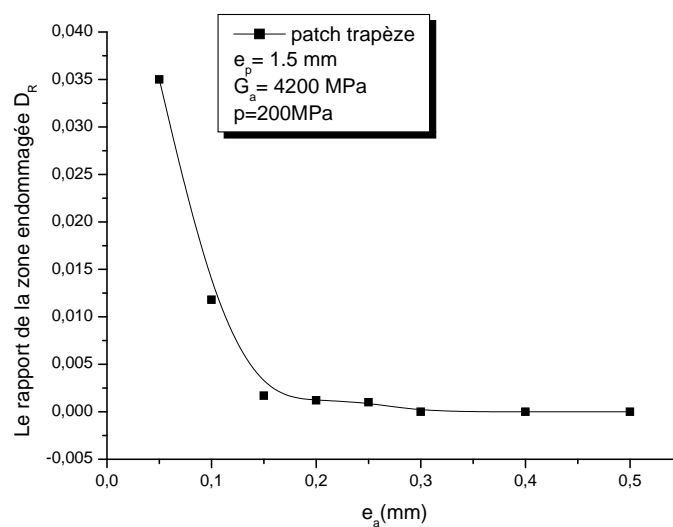


Fig. III.17 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif.

III.5.2.3 patch circulaire

La **figure III.18** représente la variation de la zone endommagée en fonction de la variation de l'épaisseur de l'adhésif. On remarque que la zone endommagée de l'adhésif est concentrée au niveau des extrémités du patch. L'augmentation de l'épaisseur de l'adhésif entraîne automatiquement une diminution de la zone endommagée, et dans cas de $e_a=0.5\text{mm}$ on remarque que la zone endommagée presque est négligeable.

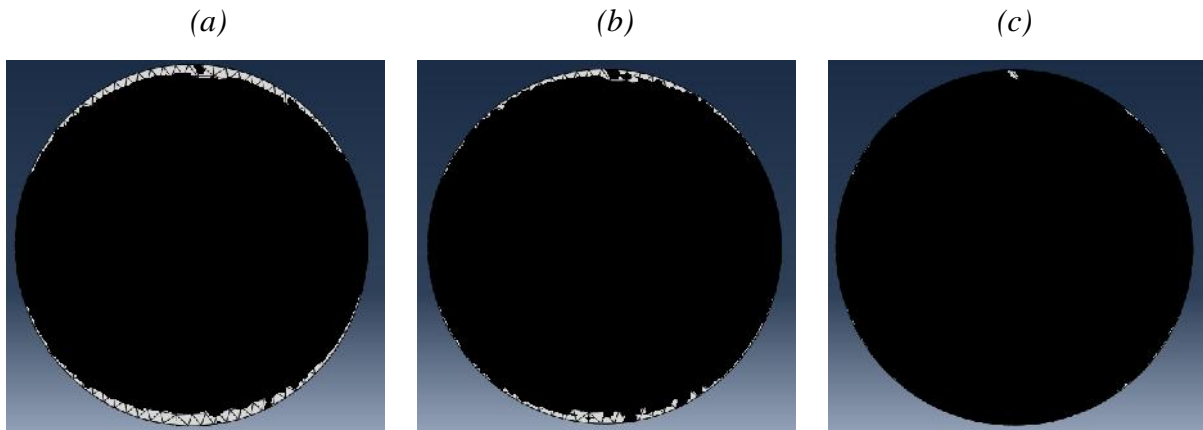


Fig. III.18 : Zone endommagée pour un patch de forme circulaire (a) $e_a=0.05\text{mm}$, (b) $e_a=0.2\text{mm}$ et (c) $e_a=0.5\text{mm}$.

La courbe représentée en **figure III.19** montre la variation de D_R en fonction de l'épaisseur de l'adhésif. L'augmentation de l'épaisseur de l'adhésif entraîne la diminution du rapport de la zone endommagée. Pour la valeur de $e_a=0.05\text{mm}$ on obtient $D_R=0.02$ et cette valeur diminue jusqu'à la valeur de 0.01 pour $e_a=0.5\text{mm}$.

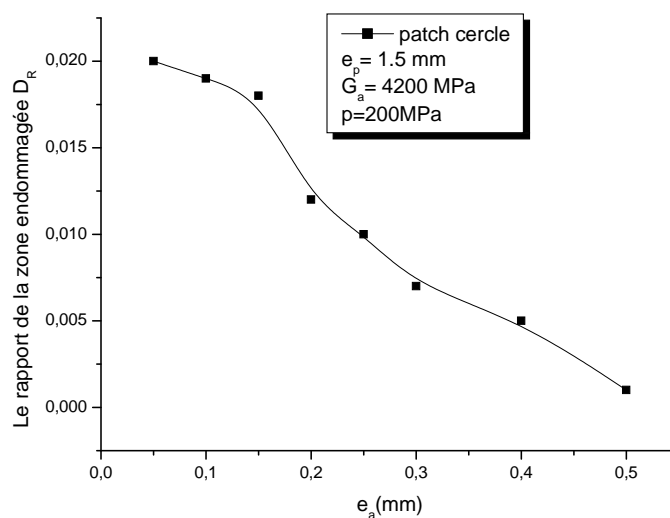


Fig. III.19 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif.

III.5.2.4 patch ellipsoïdale

L'effet de l'épaisseur de l'adhésif sur la variation de la zone endommagée pour un patch de forme ellipsoïdale est illustré sur la (Fig. III.20). On a obtenu les valeurs de la zone endommagée pour les différentes valeurs de l'épaisseur de l'adhésif $e_a = (0.05\text{mm} - 0.5\text{mm})$. On observe que dans les différentes images, la zone endommagée est localisée aux extrémités supérieures et inférieures de l'ellipse. On remarque aussi que la zone endommagée diminue en fonction de l'augmentation de l'épaisseur de l'adhésif.

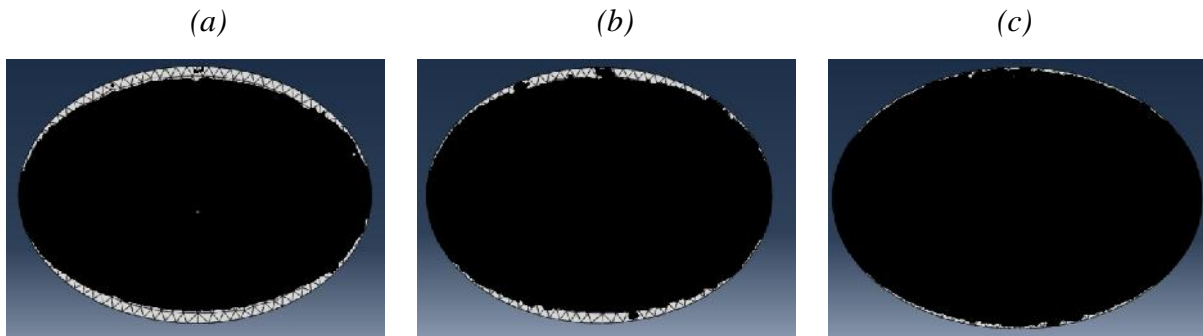


Fig. III.20 : Zone endommagée pour un patch de forme ellipsoïdale (a) $e_a=0.05\text{mm}$, (b) $e_a=0.2\text{mm}$ et (c) $e_a=0.5\text{mm}$.

La courbe de la figure III.21 représente la variation du rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif. L'augmentation de l'épaisseur de l'adhésif entraîne une diminution du rapport de la zone endommagée. En effet, la valeur de D_R atteinte 0.025 pour l'épaisseur $e_a = 0.05\text{mm}$ puis le rapport se stabiliser jusqu'à l'épaisseur de 0.15mm ensuite décroît jusqu'à la valeur de $D_R = 0.01$ pour $e_a = 0.4\text{mm}$ puis on remarque presque une stabilité du rapport de la zone endommagée après cette épaisseur.

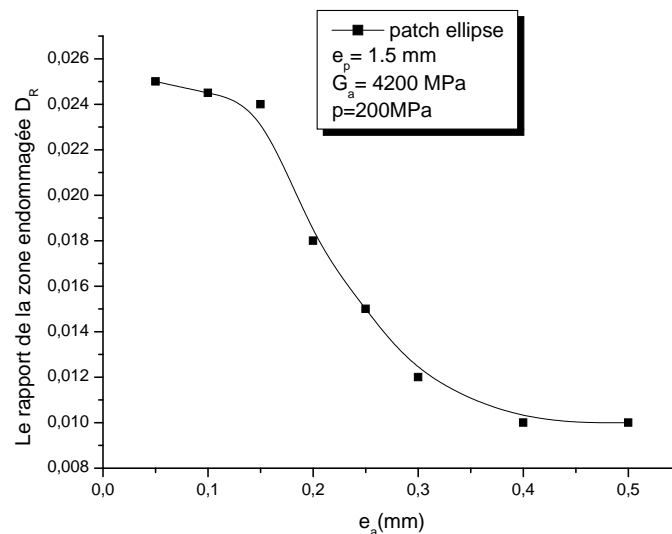


Fig. III.21 : Rapport de la zone endommagée vs de l'épaisseur de l'adhésif.

III.5.2.5 Comparaison entre les différents D_R en fonction de l'épaisseur de l'adhésif pour les différentes formes de patch :

Pour toutes les formes du patch (rectangle, trapèze, cercle ou ellipse) on remarque sur la **figure III.22** qui représente la courbe de la variation du rapport de la zone endommagée en fonction de la variation de l'épaisseur de l'adhésif. On remarque que quelle que soit la forme du patch, quand l'épaisseur de l'adhésif augmente le D_R diminue aussi. On constate que le comportement de la colle pour un patch rectangulaire donne une valeur de D_R la plus élevée pour la même épaisseur de 0.05mm et ceci constitue un danger pour la forme rectangulaire de l'adhésif. On peut en conclure que le D_R pour le patch rectangulaire pour les épaisseurs suivantes $e_a = 0.05\text{mm}$, 0.1mm et 0.15mm est élevé, mais lorsque $e_a > 0.15\text{mm}$ on observe un comportement identique pour toutes les différentes formes du patch. On remarque aussi d'après cette courbe que pour toutes les épaisseurs de l'adhésif les valeurs du rapport de la zone endommagée n'atteignent pas la valeur critique de la zone endommagée ($D_{Rc} = 0.247$).

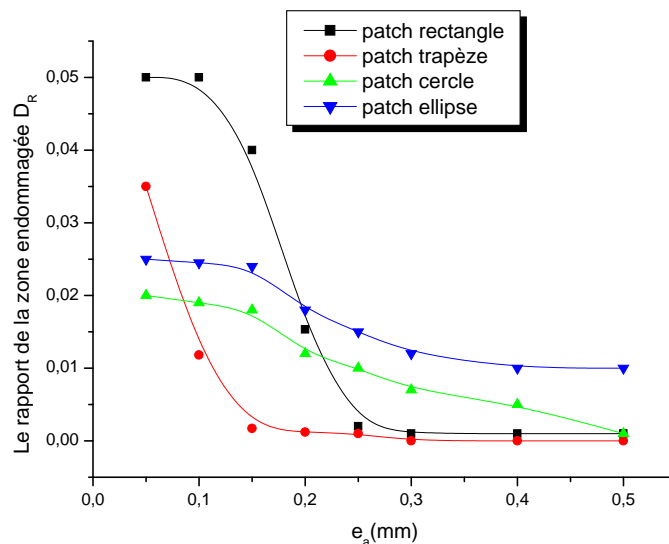


Fig. III.22 : Rapport de la zone endommagée vs l'épaisseur de l'adhésif pour les différentes formes de patch.

III.5.3 Effet de l'épaisseur du patch sur la variation de la zone endommagée de l'adhésif :

Pour montrer cet effet, on considère la charge appliquée constante $\sigma=200\text{MPa}$, puis les propriétés de, l'épaisseur et le module de cisaillement sont considérés comme fixes ($e_a=0.15\text{mm}$ et $G_a=4200\text{MPa}$).

III.5.3.1 patch rectangulaire

La **figure III.23** représente l'évolution de la zone endommagée de l'adhésif en fonction des différentes épaisseurs du patch. À partir de cette figure on remarque que cette zone existe sur une petite surface au côté supérieur du patch pour $e_p = 0.5\text{mm}$ et puis pour l'épaisseur $e_p = 1.5\text{mm}$ la zone s'élargit sur les deux côtés du rectangle supérieur et inférieur et diminue aux extrémités du rectangle **figure III.23.b**, par contre pour l'épaisseur $e_p = 5\text{mm}$ on remarque une disparition totale de la zone endommagée de l'adhésif.

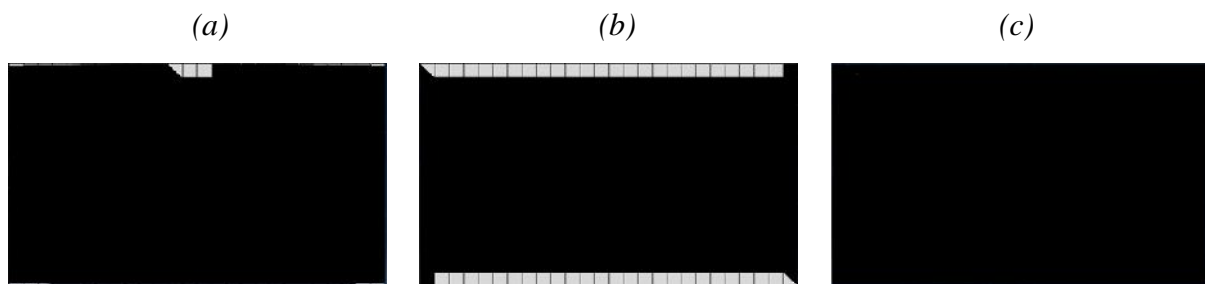


Fig. III.23 : Zone endommagée pour un patch de forme rectangulaire (a) $e_p = 0.5\text{mm}$, (b) $e_p = 2\text{mm}$ et (c) $e_p = 5\text{mm}$.

La courbe de la figure **III.24** montre la variation du rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de patch de forme rectangulaire. Tout d'abord dans l'intervalle de $e_p = (0.5-1.5)$ mm on remarque que le rapport de la zone endommagée croît rapidement, après cette épaisseur le D_R décroît entre $e_p = (1.5-3)$ mm, puis une constance du rapport de la zone endommagée jusqu'à la valeur de $D_R = 0$ pour $e_p = 5\text{mm}$.

Le risque de rupture de l'adhésif est important pour l'épaisseur de patch égale 1.5mm, ceci impose un choix d'une épaisseur optimale du patch.

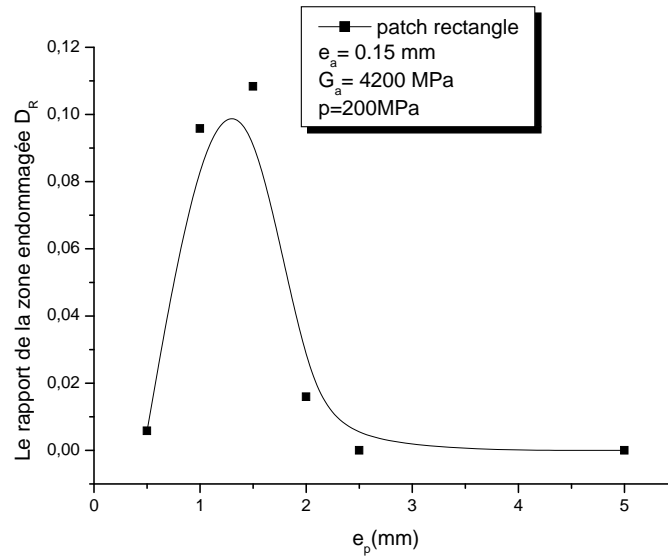


Fig. III.24 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de patch.

III.5.3.2 patch trapézoïdale

La **figure III.25** illustre la variation de la zone endommagée pour différentes valeurs de l'épaisseur de patch. On remarque d'après ces figures que la zone endommagée augmente avec l'augmentation de l'épaisseur du patch. En plus celle-ci est brutale dans le cas de $e_p = 5\text{mm}$ (**Fig. III.25.c**).

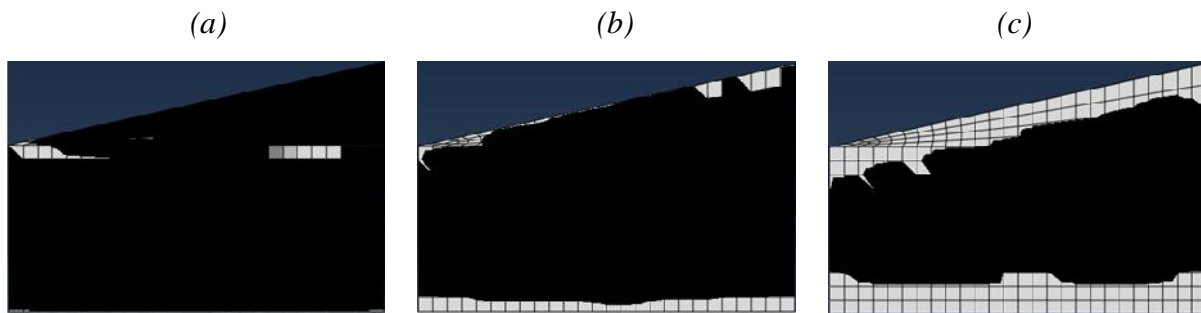


Fig. III.25 : Zone endommagée pour un patch de forme trapézoïdale (a) $e_p = 0.5\text{mm}$, (b) $e_p = 2\text{mm}$ et (c) $e_p = 5\text{mm}$.

Le calcul de D_R est représenté dans la **figure III.26** qui montre la variation du rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur du patch. On remarque que l'augmentation de l'épaisseur de patch entraîne une augmentation de D_R . Lorsque l'épaisseur du patch $e_p < 2\text{mm}$ la valeur de D_R est presque constante. Il y a augmentation proportionnelle entre l'épaisseur et les valeurs de D_R dans l'intervalle $e_p = (2-5)\text{ mm}$. Quant à la valeur critique de D_R est atteinte pour l'épaisseur du patch de 4.5mm.

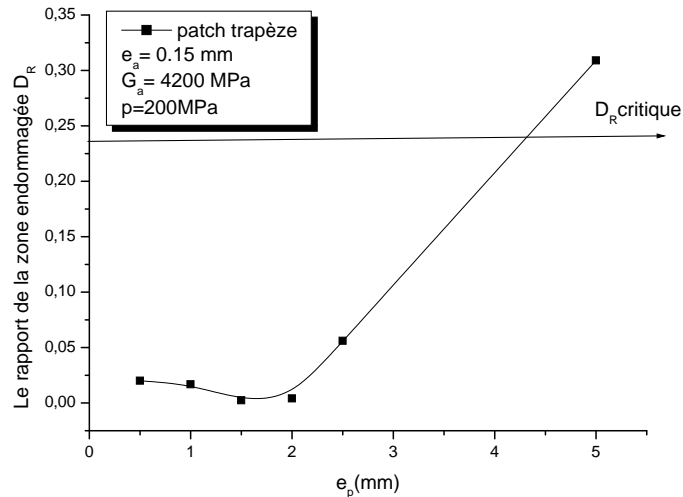


Fig. III.26. Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de patch.

III.5.3.3 patch circulaire

La **figure III.27** représente la variation de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de patch. Pour tous les cas de figures, la zone endommagée est localisée sur le périmètre de la colle. Plus que l'épaisseur du patch augmente la zone endommagée augmente aussi. Par contre au niveau de la zone corrodée aucune surface endommagée de la colle n'est observée pour toutes les valeurs de l'épaisseur du patch.

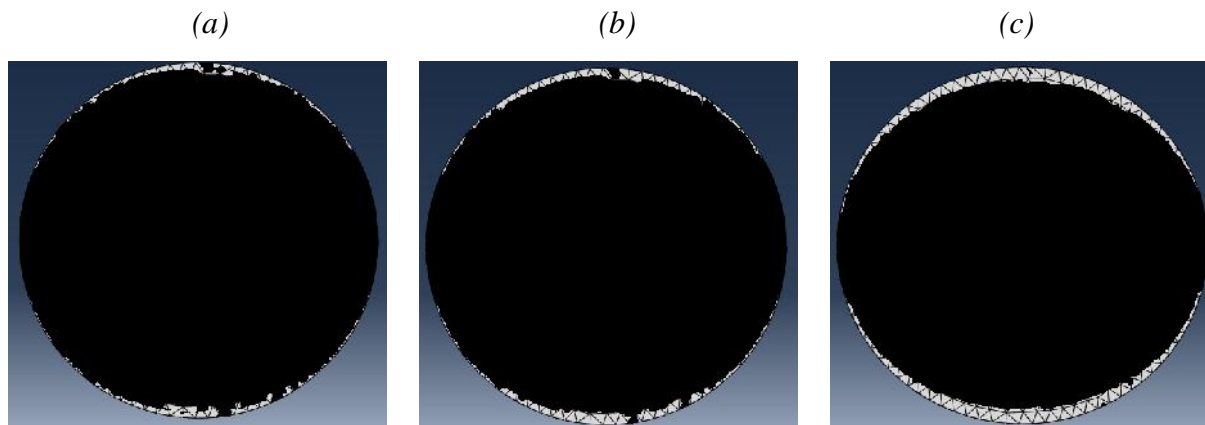


Fig. III.27. Zone endommagée pour un patch de forme circulaire (a) $e_p = 0.5\text{mm}$, (b) $e_p = 2\text{mm}$ et (c) $e_p = 5\text{mm}$.

La courbe de la **figure III.28** montre clairement que l'augmentation de l'épaisseur du patch entraîne augmentation de la valeur du rapport de la zone endommagée. Et quelque soit la valeur de l'épaisseur du patch prise (0.5-5) mm la valeur critique de D_R n'est pas atteinte ($D_{Rc}=0.247$).

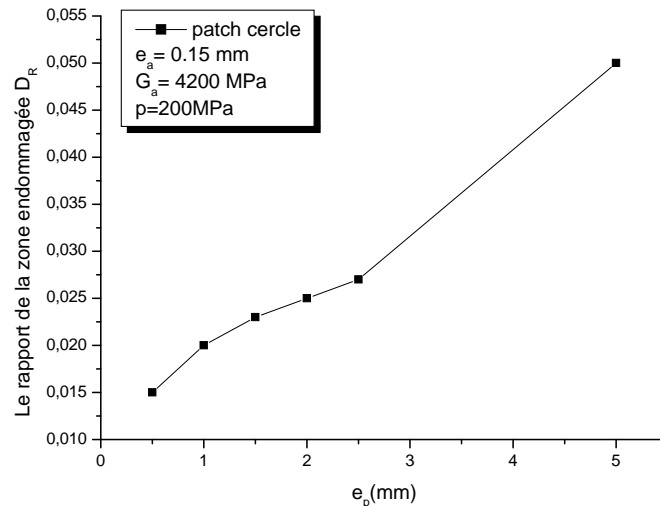


Fig. III.28 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur du patch.

III.5.3.4 patch ellipsoïdale

Cet effet est illustré sur la **figure III.29** qui représente la variation de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur du patch. On voit d'après ces figures que la taille des zones endommagées de l'adhésif est importante pour l'épaisseur du patch égale 5mm comparée aux autres cas $e_p = 0.5\text{mm}$ et $e_p = 2\text{mm}$. On observe que la zone endommagée existe seulement au niveau des extrémités supérieures et inférieures de l'ellipse.

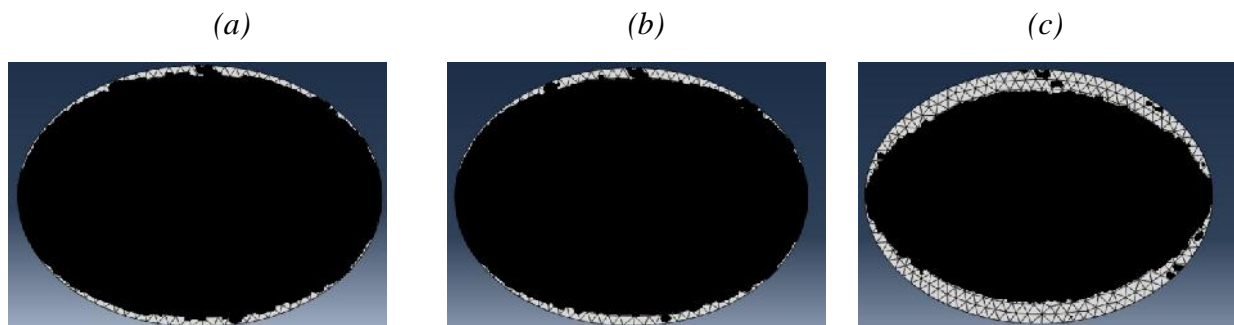


Fig. III.29 : Zone endommagée pour un patch de forme ellipsoïdale (a) $e_p = 0.5\text{mm}$, (b) $e_p = 2\text{mm}$ et (c) $e_p = 5\text{mm}$.

L'effet de l'épaisseur du patch est représenté sur la **figure III.30** qui illustre la variation du rapport de la zone endommagée D_R en fonction de l'épaisseur du patch pour un patch de forme ellipsoïdale. On observe une influence significatif de cet effet, où le rapport de la zone endommagée augmente lentement dans l'intervalle $e_p = (0.5-2)$ mm et au-delà de $e_p = 2\text{mm}$ la pente de graphe augmente rapidement jusqu'à atteindre la valeur critique pour $e_p = 5\text{mm}$.

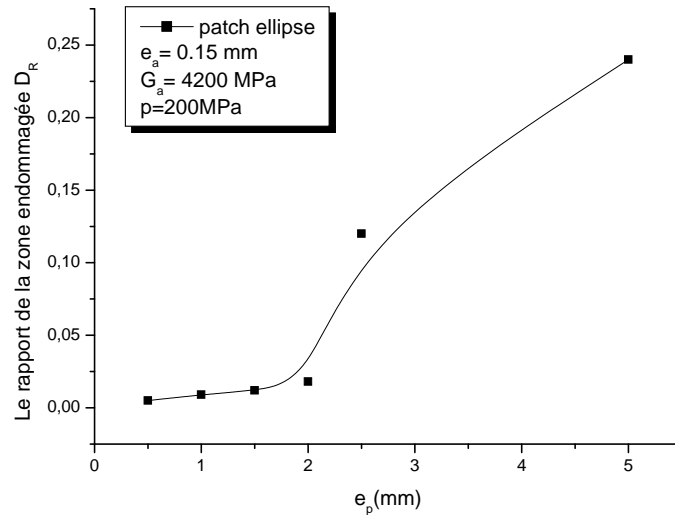


Fig. III.30 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur du patch.

III.5.3.5 Comparaison entre les différents D_R en fonction de l'épaisseur du patch pour les différentes formes:

La variation du rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur du patch est montrée en **figure III.31**. D'après ces courbes on remarque que l'augmentation de l'épaisseur du patch entraîne une augmentation des valeurs du rapport de la zone endommagée pour toutes les épaisseurs du patch. Pour le patch de forme rectangulaire on remarque qu'il y a augmentation seulement quand $e_p < 1.5\text{mm}$, et après cette épaisseur les valeurs du rapport de la zone endommagée diminuent jusqu'à la valeur de $D_R = 0$. On remarque aussi que la valeur critique du rapport de la zone endommagée n'est pas atteinte pour les cas de forme (rectangle, cercle et ellipse) par contre pour le patch de forme de trapézoïdale cette valeur est atteinte pour une épaisseur $e_p > 4.5\text{mm}$

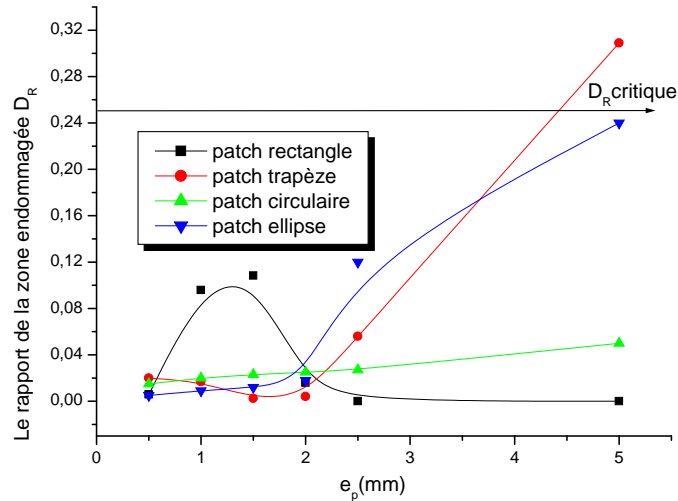


Fig. III.31 : Rapport de la zone endommagée vs l'épaisseur de patch pour les différentes formes de patch.

III.5.4 Effet du module de cisaillement de l'adhésif sur la variation de la zone endommagée de l'adhésif :

Le module de cisaillement de l'adhésif qui est une propriété mécanique influence directement sur la distribution des contraintes de cisaillement dans la couche d'adhésif. En effet, les contraintes de cisaillement dans l'adhésif sont liées à son module de cisaillement par la relation:

$$\ddagger = \frac{G_a}{e_a} (u_1 - u_2) \quad (\text{III.4})$$

Où e_a est l'épaisseur d'adhésif, u_1 et u_2 sont les déplacements dans les couches dépendantes (la plaque et le patch).

L'effet du module de cisaillement de l'adhésif est analysé pour déterminer le rapport de la zone endommagée dans l'adhésif pour différentes formes de patch. Pour déterminer cet effet l'épaisseur de l'adhésif et celle du patch sont fixées respectivement à $e_a=0.15\text{mm}$ et $e_p=1.5\text{mm}$. Et on applique une charge d'amplitude égale à $\sigma=200\text{MPa}$. puis On fait varier les valeurs de module de cisaillement de l'adhésif $G_a= (200-1400)\text{MPa}$, et procéder à une comparaison entre le rapport de la zone endommagée.

III.5.4.1 patch rectangulaire

Le module de cisaillement de l'adhésif est un paramètre très important dans la réparation par joint collé. La zone endommagée en fonction du module de cisaillement de l'adhésif du patch de forme rectangulaire est représentée en **figure III.32**. Pour la valeur de $G_a=200\text{MPa}$ on remarque que la zone endommagée apparaît avec une zone faible au niveau des angles, par contre pour $G_a=1400\text{MPa}$ la zone apparaît au niveau des longs cotés du rectangle.

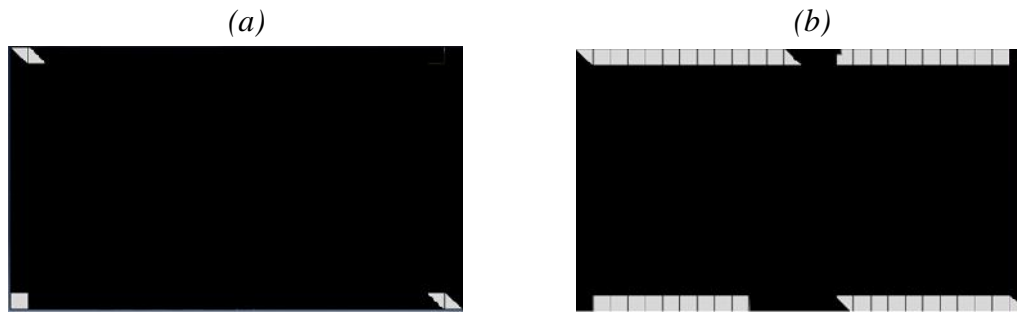


Fig. III.32 : Zone endommagée pour un patch de forme rectangulaire (a) $G_a = 200\text{MPa}$ et (b) $G_a = 1400\text{MPa}$.

La **courbe III.33** représente l'influence du module de cisaillement de l'adhésif sur le rapport de sa zone endommagée. On remarque que la pente de la courbe augmente lentement pour $G_a = (200-1000)\text{MPa}$, et quand G_a prend des valeurs supérieures à 1000MPa la pente varie d'une façon très rapide.

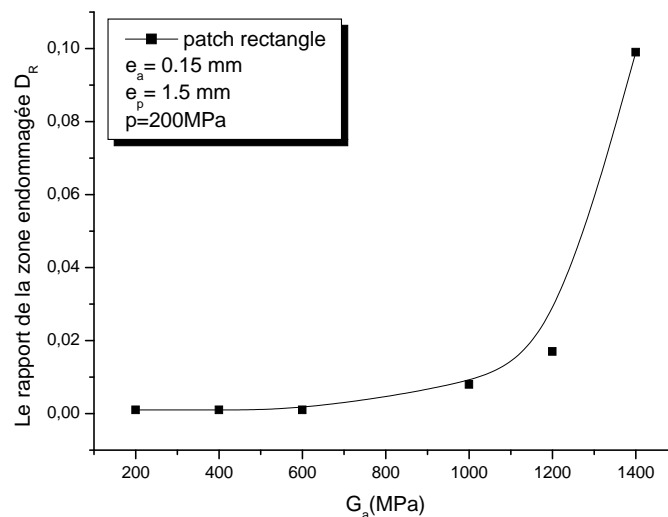


Fig. III.33 : Rapport de la zone endommagée en fonction du module de cisaillement de l'adhésif.

III.5.4.2 patch trapézoïdale

La **figure III.34** illustre la variation de la zone endommagée en fonction du module de cisaillement G_a . Celle-ci montre clairement quand la valeur du module de cisaillement de l'adhésif augmente la zone endommagée augmente. Pour la valeur de $G_a=200\text{MPa}$ une petite surface endommagée apparaît au niveau de l'angle de cotés inclinés du trapèze. Dans le cas de $G_a=1400\text{MPa}$ la surface de la zone endommagée augmente au niveau de cotés inclinés et apparaît aussi au sein du côté inférieur de trapèze.

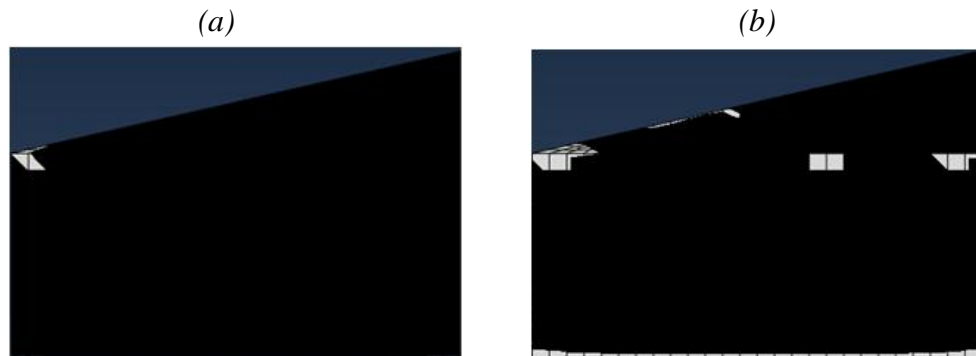


Fig. III.34 : Zone endommagée pour un patch de forme trapézoïdale (a) $G_a=200\text{MPa}$ et (b) $G_a=1400\text{MPa}$.

La **figure III.35** représente la courbe de la variation du rapport de la zone endommagée D_R en fonction du module de cisaillement de l'adhésif G_a . Dans ce cas de courbe la valeur critique de D_R n'est pas atteinte pour l'intervalle $G_a=(200-1400)\text{MPa}$. Il y a une variation proportionnelle entre les valeurs de G_a et celle de D_R . On remarque que pour $G_a<1000\text{MPa}$ il ya une augmentation légère de D_R , mais quand $G_a>1000\text{MPa}$ on observe une augmentation brutale de 0.01 jusqu'à la valeur de D_R de 0.05.

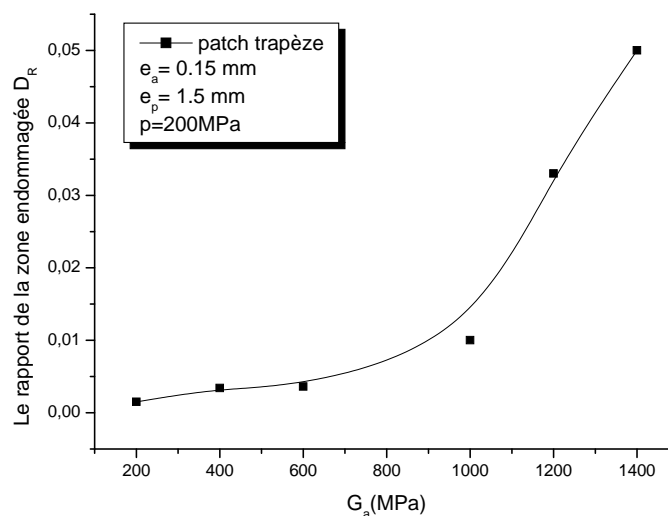


Fig. III.35 : Rapport de la zone endommagée en fonction du module de cisaillement de l'adhésif.

III.5.4.3 patch circulaire

La zone endommagée est concentrée sur l'extrémité de périmètre de la colle comme illustrée sur la **figure III.36**. On remarque une augmentation de la zone en fonction de l'augmentation du module de cisaillement de l'adhésif G_a .

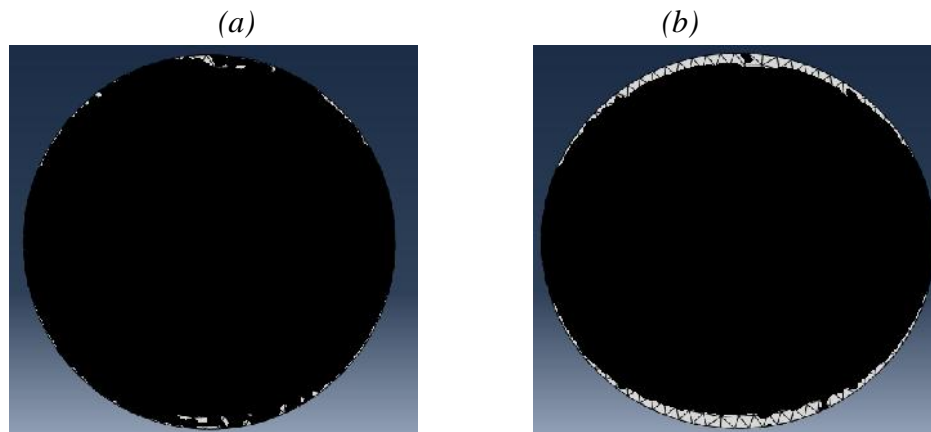


Fig. III.36 : Zone endommagée pour un patch de forme circulaire (a) $G_a = 200\text{MPa}$ et (b) $G_a = 1400\text{MPa}$.

La **figure III.37** qui représente la variation des valeurs du rapport de la zone endommagée en fonction du module de cisaillement de l'adhésif. On remarque que D_R augmente en fonction de l'augmentation du module de cisaillement de l'adhésif G_a . Au-delà de la valeur de $G_a = 1000\text{MPa}$ on remarque que les valeurs du rapport de la zone endommagée augmente très rapidement.

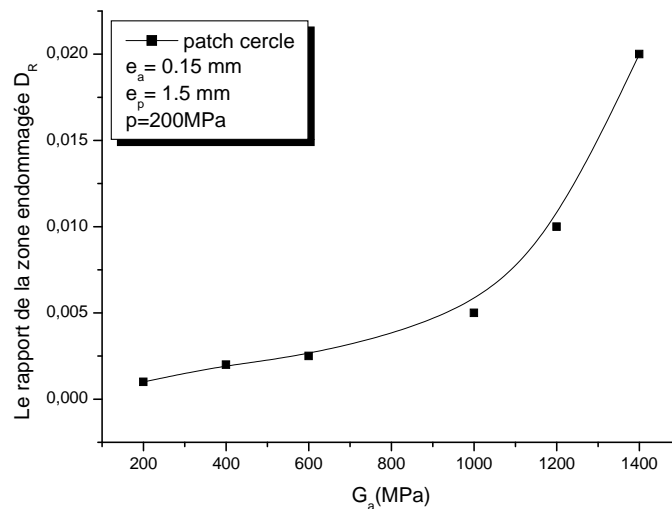


Fig. III.37 : Rapport de la zone endommagée en fonction du module de cisaillement de l'adhésif.

III.5.4.4 patch ellipsoïdale

La **Figure III.38** représente l'entendue de la zone endommagée dans la couche de l'adhésif pour les différentes valeurs du module cisaillement de l'adhésif. On peut observer que les zones endommagées sont localisées au niveau de l'extrémité du patch et aucune ne zone n'est observée au niveau de la corrosion. Plus que G_a augmente la zone endommagée augmente.

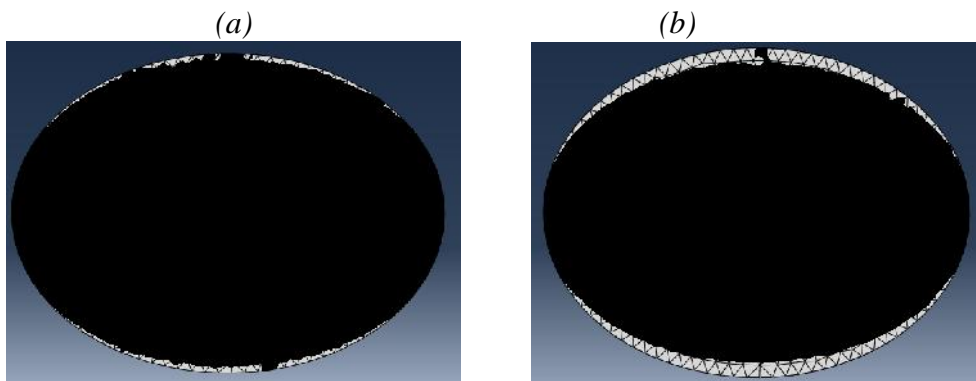


Fig. III.38 : Zone endommagée pour un patch de forme ellipsoïdale (a) $G_a=200\text{MPa}$ et (b) $G_a=1400\text{MPa}$.

La courbe de la **figure III.39** a été tracée afin de mieux analyser l'effet du module de cisaillement sur la variation du rapport de la zone endommagée. On peut noter que ce rapport augmente avec l'augmentation du module de cisaillement de l'adhésif. Le D_R atteint 0.002 pour une $G_a=200\text{MPa}$ puis augmente jusqu'à la valeur de 0.025 pour la valeur de $G_a=1400\text{MPa}$.

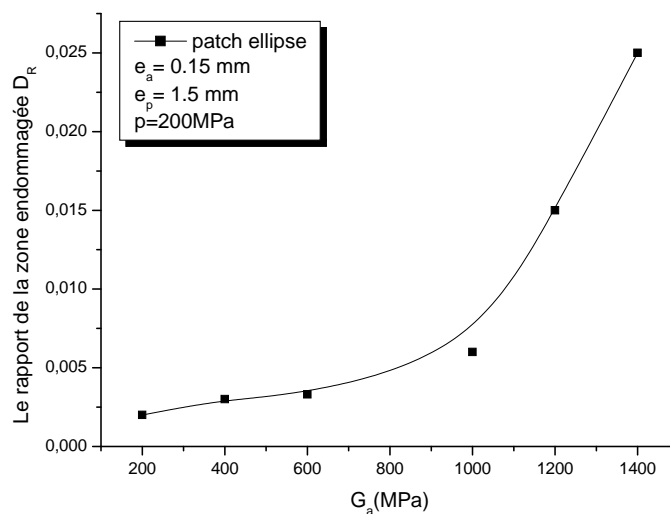


Fig. III.39 : Rapport de la zone endommagée en fonction du module de cisaillement de l'adhésif.

III.5.4.5 Comparaison entre les différents D_R en fonction du module de cisaillement de l'adhésif pour les différentes formes de patch :

On remarque d'après la **figure III.40** qui représente la variation du rapport de la zone endommagée en fonction du module de cisaillement que le comportement de la colle est identique pour toutes les formes de patch. Quand la valeur du module de cisaillement de l'adhésif augmente, elle entraîne l'augmentation du rapport de la zone endommagée. Pour un patch rectangulaire et pour $G_a=1200\text{MPa}$ le D_R atteint 0.03 et atteint rapidement la valeur de 0.1 pour $G_a=1400\text{MPa}$. Pour les autres formes la variation de D_R est semblable. On observe pour toutes les formes géométriques étudiées que la valeur critique du rapport de la zone endommagée n'est pas atteinte ($D_{Rc}=0.247$).

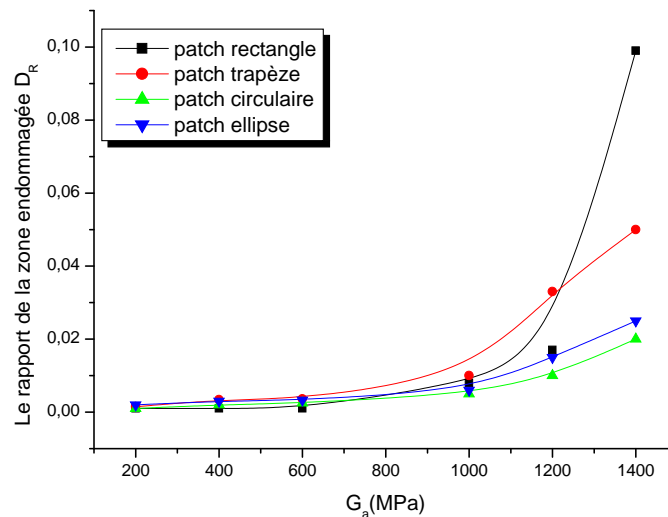


Fig. III.40 : Rapport de la zone endommagée vs du module de cisaillement de l'adhésif pour les différentes formes de patch.

CHAPITRE IV

***ANALYSE DE LA REPARATION DES PLAQUES CORRODEES
AVEC FISSURE HORIZONTALE (MODE I)***

IV.1 INTRODUCTION :

La corrosion désigne l'ensemble des phénomènes par lesquels un métal ou un alliage métallique tend à s'oxyder sous l'influence de réactifs gazeux ou en solution. La corrosion coûte cher et pose de redoutables problèmes : elle induit de graves dommages, cause de nombreux accidents et n'est pas sans conséquences écologiques notables. Ramji et al. [104] ont testé plusieurs formes de patch et ont conclu que la forme de patch octogonale prolongée fonctionne mieux en cas de réduction du facteur d'intensité de contrainte. Bachir Bouiadjra et al. [105] ont comparé la performance de la réparation de patch aux formes rectangulaires et trapézoïdales. F. Benyahia et M. Fari Bouanani [100] ont évalué l'effet de l'absorption de l'eau sur la zone endommagée de l'adhésif dans la réparation composite liée de structures d'avions, il montre que l'absorption d'eau accélère les endommagements d'adhésif et la durabilité de la réparation est affectée par l'absorption d'eau. Nous avons parlé dans ce chapitre de l'effet du module de cisaillement de l'adhésif sur la zone endommagée et nous notons que Bachir Bouiadjra et al. [105] ont montré que l'adhésif à haut module de cisaillement (de mauvaise qualité) donne un facteur d'intensité de contrainte faible à l'extrémité des fissures réparées. Par conséquent, ils ont recommandé l'utilisation, ce matériau pour augmenter les performances de la réparation. En dépit du fait que le module de cisaillement plus élevé conduit à des contraintes adhésives élevées. Cela augmente le risque de défaillance de l'adhésif.

Dans le chapitre quatre, notre étude a été conduite en vue d'analyser le comportement d'une structure fissurée et réparée par patch en composite. Plusieurs paramètres ont été mis en évidence sur la qualité de réparation à savoir les propriétés mécaniques du patch et de l'adhésif ainsi que leurs épaisseurs. Dans cette partie nous considérons le même modèle géométrique de la plaque avec une même corrosion mais avec une fissure de longueur (a) horizontale en (*mode I*). L'influence des propriétés mécaniques du patch et de l'adhésif, ainsi que leurs épaisseurs, et la taille de la fissure sont mises en évidence sur les variations de la zone endommagée de l'adhésif. Puis on a étudié la variation du facteur d'intensité de contraintes sous les effets précédents, et comparer le rapport de la zone endommagée de l'adhésif pour les différentes formes de patch.

IV.2 MODELE GEOMETRIQUE ET MAILLAGE EN MODE I PUR:

Pour étudier le comportement des fissures réparées en mode I, on considère la même plaque d'aluminium avec les dimensions suivantes : $H_{pl}=254\text{mm}$, $W_{pl}=254\text{mm}$ et $e_{pl}=5\text{mm}$, avec une fissure horizontale d'une longueur $a=15\text{mm}$. La plaque est soumise à une charge $\sigma=100\text{MPa}$ (**figure IV.1**).

La fissure est réparée avec un carbone/époxy ayant l'épaisseur $e_p = 1.5 \text{ mm}$ et les propriétés adhésives $G_a = 0.420\text{GPa}$ et $e_a = 0.15\text{mm}$.

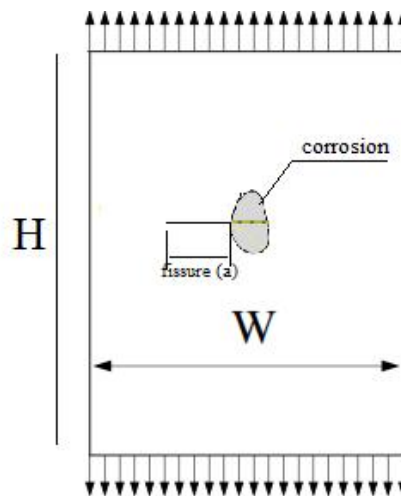


Fig. IV.1 : Modèle géométrique de la plaque fissurée, en mode I.

L'analyse par éléments finis de la configuration représentée par la **figure IV.2** a été réalisée en utilisant le logiciel ABAQUS. La forme du patch composite est identifiable sur cette figure. Un maillage régulier est effectué pour toute la structure. Ce maillage reste le même tout au long du calcul afin d'éviter toute influence du maillage sur les résultats. Le collage parfait est créé entre la plaque et le patch composite en fusionnant les nœuds des éléments. Le fait de fusionner les nœuds a pour conséquence d'avoir le même maillage pour la structure et pour le patch composite. La corrosion et la fissure centrale presque au milieu de la plaque provoquant une concentration de contrainte. Par conséquent, un maillage raffiné est effectué autour de la fissure et autour de la corrosion. Le nombre total d'éléments de la structure est égal à 50.000. La taille du côté d'un élément loin de la fissure est égale à 0,015 mm pour toute la structure et 0,001 mm au voisinage de la fissure.

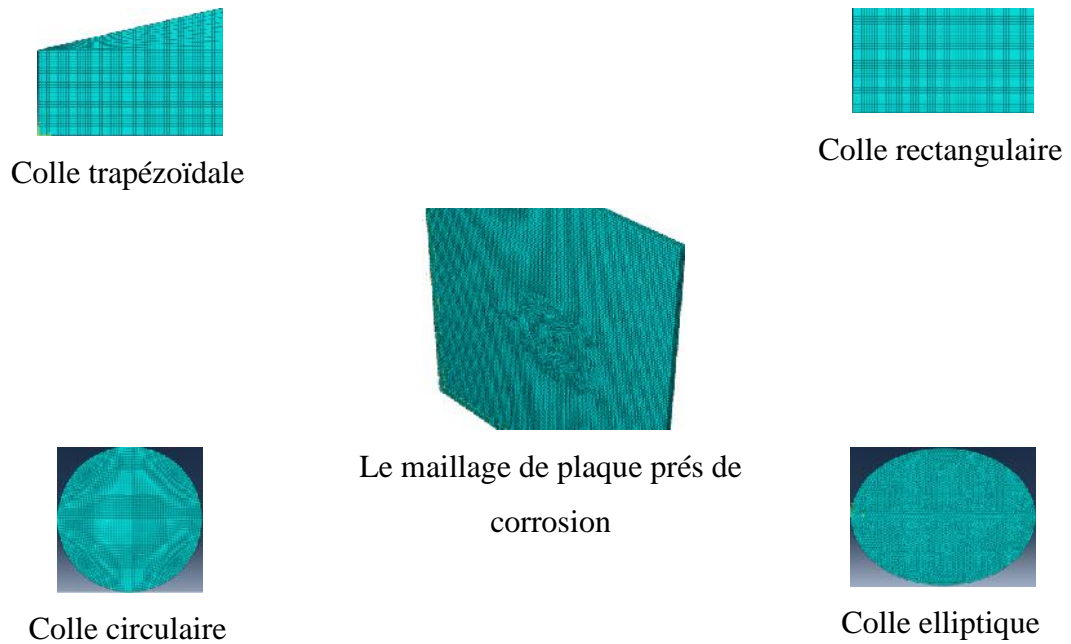


Fig. IV.2 : Représentation du maillage de la plaque et du patch en modes I.

Les facteurs d'intensité de contraintes à la pointe de la fissure sont calculés en utilisant la technique de fermeture de fissure virtuelle (VCCT) sur la base du bilan énergétique. Dans cette technique, les facteurs d'intensité de contrainte sont obtenus pour les trois modes de rupture selon l'équation:

$$G_i = \frac{K_i^2}{E} \quad \text{(III.1)}$$

Où G_i est le taux de restitution d'énergie pour le mode i , K_i est le facteur d'intensité de contrainte pour le mode i et E est le module d'élasticité.

IV.3 RESULTATS ET DISCUSSIONS:

IV.3.1 Effet de la longueur de fissure sur la variation de la zone endommagée de l'adhésif:

L'une des caractéristiques géométriques principales de la fissure est sa taille. Nous avons donc analysé numériquement son influence sur les critères de propagation de fissure dans une plaque fissurée en *mode I* (fissure horizontale) réparée par patch en composite. Les figures (IV.3- IV.5 -IV.7- IV.9) montrent l'effet de la taille de la fissure sur l'évolution de la zone endommagée réparée par patch. Ensuite nous avons calculé le facteur d'intensité de contraintes pour comparer l'évolution de D_R .

IV.3.1.1 patch rectangulaire

Les figures (IV.3.a-b-c) montrent des exemples des zones endommagées pour la forme de patch rectangulaire. Les résultats de figures obtenus pour des longueurs de fissure de 5mm, 25mm et 50mm, nous permettent de constater l'apparition de la zone endommagée de l'adhésif. Pour une longueur de fissure $a= 5\text{mm}$ on remarque une très faible apparition de

zone endommagée aux alentours de la fissure et une surface endommagée sur les deux côtés supérieurs et inférieurs. Pour les figures (IV.3.b-c) la zone endommagée augmente au niveau de la fissure et au niveau des côtés de patch en fonction de l'augmentation de la taille de fissure.

L'effet d'endommagement sur l'efficacité de la réparation, est illustré sur (Fig. IV.4).

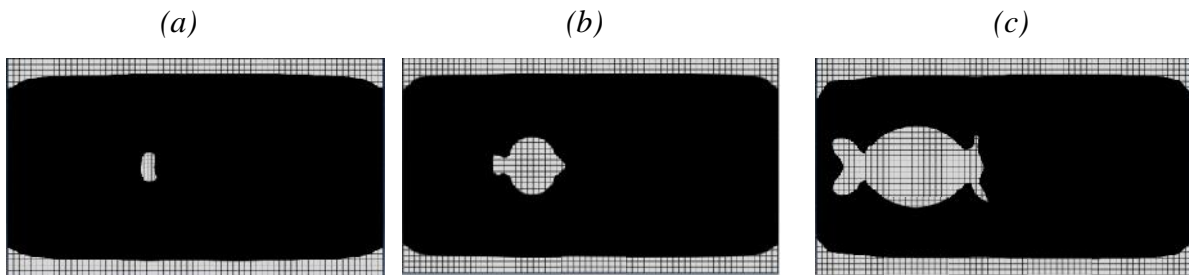


Fig. IV.3 : zone endommagée pour un patch de forme rectangulaire (a) $a=5\text{mm}$, (b) $a=25\text{mm}$ et (c) $a=50\text{mm}$.

Cette figure IV.4 montre la variation du rapport de la zone endommagée pour un chargement d'intensité $\sigma \approx 100\text{ MPa}$ pour différentes valeurs de longueurs de fissure. La courbe montre que si on augmente la longueur de fissure celle-ci entraîne une augmentation de D_R . On remarque aussi que si la longueur de la fissure est supérieure à 25mm, le rapport de la zone endommagée dépasse la valeur critique de D_R . Pour le cas du patch rectangulaire il faut éviter son utilisation pour la réparation des fissures de tailles supérieures à 25mm afin d'éviter le décollement du Patch.

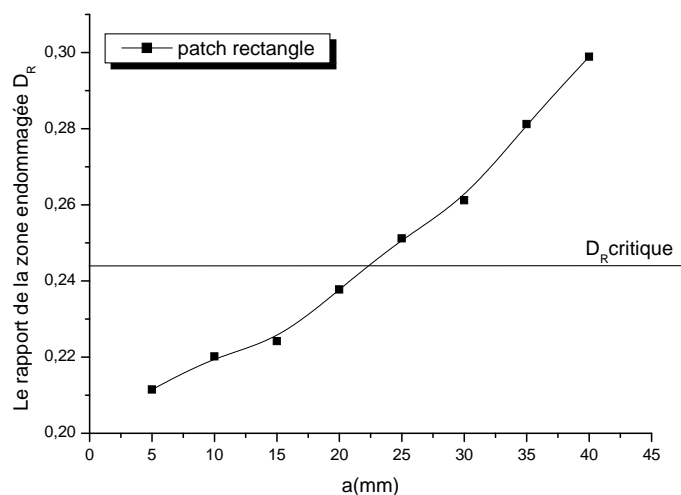


Fig. IV.4 : Rapport de la zone endommagée en fonction de la longueur de fissure.

IV.3.1.2 patch trapézoïdale

La figure IV.5 représente l'évolution de la zone endommagée en fonction de la longueur de fissure pour un patch de forme trapézoïdale.

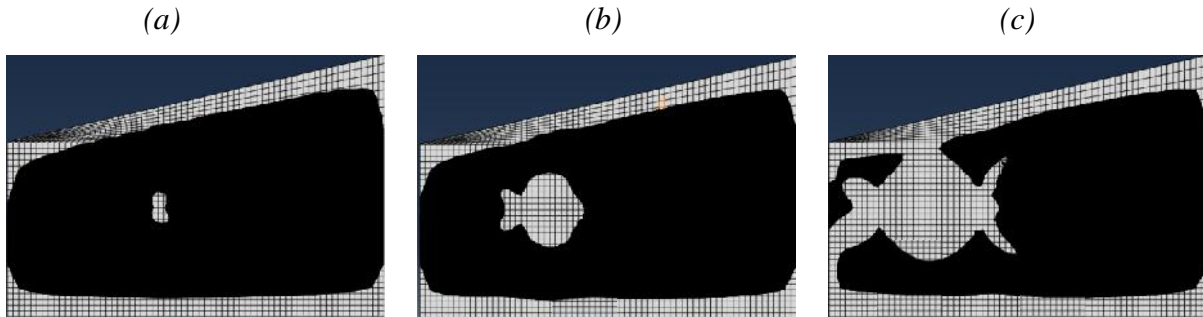


Fig. IV.5 : zone endommagée pour un patch de forme trapézoïdale (a) $a=5\text{mm}$, (b) $a=25\text{mm}$ et (c) $a=50\text{mm}$.

Pour ces trois cas de figures l'aire de la zone endommagée est identique au niveau des côtés supérieurs et inférieurs de trapèze. La différence apparaît au niveau de la fissure, lorsque sa taille de la fissure augmente la surface de la zone endommagée augmente autour de fissure.

Le comportement de la zone endommagée est visible sur la courbe de la figure IV.6 qui montre l'évolution du rapport de la zone endommagée en fonction de la longueur de fissure. On note que plus la longueur de fissure augmente les valeurs du rapport de la zone endommagée augmentent. On remarque aussi que le rapport critique D_{Rc} est atteint seulement pour une longueur de fissure égale à 20 mm.

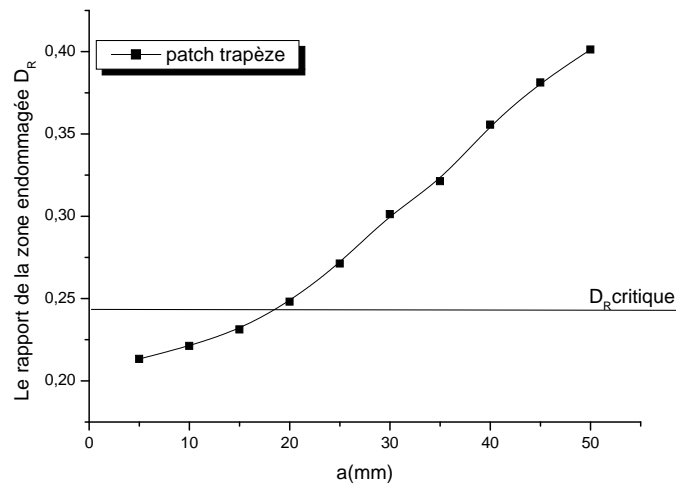


Fig. IV.6 : Rapport de la zone endommagée en fonction de la longueur de fissure.

IV.3.1.3 patch circulaire

La **figure IV.7** illustre les distributions des zones endommagées. L'analyse de cette figure montre que la zone endommagée au bord du patch des cas de $a=25\text{mm}$ et $a=50\text{mm}$ est grande relativement au cas de $a=5\text{mm}$. On constate très clairement la zone endommagée au niveau de la fissure augmente avec la taille de fissure.

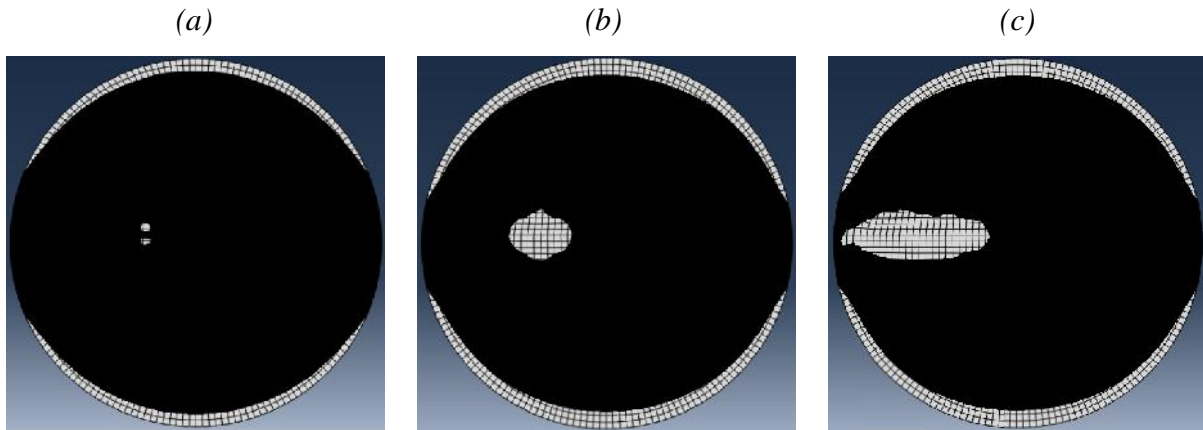


Fig. IV.7 : zone endommagée pour un patch de forme circulaire (a) $a=5\text{mm}$, (b) $a=25\text{mm}$ et (c) $a=40\text{mm}$.

Le rapport de la zone endommagée D_R est analysé sur la **figure IV.8**. Elle représente la courbe de la variation des valeurs du rapport de la zone endommagée D_R en fonction de la variation des longueurs de fissures. L'augmentation de la valeur de D_R est due à l'augmentation de la longueur de fissure. On note que la valeur critique du rapport est atteinte seulement quand $a>30\text{mm}$. La valeur maximale de D_R est observée pour $a=45\text{mm}$.

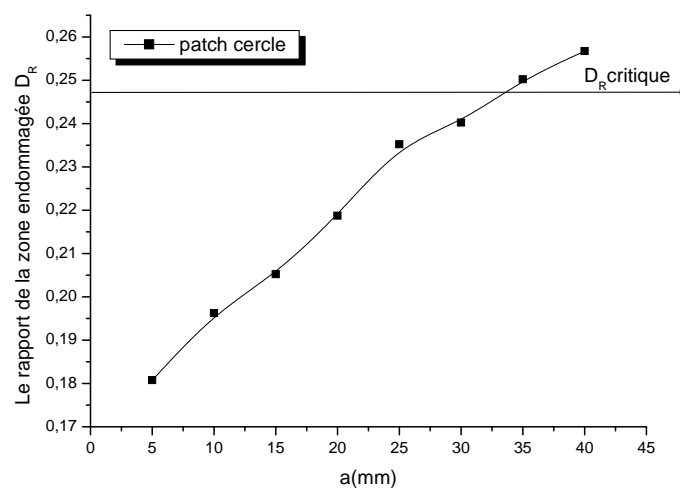


Fig. IV.8 : Rapport de la zone endommagée en fonction de la longueur de fissure.

IV.3.1.4 patch ellipsoïdale

La distribution des zones endommagées suivant la longueur de fissure est illustrée sur la **figure IV.9** celle-ci montre que quelle que soit la valeur de la longueur de fissure il ya une zone endommagée crée au niveau des bords supérieurs et inférieurs du patch. La différence principale est située au niveau de la fissure, plus la longueur de fissure augmente plus la zone endommagée entourant la fissure augmente aussi.

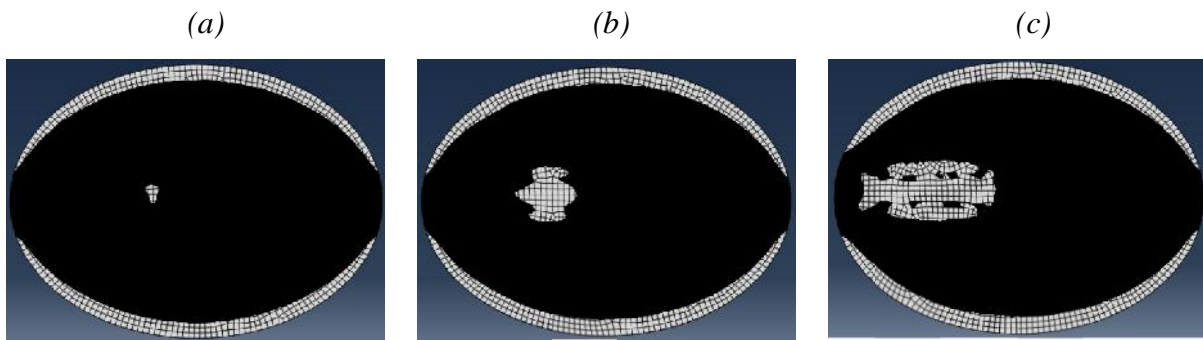


Fig. IV.9 : zone endommagée pour un patch de forme ellipsoïdale (a) $a=5\text{mm}$, (b) $a=25\text{mm}$ et (c) $a=50\text{ mm}$.

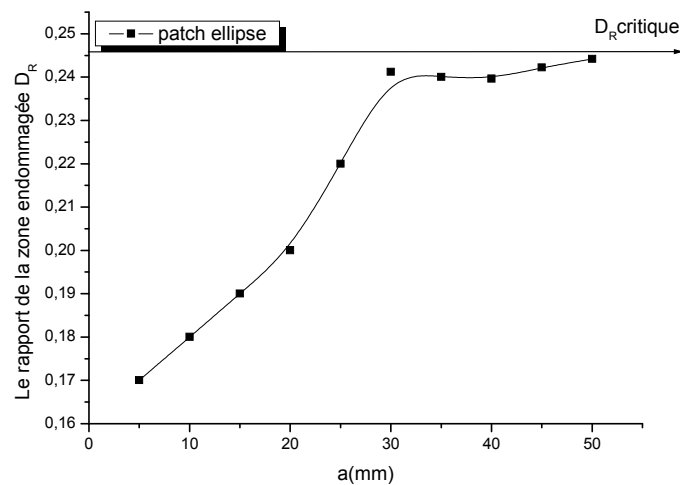


Fig. IV.10 : Rapport de la zone endommagée en fonction de la longueur de fissure.

La courbe de la **figure. IV.10** représente la variation du rapport de la zone endommagée D_R pour différentes longueurs de fissure. On observe que les valeurs du D_R augmentent en fonction de l'augmentation de la longueur de fissure. On remarque aussi que la valeur critique du rapport de la zone endommagée ($D_{Rc}=0.247$) n'est pas atteinte.

IV.3.1.5 Effet de la longueur de fissure sur la variation du rapport de la zone endommagée de l'adhésif :

Afin d'avoir une idée générale du rôle de la taille de fissure sur la variation du rapport de la zone endommagée de l'adhésif, on trace la courbe de la **figure IV.11**. À travers cette dernière on note clairement que pour toutes les formes du patch utilisées (rectangulaire, trapézoïdale, circulaire ou ellipsoïdale) plus la longueur de fissure augmente plus les valeurs du rapport augmentent. La valeur minimale de D_R est obtenue pour le patch de forme ellipsoïdale où les valeurs D_R sont inférieures à D_{Rc} ceci permet de conclure que l'efficacité est meilleure pour ce cas de forme dans la réparation des corrosions. Contrairement aux trois autres formes de patches les valeurs de D_R sont très élevées. Dans le cas du patch de forme trapézoïdale la valeur critique de D_{Rc} est atteinte pour une taille de fissure égale à 17mm et il augmente jusqu'à $D_R=0,4$ pour $a=50$ mm.

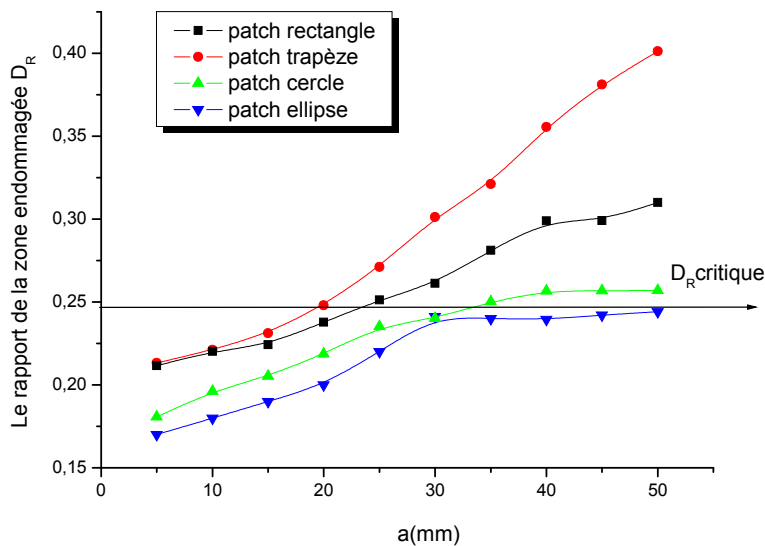


Fig. IV.11 : Rapport de la zone endommagée vs la longueur de fissure pour les différentes formes de patch.

IV.3.1.6 Effet de la longueur de fissure sur la variation FIC :

La figure III.12 représente la variation du facteur d'intensité de contraintes (FIC) en fonction de la longueur de la fissure pour des structures avec une corrosion réparée avec simple patch d'épaisseur $e_p = 1.5\text{mm}$ et pour une fissure centrale sollicitée en *mode I*. Le facteur d'intensité de contraintes croît avec la longueur de la fissure. Le comportement asymptotique est visible quand la longueur de fissure augmente le facteur d'intensité de contraintes augmente aussi pour tous les cas de forme du patch. On peut voir aussi sur cette figure que les valeurs du FIC pour le patch de forme rectangulaire et trapézoïdale semblent identiques et on note également qu'il a des valeurs inférieures à celle obtenues pour le patch de forme circulaire et ellipsoïdale. On peut dire que le patch elliptique est le moins concluant dans la réparation des fissures par rapport aux autres formes parce que les valeurs de FIC enregistrées sont les plus élevées. Pour la taille de fissure $a=5\text{mm}$ le facteur d'intensité de contraintes pour un patch de forme ellipsoïdale $K_I=11 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ par contre pour les autres formes il ne dépasse pas la valeur de $6 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

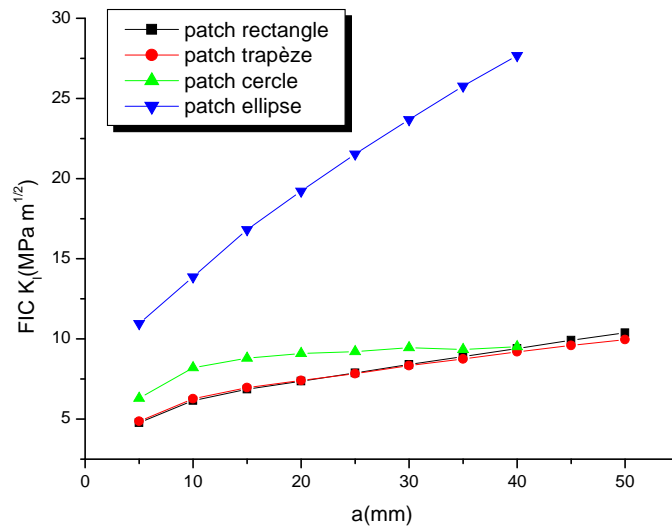


Fig. IV.12 : Variation du FIC en fonction de la longueur de fissure.

IV.3.1.7 Facteur d'intensité de contrainte en fonction du rapport de la zone endommagée D_R pour les différentes formes du patch:

Afin de mettre en évidence l'effet de l'endommagement de l'efficacité de la réparation, on représente sur la **figure IV.13** la variation du facteur d'intensité de contrainte FIC en fonction du rapport de la zone endommagée D_R , pour différentes formes de patch et avec une charge appliquée constante $\sigma = 100\text{MPa}$. Le patch de forme ellipsoïdale présente des valeurs élevées du facteur d'intensité de contraintes par rapport aux autres formes du patch. Ainsi on remarque que l'efficacité de la réparation est réduite par l'utilisation de cette forme du patch.

A travers l'analyse des résultats de la **figure IV.13** on peut voir que les valeurs du FIC les plus faibles sont pour le patch de forme rectangulaire et circulaire ainsi que les valeurs de D_R . on peut conclure que la forme rectangulaire est la forme optimale par rapport les autres formes.

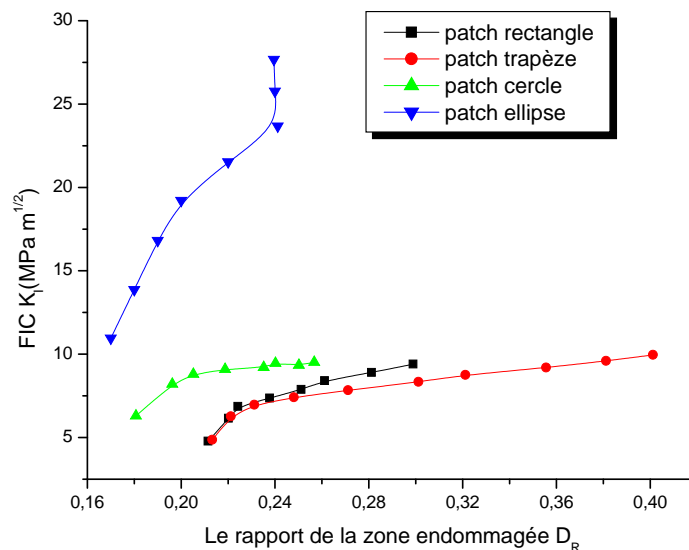


Fig. IV.13 : Variation du FIC en fonction du rapport de la zone endommagée (D_R).

IV.3.2 effet de la charge sur l'endommagement de l'adhésif :

L'influence de la variation du chargement sur la variation des zones endommagées de l'adhésif est montrée sur les figures (**IV.14**, **IV.16**, **IV.18** et **IV.20**). Pour une longueur de fissure $a = 15$ mm et les propriétés d'adhésif ($G_a = 4200$ MPa et $e_a = 0.15$ mm). Le chargement varie de 100MPa à 300MPa, et enfin une comparaison entre les formes de patch est faite.

IV.3.2.1 patch rectangulaire

Afin de voir l'effet de la charge appliquée sur l'étendue de la zone endommagée de l'adhésif, la **Figure IV.14** représente la distribution de la zone endommagée dans le joint d'adhésif pour différentes valeurs de la charge appliquée. D'après ces figures on remarque que l'augmentation de la charge appliquée engendre une augmentation de la zone endommagée environnante de la fissure. On note également une augmentation aux niveaux des côtés supérieurs et inférieurs du patch par l'augmentation de la charge. Pour la valeur de $\sigma=300$ MPa on remarque que la surface endommagée affecte tous les côtés du patch, et on observe aussi des petites surfaces au niveau de la corrosion.

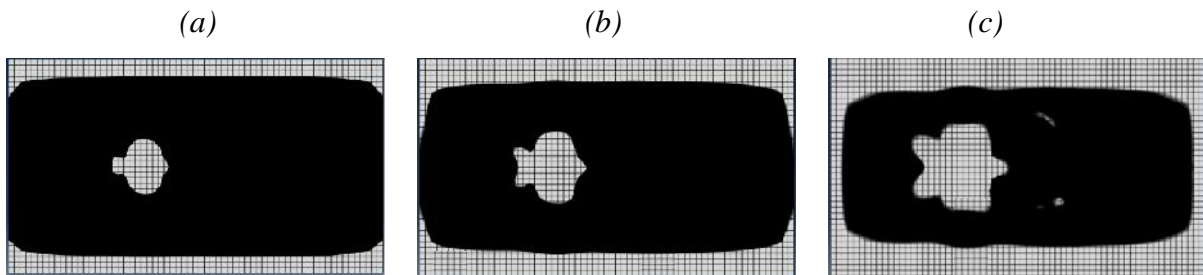


Fig. IV.14 : zone endommagée pour un patch de forme rectangulaire (a) $\sigma=100$ MPa, (b) $\sigma=200$ MPa et (c) $\sigma=300$ MPa.

L'augmentation de la charge appliquée engendre automatiquement une augmentation dans le rapport de la zone endommagée D_R en fonction de la charge appliquée. La **figure IV.15** confirme cette constatation. Les résultats obtenus montrent aussi que la valeur critique du rapport de la zone endommagée dans la colle est observée pour une charge appliquée supérieure à 150MPa.

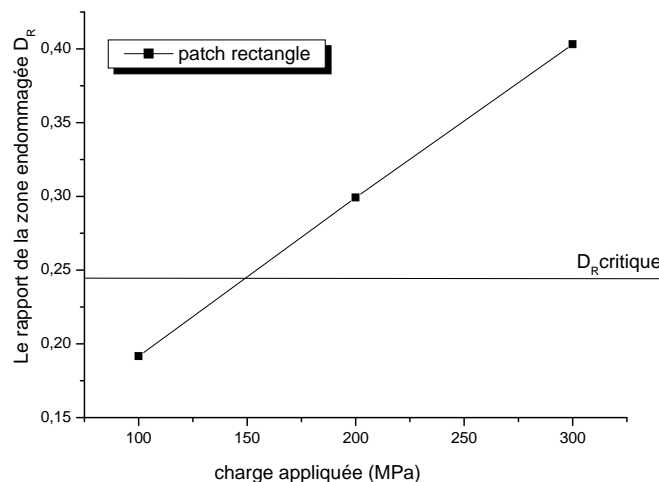


Fig. IV.15 : Rapport de la zone endommagée en fonction de la charge appliquée.

IV.3.2.2 patch trapézoïdale

Le changement de la zone endommagée sous l'effet d'un chargement mécanique est représenté sur la **figure IV.16**. Cette figure montre que l'augmentation de la charge appliquée engendre une augmentation de la zone endommagée au niveau de la fissure et aussi au niveau des côtés supérieurs et inférieurs du patch, mais en cas de $\sigma=300$ MPa on remarque une petite zone sur les bords de la corrosion.

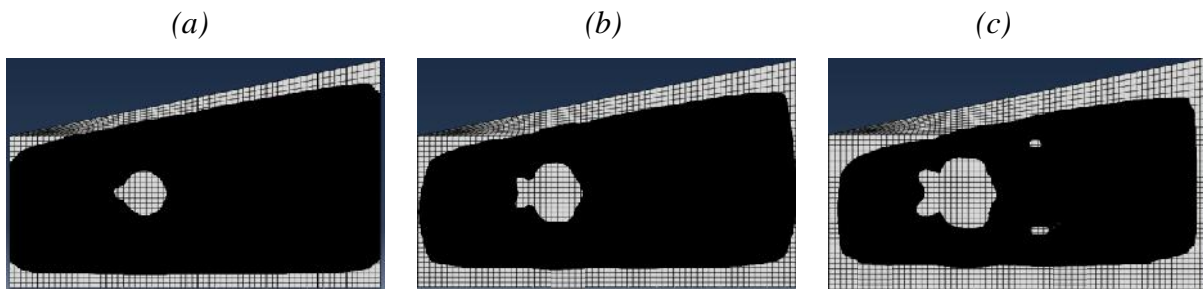


Fig. IV.16 : zone endommagée pour un patch de forme trapézoïdale (a) $\sigma=100$ MPa, (b) $\sigma=200$ MPa et (c) $\sigma=300$ MPa.

La **figure IV.17** représente l'effet de la charge appliquée sur le rapport de la zone endommagée de la colle. L'analyse de la courbe montre qu'une augmentation de cette charge entraîne une augmentation de ce rapport. La valeur de D_R critique est atteinte pour une charge appliquée supérieure à 150 MPa jusqu'à atteindre la valeur $D_R=0,42$ pour une charge $\sigma=300$ MPa.

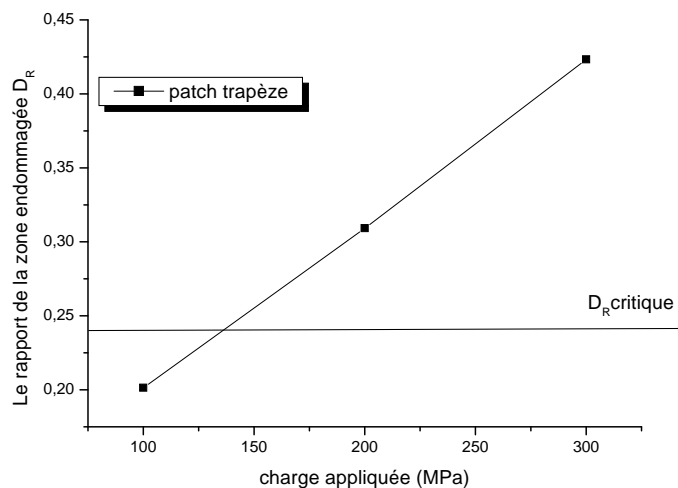


Fig. IV.17 : Rapport de la zone endommagée en fonction de la charge appliquée.

IV.3.2.3 patch circulaire

La zone endommagée pour la forme du patch circulaire apparaît dans la **figure IV.18**.

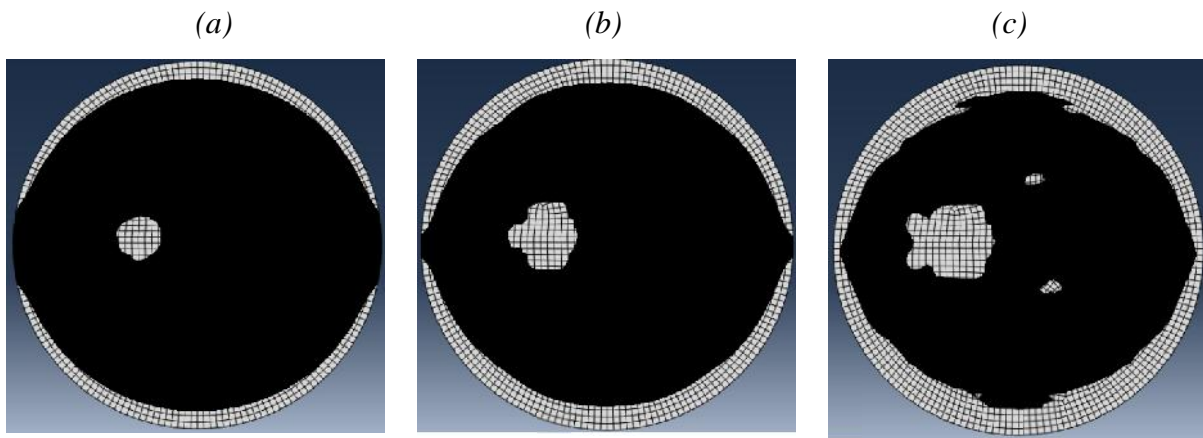


Fig. IV.18 : zone endommagée pour un patch de forme circulaire (a) $\sigma=100$ MPa, (b) $\sigma=200$ MPa et (c) $\sigma=300$ MPa.

On remarque que les zones augmentent au niveau du périmètre du patch et au sein de la fissure en augmentant la charge appliquée. Comme prévu on peut observer que la plus grande zone obtenue correspond pour le cas de $\sigma=300$ MPa, au niveau de la fissure et aussi au niveau des bords de patch. Mais pour les autres cas le comportement reste le même mais avec une réduction des surfaces de la zone endommagée pour $\sigma=100$ MPa et $\sigma=200$ MPa. Dans le cas de $\sigma=300$ MPa il ya des zones endommagées au bord de la corrosion.

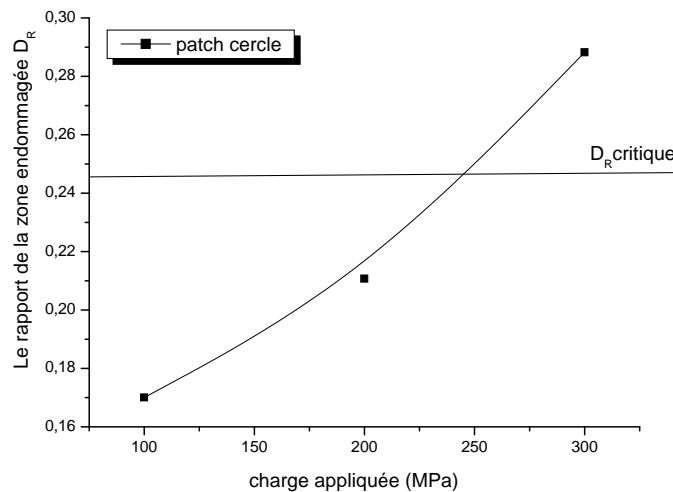


Fig. IV.19 : Rapport de la zone endommagée en fonction de la charge appliquée.

Généralement le D_R augmente très rapidement en fonction de l'augmentation de la charge appliquée. Sur la **figure IV.19** on peut voir clairement cette augmentation. Le rapport critique D_{Rc} est obtenu pour la charge de $\sigma=250$ MPa. La valeur de D_R augmente jusqu'à atteindre 0,29 pour $\sigma=300$ MPa.

IV.3.2.4 *patch ellipsoïdale*

La **figure IV.20** illustre la répartition des zones endommagées en fonction de la variation de la charge appliquée $\sigma= (100-300)$ MPa. Elles sont fortement concentrées au voisinage proche de la fissure et faiblement au bord de la corrosion. On remarque aussi que cette zone augmente en fonction de l'augmentation de la charge. On observe aussi qu'il existe une zone endommagée aux côtés supérieurs et inférieurs de l'adhésif et cette zone augmente en augmentant la charge. Pour le cas de $\sigma=300$ MPa la zone endommagée couvre l'ensemble de la périphérie de l'ellipse.

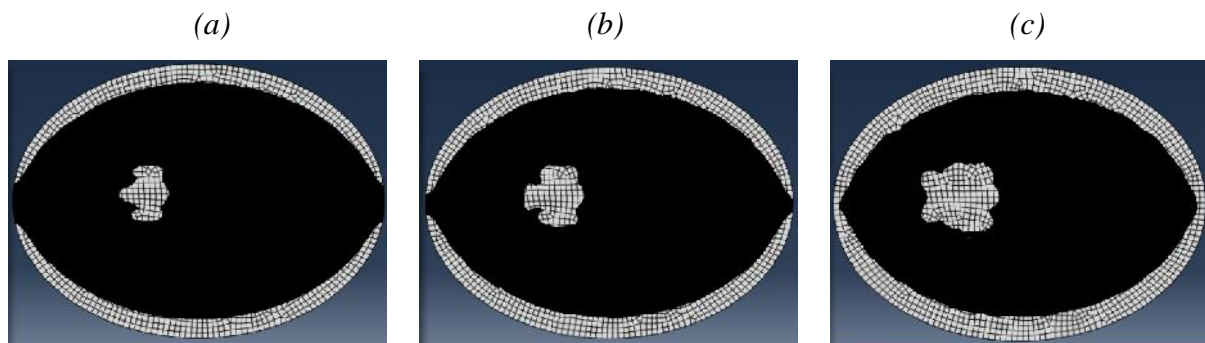


Fig. IV.20 : zone endommagée pour un patch de forme ellipsoïdale (a) $\sigma=100$ MPa, (b) $\sigma=200$ MPa et (c) $\sigma=300$ MPa.

Le niveau de la charge appliquée détermine le rapport de la zone endommagée de la colle (**Fig. IV.21**). Cette figure montre la variation de ce rapport en fonction de la variation de la charge appliquée. Les résultats illustrés sur cette figure confirment ceux représentés sur les **figures IV.20**. En effet, le D_R augmente par l'augmentation de la charge appliquée. Le rapport critique ($D_{Rc}=0.247$) est atteint pour $\sigma>270$ MPa. Pour des valeurs inférieures à 270MPa la zone endommagée observée n'engendre pas de décollement.

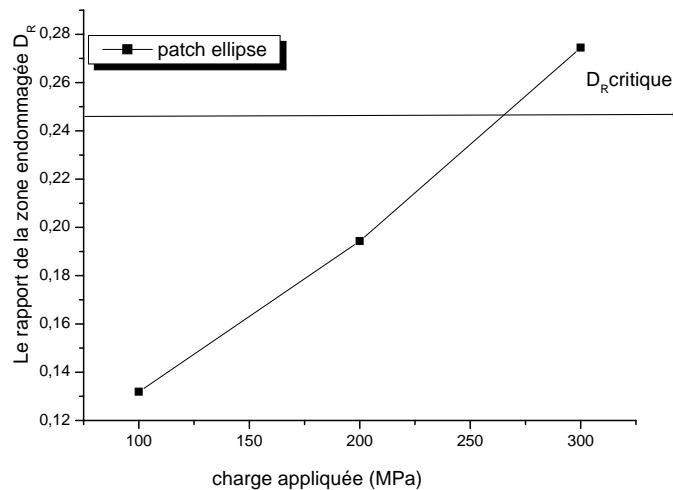


Fig. IV.21 : Rapport de la zone endommagée en fonction de la charge appliquée.

IV.3.2.5 Effet de la charge appliquée sur la variation de rapport de zone endommagée de l'adhésif :

Pour confirmer les résultats précédents, on représente sur la **figure IV.22** le rapport de la zone endommagées D_R en fonction de la charge appliquée « σ ». Pour les quatre formes de patch avec une contrainte appliquée variable de $\sigma \approx (100-300)\text{MPa}$. Les résultats obtenus montrent que le rapport D_R est faible pour la forme elliptique. Ces observations confirment les résultats des figures précédentes. On remarque aussi que l'augmentation de la charge appliquée engendre l'augmentation de D_R pour toutes les formes de patch. D'après cette courbe on peut également noter que les patches de forme trapézoïdale et rectangulaire sont à éviter parce que la valeur de D_R est très grande par rapport aux patches de forme circulaire et ellipsoïdale. La valeur critique du rapport de la zone endommagée est obtenue pour des charges faibles concernant les formes trapézoïdale et rectangulaire, contrairement à celles elliptique et circulaire qui est obtenue après application d'une charge supérieure à 230MPa.

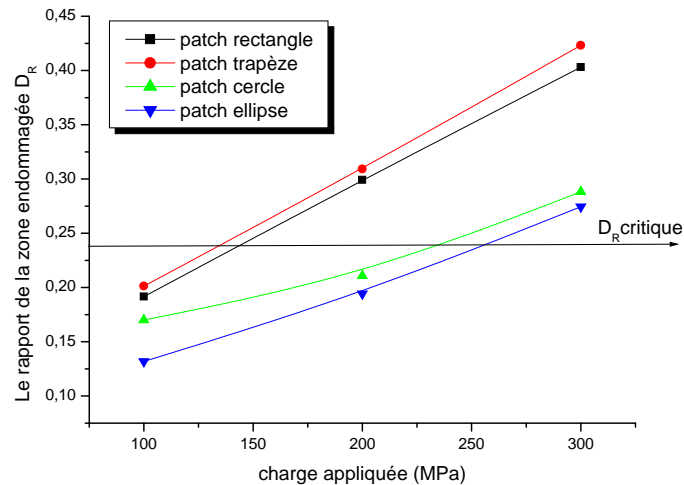


Fig. IV.22 : Rapport de la zone endommagée vs la charge appliquée pour les différentes formes de patch.

IV.3.2.6 Effet de la charge appliquée sur la variation FIC :

La **figure IV.23** représente la variation du facteur d'intensité de contraintes K_I en mode I pour une fissure réparée, en fonction de la variation des différentes valeurs de charge appliquée entre (100-300)MPa avec une taille de fissure de 15 mm. L'effet est observé par augmentation de la charge appliquée ce qui entraîne une augmentation du facteur d'intensité de contraintes pour toutes les formes de patch (rectangle, trapèze, cercle ou ellipse). Les valeurs du facteur d'intensité de contraintes obtenues sont légèrement différentes pour le patch de forme rectangulaire et trapézoïdale, avec une légère augmentation dans les valeurs de trapèze entre les charges 200MPa et 300MPa. Les valeurs du FIC varient dans l'intervalle (7-20,5)MPa.m^{1/2} pour $\sigma=(100-300)$ MPa pour la forme circulaire, Quant à celle de la forme elliptique et dans le même intervalle de la charge les valeurs de FIC sont comprise entre 17 et 50 MPa.m^{1/2}.

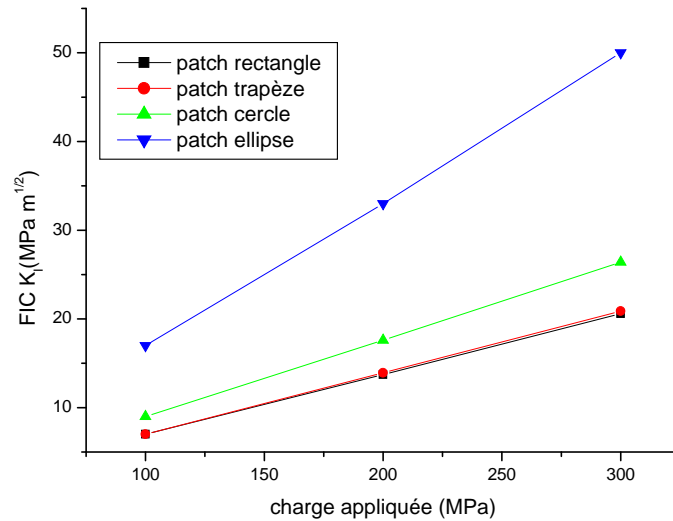


Fig. IV.23 : Variation du FIC en fonction de charge appliquée.

IV.3.2.7 Facteur d'intensité de contrainte en fonction du rapport de la zone endommagée D_R pour les différentes formes du patch:

La figure IV.24, représente l'évolution du facteur d'intensité de contraintes en fonction du rapport D_R de la zone endommagée de l'adhésif. L'ensemble des résultats obtenus montrent que les valeurs des FIC pour le patch de forme rectangulaire sont très petites par rapport aux autres formes (circulaire et ellipsoïdale). En comparant les valeurs du FIC pour la forme trapézoïdale et rectangulaire sont à peu près les mêmes, mais la forme rectangulaire est plus avantageuse du faite qu'elle offre des valeurs de D_R plus faibles. A titre comparatif entre les formes de trapèze et de rectangle à celles des circulaire et elliptique on remarque que les premières formes sont avantageuses par rapport aux deuxièmes car elles donnent des valeurs de FIC faibles. Par contre les deuxièmes formes sont plus avantageuses par rapport aux premières car elles offrent des valeurs de D_R plus faibles.

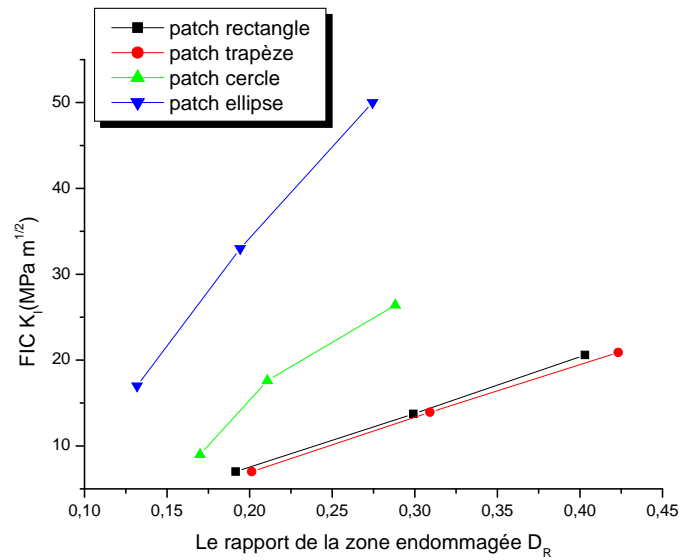


Fig. IV.24 : Variation du FIC en fonction du rapport de la zone endommagée (D_R).

IV.3.3 Effet de l'épaisseur de l'adhésif sur son endommagement:

L'épaisseur de la colle est un paramètre déterminant sur le comportement du renforcement. Les figures (IV.25- IV.27- IV.29 - IV.31) représentent les variations de la zone endommagée pour une fissure en mode I réparée en fonction de l'épaisseur de la colle. Il est clair que l'effet bénéfique la zone endommagée diminue avec l'augmentation de cette épaisseur. L'adhésif est l'agent responsable du transfert de charge de la plaque vers le patch. Son épaisseur doit être optimisée, car une faible épaisseur peut engendrer l'augmentation des niveaux des contraintes de cisaillement qui à leur tour provoquent la rupture de l'adhésion.

IV.3.3.1 patch rectangulaire

La figure IV.25 représente l'évolution de la zone endommagée. Il apparaît clairement que l'augmentation de l'épaisseur de l'adhésif entraîne une diminution de la zone endommagée autour de la fissure. Par contre la zone endommagée au niveau des côtés supérieur et inférieur reste presque la même pour tous les cas $e_a = 0.05\text{mm}$, $e_a = 0.25\text{mm}$ et $e_a = 0.5\text{mm}$. Aucune zone endommagée n'est observée au niveau de la corrosion.

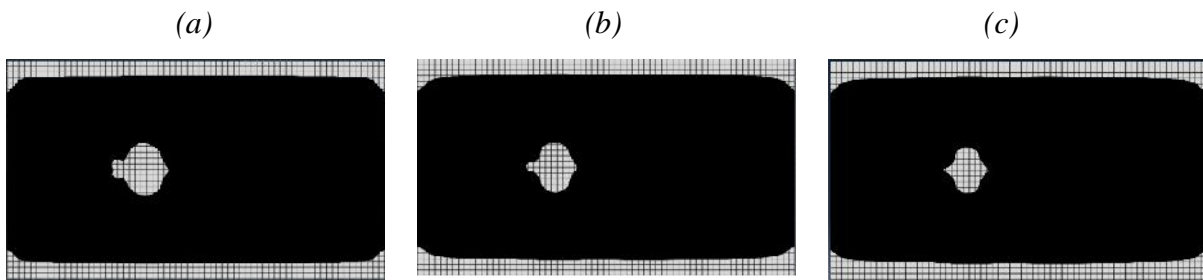


Fig. IV.25 : zone endommagée pour un patch de forme rectangulaire (a) $e_a=0.05\text{mm}$, (b) $e_a=0.25\text{mm}$ et (c) $e_a=0.5\text{mm}$.

La figure IV.26 représente la variation du rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif pour un patch de forme rectangulaire. À partir de cette courbe la valeur de D_R augmente avec l'épaisseur de l'adhésif, et passe par un maximum lorsque l'épaisseur de l'adhésif est de l'ordre de $e_a=0.3\text{mm}$, au-delà de cette valeur il diminue progressivement jusqu'à atteindre la valeur D_R égale 0.17. On remarque aussi que toutes les valeurs de D_R sont inférieures à la valeur critique ($D_{Rc}=0.247$).

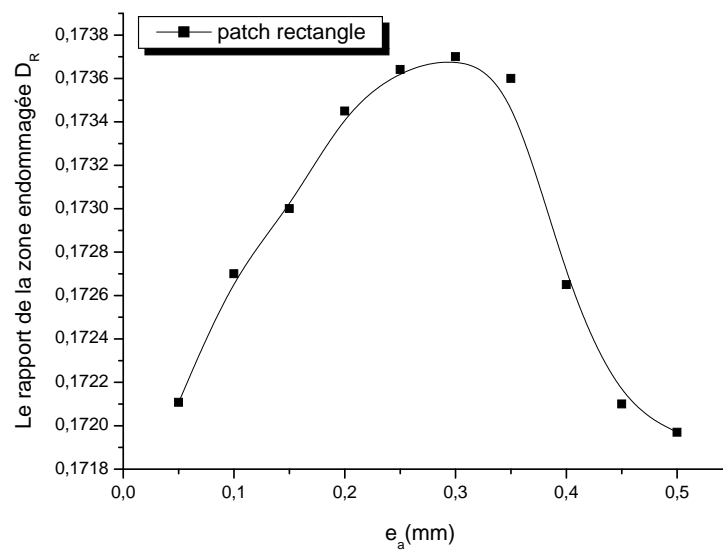


Fig. IV.26 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif.

IV.3.3.2 patch trapézoïdale

La figure IV.27 permet d'illustrer l'évolution de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif. Ce comportement est similaire au cas précédent, on constate que l'augmentation de la longueur de fissure conduit à une diminution dans la surface de la zone endommagée soit au niveau de fissure ou aux bords du patch.

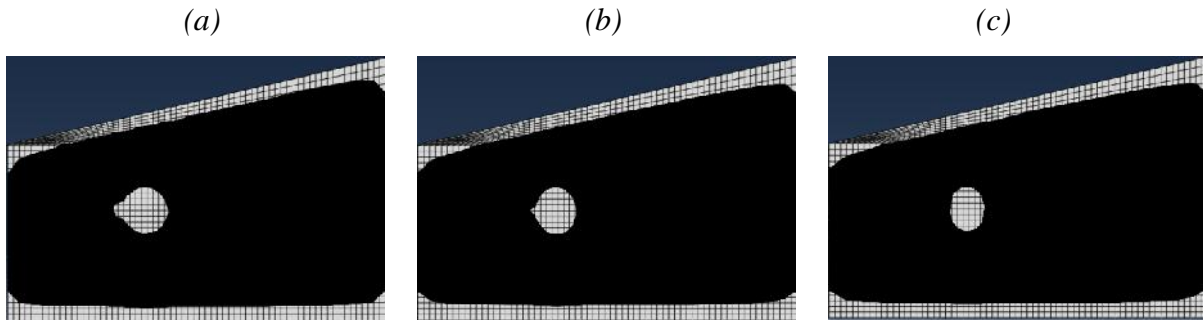


Fig. IV.27 : zone endommagée pour un patch de forme trapézoïdale (a) $e_a = 0.05mm$, (b) $e_a = 0.25mm$ et (c) $e_a = 0.5mm$.

Ces résultats nous permettent d'observer que ces zones diminuent en fonction de l'épaisseur de l'adhésif au niveau de la fissure. Par contre pour les côtés supérieurs et inférieurs de trapèze, ces zones presque restent les mêmes due à l'augmentation de l'épaisseur de l'adhésif. La variation du rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif est représentée sur la figure IV.28. Cette courbe montre que le rapport diminue en fonction de l'augmentation de l'épaisseur de l'adhésif. On remarque aussi que toutes les valeurs de D_R n'atteignent pas la valeur critique de ($D_{Rc} = 0.247$).

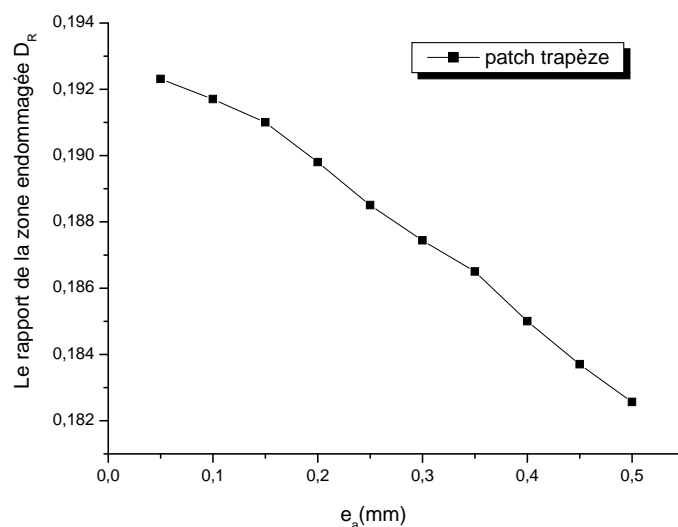


Fig. IV.28 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif.

IV.3.3.3 patch circulaire

Le patch de forme circulaire est représenté sur la figure IV.29.

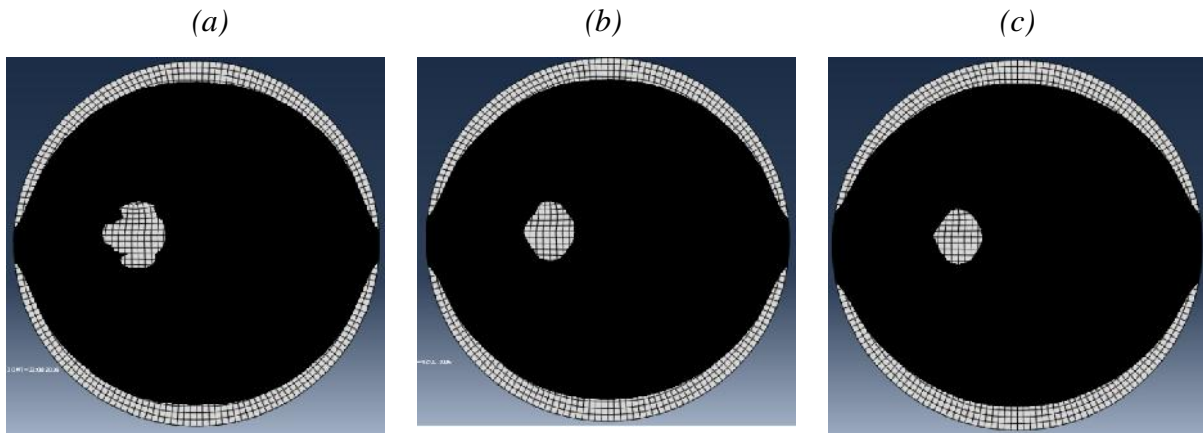


Fig. IV.29 : zone endommagée pour un patch de forme circulaire (a) $e_a = 0.05\text{mm}$, (b) $e_a = 0.25\text{mm}$ et (c) $e_a = 0.5\text{mm}$.

D'après ces figures on remarque que la zone endommagée au niveau de la fissure diminue si l'épaisseur de l'adhésif augmente. On observe aussi une déformation de la zone endommagée au niveau des deux côtés du patch.

Le même comportement est observé sur la figure IV.30 pour les formes précédentes (rectangulaire, trapézoïdale) en augmentant l'épaisseur de l'adhésif. D'après cette figure on remarque une quasi constance du rapport de la zone endommagée $D_R \approx 0.131$ entre $e_a = 0.05\text{mm}$ et $e_a = 0.25\text{mm}$. Au-delà de $e_a = 0.25\text{mm}$ on remarque une diminution très rapide de D_R jusqu'à la valeur de 0.118.

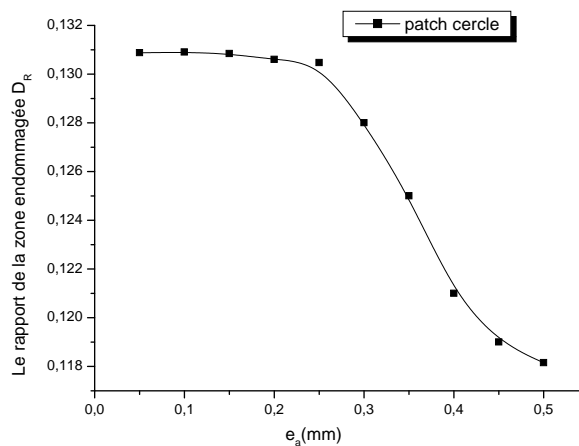


Fig. IV.30 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif.

IV.3.3.4 patch ellipsoïdale

L'évolution de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif (**Fig. IV.31**) permet de déterminer la variation de comportement de la colle en fonction la variation de l'épaisseur de l'adhésif. Les résultats observés sont similaire que ceux des cas précédents **figures (IV.27, IV.29)**.

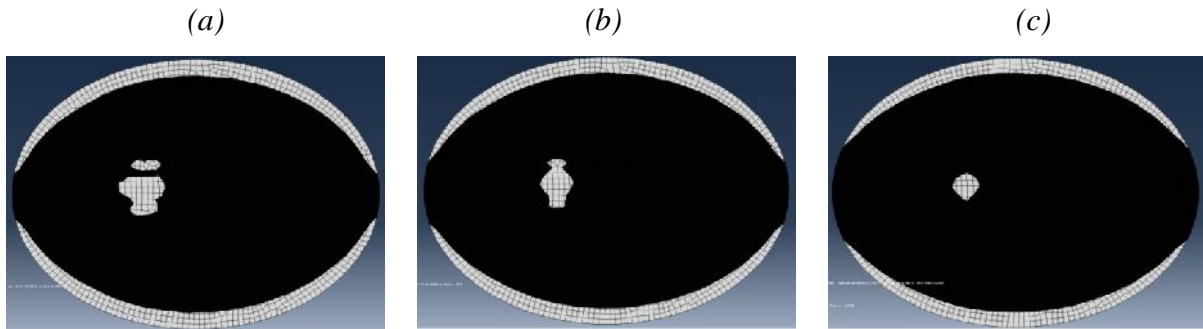


Fig. IV.31 : zone endommagée pour un patch de forme ellipsoïdale (a) $e_a=0.05\text{mm}$, (b) $e_a=0.25\text{mm}$ et (c) $e_a=0.5\text{mm}$.

La **Figure IV.32** représente l'évolution du rapport de la zone endommagée D_R en fonction de l'épaisseur de l'adhésif pour le cas du patch en forme d'ellipse. L'augmentation de l'épaisseur de l'adhésif entraîne une diminution du rapport de la zone endommagée D_R . On remarque aussi que quel que soit l'épaisseur de l'adhésif prise la valeur critique ($D_{Rc}=0.247$) n'est pas atteinte. La valeur maximale de $D_R=0.13$ est obtenue pour une épaisseur d'adhésif $e_a=0.05\text{mm}$. Il est recommandé de choisir une importante épaisseur d'adhésif par exemple $e_a=0.45\text{mm}$ car le rapport de la zone endommagée pour celle-ci est faible.

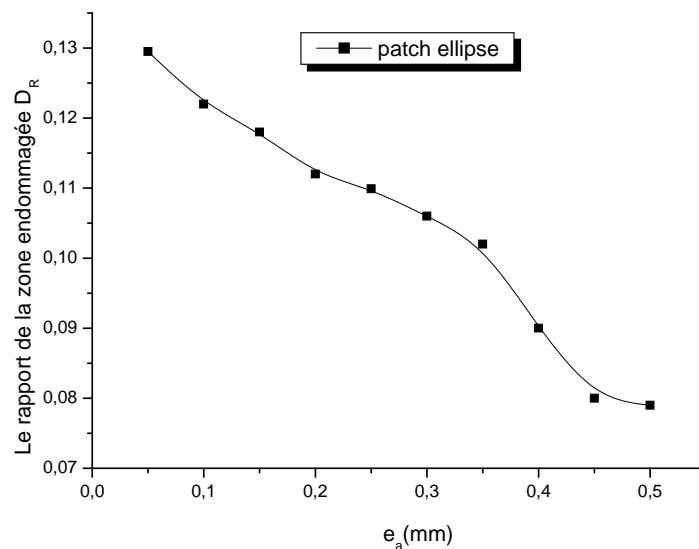


Fig. IV.32 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif.

IV.3.3.5 Effet de l'épaisseur de l'adhésif sur la variation du rapport de la zone endommagée de l'adhésif :

La **figure IV.33**. Regroupe les résultats obtenus pour la variation du rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif. On remarque que le comportement des patches elliptique et circulaire est différent de ceux des patches rectangulaire et trapézoïdale. Pour les deux premiers patches nous constatons une diminution du rapport de la zone endommagée contrairement aux autres patches où il y a presque une stabilité. Les valeurs de D_R des deux premiers sont faibles par rapport à ceux des deux autres. Dans l'intervalle $e_a = (0.05-0.5)$ mm on enregistre D_R compris entre 0,13 et 0,8 pour les formes circulaire et elliptique, tandis que les valeurs de D_R sont comprises entre 0,19 et 0,17 pour les mêmes épaisseurs prises pour les autres formes. On note aussi que toutes les valeurs du rapport de la zone endommagée n'atteignent pas la valeur critique pour toutes les formes de patches.

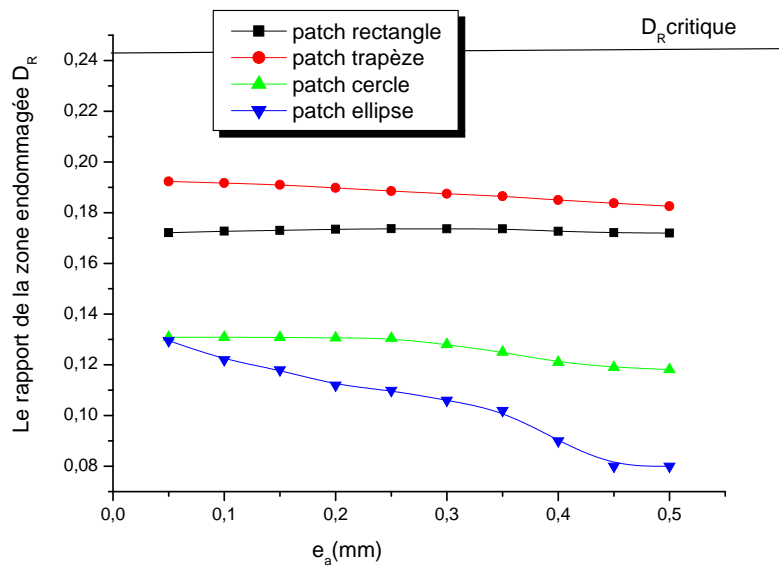


Fig. IV.33 : Rapport de la zone endommagée vs l'épaisseur de l'adhésif pour les différentes formes de patch.

IV.3.3.6 Effet de l'épaisseur de l'adhésif sur la variation du FIC :

La **figure IV.34** représente la variation du facteur d'intensité de contraintes en fonction de l'épaisseur de l'adhésif pour les différentes formes du patch. On remarque que la forme des courbes du FIC pour les patches rectangulaire et trapézoïdale est ascendante par contre celle des formes circulaire et ellipsoïdale est descendante. Bien que les valeurs de K_I pour les formes rectangulaire et trapézoïdale augmentent mais elles restent toujours inférieures à celles des deux autres formes. Nous avons enregistré la valeur du FIC de 6,5 comme valeur minimale et 7,5 valeur maximale pour les formes du patch rectangulaire et trapézoïdale, mais pour les patches circulaire et ellipsoïdale nous avons enregistré la valeur de FIC de 8.7 comme la plus faible et 10.3 comme la valeur la plus forte.

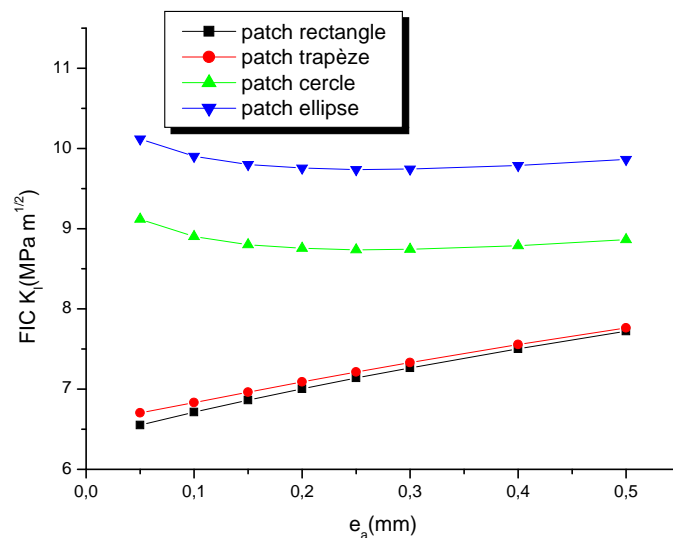


Fig. IV.34 : Variation du FIC en fonction de l'épaisseur de l'adhésif.

IV.3.3.7 Facteur d'intensité de contrainte en fonction du rapport de la zone endommagée D_R pour les différentes formes du patch:

Dans le but d'estimer la performance de la réparation et de choisir la forme la plus adéquate pour la réparation des corrosions. La **figure IV.35** montre que le patch rectangulaire est le plus efficace relativement aux autres formes, d'après cette figure on remarque aussi que les valeurs de K_I sont proches de celles du patch de forme trapézoïdale, par contre concernant les valeurs de D_R elles sont différentes. Les valeurs du rapport de la zone endommagée sont inférieures à la valeur critique ($D_{Rc}=0.247$) et à la valeur maximale ($D_R=0.19$) pour le patch de forme trapézoïdale.

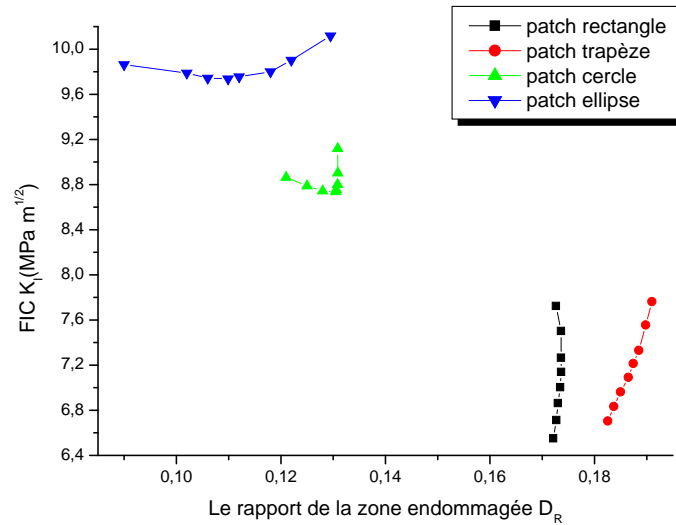


Fig. IV.35 : Variation du FIC en fonction du rapport de la zone endommagée (D_R).

IV.3.4 Effet de l'épaisseur de patch sur l'endommagement de l'adhésif :

Cet effet est indiqué sur les figures (IV.36- IV.38 - IV.40 - IV.42). Celles-ci montrent les variations de la zone endommagée dans la colle en fonction de l'épaisseur du patch. On considère que la charge appliquée est constante $\sigma=100\text{MPa}$, les propriétés de l'adhésif sont l'épaisseur et le module de cisaillement respectivement ($e_a=0.15\text{mm}$ et $G_a=4200\text{MPa}$). La longueur de la fissure est constante est vaut $a = 15 \text{ mm}$.

Après la détermination de la zone endommagée on a calculé le D_R et tracé la courbe du FIC en pointe de fissure en fonction de D_R .

IV.3.4.1 patch rectangulaire

Cette étude a été réalisée afin de déterminer l'évolution de la zone endommagée dans la couche adhésive pour des structures réparées en composite et voir l'effet de l'épaisseur du patch. La figure IV.36 représente respectivement, l'étendue de la zone endommagée dans la couche adhésive de $e_p=0.5\text{mm}$, $e_p=2.5\text{mm}$ et $e_p=5\text{mm}$.

On peut observer que les zones endommagées sont localisées autour de la fissure mais avec une réduction dans la taille de cette zone endommagée en fonction de l'épaisseur de patch. On remarque aussi que la taille de la surface blanche dans le cas $e_p=2.5\text{mm}$ est très grande par rapport aux autres cas. On remarque aussi que l'augmentation de l'épaisseur de patch

entraîne une augmentation de la zone endommagée au niveau des côtés supérieur et inférieur de la colle.

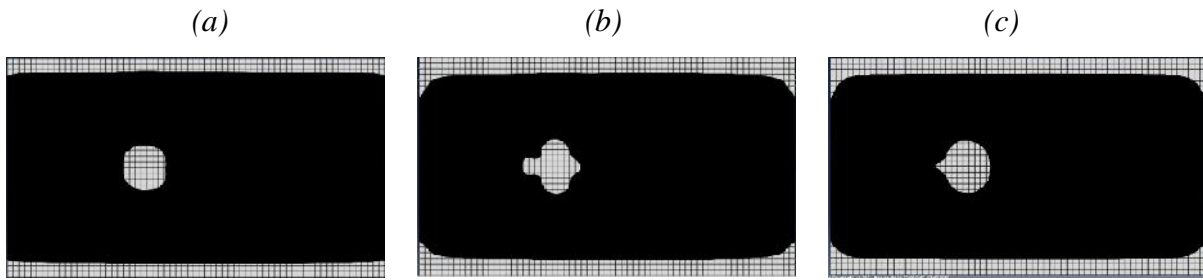


Fig. IV.36 : zone endommagée pour un patch de forme rectangulaire (a) $e_p = 0.5\text{mm}$, (b) $e_p = 2.5\text{mm}$ et (c) $e_p = 5\text{mm}$.

Les résultats de la **figure IV.37** montrent que le rapport de la zone endommagée augmente avec l'épaisseur de patch jusqu'à $D_R = 0.185$ pour $e_p = 3\text{mm}$, dépassé cette valeur la courbe a tendance à une faible descente. Cette diminution de D_R est due pour des épaisseurs importantes. Cette figure nous permet de déduire que pour toutes les valeurs de e_p le D_R critique n'est pas atteint parce que la valeur maximale de D_R vaut $0.187 < D_{Rc}$.

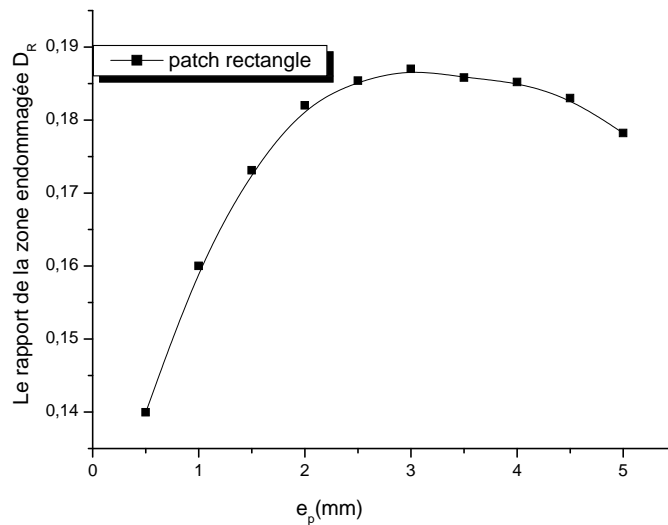


Fig. IV.37 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de patch.

IV.3.4.2 patch trapézoïdale

L'évolution de la zone endommagée de l'adhésif dans le cas du patch trapézoïdale, est illustrée sur la **figure IV.38**. Les figures montrent que la zone endommagée au niveau de la fissure augmente en fonction d'augmentation de l'épaisseur du patch. On remarque aussi que la zone endommagée aux côtés du trapèze augmenté.

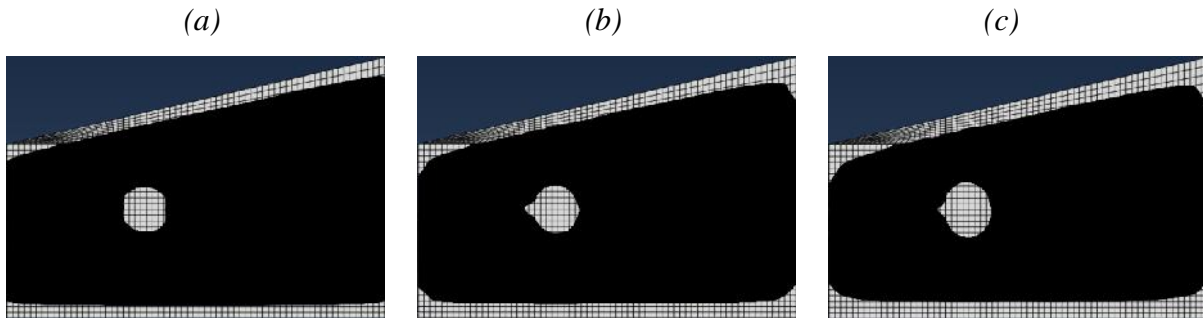


Fig. IV.38 : zone endommagée pour un patch de forme trapézoïdale (a) $e_p = 0.5\text{mm}$, (b) $e_p = 2.5\text{mm}$ et (c) $e_p = 5\text{mm}$.

L'augmentation de la zone endommagée engendre les risques de décollement du patch. L'évolution du rapport de la zone endommagée d'adhésif est montrée sur la **figure IV.39**. L'augmentation des valeurs de e_p entraîne une variation de la zone endommagée au niveau de la fissure ce qui entraîne automatiquement l'augmentation de D_R . D'après cette figure on remarque que la valeur de D_R égale 0.155 pour une épaisseur de patch $e_p = 0.5\text{mm}$ puis augmente jusqu'atteindre la valeur de 0.235 valeur avoisinante le D_{Rc} .

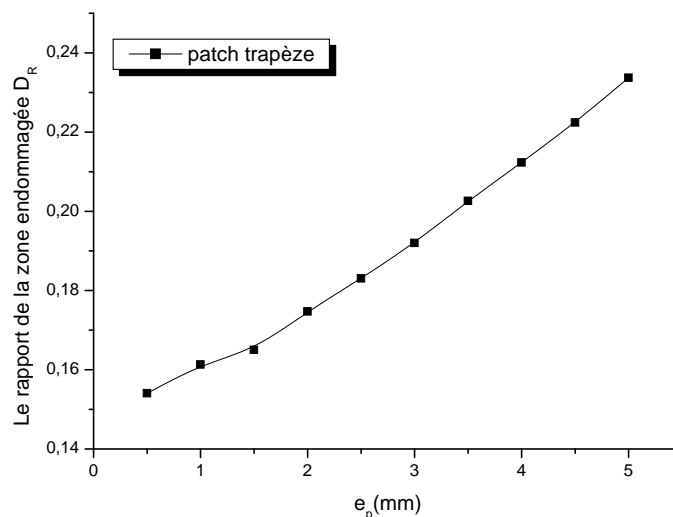


Fig. IV.39 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de patch.

IV.3.4.3 patch circulaire

La figure IV.40 représente l'évolution de la zone endommagée d'adhésif pour toutes les valeurs de l'épaisseur de patch $e_p = (0.5-5)$ mm.

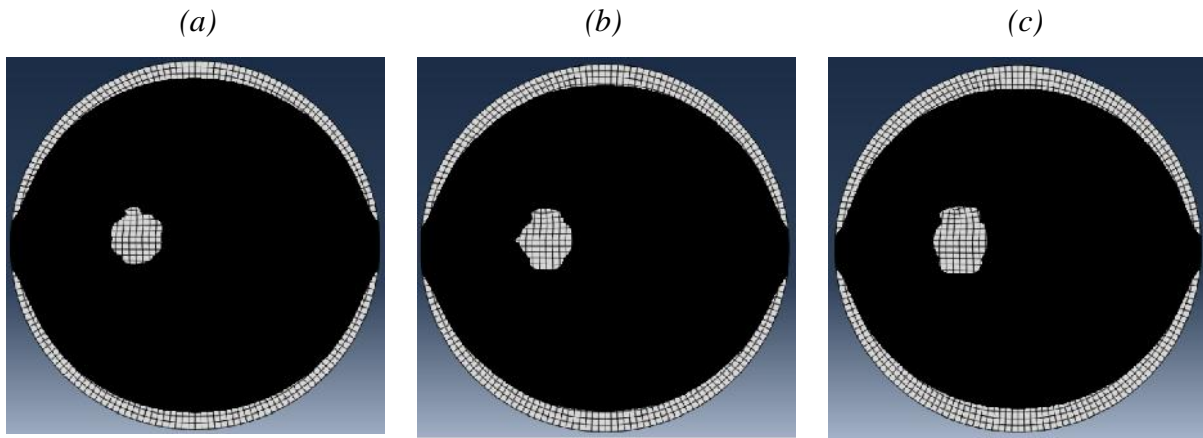


Fig. IV.40 : zone endommagée pour un patch de forme circulaire (a) $e_p = 0.5$ mm, (b) $e_p = 2.5$ mm et (c) $e_p = 5$ mm.

On remarque qu'il ya un changement dans la zone endommagée au niveau de la fissure et même au niveau des côtés de la colle. En augmentant les valeurs de l'épaisseur du patch la zone endommagée augmente au périphérique de la colle et au niveau de la fissure.

Pour illustrer l'effet du critère d'épaisseur sur le rapport de la zone endommagée D_R , la variation de ce rapport en fonction de l'épaisseur de patch pour la longueur de fissure ($a=15$ mm) est tracé sur la figure IV.41. Cette figure montre que le D_R augmente avec de l'épaisseur de patch. En effet, le taux d'augmentation atteint une valeur de 45% entre $e_p=0.5$ mm et $e_p= 3$ mm. Ce taux d'augmentation est de l'ordre de 45.5% lorsque l'épaisseur de patch varie de 3 à 5mm. Même remarque concernant la valeur de D_R critique répète que les cas précédents ($D_R < D_{Rc}$).

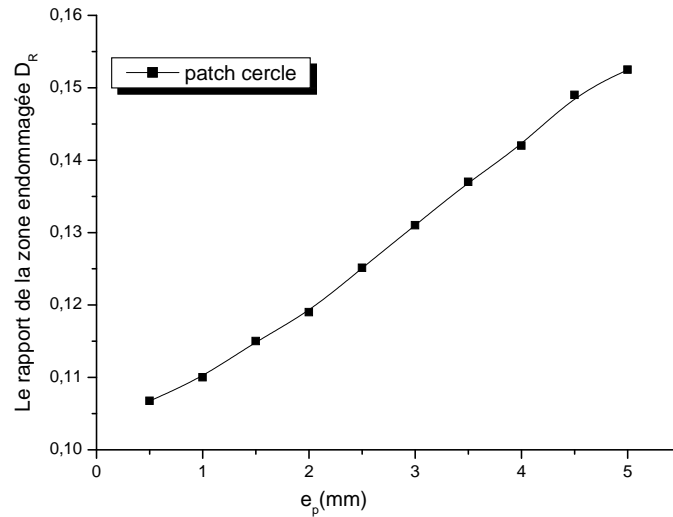


Fig. IV.41 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de patch.

IV.3.4.4 patch ellipsoïdale

L'analyse de la **figure IV.42** montre que la réparation de la plaque fissurée effectuée avec d'adhésif sous l'effet de la charge appliquée induit des contraintes sur la colle qui créent des zones endommagées dans l'adhésif.

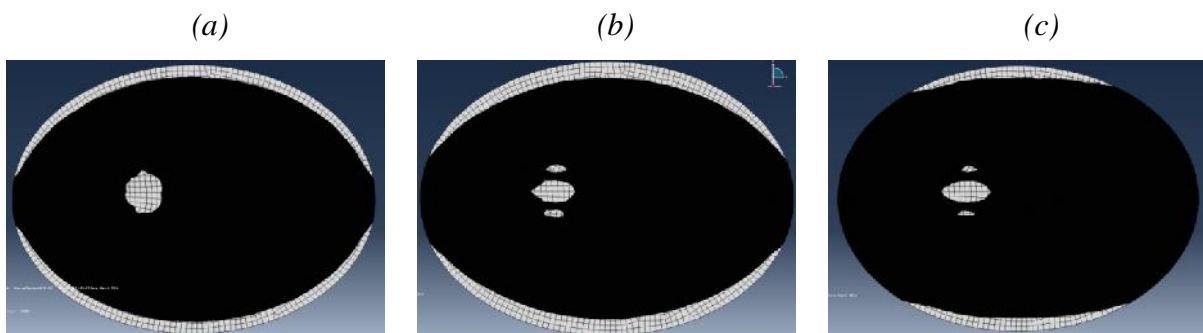


Fig. IV.42 : zone endommagée pour un patch de forme ellipsoïdale (a) $e_p = 0,5\text{mm}$, (b) $e_p = 2,5\text{mm}$ et (c) $e_p = 5\text{mm}$.

Les mêmes remarques sont observées que pour les formes précédentes du patch mais avec une réduction aux côtés supérieurs et inférieurs de la zone endommagée de l'adhésif.

La variation du rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur du patch pour la forme ellipsoïdale est représentée sur la **figure IV.43**.

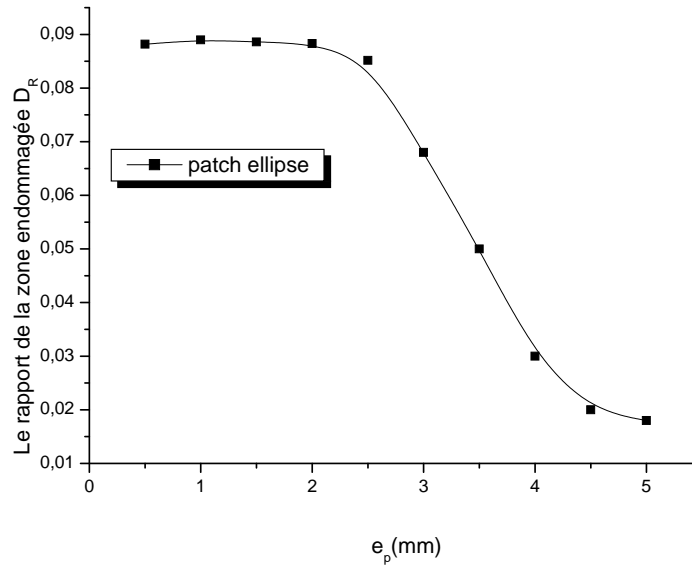


Fig. IV.43 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de patch.

Cette figure montre que le rapport de la zone endommagée diminue en fonction de l'augmentation de l'épaisseur du patch. On remarque aussi qu'il y a une stabilité dans les valeurs de D_R si on travaille dans l'intervalle $0.5\text{mm} < e_p < 2.5\text{mm}$. Mais après cet intervalle on remarque une grande diminution dans les valeurs de D_R , et toutes les valeurs de D_R enregistrées ne dépassent pas la valeur critique de D_R .

IV.3.4.5 Effet de l'épaisseur du patch sur la variation du rapport de la zone endommagée de l'adhésif :

L'analyse des résultats précédents montre que l'augmentation de l'épaisseur du patch induit une réduction de la zone endommagée au niveau de la fissure ce qui n'est pas le cas aux côtés de la colle. On représente sur la **figure IV.44** les variations du rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur du patch. On remarque un comportement similaire pour les formes circulaire et trapézoïdale de proportionnalité entre l'épaisseur du patch et le rapport de la zone endommagée. Pour les formes rectangulaire et elliptique la valeur de D_R augmente pour les valeurs de e_p comprises (0.5-2.5) mm, dépassée la valeur $e_p=2.5\text{mm}$ une diminution de D_R est observée. Cette diminution peut atteindre jusqu'à 73% pour la forme rectangulaire. Les valeurs les plus élevées de ce rapport sont obtenues pour le patch de forme trapézoïdale.

Quelle que soit la forme du patch utilisée la valeur critique du rapport de la zone endommagée n'est pas atteinte.

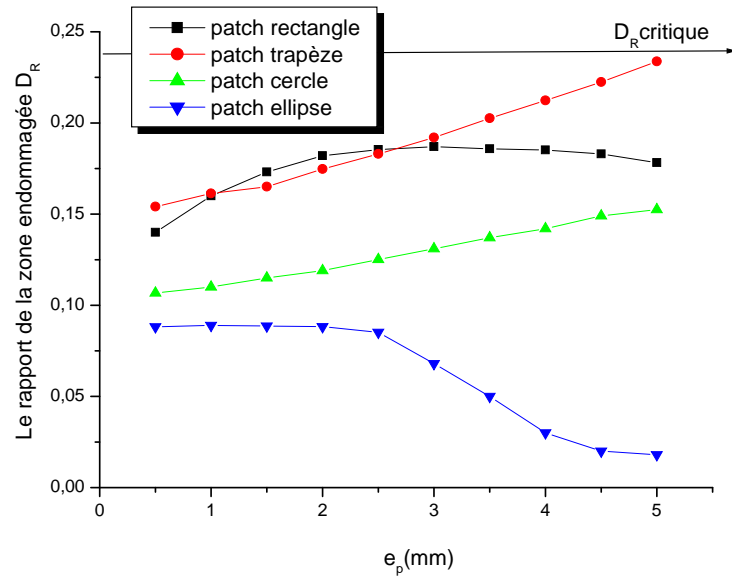


Fig. IV.44 : Rapport de la zone endommagée vs l'épaisseur du patch pour les différentes formes de patch.

IV.3.4.6 Effet de l'épaisseur du patch sur la variation du FIC :

On a observé une influence importante de l'épaisseur du patch comme le montre la figure IV.45 Ci-dessous.

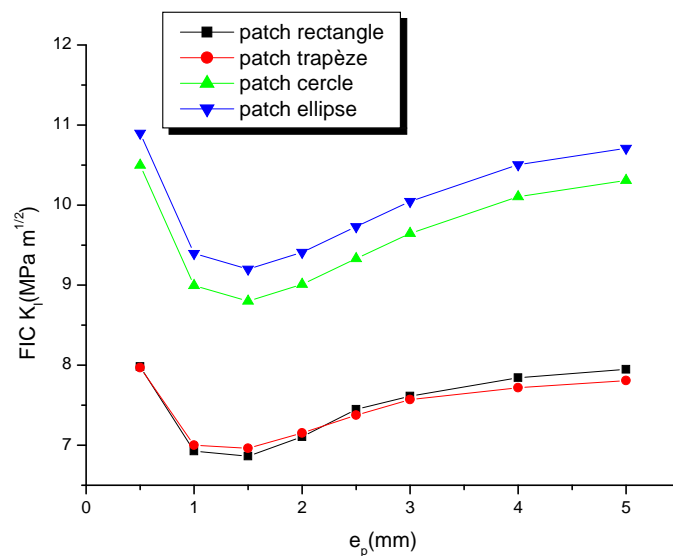


Fig. IV.45 : Variation du FIC en fonction de l'épaisseur du patch.

D'après les résultats obtenus le graphe peut être scindé en deux parties. La première où le facteur d'intensité de contraintes diminue en fonction de l'épaisseur du patch, comprise entre 0.5mm et 1.5mm. La valeur minimale du FIC est enregistrée pour $e_p=1.5\text{mm}$ où $K_I=6.8 \text{ MPa.m}^{1/2}$. Au-delà de cette épaisseur, le FIC augmente en fonction de l'épaisseur du patch avec un pourcentage de 30% pour toutes les formes de patch.

On observe aussi que les valeurs maximales du FIC enregistrées pour les patches circulaire et elliptique sont respectivement $K_I=10.5 \text{ MPa.m}^{1/2}$ et $K_I=11 \text{ MPa.m}^{1/2}$.

IV.3.4.7 Facteur d'intensité de contrainte en fonction du rapport de la zone endommagée D_R pour les différentes formes du patch:

Les résultats obtenus pour la variation du facteur d'intensité de contraintes en fonction de l'épaisseur du patch sont illustrés sur la **figure IV.46**. Cette dernière montre que le choix de la forme rectangulaire du patch dans la réparation des corrosions avec une fissure est le meilleur car la valeur du facteur d'intensité de contraintes est très faible comparée à celles des autres formes.

Ainsi, pour améliorer ce rapport il faut choisir des patches de faibles épaisseurs.

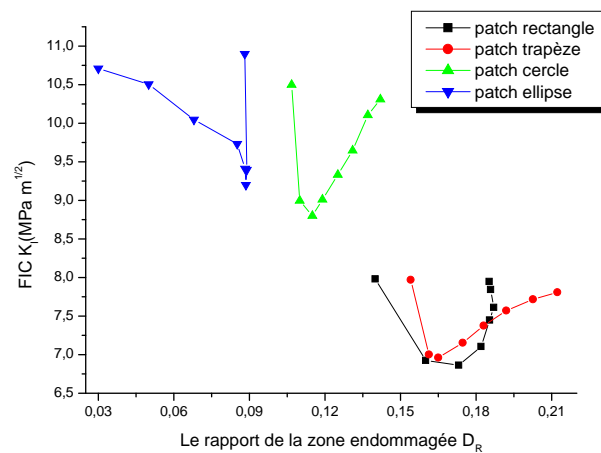


Fig. IV.46 : Variation du FIC en fonction du rapport de la zone endommagée (D_R).

IV.3.5 Effet du module de cisaillement de l'adhésif sur l'endommagement de l'adhésif :

Le point faible du renforcement par matériaux composites réside dans la colle qui permet de consolider le renfort au substrat. En effet, 53% des endommagements constatés dans les structures aéronautiques ainsi réparées sont dues à la colle. L'adhésif est souvent à l'origine d'endommagement du patch composite car c'est sa rupture ou sa décohésion qui provoque le détachement du renfort composite. Ces endommagements sont essentiellement dus au transfert d'effort du substrat vers le patch composite. Cette zone de transfert d'effort entraîne en effet un pic de cisaillement à proximité du bord libre du patch composite.

L'effet du module de cisaillement de la colle sur la variation de la zone endommagée de l'adhésif est illustré sur les figures (IV.47 - IV.49 - IV.51 - IV.53). La figure IV.56 montre la variation du facteur K_I en fonction du module de cisaillement de l'adhésif pour les différentes formes de patch. Puis le choix de la forme optimale du patch est réalisé.

IV.3.5.1 patch rectangulaire

La figure suivante (Fig. IV.47) représente la variation de la zone endommagée en fonction du module de cisaillement de l'adhésif. On constate que la zone endommagée augmente en fonction de l'augmentation de G_a autour de la fissure.

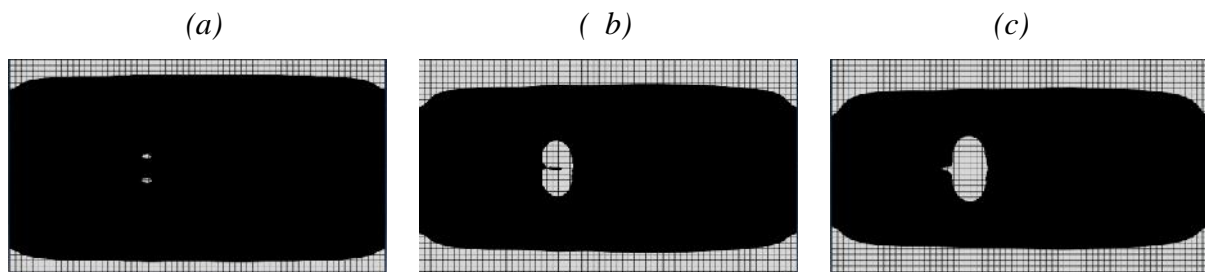


Fig. IV.47 : zone endommagée pour un patch de forme rectangulaire (a) $G_a = 200MPa$,
(b) $G_a = 800MPa$ et (c) $G_a = 1400MPa$.

Les figures IV.47 (a-b-c) montrent une augmentation au niveau des côtés du patch avec l'augmentation du module de cisaillement de l'adhésif. La zone endommagée augmente dans les deux régions sensibles au niveau de la fissure ou aux côtés du patch.

On a étudié l'évolution du rapport de la zone endommagée du patch de forme rectangulaire en fonction du module de cisaillement de l'adhésif. En traçant la courbe de la figure (Fig. IV.48). On constate que les valeurs du D_R augmentent en fonction de l'augmentation du module de cisaillement de l'adhésif. La valeur critique de la zone

endommagée ($D_{Rc}=0.247$) est atteinte pour une valeur de $G_a \geq 600$ MPa. Alors que le rapport de la zone endommagée passe de 0,15 pour $G_a=200$ MPa jusqu'à atteindre 0.35 pour $G_a=1400$ MPa. Le tracé de la variation du rapport de la zone endommagée a une forme linéaire pour toutes les valeurs du module de cisaillement de l'adhésif.

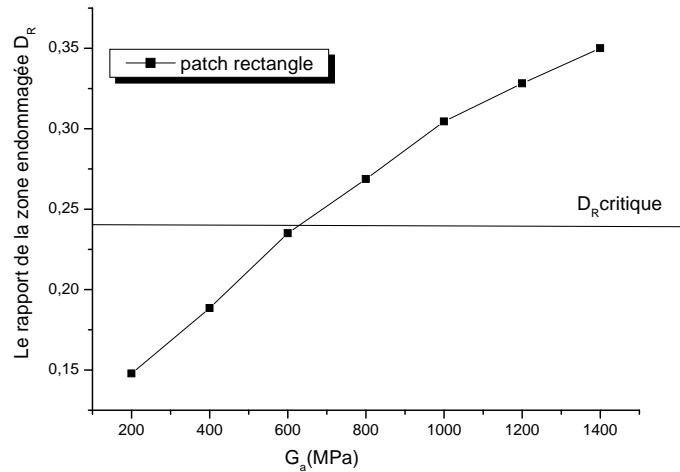


Fig. IV.48 : Rapport de la zone endommagée en fonction du module de cisaillement de l'adhésif.

IV.3.5.2 patch trapézoïdale

Le suivi de l'évolution de la zone endommagée en fonction du module de cisaillement de l'adhésif est représenté sur les figures **IV.49 (a,b,c)**. Il apparaît clairement que la zone endommagée augmente soit au niveau de la fissure ou bien au niveau des côtés de patch en fonction l'augmentation du module de cisaillement de l'adhésif.

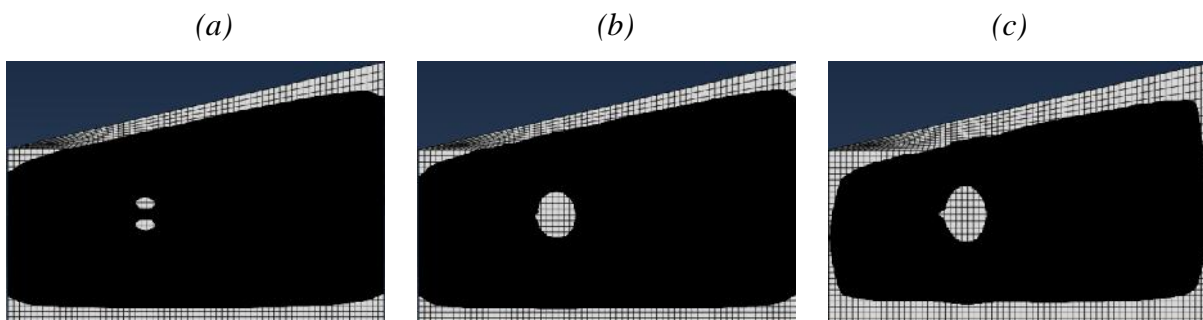


Fig. IV.49 : zone endommagée pour un patch de forme trapézoïdale (a) $G_a = 200$ MPa, (b) $G_a = 800$ MPa et (c) $G_a = 1400$ MPa.

La **courbe IV.50** confirme que le comportement est meilleur pour la réparation avec des adhésifs de modules de cisaillement faible pour la forme trapézoïdale. En effet, la valeur du rapport de la zone endommagée dans l'adhésif augmente avec l'augmentation du module de cisaillement, la valeur critique de D_R est atteinte pour $G_a \geq 500 \text{MPa}$.

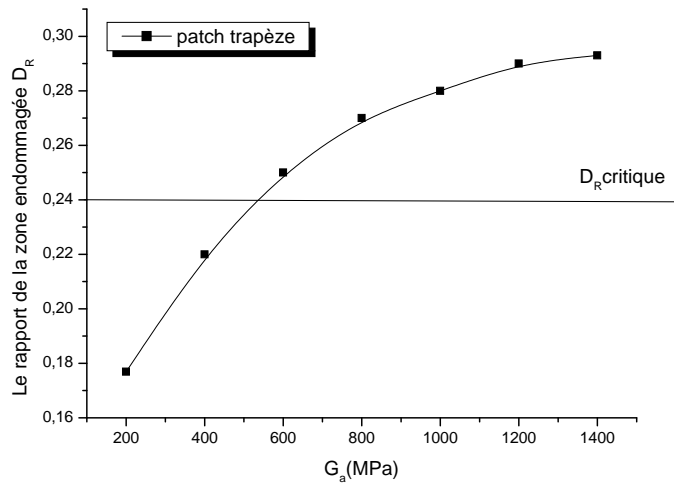


Fig. IV.50 : Variation de la zone endommagée en fonction du module de cisaillement de l'adhésif.

IV.3.5.3 patch circulaire

Les figures (IV.51 a-b-c) illustrent l'évolution de la zone endommagée pour les différentes valeurs du module de cisaillement de l'adhésif.

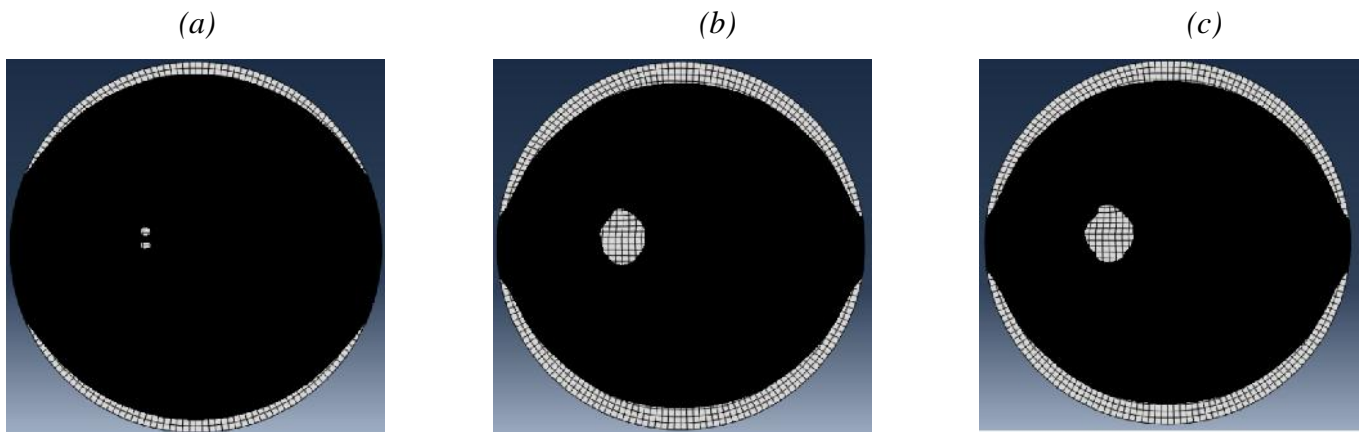


Fig. IV.51 : zone endommagée pour un patch de forme circulaire (a) $G_a = 200 \text{MPa}$,
(b) $G_a = 800 \text{MPa}$ et (c) $G_a = 1400 \text{MPa}$.

À partir de ces figures on peut dire que la zone endommagée augmente en fonction de l'augmentation du module de cisaillement de l'adhésif soit au niveau de la fissure ou bord du patch. On remarque une petite surface blanche autour de la fissure (**Fig IV.51.a**) puis cette zone augmente dans les cas $G_a=800\text{MPa}$ et $G_a=1400\text{MPa}$. L'étendue de la zone aux côtés supérieur et inférieur du patch pour les cas de $G_a=(800 \text{ et } 1400)\text{MPa}$ est pratiquement la même.

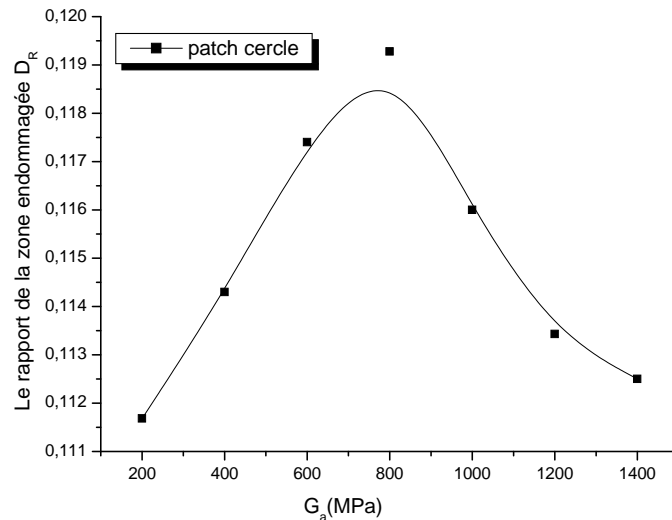


Fig. IV.52 : Rapport de la zone endommagée en fonction du module de cisaillement de l'adhésif.

On a étudié l'influence du module de cisaillement de l'adhésif sur la variation du rapport de la zone endommagée et l'influence de la corrosion (**Fig. IV.52**). On observe que l'augmentation du module de cisaillement de l'adhésif induit une augmentation du rapport de la zone endommagée. On peut noter aussi que le graphe est divisé en deux parties, $G_a < 800\text{MPa}$ la variation de la courbe a une pente très ascendante où D_R varie entre 0.1115 et 0.119, la deuxième partie pour $G_a > 800\text{MPa}$ la courbe est décroissante jusqu'à la valeur 0.1125. On remarque que pour toutes les valeurs de G_a la valeur de D_{Rc} n'est pas atteinte.

IV.3.5.4 patch ellipsoïdale

L'évolution de la zone endommagée pour une forme elliptique est mentionnée sur la figure ci-dessous (**figure IV.53**).

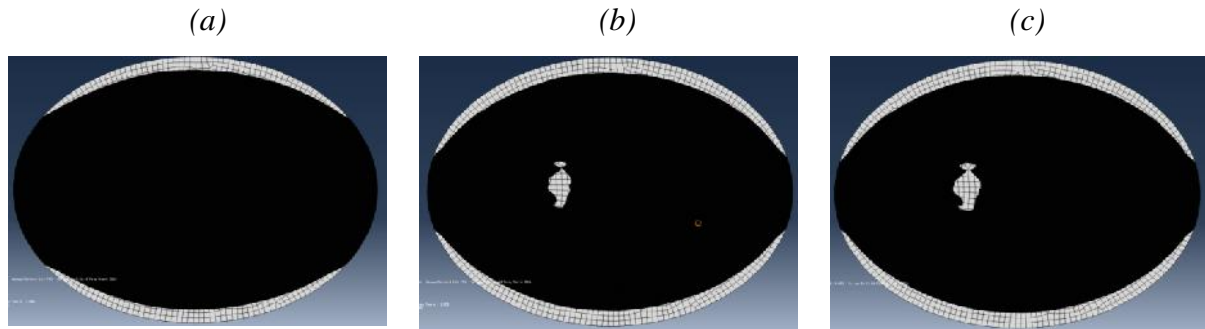


Fig. IV.53 : zone endommagée pour un patch de forme ellipsoïdale (a) $G_a = 200\text{MPa}$, (b) $G_a = 800\text{MPa}$ et (c) $G_a = 1400\text{MPa}$.

Dans le cas de $G_a = 200\text{MPa}$ on remarque que la zone endommagée apparaît seulement au niveau des bords de colle et aucune apparition de cette zone au niveau de la fissure ou de la corrosion. Puis dans les cas de $G_a = 800\text{MPa}$ et $G_a = 800\text{MPa}$ on observe que la zone endommagée est grande relativement au cas précédent aux niveaux des cotés (supérieur et inférieur) du patch, et apparaît au niveau de la fissure.

Le calcul du rapport de la zone endommagée est effectué en **figure IV.54**. On voit clairement l'augmentation en D_R en fonction de l'accroissement du module de cisaillement d'adhésif. On note une augmentation du rapport D_R de la zone endommagée allant de 0,05 jusqu' à 0.12 respectivement pour $G_a = 200\text{MPa}$ et $G_a = 1400\text{MPa}$. On remarque que l'augmentation est rapide dans l'intervalle $G_a = (200-800)\text{MPa}$, mais après la dernière valeur l'augmentation de D_R est faible. On constate que pour toutes les valeurs de G_a la valeur critique ($D_{Rc} = 0.247$) n'est pas atteinte.

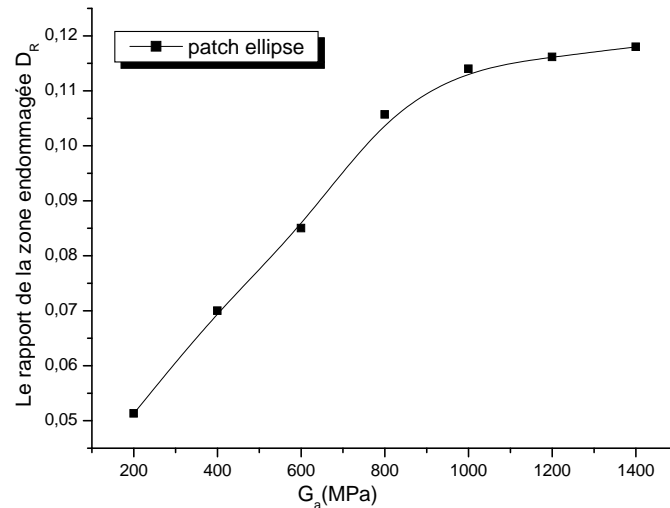


Fig. IV.54 : Rapport de la zone endommagée en fonction du module de cisaillement de l'adhésif.

IV.3.5.5 Effet du module de cisaillement de l'adhésif sur la variation du rapport de zone endommagée :

L'effet du module de cisaillement de l'adhésif est mis en évidence pour toutes les formes du patch sur la **figure IV.55**. Cette figure montre clairement le rôle de la forme dans la réduction de la zone endommagée de l'adhésif. On note que les valeurs du rapport de la zone endommagée pour les deux formes (ellipse et cercle) est faible par rapport aux valeurs de D_R pour le rectangle et le trapèze. Les valeurs minimales de D_R respectivement pour la forme elliptique et circulaire sont 0,05 et 0,11 pour un module de G_a valant 200MPa. Lorsque la valeur de G_a atteint 1400Mpa la valeur de D_R pour les deux formes vaut 0.12. Tandis que les valeurs minimales de D_R respectivement pour la forme rectangulaire et trapézoïdale sont 0,15 et 0,17 pour un module de G_a valant 200MPa, et augmente jusqu'à 0.35 pour le rectangulaire et 0,27 pour le trapézoïdale pour un module de G_a égale 1400MPa. On atteint la valeur de D_R critique uniquement pour les deux formes (rectangle, et trapèze) avec une valeur de $G_a=650$ MPa pour le rectangle et $G_a=590$ MPa pour le trapèze. Tandis que pour les autres formes, la valeur de D_{Rc} n'est jamais atteinte.

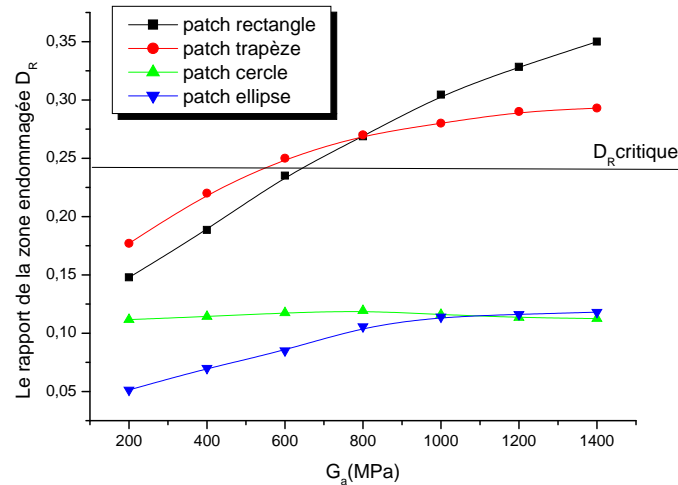


Fig. IV.55 : Rapport de la zone endommagée vs module de cisaillement de l'adhésif pour les différentes formes de patch.

IV.3.5.6 Effet de module de cisaillement de l'adhésif sur la variation FIC :

Cette courbe montre la variation du facteur d'intensité de contraintes en termes du module de cisaillement de l'adhésif illustrée sur la figure. IV.56. L'étude de cette courbe montre que l'augmentation du module de cisaillement de l'adhésif conduit à une diminution des valeurs de FIC pour toutes les formes du patch. Vu les valeurs faibles du K_I pour les formes de rectangulaire et trapézoïdale ceci engendre une grande efficacité dans la réparation par patch comparativement aux deux autres formes.

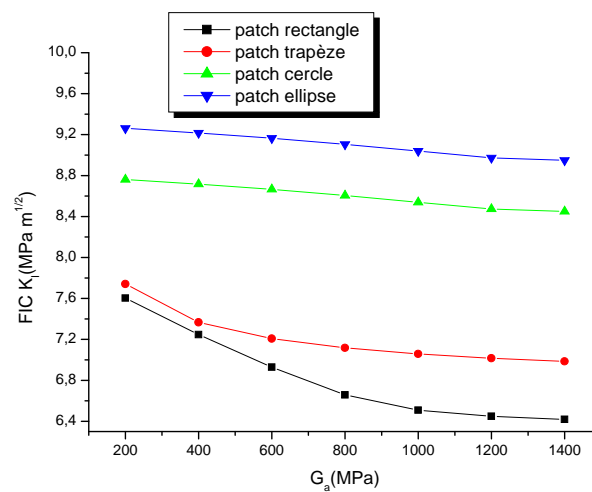


Fig. IV.56 : Variation du FIC en fonction du module de cisaillement de l'adhésif.

IV.3.5.7 Facteur d'intensité de contrainte en fonction du rapport de la zone endommagée D_R pour les différentes formes du patch:

Le graphe de la **figure. IV.57** met en évidence l'effet de l'endommagement sur l'efficacité de la réparation. Les mêmes conclusions sont observées pour tous les effets cas précédents que ce soit (l'épaisseur de l'adhésif, l'épaisseur du patch ou la longueur de fissure) où la performance concerne la réduction de la zone endommagée est meilleure pour les cas de formes elliptique et circulaire. Tandis que la performance de réduction de FIC est meilleure pour les autres formes. Ce qui signifie que la réparation des fissures est performante pour les patches en forme de rectangle et de trapèze et particulièrement le rectangle.

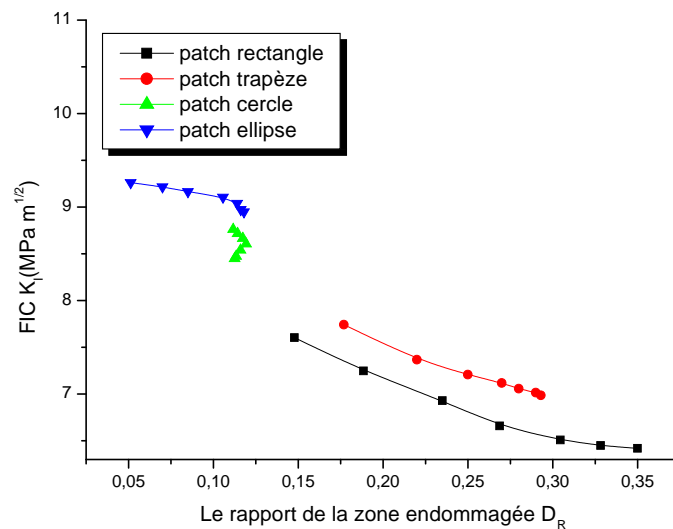


Fig. IV.57 : Variation du FIC en fonction du rapport de la zone endommagée (D_R).

CHAPITRE V

***ANALYSE DE LA REPARATION DES PLAQUES
CORRODEES AVEC FISSURE INCLINEE (MODE MIXTE)***

V.1 INTRODUCTION :

Le chapitre précédent a permis d'évaluer la variation de la zone endommagée de l'adhésif d'une plaque avec fissure normale (en mode I), et de déterminer le facteur d'intensité de contraintes en fonction des différents effets pour différentes formes de patch (rectangle, trapèze, cercle et ellipse). L'enjeu majeur est maintenant la zone endommagée de l'adhésif à la norme ($D_{Rc} < 0.247$), et la protection des alliages d'aluminium afin d'offrir au système des propriétés via la présence de corrosions et ainsi renforcer les propriétés de résistance à la corrosion. Dans ce chapitre, on se place dans le même contexte que précédemment, l'étude porte sur une analyse numérique par la méthode des éléments finis tridimensionnels, de la réparation par patch en composite d'une structure métallique fissurée avec une fissure inclinée (mode mixte). Les effets de l'inclinaison de la fissure, de l'épaisseur du patch et l'adhésif, ainsi que son module de cisaillement sont mis en évidence sur les variations du facteur d'intensité de contrainte en pointe de fissure réparée par simple patch. On a étudié le comportement de la zone endommagée et son rapport.

V.2 MODELE GEOMETRIQUE EN MODE II (MIXTE) :

Pour étudier le comportement des fissures réparées en mode mixte, on considère la même plaque d'aluminium avec les dimensions suivantes : $H_{pl} = 254\text{mm}$, $W_{pl} = 254\text{mm}$ et $e_{pl} = 5\text{ mm}$, avec une fissure inclinée d'une longueur de $a = 30\text{mm}$. Les conditions de chargement sont les mêmes que précédemment.

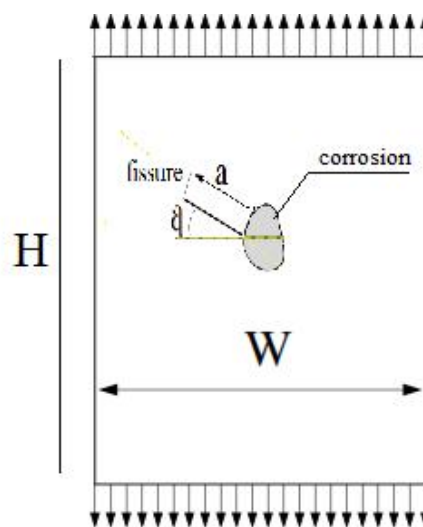


Fig. V.1 : *Modèle géométrique de la plaque avec une fissure inclinée (mode II).*

Un maillage régulier est effectué pour toute la structure. Ce maillage reste le même tout au long du calcul afin d'éviter toute influence du maillage sur les résultats. Le collage parfait est créé entre la plaque et le patch composite en fusionnant les nœuds des éléments. Le fait de fusionner les nœuds a pour conséquence d'avoir le même maillage pour la structure et pour le patch composite. La corrosion et la fissure presque au milieu de la plaque provoquant une concentration de contrainte. Par conséquent, un maillage raffiné est effectué autour de la fissure et autour de la corrosion.

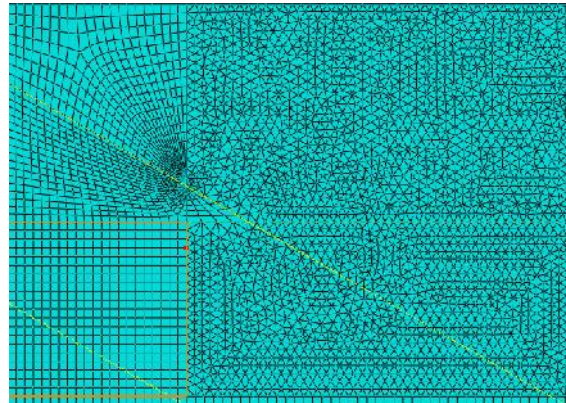


Fig. V.2 : Représentation du maillage de la plaque près de la corrosion et de la fissure inclinée en mode mixte.

V.3 RESULTATS ET DISCUSSIONS:

V.3.1 Effet de l'inclinaison de fissure sur l'endommagement de l'adhésif :

Cet effet est montré sur les figures (V.3-V.5-V.7-V.9). Celles-ci présentent les variations de la zone endommagée de l'adhésif en fonction de l'inclinaison de la fissure (θ) pour une longueur constante $a = 30$ mm réparée par simple patch. On a fixé l'épaisseur de l'adhésif $e_a = 0.15$ (mm) et l'épaisseur du patch $e_p = 1.5$ (mm), pour des différentes formes de patch (rectangle, trapèze, cercle et ellipse) et pour une charge appliquée égale à 100MPa, dans un premier temps, puis on a fait varier les inclinaisons de fissure $\theta = (15-30-45-60-75)^\circ$, après la détermination de différents graphes de rapport de la zone endommagée et les courbes de variation de facteur d'intensité de contraintes on peut faire une comparaison entre les différentes formes du patch pour déterminer l'effet de l'inclinaison de fissure.

V.3.1.1 patch rectangulaire

La **Figure V.3** montre les images qui nous ont permis de suivre l'évolution de la zone endommagée en fonction de l'inclinaison de la fissure. En général, nous constatons que plus l'inclinaison de fissure augmente plus que la surface de la zone endommagée augmente. Dans le cas de $\theta=15^\circ$ on note la présence d'une très petite zone endommagée entourant la fissure ainsi que de petites zones à la périphérie de patch. En comparant les résultats obtenus pour les inclinaisons $\theta=45^\circ$ et $\theta=75^\circ$ à ceux de $\theta=15^\circ$ on remarque une augmentation de la taille de la zone endommagée progressivement ainsi qu'une légère augmentation de la superficie à la périphérie de patch.

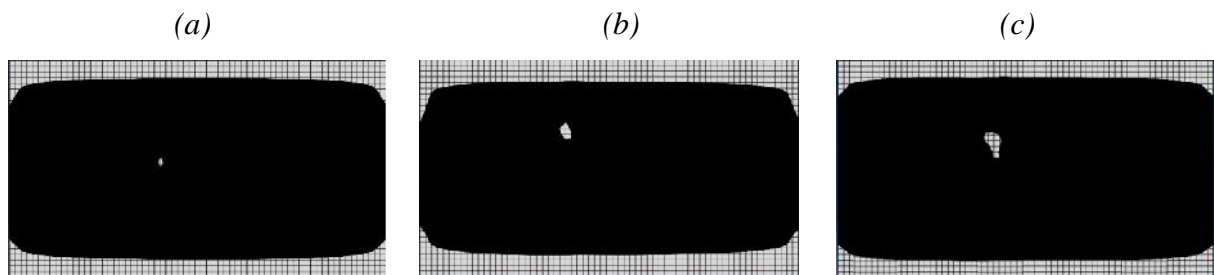


Fig. V.3 : zone endommagée pour un patch de forme rectangulaire (a) $\theta=15^\circ$, (b) $\theta=45^\circ$ et (c) $\theta=75^\circ$.

La **Figure V.4** met en valeur le rapport de la zone endommagée en fonction de l'inclinaison de fissure. On observe une forte pente au début du graphe, ce qui explique l'accroissement rapide. Ensuite, elle ralentit progressivement pour atteindre 35%, ce qui est équivalent à une diminution de 4% dans la zone endommagée. A titre comparatif entre les valeurs observées pour les inclinaisons $\theta=15^\circ$ et $\theta=30^\circ$ d'une part et $\theta=40^\circ$ et $\theta=75^\circ$ d'autre part pour le premier cas on a $D_R = (0.23-0.241)$ l'augmentation est importante et très rapide, quant au 2^{ième} cas on a : $D_R = (0.2415-0.242)$ on conclue que la variation du rapport de la zone endommagée n'est pas significatif. Les résultats obtenus dans cette étude sont toujours inférieurs à la valeur critique D_{Rc} et ceci quelque soit la valeur de l'inclinaison de fissure.

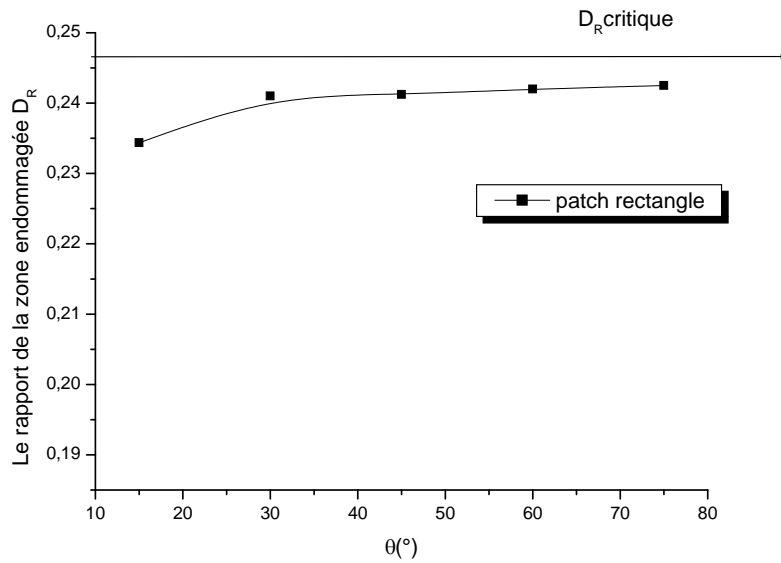


Fig. V.4 : Rapport de la zone endommagée en fonction de la l'inclinaison de fissure.

V.3.1.2 Patch trapézoïdale

Le problème est de savoir l'étendue de la zone endommagée d'adhésif comme précédemment (Figure V.5) :

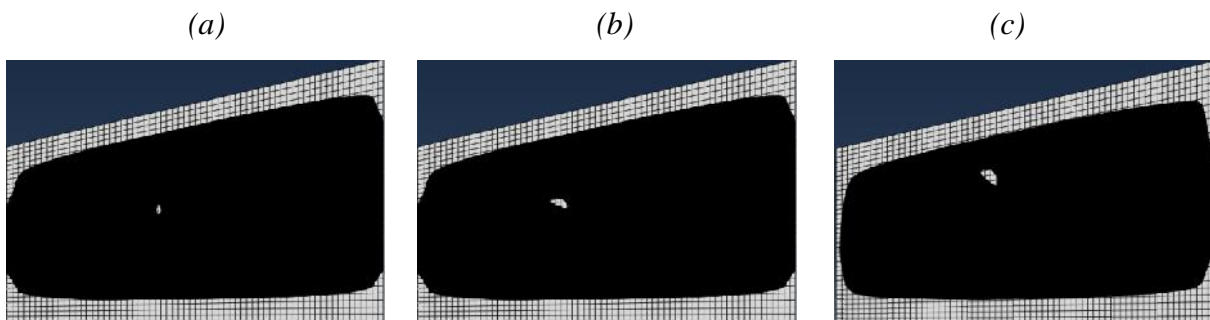


Fig. V.5 : zone endommagée pour un patch de forme trapézoïdale (a) $\theta=15^\circ$, (b) $\theta=45^\circ$ et (c) $\theta=75^\circ$.

On remarque qu'on a le même comportement observé dans la Fig. V.3. Nous notons une proportionnalité entre l'inclinaison de la fissure et la zone endommagée. En comparant les cas de figure V.5.a et V.5.c il a apparaît clairement l'augmentation de la zone endommagée (montrée en blanc) ainsi qu'une légère augmentation de la zone endommagée à la périphérie du patch.

Comme il a été observé précédemment dans le cas de la **figure V.4**, le D_R augmente avec l'augmentation de l'inclinaison de la fissure. La **Figure V.6** présente la variation du rapport de la zone endommagée en fonction de l'inclinaison de fissure. On observe deux parties distinctes de la courbe la première entre $\theta=15^\circ$ et $\theta=30^\circ$ où la pente est faible donc une faible variation du D_R (0.25-0.27). Dans la deuxième partie de la courbe entre $\theta=30^\circ$ et $\theta=75^\circ$ on remarque que la pente est significative et constante les valeurs de D_R (0.27-0.42). Toutes les valeurs du D_R obtenues sont supérieures à celle du D_{Rc} pour tous les angles de l'inclinaison.

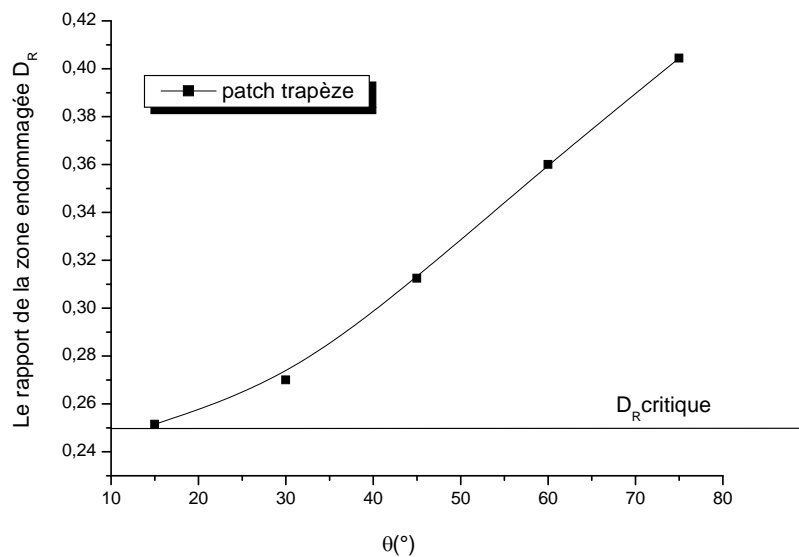


Fig. V.6 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'inclinaison de fissure.

V.3.1.3 *patch circulaire*

La **Figure V.7** présente la variation de la zone endommagée en utilisant un patch de forme circulaire. Les constatations faites précédemment sont ici très clairement visibles. L'augmentation de l'inclinaison de fissure mène directement à une augmentation de la taille de la zone endommagée. L'augmentation de la zone endommagée à la périphérie du patch est très visible comparée à ceux rectangulaire et trapézoïdale.

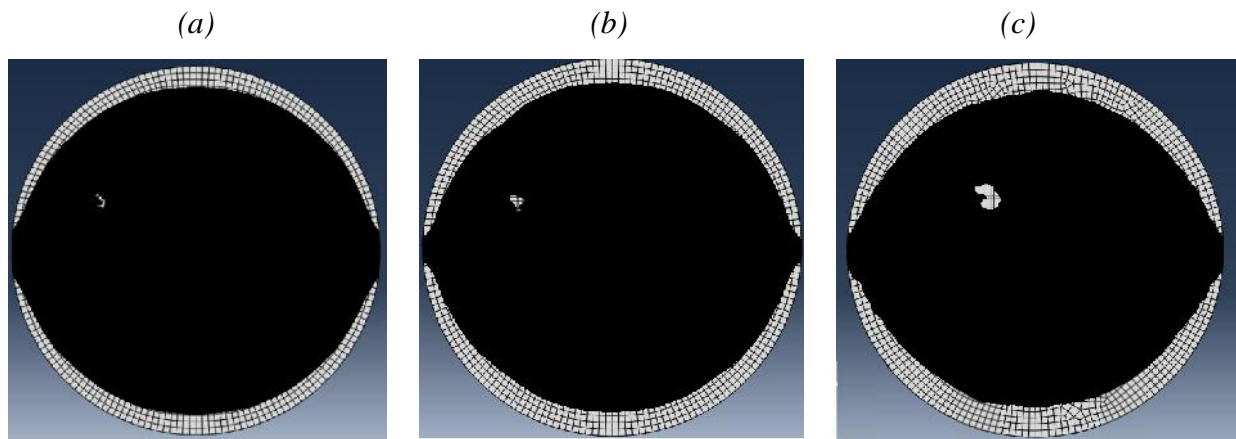


Fig. V.7 : zone endommagée pour un patch de forme circulaire (a) $\theta=15^\circ$, (b) $\theta=45^\circ$ et (c) $\theta=75^\circ$.

Le graphe de la **figure V.8**, met en évidence la variation du rapport de la zone endommagée en fonction de l'inclinaison. Quelque soit la valeur de l'inclinaison de fissure on remarque que la valeur critique D_{Rc} n'a pas été atteinte, et que l'augmentation de l'inclinaison de fissure entraine directement de l'augmentation de D_R .

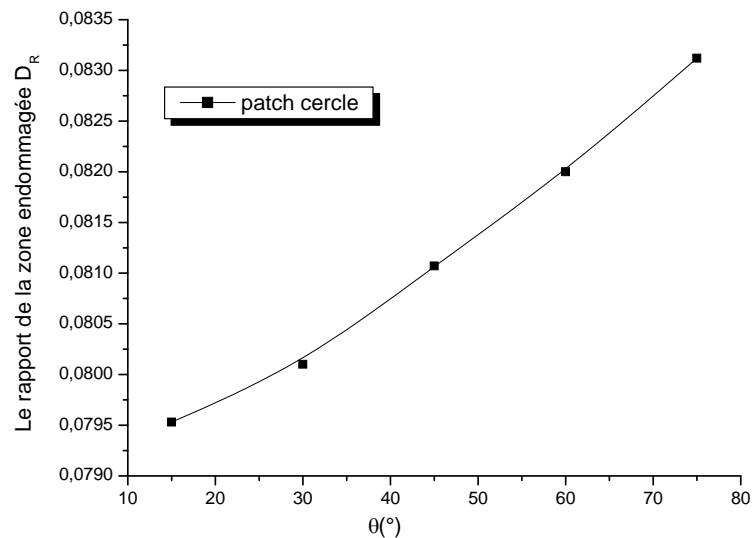


Fig. V.8 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'inclinaison de fissure.

V.3.1.4 Patch ellipsoïdale

La Figure V.9 illustrée par les trois photographies de la distribution de la zone endommagée d'adhésif pour les inclinaisons suivantes ($\theta=15^\circ$, $\theta=45^\circ$ et $\theta=75^\circ$). En comparant les résultats trouvés précédemment pour les patches en formes de (rectangle, trapèze et cercle) à ceux de l'elliptique on remarque l'apparition de la zone endommagée au niveau de la corrosion. Cette zone est visiblement nette pour $\theta=75^\circ$ que $\theta=45^\circ$. Mêmes remarques que dans les cas précédents, une augmentation de l'inclinaison de la fissure entraîne à l'augmentation de la zone endommagée entourant de fissure et petite déformation dans la zone du périphérique de patch.

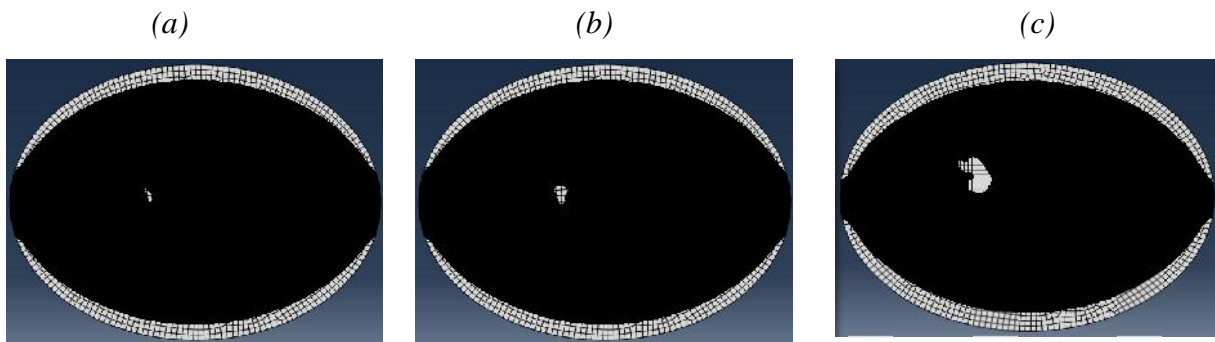


Fig. V.9 : zone endommagée pour un patch de forme ellipsoïdale (a) $\theta=15^\circ$, (b) $\theta=45^\circ$ et (c) $\theta=75^\circ$.

La courbe V.10 représente les valeurs du rapport de la zone endommagée de l'adhésif qui augmentent progressivement avec l'augmentation de l'inclinaison de fissure. Partant de la valeur de $D_R=0.0795$ pour $\theta=15^\circ$ jusqu'à atteindre la valeur maximale de $D_R=0.083$ pour $\theta=75^\circ$, la valeur critique du rapport ($D_{Rc}=0.247$) n'est pas atteinte.

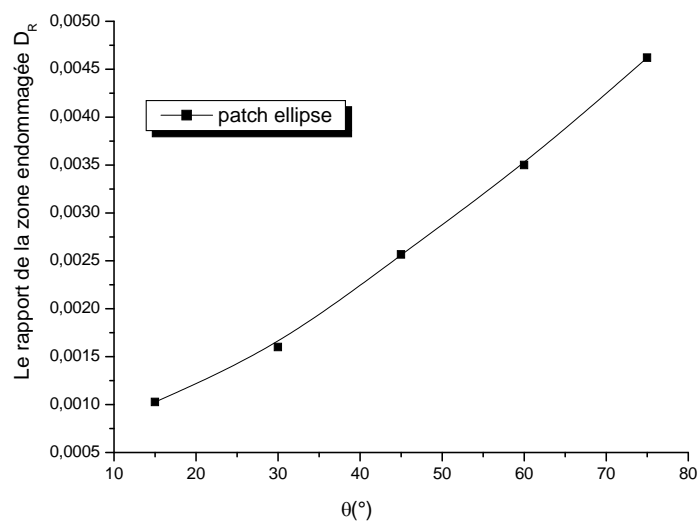


Fig. V.10 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'inclinaison de fissure.

V.3.1.5 Effet de l'inclinaison de fissure sur la variation du rapport de la zone endommagée de l'adhésif :

Afin de voir l'effet du rapport de la zone endommagée pour différentes inclinaisons de la fissure le graphe de la figure (V.II) est analysé. On note que l'augmentation de l'inclinaison de fissure conduit à une augmentation de D_R pour toutes les différentes formes de patch utilisés. Le D_R enregistré pour la forme trapézoïdale est supérieur à la valeur critique ce qui consiste un risque de décollement du patch d'où cette forme est à éviter pour la réparation. Par contre toutes les autres formes donnent des valeurs de D_R inférieures à la valeur critique ($D_{Rc}=0.247$). Parmi les résultats obtenus la forme elliptique est la meilleure car elle donne la valeur minimale de D_R .

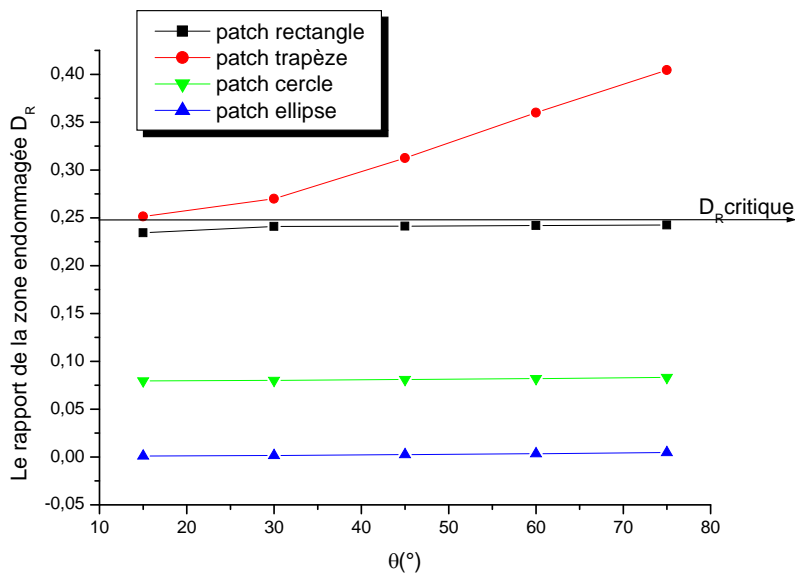


Fig. V.II : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'inclinaison de fissure pour les différentes formes de patch.

V.3.1.6 Effet de l'inclinaison de la fissure sur la variation du FIC :

Les figures V.12 et V.13 représentent respectivement les variations du FIC en mode I et II en fonction de l'inclinaison θ de la fissure pour des épaisseurs respectives de l'adhésif et de patch $e_a = 0.15\text{mm}$, $e_p = 1.5\text{mm}$ et une taille de fissure $a=30\text{mm}$. La figure V.12 montre que la valeur K_I pour les différentes formes de patch diminue avec l'augmentation de l'angle θ . La réduction des valeurs du FIC entre le patch de forme ellipsoïdale et circulaire est évaluée à 85% et d'environ 20% pour les formes trapézoïdale et rectangulaire. Lorsque la valeur de θ

tend vers 75° la valeur de FIC tend vers la valeur nulle. Pour $\theta = 0^\circ$ on a un mode I pur d'où l'ouverture de la fissure est maximale avec des valeurs du FIC élevées. Pour $\theta = 75^\circ$, la fissure étant au niveau quasiment parallèle au chargement les valeurs du FIC tendent vers 0.

Concernant le FIC en mode mixte, d'après la **figure V.13** ce facteur (caractérisant le glissement de la fissure) est nul lorsque la fissure perpendiculaire à la direction du chargement, qui passe par un maximum puis tend un minimum lorsque l'inclinaison de la fissure tend vers 75° . La valeur du K_{II} est maximale pour $\theta = 45^\circ$ pour toutes les formes. Les formes circulaire et ellipsoïdale donnent des valeurs de K_{II} plus élevées que celle les formes rectangulaire et trapézoïdale.

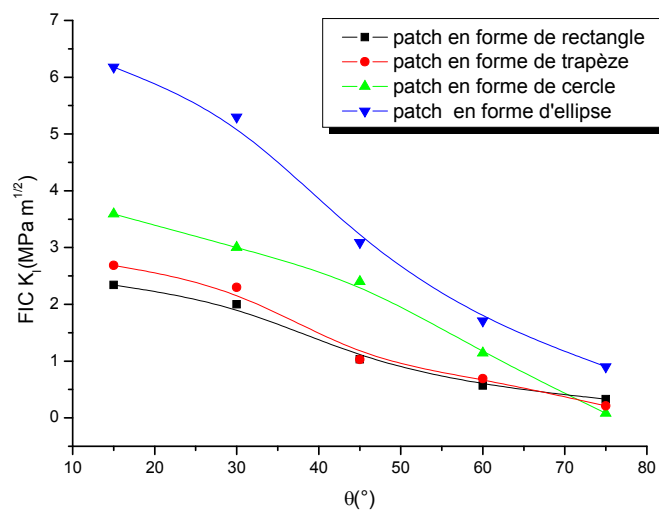


Fig. V.12 : Variation du FIC en mode I d'une fissure inclinée ($a=30\text{mm}$)

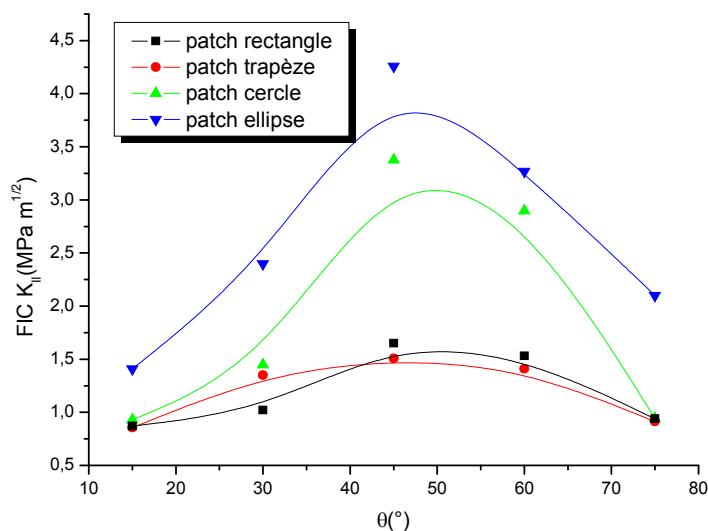


Fig. V.13 : Variation du FIC en mode II d'une fissure inclinée ($a=30\text{mm}$,)

V.3.2 Effet de la charge sur l'endommagement de l'adhésif :

Afin de voir l'effet de la charge appliquée sur le D_R de la zone endommagée de l'adhésif, on a fixé l'épaisseur de l'adhésif $e_a=0.15$ mm et celle du patch $e_p=1.5$ mm. En comparant les résultats des surfaces endommagées représentées sur les figures (V.14 - V.16 - V.18 - V.20) pour différentes formes de patch et des valeurs de la charge appliquée, le choix de la forme optimale sera fait.

V.3.2.1 patch rectangulaire

L'objectif est d'évaluer l'influence de la charge appliquée sur la variation de la zone endommagée d'adhésif et d'étudier le comportement de la colle.

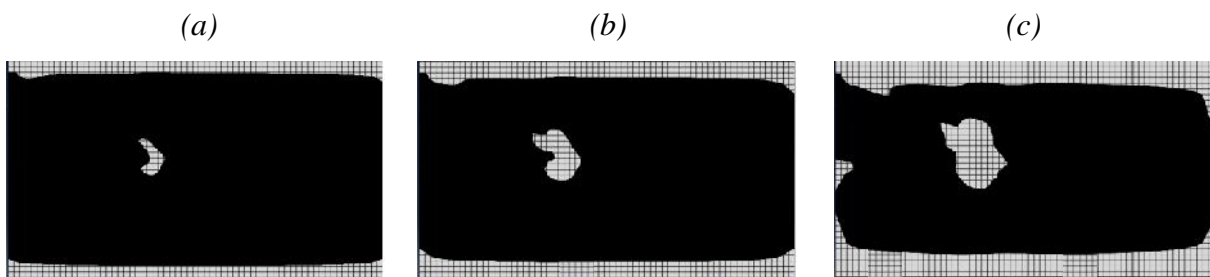


Fig. V.14 : zone endommagée pour un patch de forme rectangulaire (a) $\sigma=100$ MPa, (b) $\sigma=200$ MPa et (c) $\sigma=300$ MPa.

On remarque clairement à travers les figures (V.14.a ,b,c) que l'augmentation de la charge appliquée conduit directement à une augmentation de la taille de la zone endommagée. Dans le cas de $\sigma=100$ MPa on note qu'il y a une zone endommagée au voisinage de la fissure et une petite surface à l'extrémité du patch. Concernant les charges appliquées $\sigma=200$ MPa et 300MPa on remarque une augmentation de la taille de la zone endommagée au niveau de la fissure et même au niveau des côtés horizontaux, et peut atteindre même les côtés verticaux pour $\sigma=300$ MPa.

La Figure V.15 montre l'évolution du rapport de la zone endommagée D_R en fonction de la charge appliquée pour un patch de forme rectangulaire. La valeur de D_R critique est atteinte pour la charge de 230MPa. Les valeurs de la charge appliquée supérieures à cette dernière peuvent provoquer le décollement du patch. La valeur maximale de D_{Rmax} obtenue est 0.33 pour $\sigma=300$ MPa. D'une manière générale, on constate que le rapport de la zone endommagée augmente constamment avec l'augmentation de la charge appliquée.

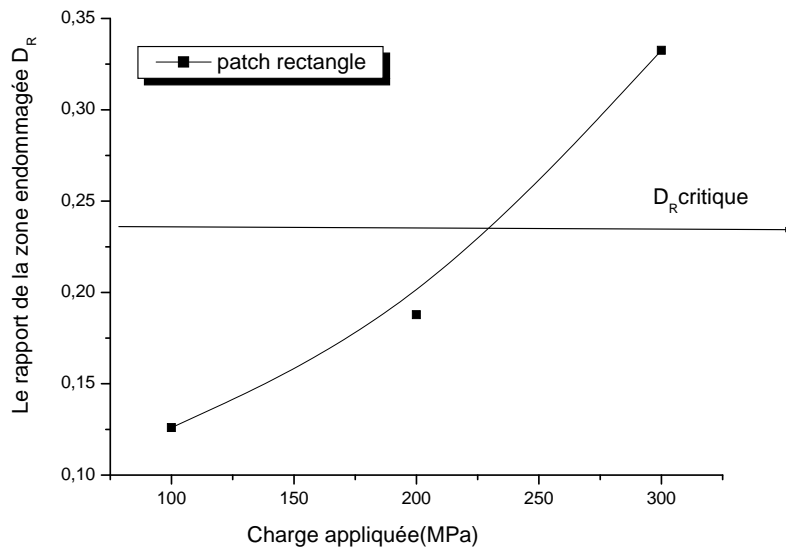


Fig. V.15 : Rapport de la zone endommagée en fonction de la charge appliquée.

V.3.2.2 patch trapézoïdale

La Figure V.16 montre l'évolution de la zone endommagée. On observe que dans le cas de $\sigma=100$ MPa la zone endommagée est limitée uniquement au niveau de la fissure avec une faible étendue de surface et aux extrémités supérieure et inférieure de patch. Dans le cas de la charge variant de $\sigma=200$ MPa à 300MPa la surface endommagée au niveau de la fissure augmente jusqu'à atteindre la périphérie de la corrosion. La zone endommagée sur les bords du patch augmente avec la charge appliquée aussi.

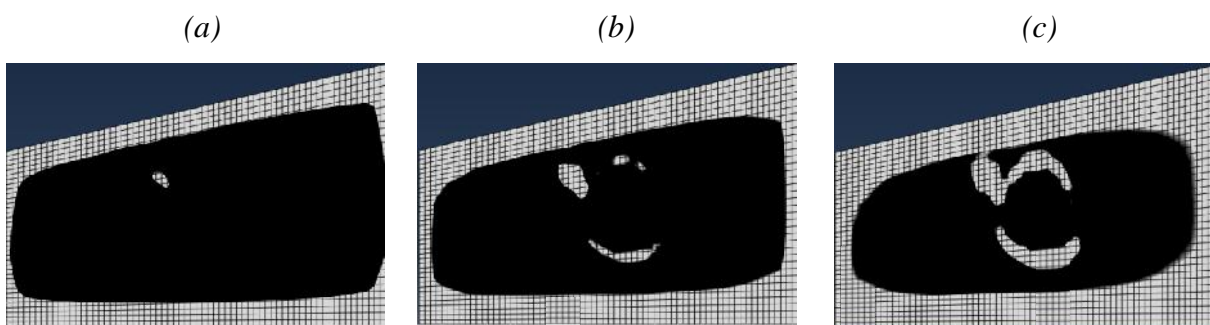


Fig. V.16 : zone endommagée pour un patch de forme trapézoïdale (a) $\sigma=100$ MPa, (b) $\sigma=200$ MPa et (c) $\sigma=300$ MPa.

Tel que représenté sur le graphe de la figure précédente (Fig. V.15) ci-dessus, le rapport de la zone endommagée pour une forme de patch trapézoïdale en fonction de la charge appliquée est illustré sur la figure V.17 on note que l'augmentation de la charge appliquée

entraîne l'augmentation du rapport de la zone endommagée. La charge de $\sigma=170\text{MPa}$ donne la valeur critique de D_R .

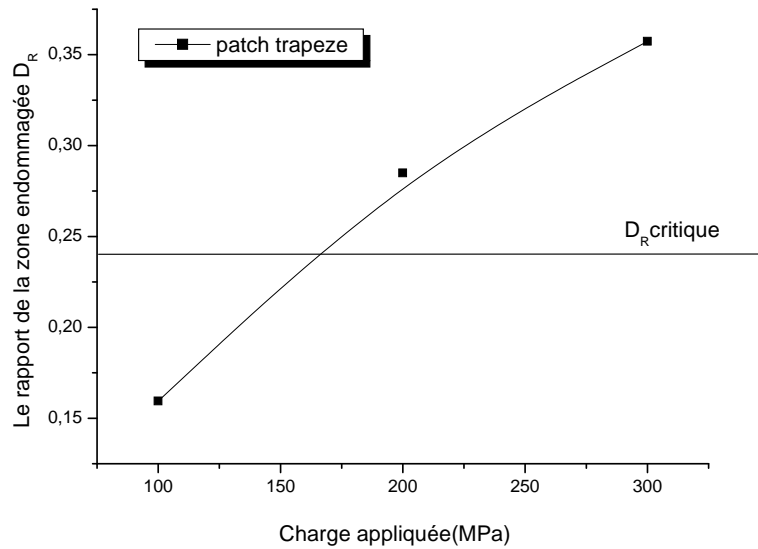


Fig. V.17 : Rapport de la zone endommagée en fonction de la charge appliquée.

V.3.2.3 patch circulaire

La Figure V.18 permet de montrer le comportement de la colle sous l'effet de la charge appliquée.

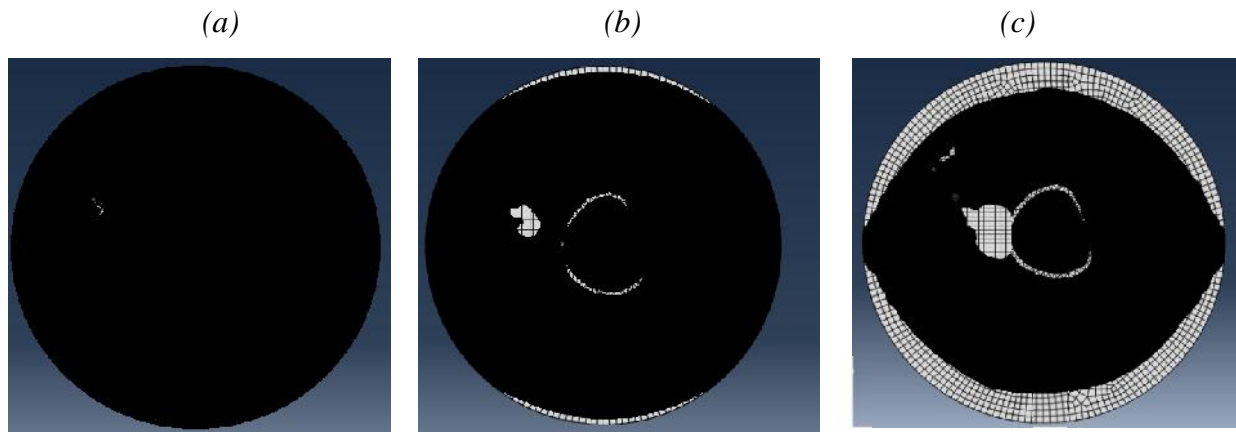


Fig. V.18 : zone endommagée pour un patch de forme circulaire (a) $\sigma=100\text{ MPa}$, (b) $\sigma=200\text{MPa}$ et (c) $\sigma=300\text{ MPa}$.

Pour la charge appliquée d'intensité 100MPa on note que la zone endommagée est très faible et peut-être considérée comme négligeable au niveau de la fissure. Dans le cas de $\sigma=200\text{ MPa}$ on remarque une formation d'une petite zone endommagée sous forme de la corrosion et d'arcs peu étendus sur la périphérie du patch. Pour $\sigma=300\text{MPa}$ la zone

endommagée continue de croître entourant la corrosion et au niveau de la fissure et l'aire des arcs augmente jusqu'à prendre la forme d'une couronne.

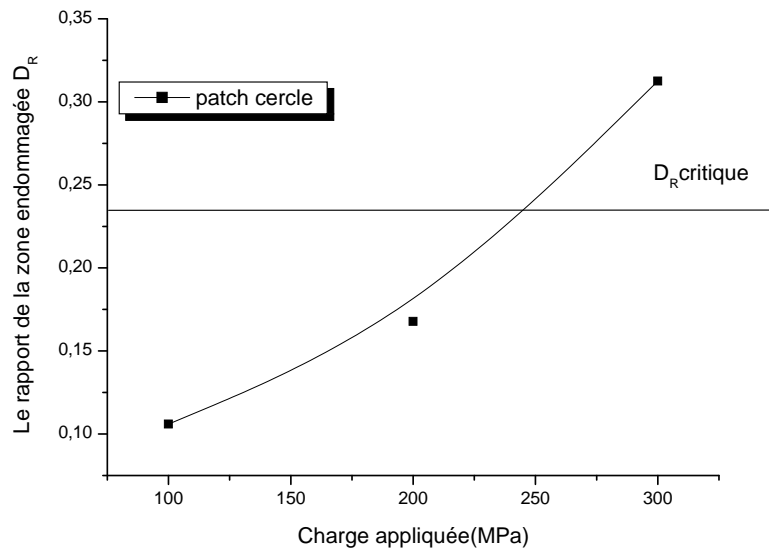


Fig. V.19 : Rapport de la zone endommagée en fonction de la charge appliquée.

La **Figure V.19** montre l'évolution du rapport de la zone endommagée D_R en fonction de la charge appliquée pour un patch de forme circulaire. La valeur de D_R critique est atteinte pour la charge de 250MPa. La valeur maximale de D_{Rmax} obtenue est 0.31 pour $\sigma=300$ MPa. D'une manière générale, on constate que le rapport de la zone endommagée augmente continuellement avec l'augmentation de la charge appliquée.

V.3.2.4 *patch ellipsoïdale*

La **Figure V.20** représente l'évolution de la zone endommagée de l'adhésif. L'analyse de ces figure ont permis d'étudier le comportement de l'adhésif pour la forme de patch ellipsoïdale.

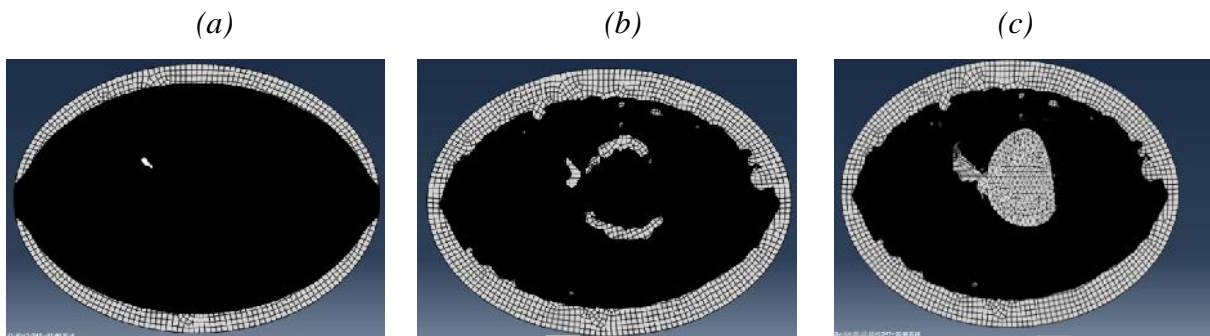


Fig. V.20 : zone endommagée pour un patch de forme ellipsoïdale (a) $\sigma=100$ MPa, (b) $\sigma=200$ MPa et (c) $\sigma=300$ MPa.

Pour la charge $\sigma=100$ MPa on observe une très petite surface de la zone endommagée au niveau de la fissure uniquement et une étendue elliptique au bord du patch. Tandis que dans le cas de $\sigma=200$ MPa et 300MPa on constate que l'étendue de la surface au bord du patch croît, on observe aussi l'émergence de la zone endommagée au niveau de la corrosion jusqu'à recouvrement totale de la surface corrodée pour $\sigma=300$ MPa.

Dans ce cas de **Figure. V.21** on note le même comportement que pour les cas précédents, plus la charge appliquée augmente plus on observe une augmentation du rapport de la zone endommagée. La valeur de rapport critique est obtenue pour $\sigma=200$ MPa.

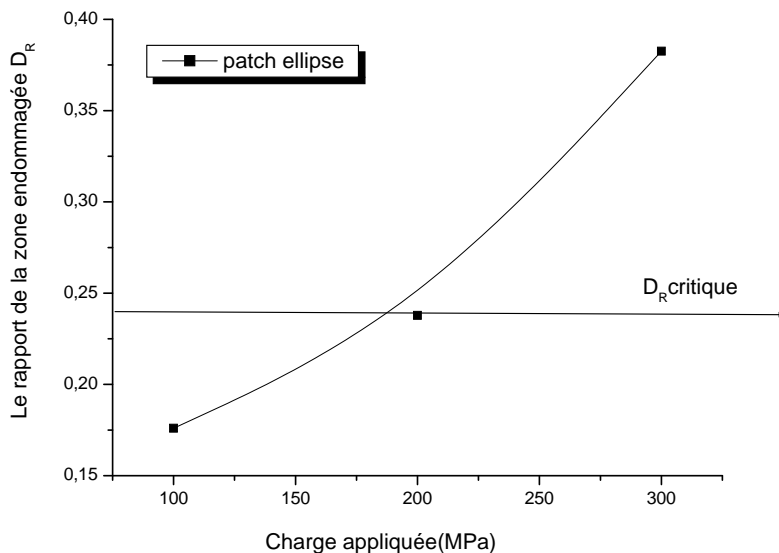


Fig. V.21 : Rapport de la zone endommagée en fonction de la charge appliquée.

V.3.2.5 Effet de la charge sur la variation du rapport de la zone endommagée de l'adhésif :

La Figure V.22 représente les courbes du rapport de la zone endommagée en fonction de la charge appliquée, pour les différentes formes de patch (rectangle, trapèze, cercle et ellipse). On remarque que toutes les courbes ont le même comportement concernant l'augmentation de la charge qui conduit à une augmentation du D_R . vu les valeurs obtenues de D_R la meilleure efficacité est donnée par la forme circulaire, et la moindre est celle pour le patch de forme trapézoïdale.

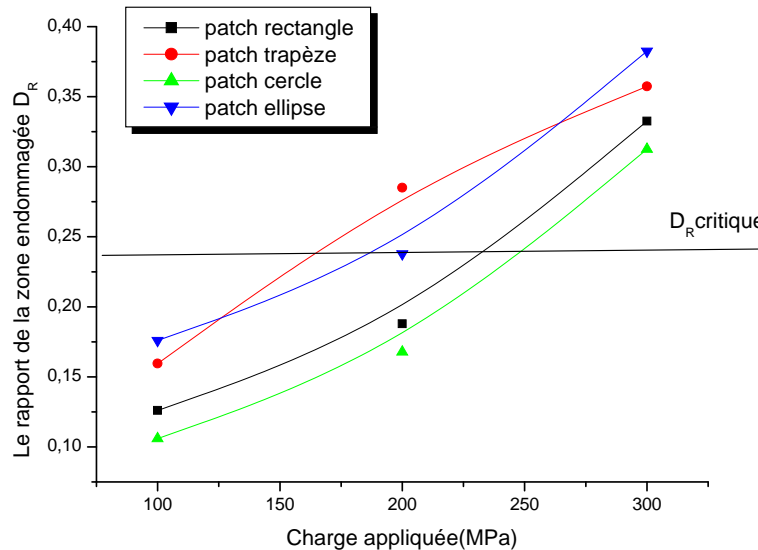


Fig. V.22 : Rapport de la zone endommagée vs la charge appliquée pour les différentes formes de patch.

V.3.2.6 Effet de la charge sur la variation du FIC :

Afin de faire le choix optimal de la forme du patch à utiliser, l'étude du facteur d'intensité de contraintes (K_I+K_{II}) en fonction de la charge appliquée a été met en évidence sur (courbe. V.23). On note que le comportement du patch pour les différentes formes est similaire, plus on augmente la charge plus les valeurs du facteur augmentent progressivement. A titre comparatif des valeurs du FIC la valeur la plus faible obtenue vaut $4.8 \text{ MPa.m}^{1/2}$ qui est considérée comme la meilleure pour les formes rectangulaire et trapézoïdale pour la réparation.

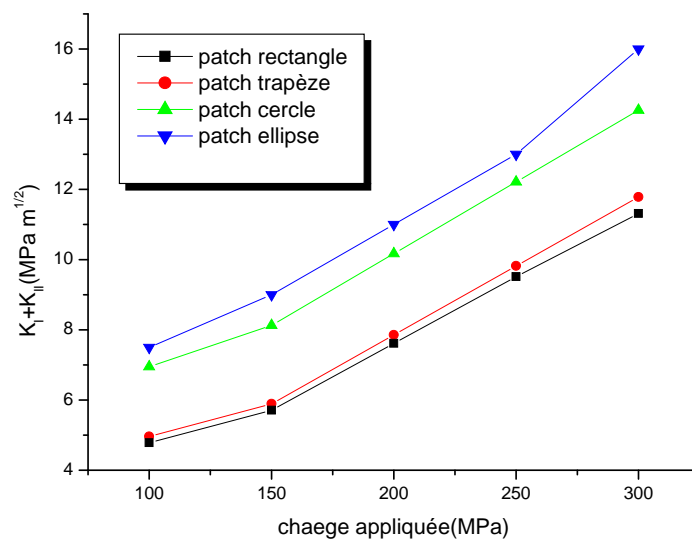


Fig. V.23 : Variation du FIC (K_I+K_{II}) en fonction de charge appliquée. ($a=30\text{mm}$, $\theta=30^\circ$)

V.3.2.7 Facteur d'intensité de contrainte en fonction du rapport de la zone endommagée D_R pour les différentes formes du patch :

La courbe V.24 représente la variation du facteur d'intensité de contraintes en fonction du rapport de la zone endommagée.

- Le patch en forme du rectangle est le meilleur pour la réparation des fissures car les valeurs du (K_I+K_{II}) qui y sont obtenues sont les plus faibles et varient entre 4,8 et 10.
- Le patch circulaire est le meilleur pour la réparation des zones endommagée car les valeurs de D_R enregistrées sont les plus faibles et limitées entre 0,1 et 0,3.

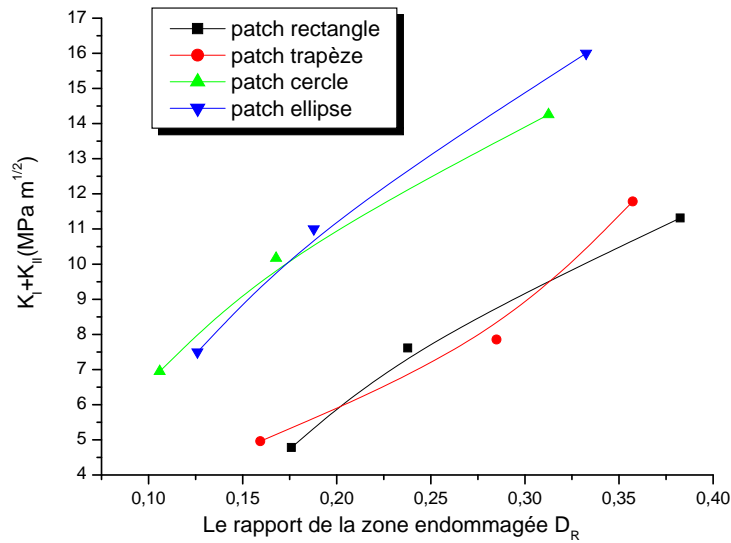


Fig. V.24 : Variation du FIC (K_I+K_{II}) en fonction du rapport de la zone endommagée (D_R).

V.3.3 Effet de l'épaisseur de l'adhésif sur son endommagement :

Les adhésifs utilisés dans les structures réparées par patch sont souvent destinés pour porter un niveau élevé des contraintes. L'effet de l'épaisseur de l'adhésif sur la distribution des zones endommagées sur la couche d'adhésif est très important. Cet effet joue un rôle important sur la performance des structures réparées. Plusieurs études ont montré que l'épaisseur de l'adhésif joue un rôle très important dans la tenue mécanique du patch. L'analyse porte sur l'effet de l'épaisseur d'adhésif sur la variation de facteur d'intensité de contraintes et l'étendue de la zone endommagée de la colle pour une fissure inclinée réparée par patch. Les figures (V.25- V.27 - V.29 - V.31) montrent l'effet de l'épaisseur de l'adhésif sur les variations de la zone endommagée. La figure (V.34) montre l'effet de l'épaisseur de l'adhésif sur les variations de FIC (K_I+K_{II}) en pointe de fissure. Pour les conditions suivantes $e_p=1.5\text{mm}$ et $G_a=4200\text{MPa}$ et avec une fissure inclinée d'un angle $\theta=15^\circ$ et de longueur constante $a=30\text{mm}$.

V.3.3.1 patch rectangulaire

La variation de l'épaisseur de l'adhésif représente une évolution de la zone endommagée au sein de l'adhésif (**figure V.25 a, b et c**). Cette dernière figure montre qu'en général, l'augmentation de l'épaisseur de l'adhésif conduit à l'augmentation de la zone endommagée. Pour tous les cas de figures il y a augmentation de la zone endommagée au niveau de la fissure et aux bords supérieurs et inférieurs du patch.

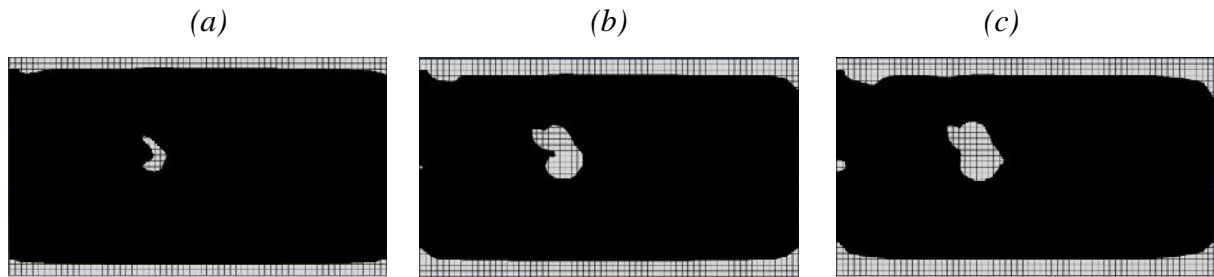


Fig. V.25 : zone endommagée pour un patch de forme rectangulaire (a) $e_a=0.05\text{mm}$, (b) $e_a=0.25\text{mm}$ et (c) $e_a=0.5\text{mm}$.

La courbe de la **Figure V.26** représente du rapport de la zone endommagée de la colle en fonction de l'épaisseur de l'adhésif pour une forme de patch rectangulaire. Il y a une proportionnalité d'augmentation entre l'épaisseur et le rapport de la zone endommagée. La courbe augmente puis prend une forme asymptotique horizontale, il y a stabilité pour l'épaisseur d'adhésif $e_a > 0.35\text{mm}$

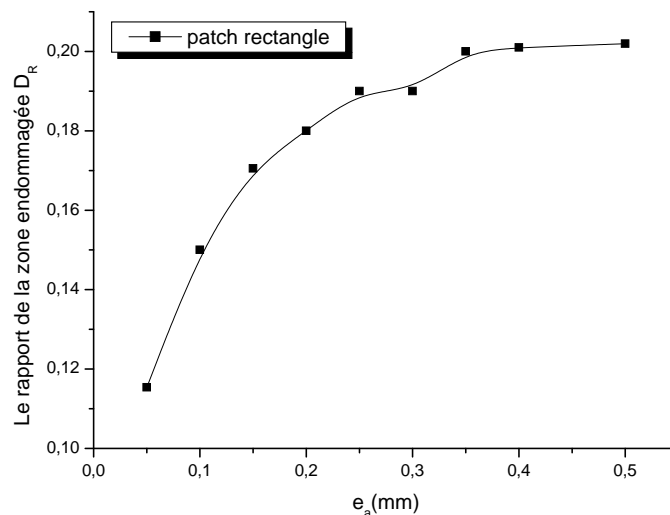


Fig. V.26 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif.

V.3.3.2 patch trapézoïdale

La **figure V.27** illustre les distributions des zones endommagées dans l'adhésif. Les résultats montrent que pour $e_a=0.05\text{mm}$ il y a apparition de la zone seulement au niveau des bords supérieur et inférieur du patch. Pour $e_a=0.25\text{mm}$ et $e_a=0.5\text{mm}$ on constate que l'étendue de la surface au bord du patch croît, et l'émergence de la zone endommagée au niveau de la corrosion jusqu'à recouvrement totale de la périphérie de la corrosion pour $e_a=0.5\text{mm}$.

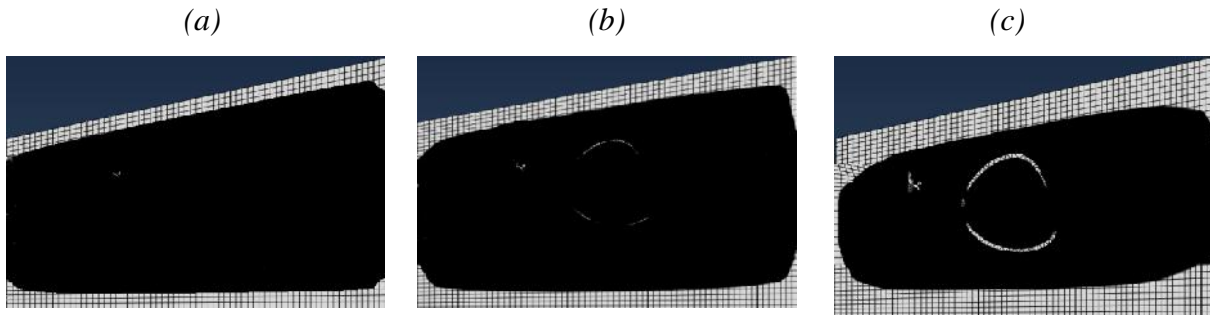


Fig. V.27 : zone endommagée pour un patch de forme trapézoïdale (a) $e_a = 0.05\text{mm}$, (b) $e_a = 0.25\text{mm}$ et (c) $e_a = 0.5\text{mm}$.

La courbe de la **figure V.28** représente la variation du rapport de la zone endommagée D_R pour une forme trapézoïdale en fonction de l'épaisseur de l'adhésif. La courbe peut être scindé en deux parties: la première partie où l'augmentation de D_R est lente allant de 0.18 jusqu'à 0.21 pour des valeurs d'épaisseur comprises entre $e_a=0.05\text{mm}$ et $e_a=0.3\text{mm}$. La deuxième observe une augmentation rapide pour le rapport de la zone endommagée de 0,21 à 0,28 seulement pour une différence de variation de 0.2mm. La valeur critique de D_R est obtenue pour $e_a=0.35\text{mm}$.

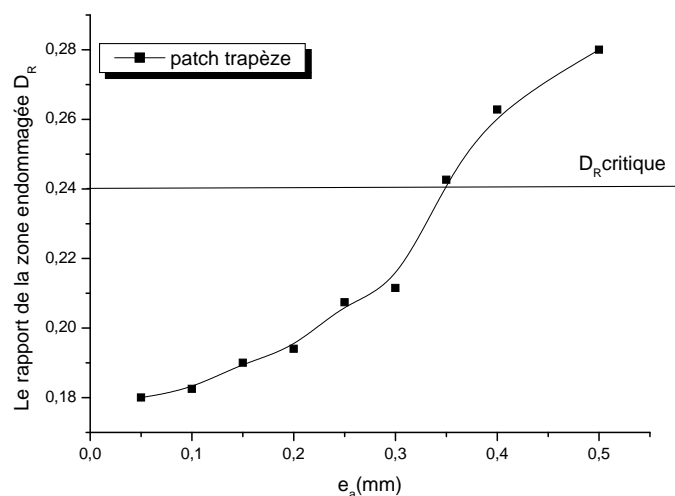


Fig. V.28 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif.

V.3.3.3 patch circulaire

L'analyse de l'effet de l'épaisseur de l'adhésif sur les zones endommagées est représentée sur la **figure V.29**. Cette dernière montre que l'augmentation de l'épaisseur de l'adhésif engendre l'augmentation de la zone endommagée. Après comparaison entre les cas de $e_a=0.05\text{mm}$, $e_a=0.25\text{mm}$ et $e_a=0.5\text{mm}$ on note ce que suit. Pour l'épaisseur $e_a=0.05\text{mm}$ on observe une très petite surface de la zone endommagée au niveau de la fissure uniquement et une étendue elliptique au bord du patch. Tandis que dans le cas de $e_a=0.25\text{mm}$ et 0.5mm on constate que l'étendue de la surface au bord du patch croît, on observe aussi l'émergence de la zone endommagée au niveau de la corrosion jusqu'à recouvrement totale de la surface corrodée pour $e_a=0.5\text{mm}$.

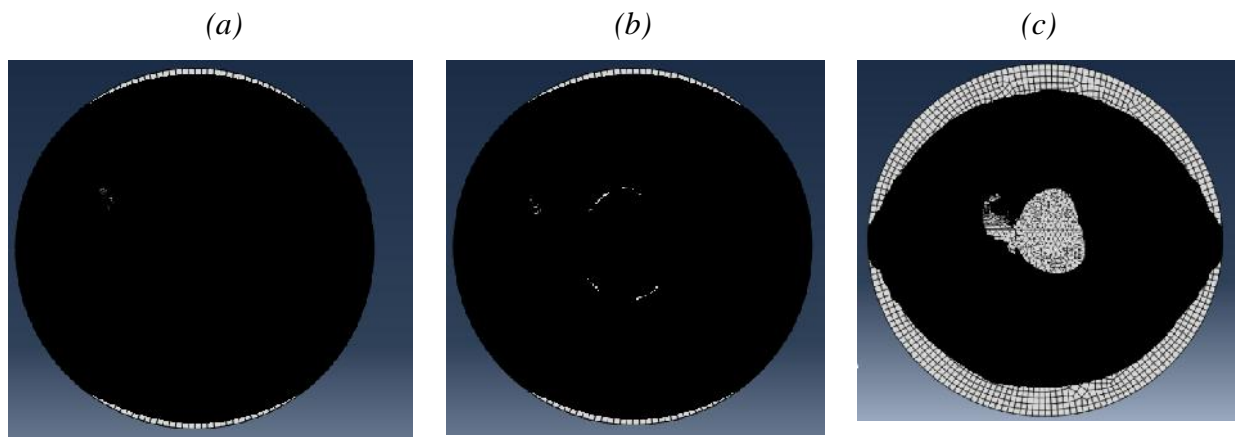


Fig. V.29 : zone endommagée pour un patch de forme circulaire (a) $e_a = 0.05\text{mm}$, (b) $e_a = 0.25\text{mm}$ et (c) $e_a = 0.5\text{mm}$.

La **figure V.30** représente la variation du rapport de la zone endommagée D_R en fonction de l'épaisseur de l'adhésif. La courbe illustre une augmentation rapide des valeurs du rapport de la zone endommagée lorsque $e_a < 0.2\text{mm}$ puis on note une petite variation. On note également que toutes les valeurs de la zone endommagée ne dépassent pas la valeur critique du rapport.

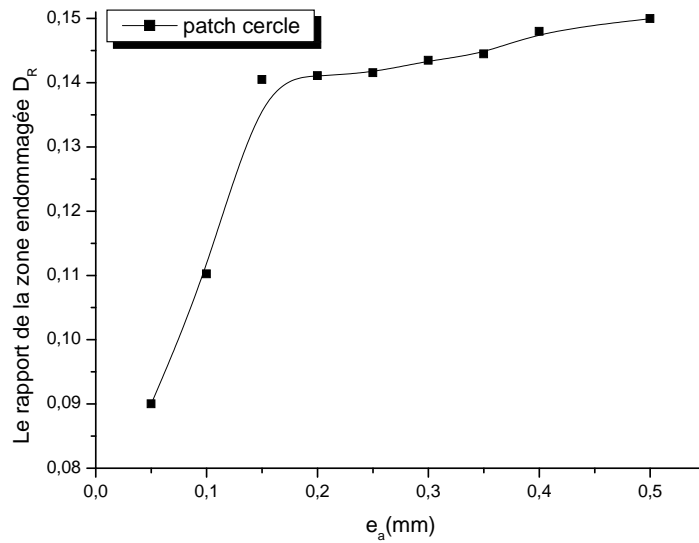


Fig. V.30 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif.

V.3.3.4 patch ellipsoïdale

L'analyse de la distribution des zones endommagées dans la colle pour un patch de forme ellipsoïdale est montrée sur la Figure. V.31.

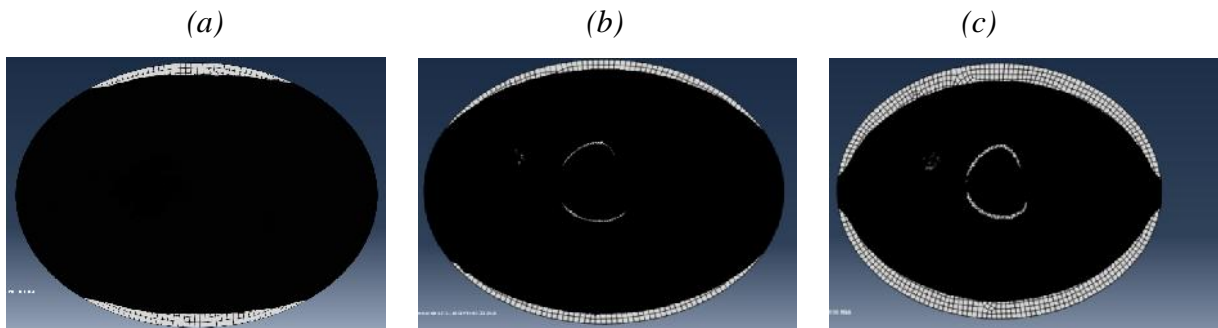


Fig. V.31 : zone endommagée pour un patch de forme ellipsoïdale (a) $e_a = 0.05\text{mm}$, (b) $e_a = 0.25\text{mm}$ et (c) $e_a = 0.5\text{mm}$.

Pour l'épaisseur de $e_a = 0.05\text{mm}$ on note que la zone endommagée est très faible et peut-être considérée comme négligeable au niveau de la fissure et existe des zones sur les arcs du patch. Dans le cas de $e_a = 0.25\text{mm}$ on remarque une formation d'une petite zone endommagée sous forme de la corrosion et d'arcs peu étendus sur la périphérie du patch. Pour $e_a = 0.5\text{mm}$ la zone endommagée continue de croître entourant la corrosion et au niveau de la fissure et l'aire des arcs augmente jusqu'à prendre la forme d'une couronne.

La variation du rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif pour un patch de forme elliptique est représentée sur la **figure V.32**. Cette dernière montre que les rapports les plus forts sont situés dans le domaine $e_a = (0.4-0.5)$ mm. On remarque que cette courbe comporte trois domaines. Le premier est compris entre $e_a = 0.05$ mm et $e_a = 0.25$ mm on note quasiment une stabilité du rapport de la zone endommagée valant 0.1. Le deuxième pour les valeurs de $e_a (0.25-0.4)$ mm la courbe a une grande pente, atteignant la valeur 0,117. Le dernier domaine pour $e_a > 0.4$ mm la variation de D_R est faible jusqu'à atteindre la valeur maximale 0.118 pour $e_a = 0.5$ mm. Toutes les valeurs de D_R dans ces domaines sont inférieures à la valeur critique.

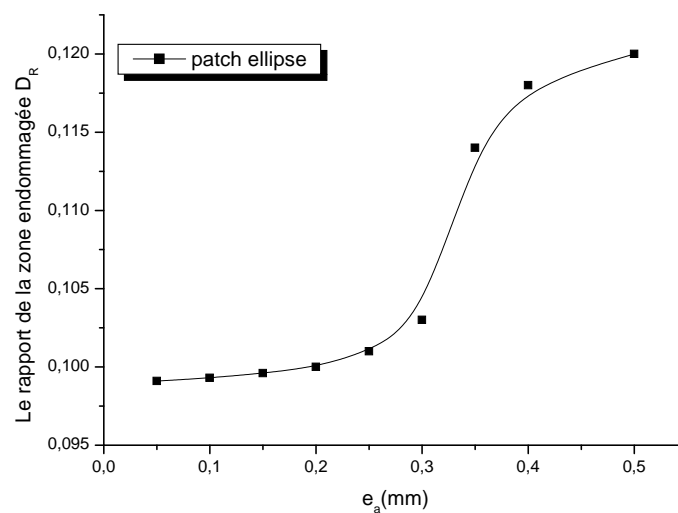


Fig. V.32 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif.

V.3.3.5 Effet de l'épaisseur de l'adhésif sur la variation de rapport de zone endommagée de l'adhésif :

La **figure V.33** illustre l'influence de l'épaisseur de l'adhésif sur le niveau des rapports des zones endommagées pour toutes les formes de patch. L'analyse du graphe de cette figure montre que le patch elliptique est le meilleur par rapport aux autres, car la valeur du rapport de la zone endommagée est la plus faible. Le D_R pour les trois formes (rectangle, cercle et ellipse) est inférieur au D_R critique, par contre celui du trapèze est supérieur à la valeur critique pour $e_a = 0.35$ mm.

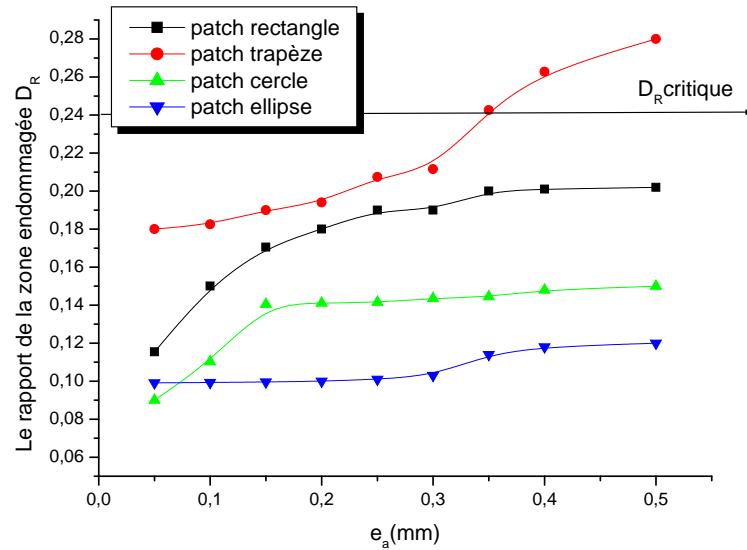


Fig. V.33 : Rapport de la zone endommagée vs l'épaisseur de l'adhésif pour les différentes formes de patch.

V.3.3.6 Effet de l'épaisseur de l'adhésif sur la variation du FIC :

La Figure V.34 représente la variation de facteur d'intensité de contraintes en fonction de l'épaisseur de l'adhésif pour différentes formes de patch. On constate que l'augmentation de l'épaisseur de l'adhésif entraîne une augmentation du facteur d'intensité de contraintes. On note que les valeurs du FIC du patch de forme trapézoïdale sont légèrement supérieures à celles de la forme rectangulaire. Les valeurs du FIC (K_I+K_{II}) pour les formes circulaire et elliptique sont largement supérieures à celles des deux autres. En conclusion le patch rectangulaire peut être considéré comme la meilleure solution dans la réparation des fissures contrairement à celui de la forme elliptique.

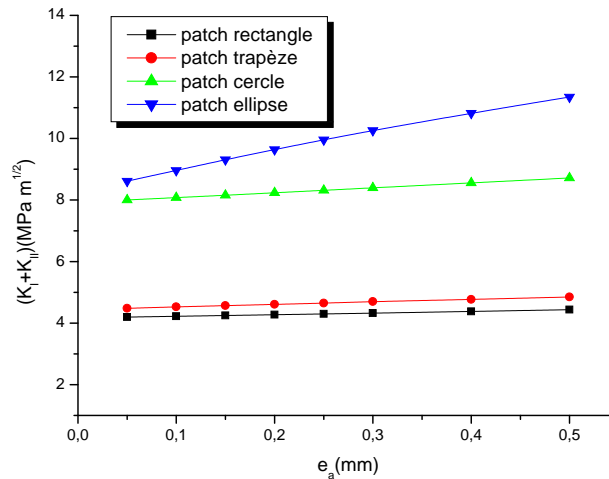


Fig. V.34 : Variation du FIC (K_I+K_{II}) en fonction de l'épaisseur de l'adhésif. ($a=30\text{mm}$, $\theta=30^\circ$)

V.3.3.7 Facteur d'intensité de contrainte en fonction du rapport de la zone endommagée D_R pour les différentes formes du patch:

La variation du facteur d'intensité de contraintes en fonction du rapport de la zone endommagée est représentée sur la Figure V.35. Les résultats montrent que le patch rectangulaire est le meilleur car les valeurs du FIC obtenues pour cette forme sont les plus faibles et celles du D_R sont de valeurs moyennes comparées à celles des autres formes.

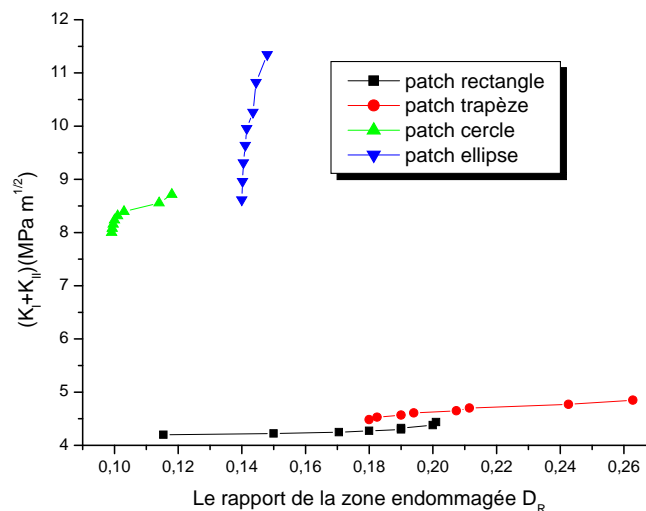


Fig. V.35 : Variation du FIC (K_I+K_{II}) en fonction du rapport de la zone endommagée (D_R).

V.3.4 Effet de l'épaisseur du patch sur l'endommagement de l'adhésif :

L'épaisseur du patch joue un rôle déterminant sur la stabilité des fissures réparées par patch. Sur les figures (V.37, V.39, V.41 et V.43) est représentée la variation de D_R pour différentes épaisseurs du patch. L'étude a été effectuée avec une fissure inclinée d'un angle $\theta=15^\circ$ et de longueur constante $a=30\text{mm}$. Il est clair que l'augmentation de l'épaisseur du patch engendre une diminution de FIC selon la figure V.45, et augmentant ainsi l'efficacité de la réparation ce qui permet d'augmenter la durée de vie de la structure réparée.

V.3.4.1 patch rectangulaire

La figure V.36 représente l'évolution de la zone endommagée en fonction l'épaisseur du patch en mode II pour une forme rectangulaire. Selon les figures (a, b et c) on peut dire que l'augmentation de l'épaisseur de patch diminue l'étendue de la zone endommagée soit au niveau de la fissure comme aux bords du patch.

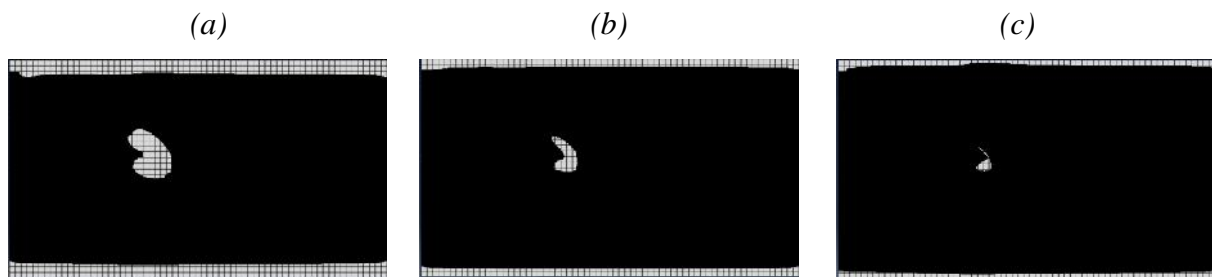


Fig. V.36 : zone endommagée pour un patch de forme rectangulaire (a) $e_p = 0.5\text{mm}$, (b) $e_p = 25\text{mm}$ et (c) $e_p = 5\text{mm}$.

L'évolution du rapport de la zone endommagée dans l'adhésif en fonction de l'épaisseur du patch a été citée en (figure V.36). En figure V.37 l'analyse de la variation de D_R montre que l'augmentation de l'épaisseur du patch induit une diminution de la valeur du rapport de la zone endommagée. Quelle que soit la valeur de la variation de l'épaisseur jusqu'à atteindre $e_p=5\text{mm}$ La valeur de D_{Rc} n'est pas atteinte.

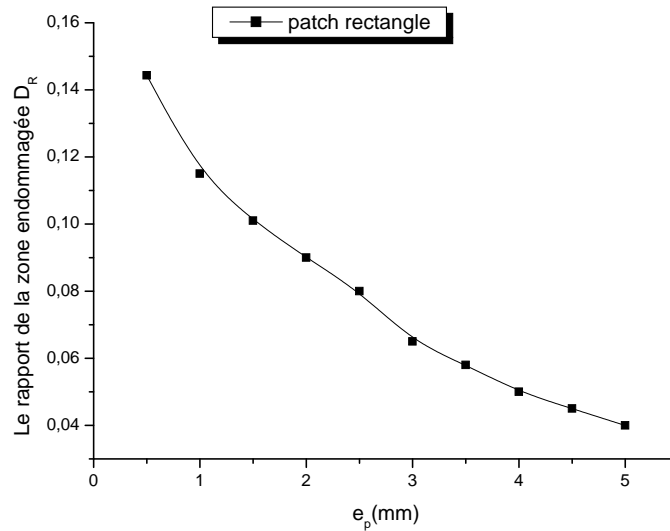


Fig. V.37 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur du patch.

V.3.4.2 patch trapézoïdale

La figure V.38 illustre la distribution de la zone endommagée dans l'adhésif et permet le calcul du rapport de la zone endommagée et connaître le comportement de la colle en mode II. Après avoir visionné ces formes on peut conclure que la zone endommagée diminue en fonction de l'augmentation de l'épaisseur de patch. Pour le cas de $e_p = 0.5\text{mm}$ on note que la zone endommagée occupe toute la surface de la corrosion et aux alentours de la fissure. Il y a apparition aussi d'une grande zone aux bords du patch. Concernant le cas $e_p = 2.5\text{mm}$ la zone endommagée au niveau de la fissure et de la corrosion a largement diminué. Quand l'épaisseur varie entre 2.5 et 5mm la zone endommagée au niveau des bords diminue de façon considérable.

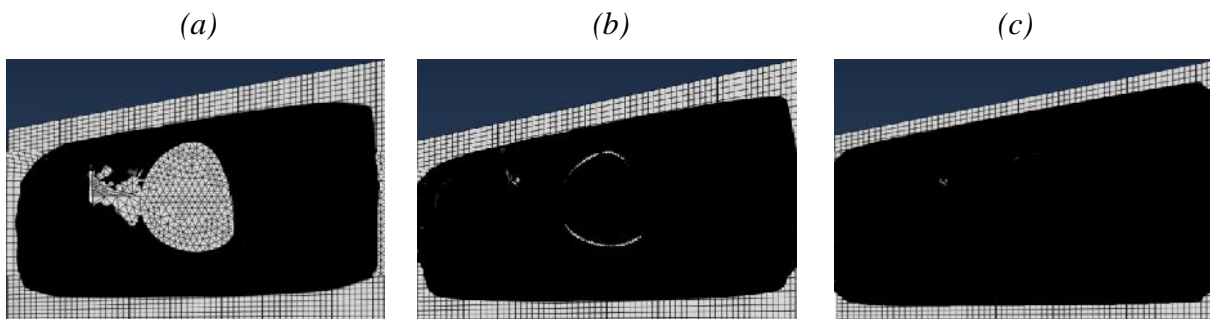


Fig. V.38 : zone endommagée pour un patch de forme trapézoïdale (a) $e_p = 0.5\text{mm}$, (b) $e_p = 2.5\text{mm}$ et (c) $e_p = 5\text{mm}$.

Le calcul a été effectué pour une forme de patch trapézoïdale, la **figure V.39** représente la variation du rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de patch. Cette courbe montre que D_R diminue avec l'augmentation de l'épaisseur du patch. On constate clairement une diminution du rapport de D_R entre 0,17 jusqu'à 0,125 dans le domaine $0,5\text{mm} < e_p < 2,5\text{mm}$. Pour des valeurs $e_p > 2,5\text{mm}$ on note une stabilité de $D_R \approx 0,01$. La valeur critique de D_R n'est pas atteinte quelle que soit la valeur de l'épaisseur du patch.

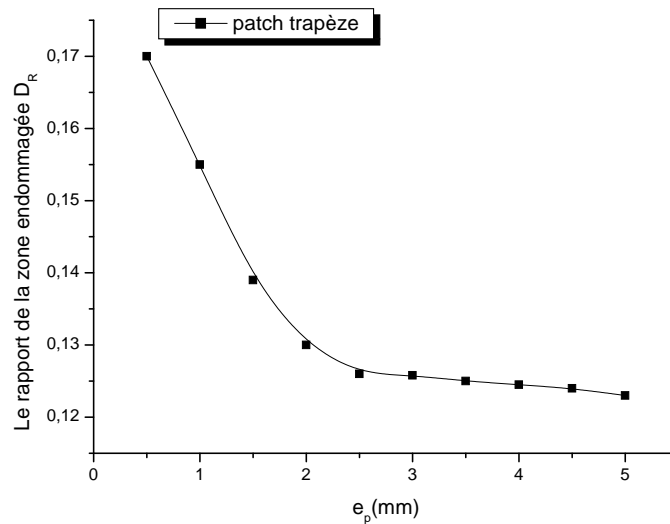


Fig. V.39 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de patch.

V.3.4.3 *patch circulaire*

Sur la **figure V.40** est représentée la variation de la distribution de la zone endommagée dans l'adhésif en fonction de la variation de l'épaisseur du patch en forme circulaire. Pour une épaisseur de 0,5mm on remarque la présence de la zone en grande étendue entourant la fissure et couvrant la totalité de la corrosion au centre du patch. Cette zone apparaît sous forme d'arcs peu étendus aux bords du patch. Quand l'épaisseur varie de 2,5mm à 5mm, la zone endommagée apparaît sous formes ponctuelles au niveau de la fissure et sa surface aux bords du patch diminue considérablement à $e_p = 0,5\text{mm}$.

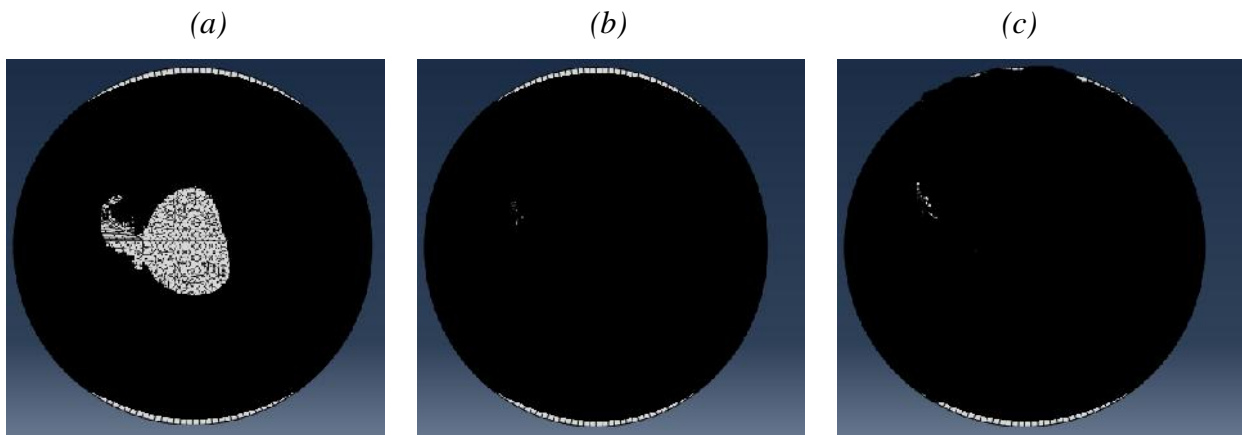


Fig. V.40 : zone endommagée pour un patch de forme circulaire (a) $e_p = 0.5\text{mm}$, (b) $e_p = 25\text{mm}$ et (c) $e_p = 5\text{mm}$.

La variation de D_R en fonction de l'épaisseur du patch est représenté en **figure V.41**. Le graphe prend l'allure d'une hyperbole. Plus la valeur de l'épaisseur du patch augmente plus la valeur de D_R diminue de $D_R = 0.105$ à $D_R = 0.01$. Toutes les valeurs du rapport obtenues sont inférieures à celle de la valeur critique dans ce cas.

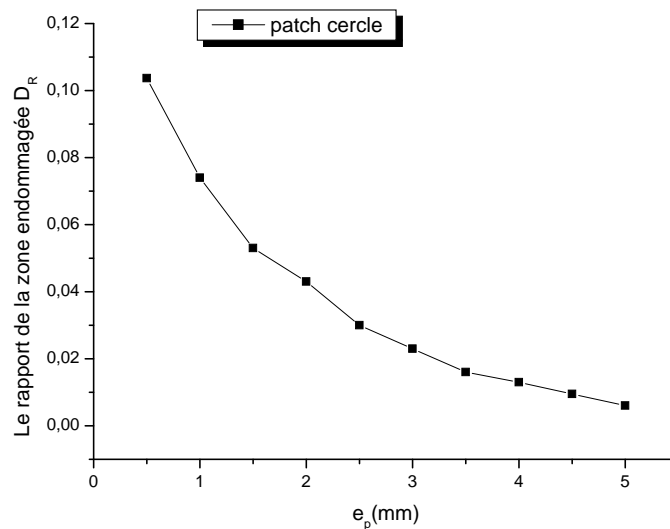


Fig. V.41 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de patch.

V.3.4.4 patch ellipsoïdale

L'évolution de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur du patch en forme d'ellipse est représentée en **figure V.42**. L'augmentation de l'épaisseur du patch conduit à une disparition de la zone endommagée. Pour une épaisseur de 0.5mm on remarque la présence de la zone en grande étendue entourant la fissure et couvrant la totalité de la corrosion au

centre du patch. Cette zone apparaît sous forme d'arcs peu étendus aux bords du patch. Quand l'épaisseur varie de 2.5mm à 5mm, aucune zone endommagée n'apparaît ni au niveau de la fissure ni au niveau de la corrosion et sa surface aux bords du patch reste inchangée.

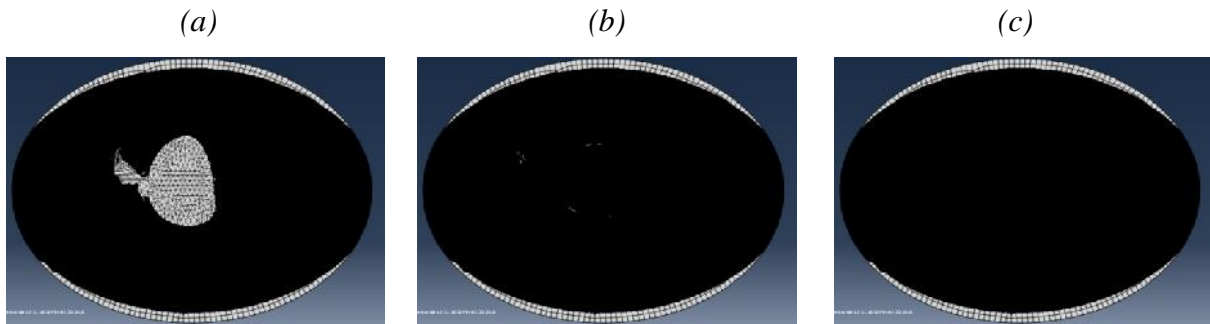


Fig. V.42 : zone endommagée pour un patch de forme ellipsoïdale (a) $e_p = 0.5\text{mm}$, (b) $e_p = 2.5\text{mm}$ et (c) $e_p = 5\text{mm}$.

La variation de D_R en fonction de l'épaisseur du patch est tracée sur courbe de la **figure V.43**. Plus la valeur de l'épaisseur du patch augmente plus la valeur de D_R diminue. Toutes les valeurs du rapport obtenues sont inférieures à celle de la valeur critique dans ce cas.

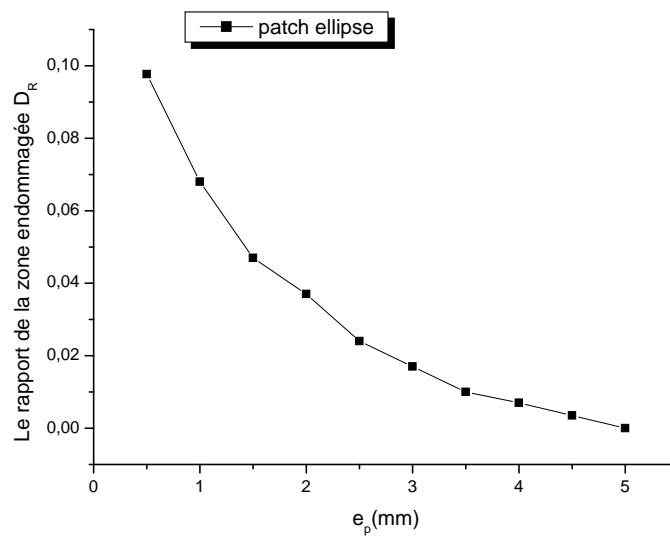


Fig. V.43 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de patch.

V.3.4.5 Effet de l'épaisseur du patch sur la variation du rapport de la zone endommagée de l'adhésif :

La **Figure V.44** représente la variation du rapport de la zone endommagée D_R en fonction de l'épaisseur du patch. Pour le calcul de ce rapport on fixe la valeur de l'épaisseur, le module de cisaillement de l'adhésif et on fait varier les valeurs de l'épaisseur du patch pour toutes les formes.

Toutes les courbes ont approximativement le même comportement. Il résulte une diminution du rapport de la zone endommagée de l'adhésif par augmentation de l'épaisseur du patch. Par comparaison des résultats des formes rectangulaire et trapézoïdale la différence de la diminution de D_R est importante lorsque l'épaisseur du patch est au maximum. La forme optimale de patch est celle elliptique parce que les valeurs du rapport de zone endommagée sont les plus petites par rapport aux autres formes du patch. La forme trapézoïdale est à éviter car les valeurs obtenues de D_R sont très élevées relativement aux autres formes. On note aussi que toutes les valeurs D_R sont inférieures à la valeur critique de D_{Rc} .

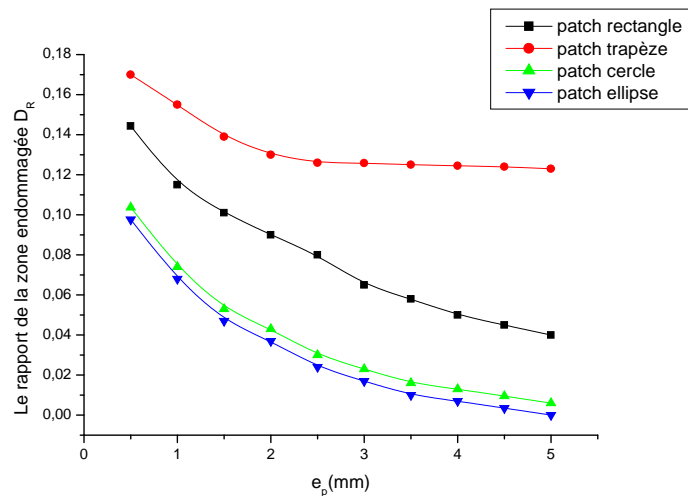


Fig. V.44 : Rapport de la zone endommagée vs l'épaisseur de patch pour les différentes formes du patch.

V.3.4.6 Effet de l'épaisseur du patch sur la variation FIC :

La **figure V.45** montre la variation du facteur d'intensité de contraintes FIC (K_I+K_{II}) en fonction de l'épaisseur du patch. Plusieurs chercheurs ont montré l'importance de l'épaisseur du patch sur la performance de la réparation des structures fissurées en aéronautique. Le comportement de toutes les courbes est similaire. Il y a une variation

inversement proportionnelle de FIC par rapport à celle de l'épaisseur du patch. Les résultats obtenus pour les formes rectangulaire et trapézoïdale sont plus faibles par rapport à ceux des formes elliptique et circulaire.

D'après les résultats des courbes qui confirment clairement le rôle que joue le patch de forme rectangulaire dans la performance pour la résolution de problème de propagation de la fissure.

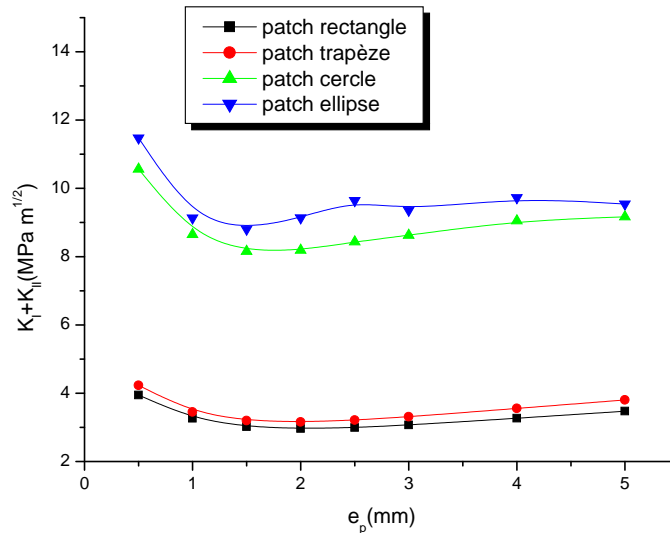


Fig. V.45 : Variation du FIC ($K_I + K_{II}$) en fonction de l'épaisseur de patch. ($a=30\text{mm}$, $\theta=30^\circ$)

V.3.4.7 Facteur d'intensité de contrainte en fonction du rapport de la zone endommagée D_R pour les différentes formes du patch :

La comparaison des valeurs du facteur d'intensité de contraintes en fonction du rapport de la zone endommagée de l'adhésif est étudiée en **figure V.46**. L'ensemble des résultats obtenus montrent que les valeurs des FIC pour le patch de forme rectangulaire sont très petites par rapport aux autres formes (circulaire et ellipsoïdale). En comparant les valeurs du FIC pour la forme trapézoïdale et rectangulaire sont à peu près les mêmes, mais la forme rectangulaire est plus avantageuse du faite qu'elle offre des valeurs de D_R plus faibles. A titre comparatif entre les formes de trapèze et de rectangle à celles des circulaire et elliptique on remarque que les premières formes sont avantageuses par rapport aux deuxièmes car elles donnent des valeurs de FIC faibles. Par contre les deuxièmes formes sont plus avantageuses par rapport aux premières car elles offrent des valeurs de D_R plus faibles.

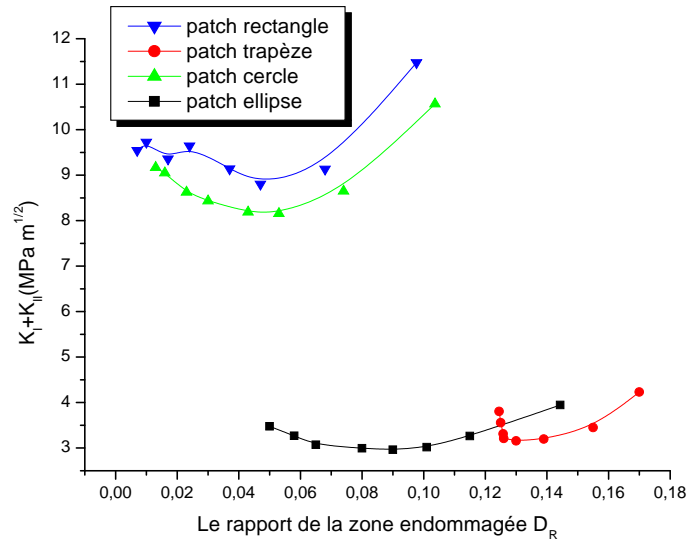


Fig. V.46 : Variation du FIC ($K_I + K_{II}$) en fonction du rapport de la zone endommagée (D_R).

V.3.5 Effet du module de cisaillement de l'adhésif sur son endommagement :

L'adhésif est l'élément fondamental pour la fixation du patch, son rôle principal est d'assurer une bonne adhésion et assure le transfert de charge de la plaque vers le patch. Ce matériau est le point faible du renforcement. En effet, la majorité des endommagements observés dans les structures réparées sont dus à l'adhésif. Sa rupture ou son décollement provoque le détachement du patch en composite. L'influence du module de cisaillement de la colle sur les variations des zones endommagées est indiquée sur les figures V.47, V.49, V.51, V.53. Pour une taille de fissure $a=30\text{mm}$, un chargement de valeur de 200MPa , une épaisseur d'adhésif $e_a = 0.15\text{ mm}$ et une épaisseur de patch $e_p = 0.15\text{ mm}$. Ensuite, l'étude de l'effet de la variation du module de cisaillement de l'adhésif a été mise en relief.

V.3.5.1 patch rectangulaire

L'influence de la variation du module de cisaillement de l'adhésif sur la zone endommagée est illustrée sur la Figure V.47. L'augmentation du module de cisaillement de l'adhésif conduit à une diminution dans la zone endommagée. Cette diminution est importante et plus apparente au niveau de la fissure qu'aux bords du patch.

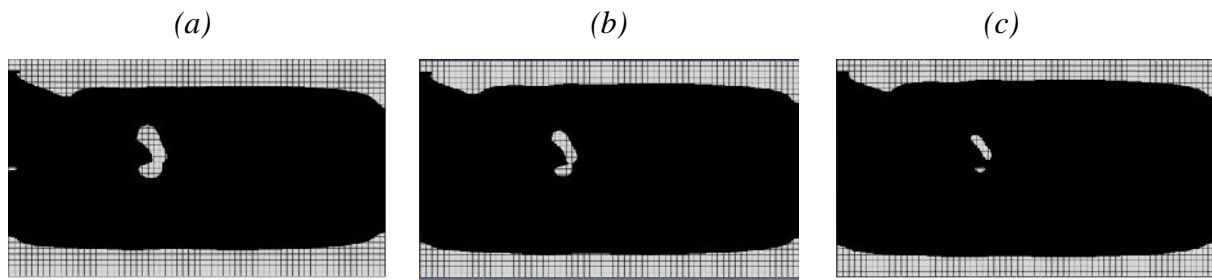


Fig. V.47 : zone endommagée pour un patch de forme rectangulaire (a) $G_a = 200\text{MPa}$, (b) $G_a = 800\text{MPa}$ et (c) $G_a = 1400\text{MPa}$.

La **Figure V.48** représente la variation du rapport de la zone endommagée D_R en fonction du module de cisaillement de l'adhésif pour le patch rectangulaire. L'augmentation du module de cisaillement de l'adhésif entraîne une diminution du rapport D_R . Toutes les valeurs de la zone endommagée ne dépassent pas la valeur critique ($D_{Rc}=0.247$) quel que soit le module de cisaillement de l'adhésif. La valeur maximale de $D_R=0.217$ est obtenue pour un module de cisaillement $G_a=200\text{MPa}$ et diminue jusqu'à $D_R=0.15$ pour $G_a=1400\text{MPa}$.

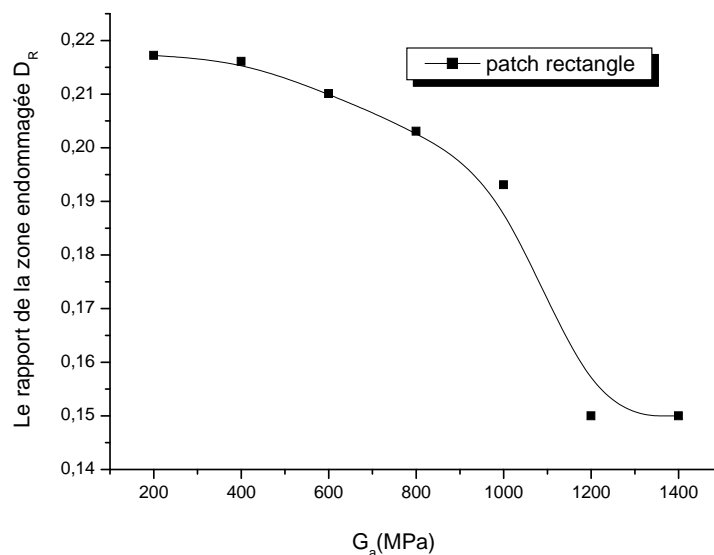


Fig. V.48 : Rapport de la zone endommagée en fonction du module de cisaillement de l'adhésif.

V.3.5.2 patch trapézoïdale

La distribution de la zone endommagée de l'adhésif en fonction du module de cisaillement est schématisée sur la **Figure V.49**. En générale pour une augmentation de G_a on observe une diminution de la zone endommagée. Pour $G_a = 200\text{MPa}$, on note la présence de la zone endommagée assez importante au niveau des bords de patch, et également de petites zones entourant la corrosion, et même au niveau de la fissure. Dans les cas $G_a = 800\text{MPa}$ et $G_a = 1400\text{MPa}$ la zone intérieure au patch (corrosion et fissure) disparu et on observe une diminution des surfaces endommagées au niveau des côtés du patch.

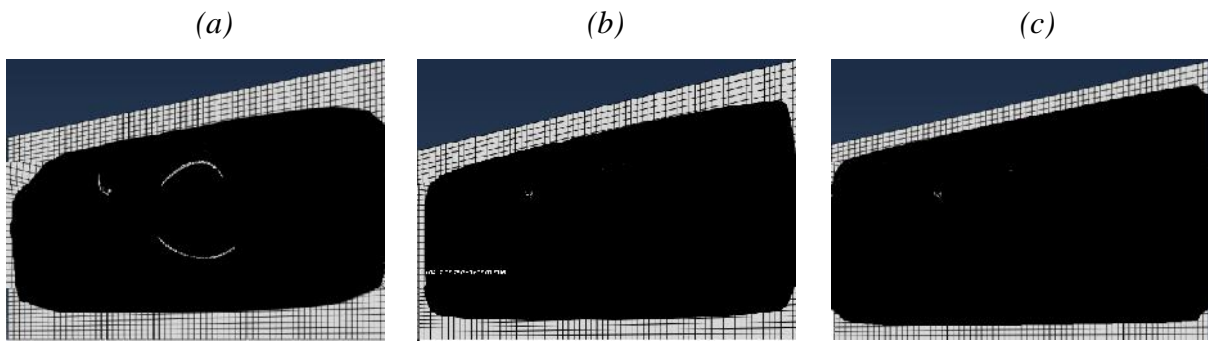


Fig. V.49 : zone endommagée pour un patch de forme trapézoïdale (a) $G_a = 200\text{MPa}$, (b) $G_a = 800\text{MPa}$ et (c) $G_a = 1400\text{MPa}$.

La variation du rapport de la zone endommagée en fonction du module de cisaillement de l'adhésif est illustrée sur la courbe de la **Figure V.50**. Cette figure montre que le rapport de la zone endommagée diminue en fonction de l'augmentation du module de cisaillement de l'adhésif. On remarque qu'il y a une stabilité dans les valeurs de $D_R \approx 0.178$ si on travaille dans l'intervalle $200\text{MPa} < G_a < 600\text{MPa}$, après cet intervalle on remarque une grande diminution dans les valeurs de D_R allant de 0.177 jusqu'à 0.13, puis une stabilisation quand $G_a > 1200\text{MPa}$ de $D_R \approx 0.13$. Toutes les valeurs de D_R enregistrées ne dépassent pas la valeur critique de D_R .

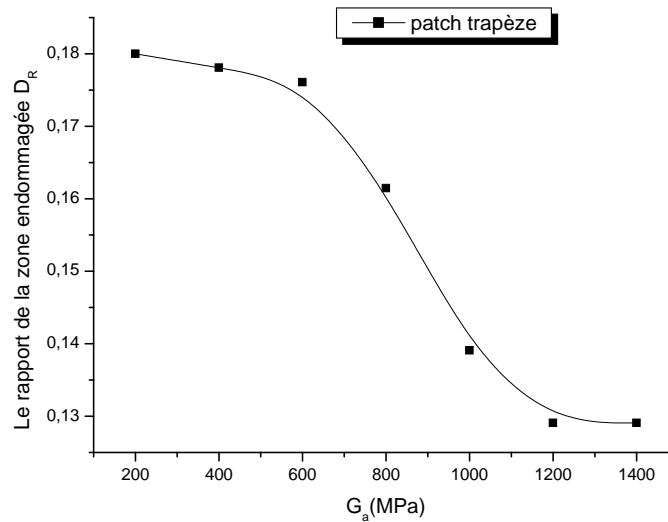


Fig. V.50 : Rapport de la zone endommagée en fonction du module de cisaillement de l'adhésif.

V.3.5.3 patch circulaire

La figure V.51 illustre de manière générale le comportement de l'adhésif en fonction de la variation de son module de cisaillement,

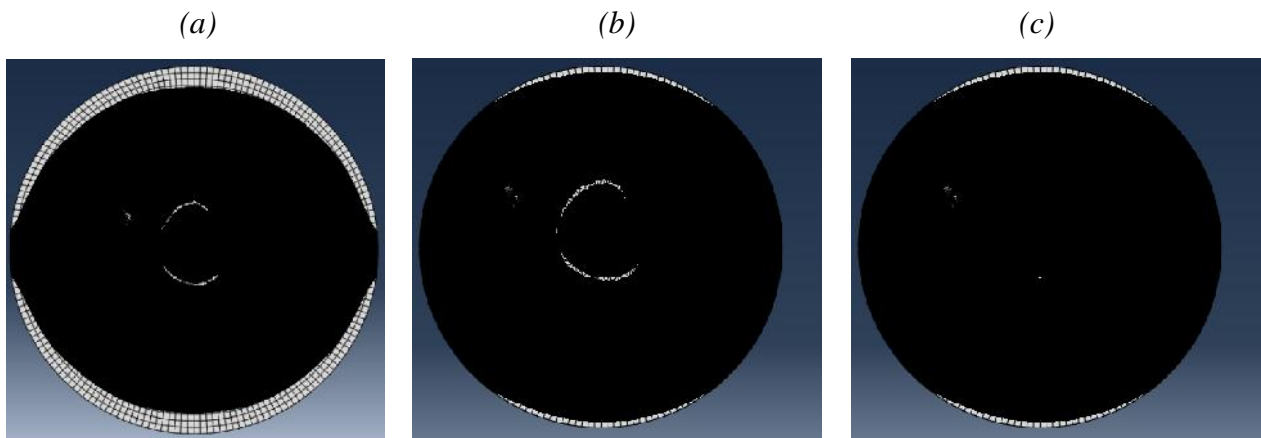


Fig. V.51 : zone endommagée pour un patch de forme circulaire (a) $G_a = 200\text{MPa}$, (b) $G_a = 800\text{MPa}$ et (c) $G_a = 1400\text{MPa}$.

Pour la valeur de $G_a = 200\text{MPa}$ il y a constitution de quelques zones endommagées au niveau de la corrosion et de la fissure, et on note également une formation de surface considérable sous forme d'arcs aux bords du patch. Pour les cas $G_a > 200\text{MPa}$ il y a une diminution de ces zones endommagées au niveau de corrosion et aux bords du patch.

La Figure V.52 représente du rapport de la zone endommagée D_R en fonction de module de cisaillement de l'adhésif. On remarque une diminution de D_R très rapide de $D_R = 0.1308$ jusqu'à 0.1257 puis une stabilisation dans les valeurs à partir de $G_a = 1000\text{MPa}$. On remarque aussi que la valeur critique du rapport de la zone endommagée n'est pas atteinte.

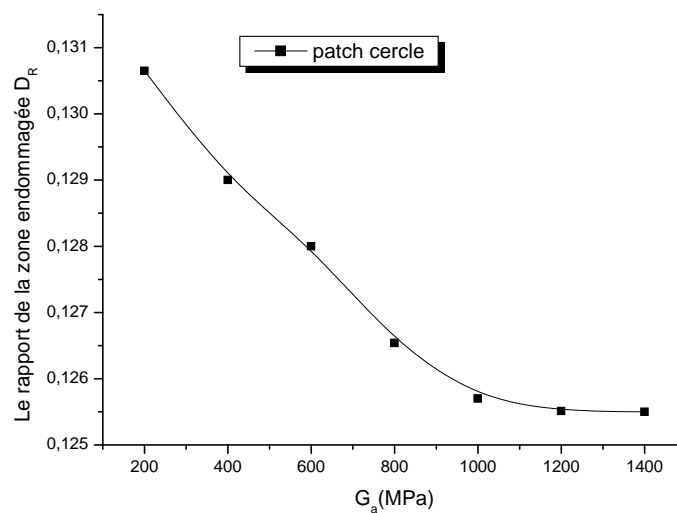


Fig. V.52 : Rapport de la zone endommagée en fonction du module de cisaillement de l'adhésif.

V.3.5.4 patch ellipsoïdale

Les *Figures (V.53 a-b-c)* représentent respectivement la répartition de la zone endommagée de l'adhésif en fonction de la variation du module de cisaillement pour le cas du patch de forme elliptique. Les résultats obtenus sont similaires à ceux du patch en forme de cercle pour toutes les valeurs de G_a . Avec disparition de ces zones (au niveau de côtés) dans le cas de $G_a = 1400\text{MPa}$.

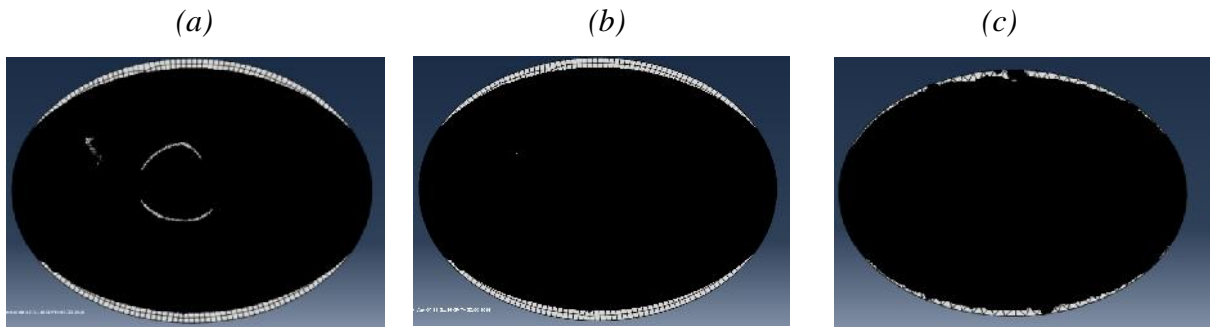


Fig. V.53 : zone endommagée pour un patch de forme ellipsoïdale (a) $G_a = 200\text{MPa}$, (b) $G_a = 800\text{MPa}$ et (c) $G_a = 1400\text{MPa}$.

La *Figure V.54* représente la variation du rapport de la zone endommagée dans l'adhésif. On constate que le D_R diminue progressivement avec l'augmentation du module de cisaillement de l'adhésif. La valeur enregistrée de D_R est de 0,124 pour $G_a = 200\text{MPa}$ et diminue jusqu'à atteindre la valeur de 0,1 pour $G_a = 1400\text{MPa}$. Quelle que soit la valeur de G_a utilisée la valeur de D_R critique n'est pas atteinte.

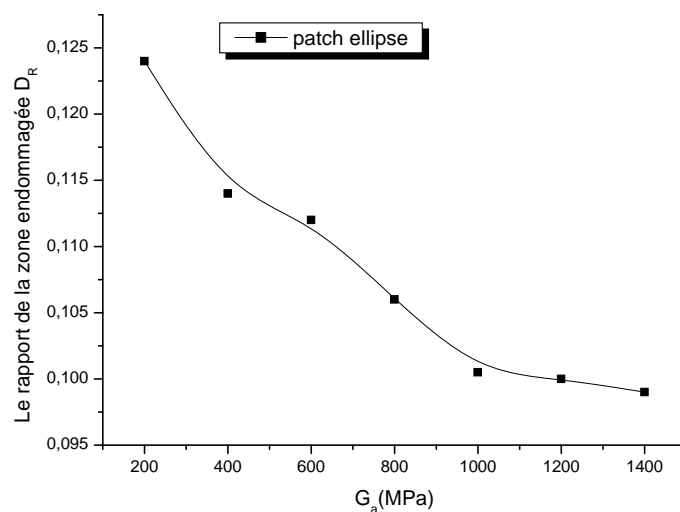


Fig. V.54 : Rapport de la zone endommagée en fonction du module de cisaillement de l'adhésif.

V.3.5.5 Effet du module de cisaillement de l'adhésif sur la variation du rapport de la zone endommagée de l'adhésif :

La **figure V.55** montre l'influence du module de cisaillement de l'adhésif sur le rapport de la zone endommagée pour les différentes formes du patch. On remarque que toutes les courbes ont le même comportement, plus on augmente les valeurs du module de cisaillement de l'adhésif on observe une diminution du rapport de la zone endommagée. On peut conclure sur la base de ces résultats que le patch de forme elliptique est le meilleur pour la réparation car les valeurs de D_R obtenues sont les plus petites par rapport aux autres formes. La forme rectangulaire du patch est à éviter car elle donne des valeurs de D_R trop élevées. Pour toutes les formes les valeurs de D_R sont inférieures à la valeur critique.

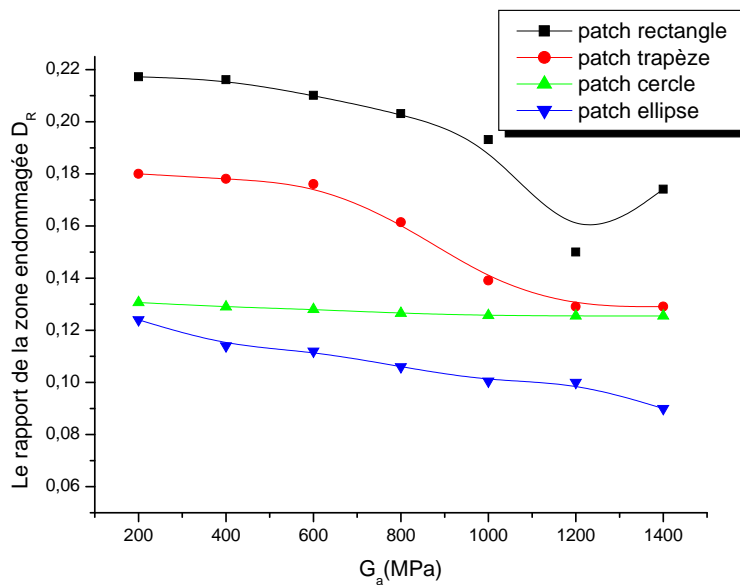


Fig. V.55 : Rapport de la zone endommagée vs module de cisaillement de l'adhésif pour les différentes formes de patch.

V.3.5.6 Effet du module de cisaillement de l'adhésif sur la variation du FIC :

La Figure IV.56 représente l'évolution du FIC en fonction du module de cisaillement de l'adhésif pour des fissures inclinées de 30° . On remarque qu'en augmentant le module de cisaillement de l'adhésif on observe une diminution du facteur d'intensité de contraintes dans le cas de patch de forme elliptique. Pour les trois formes restantes (rectangle, trapèze et cercle) la variation dans la diminution n'est pas très significative, et apparaît dans la figure sous forme de lignes droites horizontales. Pour la valeur de $G_a=200\text{MPa}$ le FIC vaut 8 et 11 respectivement pour le circulaire et l'elliptique et la valeur du FIC vaut 2 et 4 pour le rectangulaire et trapézoïdale. Ceci permet de conclure que la forme rectangulaire est la meilleure.

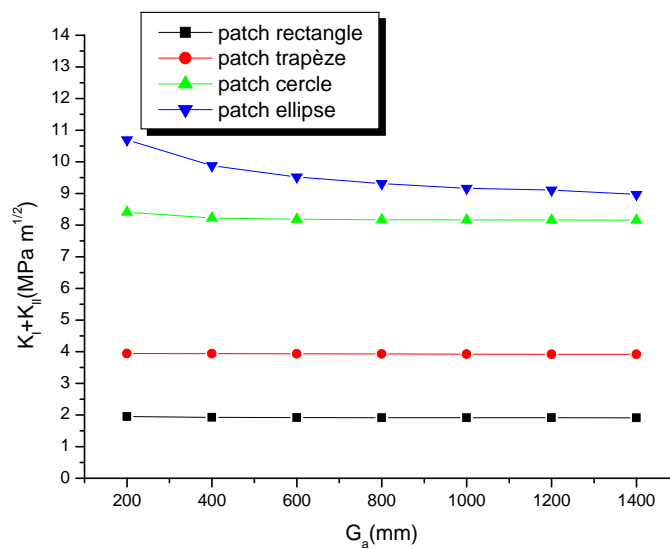


Fig. IV.56 : Variation du FIC ($K_I + K_{II}$) en fonction du module de cisaillement de l'adhésif. ($a=30\text{mm}$, $\theta=30^\circ$)

V.3.5.7 Facteur d'intensité de contrainte en fonction du rapport de la zone endommagée D_R pour les différentes formes du patch :

La courbe de la **Figure. IV.57** montre la variation du facteur d'intensité de contraintes (K_I+K_{II}) en mode mixte en fonction du rapport de la zone endommagée D_R pour les différentes formes du patch. À travers ces courbes on peut distinguer deux comportements différents. Le premier comportement concerne la réparation de fissure, le patch de forme rectangulaire est le meilleur car il donne des valeurs de FIC les plus faibles. Le deuxième comportement est lié à la diminution de la zone endommagée, la forme elliptique est la meilleure comparée aux autres formes car elle donne des valeurs de D_R les plus faibles.

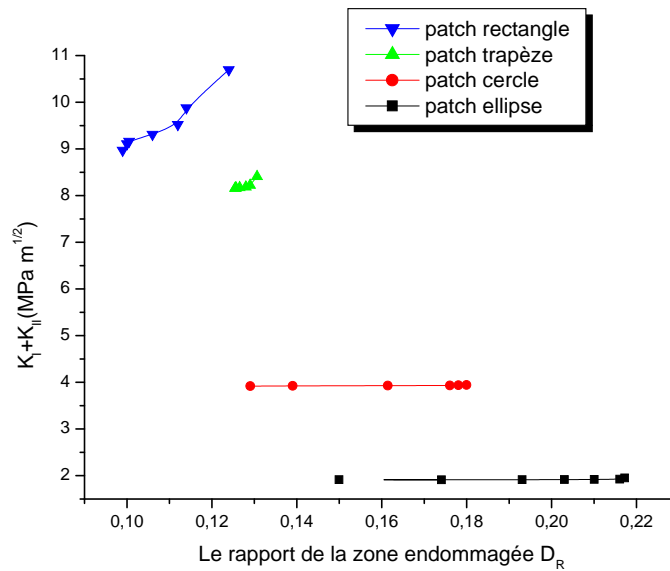


Fig. IV.57 : Variation du FIC (K_I+K_{II}) en fonction du rapport de la zone endommagée (D_R).

CONCLUSION GENERALE

Cette thèse s'est inscrite dans une démarche globale de compréhension du comportement en corrosion des alliages d'aluminium de la série 2000. Les travaux ont porté en particulier sur l'alliage d'aluminium 2024. Ces travaux consistent à évaluer la zone endommagée de l'adhésif à partir plusieurs effets. L'objectif de cette thèse était de calculer le rapport de la zone endommagée et de déterminer le facteur d'intensité de contraintes ensuite comparer les résultats pour les différentes formes du patch (rectangulaire, trapézoïdale, circulaire et ellipsoïdale).

Les résultats sont obtenus à l'aide de la méthode des éléments finis d'une plaque (sans fissure, avec fissure horizontale «en mode I» et avec une fissure inclinée « en mode mixte»), réparée par composite. Le comportement du facteur d'intensité de contrainte et la répartition des zones endommagées dans l'adhésif, ont permis de déduire les conclusions suivantes :

La première partie consiste à l'étude de l'influence du chargement mécanique sur la variation du rapport de la zone endommagée dans l'adhésif pour une plaque corrodée sans fissure, puis l'influence des épaisseurs de l'adhésif, du patch ainsi que l'effet du module de cisaillement de l'adhésif. Les résultats ont permis de déduire les conclusions suivantes :

- L'augmentation de la charge σ entraîne une augmentation de D_R .
- La forme rectangulaire du patch est la meilleure que les autres formes, car elle permet d'atteindre la valeur critique de D_R pour une valeur de σ assez élevée.
- quelle que soit la forme du patch, une augmentation de l'épaisseur de l'adhésif donne une augmentation de D_R , sans atteindre la valeur critique ($D_{Rc}=0.247$).
- L'augmentation de l'épaisseur du patch entraîne une augmentation des valeurs du rapport de la zone endommagée pour toutes les formes.
- Pour toutes les formes, l'augmentation du module de cisaillement de l'adhésif entraîne une augmentation du rapport de la zone endommagée sans atteindre la valeur critique D_{Rc} .

La deuxième partie permet d'analyser le comportement d'une structure fissurée horizontalement (en mode I), et réparée par patch en composite. Plusieurs paramètres ont été mis en évidence sur la qualité de réparation à savoir les propriétés mécaniques du patch et de l'adhésif ainsi que leurs épaisseurs ont permis de conclure ce qui suit :

- Pour toutes les formes du patch utilisées, plus la taille de fissure augmente plus les valeurs du rapport D_R augmentent.

- Le facteur d'intensité de contraintes croît avec la longueur de la fissure.
- Pour les différentes longueurs de fissure, la forme elliptique est la meilleure dans la réparation des plaques corrodées car le D_R est le plus faible, et la moins concluante dans la réparation des fissures car les valeurs du FIC enregistrées sont les plus élevées par rapport aux autres formes.
- L'augmentation de la charge appliquée engendre l'augmentation de D_R et du FIC pour toutes les formes de patch.
- La variation de la charge appliquée permet de conclure que les formes du trapèze et du rectangle sont avantageuses par rapport à celles des circulaire et elliptique car elles donnent des valeurs de FIC faibles, par contre ces dernières sont plus avantageuses car elles offrent des valeurs de D_R plus faibles.
- La variation de l'épaisseur de l'adhésif donne un comportement des patches elliptique et circulaire différent de ceux des patches rectangulaire et trapézoïdale deux à deux concernant les valeurs du D_R et du FIC.
- L'efficacité du patch rectangulaire est la meilleure concernant l'épaisseur de l'adhésif.
- Il y a un comportement de proportionnalité pour les formes circulaire et trapézoïdale entre l'épaisseur du patch et le D_R par contre pour les formes rectangulaire et elliptique le comportement est opposé.
- L'effet de l'épaisseur du patch impose que la meilleure forme est celle rectangulaire dans la réparation des corrosions avec une fissure.
- La performance concernant la réduction de la zone endommagée est meilleure pour les cas de formes elliptique et circulaire, concernant la réduction de FIC est meilleure pour les autres formes.

La troisième partie est similaire à la seconde mais avec une fissure inclinée (mode mixte), les résultats obtenus permettent les conclusions suivantes :

- L'augmentation de l'inclinaison de fissure conduit à une augmentation de D_R pour toutes les différentes formes de patch utilisé.
- Le risque de décollement du patch peut être observé pour la forme trapézoïdale qui est du à D_R supérieur à la valeur critique pour les différentes θ .
- La valeur K_I diminue avec l'augmentation de l'angle θ et la valeur du K_{II} est maximale pour $\theta = 45^\circ$ pour toutes les formes du patch.

- L'augmentation de la charge conduit à une augmentation du D_R .
- Le comportement du patch pour les différentes formes est similaire, plus on augmente la charge plus les valeurs du facteur augmentent.
- Pour différentes charges appliquées le patch en forme de rectangle est le meilleur pour la réparation des fissures car les valeurs du (K_I+K_{II}) obtenues sont les plus faibles. Le patch elliptique est le meilleur pour la réparation des zones endommagée car les valeurs de D_R enregistrées sont les plus faibles.
- La forme elliptique est la meilleure, car la valeur du D_R est la plus faible pour la variation de l'épaisseur de l'adhésif.
- L'augmentation de l'épaisseur de l'adhésif entraîne une augmentation du FIC.
- Le patch rectangulaire est le meilleur car les valeurs du FIC obtenues pour cette forme sont les plus faibles et celles du D_R sont de valeurs moyennes comparées à celles des autres formes.
- La diminution du D_R pour la variation de l'épaisseur du patch.
- La variation du FIC est inversement proportionnelle à celle de l'épaisseur du patch.
- Pour la réparation des fissures les formes de trapèze et de rectangle sont les plus avantageuses car elles donnent des valeurs de FIC faibles. Par contre les formes circulaire et elliptique sont à leur tour plus avantageuses par rapport aux premières car elles offrent des valeurs de D_R plus faibles.
- Plus on augmente les valeurs du module de cisaillement de l'adhésif on observe une diminution du rapport de la zone endommagée.
- En augmentant le module de cisaillement de l'adhésif on observe une diminution du facteur d'intensité de contraintes
- Pour la réparation des fissures, la forme rectangulaire est la meilleure car il donne des valeurs de FIC les plus faibles, la forme elliptique est la meilleure car elle permet d'obtenir des valeurs de D_R faibles.

ANNEXES

***REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES
LISTES DES FIGURES, TABLEAUX ET RELATIONS***

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Crocombe A, Richardson G.** (1995), “A unified approach for predicting the strength of cracked and non-cracked adhesive joints. *Int J Adhes*; 49:211–44.
- [2] **Sheppard A, Kelly D, Tong L.** (1998), “A damage zone model for the failure analysis of adhesively bonded joints. *Int J Adhes*; 18:385–400.
- [3] **Magalhães AG, De Moura MFSF, Gonçalves JPM.** (2005), “Evaluation of stress concentration effects in single-lap bonded joints of laminate composite materials. *Int J Adhes*; 25:313–9.
- [4] **Hossein Hosseini, Ghaffar. M, Mohammadi Bijan.** (2012), “Finite element fatigue propagation of induced cracks by stiffeners in repaired panels with composite patches”, *Compos Struct*, 94, 1771–1780.
- [5] **Kayser, J.R. and Nowak, A.S.** (1987), “Evaluation of corroded steel bridges”, *Bridges and Transmission Line Structures*, ASCE, 35-46.
- [6] **Kayser, J.R. and Nowak, A.S.** (1989), “Capacity loss due to corrosion in steel –girder bridges”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 115(6), 1525-1537.
- [7] **Fahad. M. Almutlaq.** (2014), “The influence of eaf dust on resistivity of concrete and corrosion of steel bars embedded in concrete”, *Advances in Concrete Construction*, Vol. 2 No. 3.
- [8] **Congqi Fang, Shuai .Y and Zhang .Z .** (2013), “Bending characteristics of corroded reinforced concrete beam under repeated loading”, *Structural Engineering and Mechanics*, 47,6,773-790.
- [9] **Kurklu .G, Ba pınar. M.S and Ergun. A.** (2013), “A comparative study on bond of different grade reinforcing steels in concrete under accelerated corrosion” *Steel and Composite Structures*, Vol.14 No. 3.
- [10] **Faiz U.A. Shaikh .** (2014), “Effects of alkali solutions on corrosion durability of geopolymer concrete ”, *Advances in Concrete Construction*, Vol. 2 No. 2 .
- [11] **Fournel. F, Martin. C, Radisson. D, Larrey. V, Beche. E, Morales. C, Delean. P. A, Rieutord. F and Moriceaua. H.** (2015), “Water Stress Corrosion in Bonded Structures”, *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 4 (5), 124-130.
- [12] **Bo Diao, Yang. S, Yinghua.Y and Shaohong.C.** (2012), “Impact of seawater corrosion and freeze-thaw cycles on the behavior of eccentrically loaded reinforced concrete columns”, *Ocean Systems Engineering*, 2 No. 2.
- [13] **E. BAYET, F. HUET, M. KEDDAM, K. OGLE ET H. TAKENOUTI.** (1997), “A Novel Way of Measuring Local Electrochemical Impedance Using A Single Vibrating Probe . *J. Electrochem. Soc.* 144(4), L87.
- [14] **F. Benyahia , A. Albedah , B. Bachir Bouiadjra .** (2014), “Analysis of the adhesive damage for different patch shapes in bonded composite repair of aircraft structures *Mat Des* ;54:18–24.
- [15] **T. SUTER ET R. C. ALKIRE.** (2001), “Microelectrochemical Studies of Pit Initiation at Single Inclusions in Al 2024-T3. *J. Electrochem. Soc.*, 148(1), B36.
- [16] **J. O. PARK, C. H. PAIK, Y. H. HUANG ET R. C. ALKIRE.** (1999), “Influence of FeRich Intermetallic Inclusions on Pit Initiation on Aluminum Alloys in Aerated NaCl. *J. Electrochem. Soc.*, 146(2), 517.
- [17] **A. J.BARD, F. R. F. FAN, J. KWAK ET O. LEV.** (1989), “Scanning electrochemical microscopy. Introduction and principles. *Anal. Chem.* 61(2), 132.
- [18] **J. C.SEEGMILLER ET D. A. BUTTRY.** (2003), “A SECM Study of Heterogeneous Redox Activity at AA2024 Surfaces. *J. Electrochem. Soc.* 150(9), B413.
- [19] **M. BÜCHLER, J. KERIMO, F. GUILLAUME ET W. H. SMYRL.** (2000), “Fluorescence and Near-Field Scanning Optical Microscopy for Investigating Initiation of Localized Corrosion of Al 2024. *J. Electrochem. Soc.* 147(10), 3691.
- [20] **J. HE, V. J. GELLING, D. E. TALLMAN ET G. P. BIERWAGEN.** (2000), “A Scanning Vibrating Electrode Study of Chromated-Epoxy Primer on Steel and Aluminum. *J. Electrochem. Soc.* 147(10), 3661.
- [21] **J. HE, V. J. GELLING, D. E. TALLMAN, G. P. BIERWAGEN ET G. G. WALLACE.** (2000), “Conducting Polymers and Corrosion III. A Scanning Vibrating Electrode Study of Poly(3-octyl pyrrole) on Steel and Aluminum. *J. Electrochem. Soc.* 147(10), 3667,.
- [22] **J. HE, D. E. TALLMAN ET G. P. BIERWAGEN.** (2004), “Conjugated Polymers for Corrosion Control: Scanning Vibrating Electrode Studies of Polypyrrole-Aluminum Alloy Interactions. *J. Electrochem. Soc.* 151(12), B644.
- [23] **D. BATTOCCHI, J. HE, G. P. BIERWAGEN ET D. E. TALLMAN.** (2005), “Emulation and study of the corrosion behavior of Al alloy 2024-T3 using a wire beam electrode (WBE) in conjunction with scanning vibrating electrode technique (SVET). *Corros. Sci.* 47(5), 1165.

- [24] **H. KRAWIEC, V. VIGNAL ET R. OLTRA.** (2004), "Use of the electrochemical microcell technique and the SVET for monitoring pitting corrosion at MnS inclusions. *Electrochem. Commun.*, 6(7), 655.
- [25] **E. CHARITIDOU, G. PAPAPOLYMEROU, G. N. HAIDEMENOPOULOS, N. HASIOTIS ET V. BONTOZOGLU.** (1999), "Characterization of trapped hydrogen in exfoliation corroded aluminium alloy 2024. *Scripta Materialia*, 41(12), 1327.
- [26] **R. S. LILLARD, P. J. MORAN ET H. S. ISAACS.** (1992), "A Novel Method for Generating Quantitative Local Electrochemical Impedance Spectroscopy. *J. Electrochem. Soc.* 139(4), 1007.
- [27] **J.-B. JORCIN, E. ARAGON, C. MERLATTI ET N. PÉBÈRE.** (2006), "Delaminated areas beneath organic coating: A local electrochemical impedance approach. *Corros. Sci.* 48(7), 1779.
- [28] **G. A. GALICIA.** (2006), "Etude par spectroscopie d'impédance globale et locale de la corrosion du magnésium et des alliages de magnésium AZ91. Thèse de doctorat, Université Paris VI.
- [29] **G. BARIL, G. GALICIA, C. DESLOUIS, N. PÉBÈRE, B. TRIBOLLET ET V. VIVIER.** (2007), "An Impedance Investigation of the Mechanism of Pure Magnesium Corrosion in Sodium Sulfate Solutions. *J. Electrochem. Soc.* 154(2), C108.
- [30] **P. DE LIMA-NETO, J. P. FARIAS, L. F. G. HERCULANO, H. C. DE MIRANDA, W. S. ARAÚJO, J.-B. JORCIN ET N. PÉBÈRE.** (2008), "Determination of the sensitized zone extension in welded AISI 304 stainless steel using non-destructive electrochemical techniques. *Corros. Sci.* 50(4), 1149.
- [31] **J.-B. JORCIN, C. BLANC, N. PEBERE, B. TRIBOLLET ET V. VIVIER.** (2008), "Galvanic Coupling Between Pure Copper and Pure Aluminum. *J. Electrochem. Soc.* 155(1), C46.
- [32] **M. LOHRENGEL, S. HEIROTH, K. KLUGER, M. PILASKI ET B. WALTHER.** (2006), "Microimpedance-Localized material analysis. *Electrochim. Acta*, 51(8-9), 1431.
- [33] **G. O. ILEVARE, O. SCHNEIDER, R. G. KELLY ET J. R. SCULLY.** (2004), "In Situ Confocal Laser Scanning Microscopy of AA 2024-T3 Corrosion Metrology. *J. Electrochem. Soc.* 151(8), B453.
- [34] **O. SCHNEIDER, G. O. ILEVARE, R. G. KELLY ET J. R. SCULLY.** (2007), "In Situ Confocal Laser Scanning Microscopy of AA2024-T3 Corrosion Metrology. *J. Electrochem. Soc.*, 154(8), C397.
- [35] **D. W. POHL, W. DENK ET M. LANZ.** (1984), "Optical stethoscopy: Image recording with resolution $\lambda/20$. *Appl. Phys. Lett.*, 44(7), 651.
- [36] **E. DELTOMBE ET M. POURBAIX.** (1956), "Comportement électrochimique de l'aluminium, diagrammes d'équilibre tension pH du système Al-H₂O à 25°C. Rapport technique 42, Cebelcor.
- [37] **M. PAESLER ET P. MOYER.** *Near-Fiel Optics*: (1996), "Theory, Instrumentation, and Applications. John Wiley and Sons, Inc. New York.
- [38] **W.-J. LEE, F. GUILLAUME, T. L. KNUTSON ET W. H. SMYRL.** (2005), "Analysis of Products at Reaction Sites by Fluorescence Microspectroscopy Using the f-NSOM Technique. *J. Electrochem. Soc.* 152(3), B111.
- [39] **M. A. ALODAN ET W. H. SMYRL.** (1998), "Detection of Localized Corrosion of Aluminum Alloys Using Fluorescence Microscopy. *J. Electrochem. Soc.* 145(5), 1571.
- [40] **K. KOWAL, J. DELUCCIA, J. Y. JOSEFOWICZ, C. LAIRD ET G. C. FARRINGTON.** (1996), "In Situ Atomic Force Microscopy Observations of the Corrosion Behavior of Aluminum-Copper Alloys. *J. Electrochem. Soc.* 143(8), 2471.
- [41] **C. BLANC, S. GASTAUD ET G. MANKOWSKI.** (2003), "Mechanistic Studies of the Corrosion of 2024 Aluminum Alloy in Nitrate Solutions. *J. Electrochem. Soc.* 150(8), B396.
- [42] **A. DAVOODI, J. PAN, C. LEYGRAF ET S. NORNGREN.** (2005), "In Situ Investigation of Localized Corrosion of Aluminum Alloys in Chloride Solution Using Integrated EC-AFM/SECM Techniques. *Electrochem. SolidState Lett.* 8(6), B21.
- [43] **A. DAVOODI, J. PAN, C. LEYGRAF ET S. NORNGREN.** (2008), "The Role of Intermetallic Particles in Localized Corrosion of an Aluminum Alloy Studied by SKPFM and Integrated AFM/SECM. *J. Electrochem. Soc.* 155(5), C211.
- [44] **M. FEMENIA, C. CANALIAS, J. PAN ET C. LEYGRAF.** (2003), "Scanning Kelvin Probe Force Microscopy and Magnetic Force Microscopy for Characterization of Duplex Stainless Steels. *J. Electrochem. Soc.* 150(6), B274.
- [45] **G. BINNIG, C. F. QUATE ET C. GERBER.** (1986), "Atomic Force Microscope. *Phys. Rev. Lett.*, 56(9), 930.
- [46] **Y. MARTIN, D. W. ABRAHAM ET H. K. WICKRAMASINGHE.** (1988), "High-resolution capacitance measurement and potentiometry by force microscopy. *Appl. Phys. Lett.*, 52(13), 1103.
- [47] **M. NONNENMACHER, M. P. O'BOYLE ET H. K. WICKRAMASINGHE.** (1991), "Kelvin probe force microscopy. *Appl. Phys. Lett.*, 58(25), 2921.

- [48] **M. NONNENMACHER, M. O'BOYLE ET H. K. WICKRAMASINGHE.** (1992), "Surface investigations with a Kelvin probe force microscope. *Ultramicroscopy*, 42-44(Part 1), 268.
- [49] **H. O. JACOBS, H. F. KNAPP, S. MULLER ET A. STEMMER.** (1997), "Surface potential mapping: A qualitative material contrast in SPM. *Ultramicroscopy*, 69(1), 39.
- [50] **P. SCHMUTZ ET G. S. FRANKEL.** (1998), "Characterization of AA2024-T3 by Scanning Kelvin Probe Force Microscopy. *J. Electrochem. Soc.* 145(7), 2285.
- [51] **S. TRASATTI.** (1974), "The concept of absolute electrode potential an attempt at a calculation. *J. Electroanal. Chem.*, 52(3), 313.
- [52] **S. TRASATTI.** (1990), "The "absolute" electrode potential—the end of the story. *Electrochim. Acta*, 35(1), 269.
- [53] **S. TRASATTI.** (1995), "Surface science and electrochemistry: concepts and problems. *Surf. Sci.* 335, 1.
- [54] **M. STRATMANN ET H. STRECKEL.** (1990), "On the atmospheric corrosion of metals which are covered with thin electrolyte layers—I. Verification of the experimental technique. *Corros. Sci.* 30(6-7), 681.
- [55] **N. BIRBILIS ET R. G. BUCHHEIT.** (2005), "Electrochemical Characteristics of Intermetallic Phases in Aluminum Alloys. *J. Electrochem. Soc.* 152(4), B140.
- [56] **R. G. BUCHHEIT.** (1995), "A Compilation of Corrosion Potentials Reported for Intermetallic Phases in Aluminum Alloys. *J. Electrochem. Soc.* 142(11), 3994.
- [57] **P. LEBLANC ET G. S. FRANKEL.** (2002), "A Study of Corrosion and Pitting Initiation of AA2024-T3 Using Atomic Force Microscopy. *J. Electrochem. Soc.* 149(6), B239.
- [58] **V. GUILLAUMIN, P. SCHMUTZ ET G. S. FRANKEL.** (2001), "Characterization of Corrosion Interfaces by the Scanning Kelvin Probe Force Microscopy Technique. *J. Electrochem. Soc.* 148(5), B163.
- [59] **A. CABRAL, R. DUARTE, M. MONTEMOR, M. ZHELUDKEVICH ET M. FERREIRA.** (2005), "Analytical characterisation and corrosion behaviour of bis-[triethoxysilylpropyl]tetrasulphide pre-treated AA2024-T3. *Corros. Sci.* 47(3), 869.
- [60] **T. H. MUSTER ET A. E. HUGHES.** (2006), "Applications and Limitations of Scanning Kelvin Probe Force Microscopy for the Surface Analysis of Aluminum Alloys. *J. Electrochem. Soc.* 153(11), B474.
- [61] **M. ROHWERDER ET F. TURCU.** (2007), "High-resolution Kelvin probe microscopy in corrosion science: Scanning Kelvin probe force microscopy (SKPFM) versus classical scanning Kelvin probe (SKP). *Electrochim. Acta*, 53(2), 290.
- [62] **Good R.J.** (1976), "On the definition of adhesion. *Journal of Adhesion*, vol. 8, pp 1–9.
- [63] **Shanahan M.E.R.** (1991), "Adhesion and wetting : similarities and differences (physical phenomena). *Rubber World*, 205(1), pp 28–36.
- [64] **Kinloch, A. J.** (1987), "Adhesion and Adhesives. Chapman and Hall.
- [65] **Venables J.D.** 1983. Adhesion and Durability of Metal/Polymer Bonds. *Adhesion*, vol. 7, pp 87–93
- [66] **VOYUTSKII S.S.** (1957), "Rubber Chemical Technology, vol. 30, pp 531.
- [67] **DE GENNES P.G.** (1971), "Reptation of a polymer chain in the presence of fixed obstacles. *Journal of Chemical Physics*, vol. 55, pp 572–579.
- [68] **DERYAGIN B.V. ET KROTOVA N.A.** (1948), "Doklady Akademii NaukSSSR, vol. 61, pp 849.
- [69] **BUCHAN S. ET RAE W.D.** (1946), "Trans. Inst. Rubber. Int., vol. 20, pp 205.
- [70] **BOULOURI H., MACALLISTER J.M.R., PETHRICK R.A., ET AFFROSSMAN S.** (1985), "Study of epoxy resins: sensitivity of a diglycidyl ether to X-Ray electron irradiation. *Applied Surface Science*, vol. 24, pp 18–24.
- [71] **Mario. O.** (2007), "Étude du vieillissement des assemblages structuraux acier/aluminium: Influence de l'environnement sur le dimensionnement. Thèse de Doctorat, Ecole nationale supérieure des mines de paris.
- [72] **Buch X.** (2000), "Dégradation thermique et fluage d'un adhésif structural époxyde Thèse de Doctorat, Ecole nationale supérieure des mines de paris.
- [73] **Joannès S.** (2007), "Caractérisation mécanique et outil d'aide au dimensionnement des collages structuraux. Thèse de Doctorat, Ecole nationale supérieure des mines de paris.
- [74] **Kinloch, A. J.** (1987), "Adhesion and Adhesives. Chapman and Hall.
- [75] **R. D. Adams and W. C. Wake.** (1984), "Structural adhesive joints in engineering. Elsevier Applied Science Publishers, London.
- [76] **Hibbitt, Karlsson & Sorensen**, (2007), "ABAQUS/CAE Ver 6.9 User's Manual.
- [77] **Adams, R., Wake W.** (1984), "Structural adhesive joints in engineering, Elsevier.

- [78] **Davis M., Bond D.** (1999), "Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs, *International Journal of Adhesion and Adhesives* 19 91-105.
- [79] **Goland, Reissner.** (1944), "The stress in cemented joints, *Journal of Applied Mechanics* 11 A17–A27.
- [80] **Hart-Smith L.** (1973), "Adhesive bonded double lap joints, Tech. Rep. CR 112235, NASA.
- [81] **Hart-Smith L.** (1973), "Adhesive bonded single lap joints, Tech. Rep. CR-112236, NASA.
- [82] **Hollaway L., Leeming M.** *Strengthening of reinforced concrete Structures*, Woodhead Publishing Limited, 1999.
- [83] **Kumar A., Hakeem S.** (2000), "Optimum design of symmetric composite patch repair to centre cracked metallic sheet, *Composite Structures* 49 285–292.
- [84] **Xiong, Y., and Raizenne, D.** *Stress and failure analysis of bonded composite-to metal joints*. Tech. rep., Institute for aerospace research, Canada.
- [85] **Kumar, A., and Hakeem, S.** (2000), "Optimum design of symmetric composite patch repair to centre cracked metallic sheet. *Composite Structures* 49 285–292.
- [86] **Maxwell Davis, David Bond.** (1999), "Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 19:91-105.
- [87] Adheria @ la base de données des adhésifs. <http://www.carma-adheria.net/>.
- [88] **S.T. Pinho, C.G. Davila, P.P. Camanho, L. Iannucciet, P. Robinson.** (February 2005), "Failure models and criteria for frp under in-plane or three-dimensional stress states including shear nonlinearity. Rapport technique NASA/TM-2005-213530, Nasa.
- [89] **H. Monternot, D. Bénazet, H. Ancenay.** (1978), "Guide du collage. CETIM.
- [90] **F. Elbing, N. Anagreh, L. Dorn, E. Uhlmann.** (2003), "Dry ice blasting as pretreatment of aluminum surfaces to improve the adhesive strength of aluminum bonding joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 23:69-79.
- [91] **J.D. Bardiset, K.T. Kedward.** (2002), "Surface preparation effects on mode I testing of adhesively bonded composite joints. *Journal of Composites Technology & Research*, 24:30-37.
- [92] **L.J. Hart-Smith.** (1999), "A peel-type durability test coupon to assess interfaces in bonded, cobonded, and co-cured composite. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 19:181-191.
- [93] **K.L. Mittal, Pizzi A.** (1999), "Adhesion Promotion Techniques : Technical Applications. Marcel Dekker.
- [94] **Sandra L. Case, Emmett P. O'Brien, Thomas C. Ward.** (2005), "Cure profiles, crosslink density, residual stresses, and adhesion in a model epoxy. *Polymer*, 46:10831-10840.
- [95] **J.P. Jeandrouet, J. Lemaire** (2006), "le collage le permet aujourd'hui ! In *Les lundis de la mécanique*, 40% d'économie sur vos assemblages : Clermont-Ferrand, Novembre.
- [96] **A. Higgins** (2000), "Adhesive bonding of aircraft structures. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 20:367-376.
- [97] **A. Chukwujekwu Okafor, Hari Bhogapurapu.** *Design and analysis of adhesively bonded thick composite patch repair of corrosion grind-out and cracks on 2024 T3 clad aluminum aging aircraft structures.*
- [98] **M.M. Hall Jr .** *Effect of cyclic crack opening displacement rate on corrosion fatigue crack velocity and fracture mode transitions for Al–Zn–Mg–Cu alloys.*
- [99] **H.P. Seifert, S. Ritter, H.J. Leber.** "Corrosion fatigue initiation and short crack growth behaviour of austenitic stainless steels under light water reactor conditions.
- [100] **M. Fari Bouanani, F. Benyahia, A. Albedah, A. Aid, B. Bachir Bouiadjra, M. Belhouari, T. Achour .** (2013), " Analysis of the adhesive failure in bonded composite repair of aircraft structures using modified damage zone theory *Mat Des* ;50:433–439.
- [101] **T. SUTER ET H. BÖHNI.** (2001), "Microelectrodes for corrosion studies in microsystems. *Electrochim. Acta*, 47(1-2), 191.
- [102] ABAQUS/CAE Ver 6.9 User's Manual. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc; 2007.
- [103] **Ban Chang-Su, Lee Young-Hwan, Choi Jin-Ho, Kweon Jin-Hwe.** (2008), "Strength prediction of adhesive joints using the modified damage zone theory. *Compos Struct*;86:96–100.
- [104] **Ramji M, Srilakshmi R, Bhanu Prakash M.** (2013) "Towards optimization of patch shape on the performance of bonded composite repair using FEM. *Compos B Eng*; 45:710–20.
- [105] **Bachir Bouiadjra B, Fari Bouanani M, Albedah A, Benyahia F, Es-Saheb M.** (2011), "Comparison between rectangular and trapezoidal bonded composite repairs in aircraft structures: a numerical analysis. *Mater Des*; 32:3161–6.
- [106] **C. VARGEL.** (1999), "Corrosion de l'aluminium. Dunod, Paris.
- [107] **E. C. W. Perryman,** (1950), "S. E. Hadden, Relation between the aging and stress-corrosion properties of aluminum-zinc alloys. *Journal of the Institute of Metals*, vol. 77, pp. 207-235.
- [108] **G. Beranger.** (2002), "Corrosion et anticorrosion. Paris : Lavoisier, 297p. ISBN 2-7462-0467-3

-
- [109] **J. E. Hatch**, (1984), "Aluminum: Properties and Physical Metallurgy, Ohio: Metals Park, 319p.
- [110] **R. DEVELAY**. (1992), "Propriétés de l'aluminium et des alliages d'aluminium corroyés. Rapport technique, Techniques de l'Ingénieur, M440.
- [111] **J-P. Baïlon, J-M. Dorlot**. (2000), "Des matériaux, troisième édition, Montréal : Ecole Polytechnique de Montréal, 480 p.
- [112] **M. POURBAIX**. (1963), "Atlas des équilibres électrochimiques. Gauthiers-Villas et Cie Ed., Paris, France.
- [113] **H. DUNLOP ET M. BENMALEK**. (1996), "Role and characterization of surfaces in the aluminium industry. 9^{ème} Entretien du Centre Jacques Cartier, Ecole Polytechnique de Montréal.
- [114] **M. REBOUL ET M. H. B. B. WARNER, T.J.** (1996), "A ten-step mechanism for pitting corrosion of aluminium. *Materials Science Forum*, 1553.
- [115] **M. REBOUL**. (2005), "Corrosion des alliages d'aluminium. Rapport technique, Techniques de l'ingénieur, COR 325.
- [116] **M. R.BAYOUMI**. (1996), "The mechanics and mechanisms of fracture in stress corrosion cracking of aluminium alloys. *Engineering Fracture Mechanics*, 54(6), 879.
- [117] **G. SCAMANS, R. ALANI ET P. SWANN**. (1976), "Pre-exposure embrittlement and stress corrosion failure in Al—Zn—Mg Alloys. *Corros. Sci.*16(7), 443.

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Les alliages d'aluminium et corrosion

Fig. I.1 : Diagramme de Pourbaix du système Al-H₂O à 25°C.

Fig. I.2 : Couches et adsorption sur le film d'oxyde d'aluminium [Dunlop96].

Fig. I.3: Propagation autocatalytique d'une piqûre [Reboul05].

Fig. I.4 : Microcellule électrochimique de Suter et al. [Suter01b], vue générale (a), extrémité du microcapillaire de 100 µm recouverte d'un joint en silicone (b-c).

Fig. I.5 : Cartographie SECM, mécanisme par « feed back » positif ou bloquant (a), micrographie MEB (b) et SECM (c) d'un échantillon d'alliage 2024, 200 µm × 200 µm [Seegmiller03].

Fig. I.6 : Schéma de la sonde intégrant EC-AFM et SECM et micrographie de la pointe de la sonde [Davoodi05].

Fig. I.7 : Corrélations entre le potentiel Volta mesuré à l'air par SKPFM et le potentiel de corrosion mesuré pour différents métaux dans l'eau désionisée (a) et dans la solution de NaCl 0,5 M (b) [Schmutz98a].

CHAPITRE II

Technologie de réparation des structures collées par patchs

Fig. II.1 : Exemple d'un mouillage pour l'ancrage mécanique [6] (a) bon mouillage, (b) mauvais mouillage.

Fig. II.2 : Mécanisme réactionnel entre un adhésif époxyde et un métal [6].

Fig. II.3 : Mouillage : modèle de Young [6].

Fig. II.4 : Goutte d'eau millimétrique sur une surface de polytétrafluoréthylène (PTFE) rugueux [6].

Fig. II.5 : Angle de contact d'une goutte d'eau déposée sur une surface d'Aluminium [6]. (a) Surface non traitée, (b) surface traitée au plasma.

Fig. II.6 : Décomposition du processus de collage suivant les principaux mécanismes d'adhésion mis en jeu [6].

Fig. II.7 : Différents modes de ruptures [21].

Fig. II.8 : Différents modes de sollicitations mécaniques [21].

Fig. II.9 : Défauts typiques d'un assemblage collé [23].

Fig. II.10 : Diverses formes de patchs composites d'après [58].

Fig. II.11 : Répartition des causes de défaillance d'un renfort collé [67].

Fig. II.12 : Qualité du mouillage d'une surface.

CHAPITRE III

Analyse de la réparation des plaques corrodées non fissurées

Fig. III.1: Géométrie de la structure analysée.

Fig. III.2 : Dimensions des patchs (a) elliptique, (b) circulaire, (c) rectangulaire, (d) trapézoïdale.

Fig. III.3 : Maillage de Plaque avec (a) rectangulaire, (b) trapézoïdale, (c) elliptique, (d) circulaire.

Fig. III.4 : Courbe contrainte-déformation de l'adhésif époxy FM 73.

Fig. III.5 : Zone endommagée pour un patch de forme rectangulaire (a) $\sigma=200$ MPa, (b) $\sigma=240$ MPa et (c) $\sigma=300$ MPa.

Fig. III.6 : Rapport de la zone endommagée en fonction de la charge.

Fig. III.7 : zone endommagée pour un patch de forme trapézoïdale. (a) $\sigma=200$ MPa, (b) $\sigma=240$ MPa et (c) $\sigma=300$ MPa.

Fig. III.8 : Rapport de la zone endommagée en fonction de la charge.

Fig. III.9 : zone endommagée pour un patch de forme circulaire. (a) $\sigma=200$ MPa, (b) $\sigma=240$ MPa et (c) $\sigma=300$ MPa.

Fig. III.10 : Rapport de la zone endommagée en fonction de la charge.

Fig. III.11 : Zone endommagée pour un patch de forme ellipsoïdale. (a) $\sigma=200$ MPa, (b) $\sigma=240$ MPa et (c) $\sigma=300$ MPa.

Fig. III.12 : Rapport de la zone endommagée en fonction de la charge.

Fig. III.13. Rapport de la zone endommagée vs charge pour les différentes formes de patch.

Fig. III.14 : Zone endommagée pour un patch de forme rectangulaire. (a) $e_a=0.05$ mm, (b) $e_a=0.2$ mm et (c) $e_a=0.5$ mm.

Fig. III.15 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif.

Fig. III.16 : Zone endommagée pour un patch de forme trapézoïdale. (a) $e_a = 0.05$ mm, (b) $e_a = 0.2$ mm et (c) $e_a = 0.5$ mm.

Fig. III.17 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif.

Fig. III.18 : Zone endommagée pour un patch de forme circulaire. (a) $e_a = 0.05$ mm, (b) $e_a = 0.2$ mm et (c) $e_a = 0.5$ mm.

Fig. III.19 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif.

Fig. III.20 : Zone endommagée pour un patch de forme ellipsoïdale. (a) $e_a = 0.05$ mm, (b) $e_a = 0.2$ mm et (c) $e_a = 0.5$ mm.

Fig. III.21 : Rapport de la zone endommagée vs de l'épaisseur de l'adhésif.

Fig. III.22 : Rapport de la zone endommagée vs l'épaisseur de l'adhésif pour les différentes formes de patch.

Fig. III.23 : Zone endommagée pour un patch de forme rectangulaire. (a) $e_p = 0.5$ mm, (b) $e_p = 2$ mm et (c) $e_p = 5$ mm.

Fig. III.24 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de patch.

Fig. III.25 : Zone endommagée pour un patch de forme trapézoïdale. (a) $e_p = 0.5$ mm, (b) $e_p = 2$ mm et (c) $e_p = 5$ mm.

Fig. III.26. Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de patch.

Fig. III.27. Zone endommagée pour un patch de forme circulaire. (a) $e_p = 0.5$ mm, (b) $e_p = 2$ mm et (c) $e_p = 5$ mm.

Fig. III.28. Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de patch.

Fig. III.29 : Zone endommagée pour un patch de forme ellipsoïdale. (a) $e_p = 0.5$ mm, (b) $e_p = 2$ mm et (c) $e_p = 5$ mm.

Fig. III.30 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de patch.

Fig. III.31 : Rapport de la zone endommagée vs l'épaisseur de patch pour les différentes formes de patch.

Fig. III.32 : Zone endommagée pour un patch de forme rectangulaire. (a) $G_a = 200$ MPa et (b) $G_a = 1400$ MPa.

Fig. III.33 : Rapport de la zone endommagée en fonction de module de cisaillement de l'adhésif.

Fig. III.34 : Zone endommagée pour un patch de forme trapézoïdale. (a) $G_a = 200$ MPa et (b) $G_a = 1400$ MPa.

Fig. III.35 : Rapport de la zone endommagée en fonction de module de cisaillement de l'adhésif.

Fig. III.36 : Zone endommagée pour un patch de forme circulaire. (a) $G_a = 200$ MPa et (b) $G_a = 1400$ MPa.

Fig. III.37 : Rapport de la zone endommagée en fonction de module de cisaillement de l'adhésif.

Fig. III.38 : Zone endommagée pour un patch de forme ellipsoïdale. (a) $G_a = 200$ MPa et (b) $G_a = 1400$ MPa.

Fig. III.39 : Rapport de la zone endommagée en fonction de module de cisaillement de l'adhésif.

Fig. III.40 : Rapport de la zone endommagée vs de module de cisaillement de l'adhésif pour les différentes formes.

CHAPITRE IV

Analyse de la réparation des plaques corrodées avec fissure horizontale (mode I)

Fig. IV.1 : Modèle géométrique de la plaque fissurée, en mode I.

Fig. IV.2 : Représentation du maillage de la plaque et du patch en modes I.

Fig. IV.3 : zone endommagée pour un patch de forme rectangulaire. (a) $\alpha=5$ mm, (b) $\alpha=25$ mm et (c) $\alpha=50$ mm.

Fig. IV.4 : Rapport de la zone endommagée en fonction de la longueur de fissure.

Fig. IV.5 : zone endommagée pour un patch de forme trapézoïdale. (a) $\alpha=5$ mm, (b) $\alpha=25$ mm et (c) $\alpha=50$ mm.

Fig. IV.6 : Rapport de la zone endommagée en fonction de la longueur de fissure.

- Fig. IV.7 :** zone endommagée pour un patch de forme circulaire. (a) $a=5\text{mm}$, (b) $a=25\text{mm}$ et (c) $a=40\text{mm}$.
- Fig. IV.8 :** Rapport de la zone endommagée en fonction de la longueur de fissure.
- Fig. IV.9 :** zone endommagée pour un patch de forme ellipsoïdale. (a) $a=5\text{mm}$, (b) $a=25\text{mm}$ et (c) $a=50\text{mm}$.
- Fig. IV.10 :** Rapport de la zone endommagée en fonction de la longueur de fissure.
- Fig. IV.11 :** Rapport de la zone endommagée vs la longueur de fissure pour les différentes formes de patch.
- Fig. IV.12 :** Variation du FIC en fonction de la longueur de fissure.
- Fig. IV.13 :** Variation du FIC en fonction du rapport de la zone endommagée (D_R).
- Fig. IV.14 :** zone endommagée pour un patch de forme rectangulaire. (a) $\sigma=100\text{MPa}$, (b) $\sigma=200\text{MPa}$ et (c) $\sigma=300\text{MPa}$.
- Fig. IV.15 :** Rapport de la zone endommagée en fonction de la charge appliquée.
- Fig. IV.16 :** zone endommagée pour un patch de forme trapézoïdale. (a) $\sigma=100\text{MPa}$, (b) $\sigma=200\text{MPa}$ et (c) $\sigma=300\text{MPa}$.
- Fig. IV.17 :** Rapport de la zone endommagée en fonction de la charge appliquée.
- Fig. IV.18 :** zone endommagée pour un patch de forme circulaire. (a) $\sigma=100\text{MPa}$, (b) $\sigma=200\text{MPa}$ et (c) $\sigma=300\text{MPa}$.
- Fig. IV.19 :** Rapport de la zone endommagée en fonction de la charge appliquée.
- Fig. IV.20 :** zone endommagée pour un patch de forme ellipsoïdale. (a) $\sigma=100\text{MPa}$, (b) $\sigma=200\text{MPa}$ et (c) $\sigma=300\text{MPa}$.
- Fig. IV.21 :** Rapport de la zone endommagée en fonction de la charge appliquée.
- Fig. IV.22 :** Rapport de la zone endommagée vs la charge appliquée pour les différentes formes de patch.
- Fig. IV.23 :** Variation du FIC en fonction de charge appliquée.
- Fig. IV.24 :** Variation du FIC en fonction du rapport de la zone endommagée (D_R).
- Fig. IV.25 :** zone endommagée pour un patch de forme rectangulaire. (a) $e_a=0.05\text{mm}$, (b) $e_a=0.25\text{mm}$ et (c) $e_a=0.5\text{mm}$.
- Fig. IV.26 :** Variation de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif.
- Fig. IV.27 :** zone endommagée pour un patch de forme trapézoïdale. (a) $e_a=0.05\text{mm}$, (b) $e_a=0.25\text{mm}$ et (c) $e_a=0.5\text{mm}$.
- Fig. IV.28 :** Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif.
- Fig. IV.29 :** zone endommagée pour un patch de forme circulaire. (a) $e_a=0.05\text{mm}$, (b) $e_a=0.25\text{mm}$ et (c) $e_a=0.5\text{mm}$.
- Fig. IV.30 :** Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif.
- Fig. IV.31 :** zone endommagée pour un patch de forme ellipsoïdale. (a) $e_a=0.05\text{mm}$, (b) $e_a=0.25\text{mm}$ et (c) $e_a=0.5\text{mm}$.
- Fig. IV.32 :** Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif.
- Fig. IV.33 :** Rapport de la zone endommagée vs l'épaisseur de l'adhésif pour les différentes formes de patch.
- Fig. IV.34 :** Variation du FIC en fonction de l'épaisseur de l'adhésif.
- Fig. IV.35 :** Variation du FIC en fonction du rapport de la zone endommagée (D_R).
- Fig. IV.36 :** zone endommagée pour un patch de forme rectangulaire. (a) $e_p=0.5\text{mm}$, (b) $e_p=25\text{mm}$ et (c) $e_p=5\text{mm}$.
- Fig. IV.37 :** Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de patch.
- Fig. IV.38 :** zone endommagée pour un patch de forme trapézoïdale. (a) $e_p=0.5\text{mm}$, (b) $e_p=25\text{mm}$ et (c) $e_p=5\text{mm}$.
- Fig. IV.39 :** Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de patch.
- Fig. IV.40 :** zone endommagée pour un patch de forme circulaire. (a) $e_p=0.5\text{mm}$, (b) $e_p=25\text{mm}$ et (c) $e_p=5\text{mm}$.
- Fig. IV.41 :** Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de patch.
- Fig. IV.42 :** zone endommagée pour un patch de forme ellipsoïdale. (a) $e_p=0.5\text{mm}$, (b) $e_p=25\text{mm}$ et (c) $e_p=5\text{mm}$.
- Fig. IV.43 :** Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de patch.
- Fig. IV.44 :** Rapport de la zone endommagée vs l'épaisseur de patch pour les différentes formes de patch.
- Fig. IV.45 :** Variation du FIC en fonction de l'épaisseur de l'adhésif.
- Fig. IV.46 :** Variation du FIC en fonction du rapport de la zone endommagée (D_R).
- Fig. IV.47 :** zone endommagée pour un patch de forme rectangulaire. (a) $G_a=200\text{MPa}$, (b) $G_a=800\text{MPa}$ et (c) $G_a=1400\text{MPa}$.

Fig. IV.48 : Rapport de la zone endommagée en fonction de module de cisaillement de l'adhésif.

Fig. IV.49 : zone endommagée pour un patch de forme trapézoïdale. (a) $G_a = 200\text{MPa}$, (b) $G_a = 800\text{MPa}$ et (c) $G_a = 1400\text{MPa}$.

Fig. IV.50 : Rapport de la zone endommagée en fonction de module de cisaillement de l'adhésif.

Fig. IV.51 : zone endommagée pour un patch de forme circulaire. (a) $G_a = 200\text{MPa}$, (b) $G_a = 800\text{MPa}$ et (c) $G_a = 1400\text{MPa}$.

Fig. IV.52 : Rapport de la zone endommagée en fonction de module de cisaillement de l'adhésif.

Fig. IV.53 : zone endommagée pour un patch de forme ellipsoïdale. (a) $G_a = 200\text{MPa}$, (b) $G_a = 800\text{MPa}$ et (c) $G_a = 1400\text{MPa}$.

Fig. IV.54 : Rapport de la zone endommagée en fonction de module de cisaillement de l'adhésif.

Fig. IV.55 : Rapport de la zone endommagée vs module de cisaillement de l'adhésif pour les différentes formes.

Fig. IV.56 : Variation du FIC en fonction de module de cisaillement de l'adhésif.

Fig. IV.57 : Variation du FIC en fonction du rapport de la zone endommagée (D_R).

CHAPITRE V

Analyse de la réparation des plaques corrodées avec fissure inclinée (mode II)

Fig. V.1 : Modèle géométrique de la plaque avec une fissure inclinée (mode II)

Fig. V.2 : Représentation du maillage de la plaque près de la corrosion et de la fissure inclinée en mode II.

Fig. V.3 : zone endommagée pour un patch de forme rectangulaire. (a) $\theta = 15^\circ$, (b) $\theta = 45^\circ$ et (c) $\theta = 75^\circ$.

Fig. V.4 : Rapport de la zone endommagée en fonction de la l'inclinaison de fissure.

Fig. V.5 : zone endommagée pour un patch de forme trapézoïdale. (a) $\theta = 15^\circ$, (b) $\theta = 45^\circ$ et (c) $\theta = 75^\circ$.

Fig. V.6 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'inclinaison de fissure.

Fig. V.7 : zone endommagée pour un patch de forme circulaire. (a) $\theta = 15^\circ$, (b) $\theta = 45^\circ$ et (c) $\theta = 75^\circ$.

Fig. V.8 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'inclinaison de fissure.

Fig. V.9 : zone endommagée pour un patch de forme ellipsoïdale. (a) $\theta = 15^\circ$, (b) $\theta = 45^\circ$ et (c) $\theta = 75^\circ$.

Fig. V.10 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'inclinaison de fissure.

Fig. V.11 : Rapport de la zone endommagée vs l'inclinaison de fissure pour les différentes formes de patch.

Fig. V.12 : Variation du FIC en mode I d'une fissure inclinée ($a=30\text{mm}$)

Fig. V.13 : Variation du FIC en mode II d'une fissure inclinée ($a=30\text{mm}$.)

Fig. V.14 : zone endommagée pour un patch de forme rectangulaire. (a) $\sigma = 100\text{MPa}$, (b) $\sigma = 200\text{MPa}$ et (c) $\sigma = 300\text{MPa}$.

Fig. V.15 : Rapport de la zone endommagée en fonction de la charge appliquée.

Fig. V.16 : zone endommagée pour un patch de forme trapézoïdale. (a) $\sigma = 100\text{MPa}$, (b) $\sigma = 200\text{MPa}$ et (c) $\sigma = 300\text{MPa}$.

Fig. V.17 : Rapport de la zone endommagée en fonction de la charge appliquée.

Fig. V.18 : zone endommagée pour un patch de forme circulaire. (a) $\sigma = 100\text{MPa}$, (b) $\sigma = 200\text{MPa}$ et (c) $\sigma = 300\text{MPa}$.

Fig. V.19 : Rapport de la zone endommagée en fonction de la charge appliquée.

Fig. V.20 : zone endommagée pour un patch de forme ellipsoïdale. (a) $\sigma = 100\text{MPa}$, (b) $\sigma = 200\text{MPa}$ et (c) $\sigma = 300\text{MPa}$.

Fig. V.21 : Rapport de la zone endommagée en fonction de la charge appliquée.

Fig. V.22 : Rapport de la zone endommagée vs la charge appliquée pour les différentes formes de patch.

Fig. V.23 : Variation du FIC ($K_I + K_{II}$) en fonction de charge appliquée. ($a=30\text{mm}$, $\theta = 30^\circ$)

Fig. V.24 : Variation du FIC ($K_I + K_{II}$) en fonction du rapport de la zone endommagée (D_R).

Fig. V.25 : zone endommagée pour un patch de forme rectangulaire. (a) $e_a = 0.05\text{mm}$, (b) $e_a = 0.25\text{mm}$ et (c) $e_a = 0.5\text{mm}$.

Fig. V.26 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif.

Fig. V.27 : zone endommagée pour un patch de forme trapézoïdale. (a) $e_a = 0.05\text{mm}$, (b) $e_a = 0.25\text{mm}$ et (c) $e_a = 0.5\text{mm}$.

Fig. V.28 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif.

Fig. V.29 : zone endommagée pour un patch de forme circulaire. (a) $e_a = 0.05\text{mm}$, (b) $e_a = 0.25\text{mm}$ et (c) $e_a = 0.5\text{mm}$.

Fig. V.30 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif.

Fig. V.31 : zone endommagée pour un patch de forme ellipsoïdale. (a) $e_a = 0.05\text{mm}$, (b) $e_a = 0.25\text{mm}$ et (c) $e_a = 0.5\text{mm}$.

Fig. V.32 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de l'adhésif.

Fig. V.33 : Rapport de la zone endommagée vs l'épaisseur de l'adhésif pour les différentes formes de patch.

Fig. V.34 : Variation du FIC ($K_I + K_{II}$) en fonction de l'épaisseur de l'adhésif. ($a = 30\text{mm}$, $\theta = 30^\circ$)

Fig. V.35 : Variation du FIC ($K_I + K_{II}$) en fonction du rapport de la zone endommagée (D_R).

Fig. V.36 : zone endommagée pour un patch de forme rectangulaire. (a) $e_p = 0.5\text{mm}$, (b) $e_p = 25\text{mm}$ et (c) $e_p = 5\text{mm}$.

Fig. V.37 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de patch.

Fig. V.38 : zone endommagée pour un patch de forme trapézoïdale. (a) $e_p = 0.5\text{mm}$, (b) $e_p = 25\text{mm}$ et (c) $e_p = 5\text{mm}$.

Fig. V.39 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de patch.

Fig. V.40 : zone endommagée pour un patch de forme circulaire. (a) $e_p = 0.5\text{mm}$, (b) $e_p = 25\text{mm}$ et (c) $e_p = 5\text{mm}$.

Fig. V.41 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de patch.

Fig. V.42 : zone endommagée pour un patch de forme ellipsoïdale. (a) $e_p = 0.5\text{mm}$, (b) $e_p = 25\text{mm}$ et (c) $e_p = 5\text{mm}$.

Fig. V.43 : Rapport de la zone endommagée en fonction de l'épaisseur de patch.

Fig. V.44 : Rapport de la zone endommagée vs l'épaisseur de patch pour les différentes formes de patch.

Fig. V.45 : Variation du FIC ($K_I + K_{II}$) en fonction de l'épaisseur de l'adhésif. ($a = 30\text{mm}$, $\theta = 30^\circ$)

Fig. V.46 : Variation du FIC ($K_I + K_{II}$) en fonction du rapport de la zone endommagée (D_R).

Fig. V.47 : zone endommagée pour un patch de forme rectangulaire. (a) $G_a = 200\text{MPa}$, (b) $G_a = 800\text{MPa}$ et (c) $G_a = 1400\text{MPa}$.

Fig. V.48 : Rapport de la zone endommagée en fonction de module de cisaillement de l'adhésif.

Fig. V.49 : zone endommagée pour un patch de forme trapézoïdale. (a) $G_a = 200\text{MPa}$, (b) $G_a = 800\text{MPa}$ et (c) $G_a = 1400\text{MPa}$.

Fig. V.50 : Rapport de la zone endommagée en fonction de module de cisaillement de l'adhésif.

Fig. V.51 : zone endommagée pour un patch de forme circulaire. (a) $G_a = 200\text{MPa}$, (b) $G_a = 800\text{MPa}$ et (c) $G_a = 1400\text{MPa}$.

Fig. V.52 : Rapport de la zone endommagée en fonction de module de cisaillement de l'adhésif.

Fig. V.53 : zone endommagée pour un patch de forme ellipsoïdale. (a) $G_a = 200\text{MPa}$, (b) $G_a = 800\text{MPa}$ et (c) $G_a = 1400\text{MPa}$.

Fig. V.54 : Rapport de la zone endommagée en fonction de module de cisaillement de l'adhésif.

Fig. V.55 : Rapport de la zone endommagée vs module de cisaillement de l'adhésif pour les différentes formes.

Fig. IV.56 : Variation du FIC ($K_I + K_{II}$) en fonction de module de cisaillement de l'adhésif. ($a = 30\text{mm}$, $\theta = 30^\circ$)

Fig. IV.57 : Variation du FIC ($K_I + K_{II}$) en fonction du rapport de la zone endommagée (D_R).

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Les alliages d'aluminium et corrosion

Tab. I.1 : Désignation des alliages de corroyage [Vargel99].

CHAPITRE II

Technologie de réparation des structures collées par patches

Tab. II.1 : Énergies des différents types de liaisons intermoléculaires.

Tab. II.2 : Énergies de surface pour quelque matériau [84].

CHAPITRE III

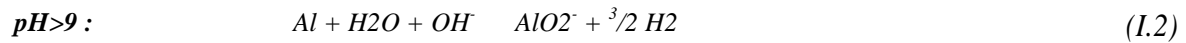
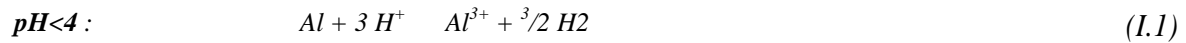
Analyse de la réparation des *plaques corrodées non fissurées*

Tab. III.1. Les propriétés élastiques des différents matériaux.

LISTE DES RELATIONS

CHAPITRE I

Les alliages d'aluminium et corrosion



CHAPITRE II

Technologie de réparation des structures collées par patches

$$SV = SL + LV \cos \alpha \quad (II.1)$$

$$wA = x + y - xy \quad (II.2)$$

CHAPITRE III

Analyse de la réparation des *plaques corrodées non fissurées*

$$G_i = \frac{K_i^2}{E} \quad (III.1)$$

$$v_{equiv} = \frac{1}{\sqrt{2(1+\nu)}} X \sqrt{(v_{p1} - v_{p2})^2 + (v_{p2} - v_{p3})^2 + (v_{p3} - v_{p2})^2} \quad (III.2)$$

$$D_R = \frac{\sum A_i}{l.w} \quad (III.3)$$

$$\dagger = \frac{G_a}{e_a} (u_1 - u_2) \quad (III.4)$$