

RÉPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ DE SIDI BEL ABBES
FACULTÉ DE LA TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GENIE MÉCANIQUE



MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de MAGISTER

Spécialité : Mécanique des matériaux et structures

Option : Mécanique des solides et des structures

Présentée par Monsieur : BACHIR BOUIADJRA BACHIR

***Etude comparative entre les techniques des raidisseurs et des
patches en composites dans la réparation des structures***

Soutenue NOVEMBRE 2012 devant la commission d'examen :

Président :

- Serieur Boualem

professeur UDL de Sidi Bel Abbès

Examineurs :

- Amiri Ahmed

Maître de Conférence (A) UDL de Sidi Bel Abbès

- Kaddouri Kacem

Maître de Conférence (A) UDL de Sidi Bel Abbès

- Madani Kouider

Maître de Conférence (A) UDL de Sidi Bel Abbès

Encadreur :

- Bachir Bouiadjra Bel Abbès

professeur UDL de Sidi Bel Abbès

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REMERCIEMENT

Tout d'abord, on prie dieu de nous avoir donné la force et le courage de terminer nos études.

En premiers lieux nous exprimons nos vifs remerciements et notre sincère reconnaissance à notre encadreur monsieur **Bachir Bouiadjra Bel Abbes** Professeur à l'Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes qui a voulu nous encadrer par sa compétence et son expérience qui nous a aidé à réaliser ce travail.

Nous tenons à remercier les membres du jury d'avoir accepter d'examiner notre travail.

Nos profonds remerciements pour tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur **B.SERIER**, Professeur à l'Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes et directeur de labo de recherche pour ses précieux conseils, son aide et ses encouragements.

Mes remerciements vont aussi à Messieurs **KADDOURI.K** Maître de Conférence à l'Université Djillali Liabes Sidi Bel Abbes.

Mes remerciements vont aussi à Messieurs **MADANI.K** Maître de Conférence à l'Université Djillali Liabes Sidi Bel Abbes.

Mes remerciements vont aussi à Messieurs **AMIRI.A** Maître de Conférence à l'Université Djillali Liabes Sidi Bel Abbes.

Mes remerciements vont aussi à Messieurs **ACHOUR.T** Maître de Conférence à l'Université Djillali Liabes Sidi Bel Abbes.

DIDICACE

Je dédie ce mémoire à:

Mer très chers parents pour leur tendresse, sacrifices,
aides et leur soutien tout au long de mes études.

Et à toute ma famille sans exception.

Ainsi à toute mes amis.

A mon encadreur monsieur Bachir Bouiadjra Bel Abbes
Et enfin à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin
à accomplir ce travail

BACHIR

Thème : étude comparative entre les techniques des raidisseurs et des patches en composites dans la réparation des structures

Résumé :

Dans cette étude la méthode des éléments fini sera utilisée par mener une comparaison entre les deux techniques utilisées pour le renforcement et la réparation des structures aéronautiques : la technique des raidisseurs et celle des patches en composites. Le facteur d'intensité de contraintes en tête de fissures réparées sera calculé pour comparer l'efficacité des deux techniques. La distribution des contraintes dans la couche adhésive sera analysée pour comparer la durabilité des deux techniques de réparation Une étude paramétriques sera réalisée pour analyser les effets des épaisseurs du patch et du raidisseur sur la performance de la réparation.

Mos clé : raidisseur, patch en composite, fissure, facteur d'intensité de contrainte, méthode des éléments finis

Abstract

In this study the finite element method will be used for conducting a comparison between the two techniques for reinforcing and repairing aircraft structures: The techniques of stiffeners and composite patches. The stress intensity factor at the tip of repaired cracks will be calculated to compare the effectiveness of the two techniques. The distribution of the shear stresses in the adhesive layer will be analyzed to compare the durability of the two repair techniques A parametric study will be conducted to analyze the effects of the patch and the stiffener thicknesses on the repair performances.

Key words: stiffener, patch in composite, crack, stress intensity factor, finite element method.

الملخص:

في هذه الدراسة طريقة الأجزاء المنتهية هي التي استعملناها من أجل مقارنة بين التقنيتين المستعملتين من أجل تدعيم و إصلاح الأجسام الجوية: تقنية المدعم و تقنية اللاصقة المركبة.

ثابت تركز الضغوطات في مقدمة التشقق المصلح تم حسابه من أجل مقارنة فعالية التقنيتين. توزع الضغوط على الطبقة اللاصقة حلت من أجل مقارنة صلابة التقنيتين المستعملتين في الإصلاح. وهناك دراسة أخرى في هذا العمل قمنا بتحليل تأثيرات سماكة اللاصقة و المدعم على أداء الإصلاح.

المفاتيح:

المدعم، اللاصقة المركبة، التشقق، ثابت تركز الضغوطات، طريقة الأجزاء المنتهية.

Listes des figures :

Chapitre1 :

Fig. 1.1 - Vue éclatée des différentes portions d'une automobile	7
Fig. 1.2 - Vue éclatée des différentes portions à assembler d'un A330	8
Fig. 1.3 - Vue éclatée de la plate-forme PROTEUS	8
Figure 1-4 : Représentation schématique d'un joint à simple et double recouvrement	10
Figure 1-5 : Vue en coupe d'un assemblage structural	12
Figure 1-6 : Défauts typiques d'un assemblage collé	13
Figure 1.7: Adhésion et cohésion	20
Figure 1.8 : Mouillage des substrats	20
Figure 1.9 : Mouillage des substrats encollés	21
Figure I-10: Représentation des modes de déplacement des surfaces de fissures (a) ouverture (mode I), (b) cisaillement plan (mode II), (c) cisaillement anti-plan (mode III).	28
Figure I.11: Présentation schématique des modes de rupture des joints collés	29

Chapitre2 :

Figure 2-1 : Les zones de champs mécaniques	37
Figure 2-2 : Plasticité en pointe de fissure	37
Fig. 2-3 : Mode de Rupture par Ouverture	38
Fig. 2-4 : Mode de Rupture par Glissement Longitudinal	38
Fig. 2-5 : Mode de Rupture par Glissement Transversal	39
Figure 2.6 : Modes de sollicitation	41
Figure 2.7 : Propagation de la fissure sur une longueur Δa	42

Fig. 2-8 : Définition des Coordonnées (plaque Infinie avec une Fissure – Mode I	44
Fig. 2-9 : Contrainte σ_{yy} ($\theta=0$) perpendiculaire au plan de fissuration	45
Figure 2-10. Contour arbitraire autour de l'extrémité d'une fissure	47
Figure 2-11. Variation d'énergie lors de la propagation	47
Figure 2-12. Solide fissuré	49
Chapitre3 :	
Fig3-1 : Modèle géométrique de la plaque non réparée	53
Fig3-2 : Modèle géométrique de la plaque réparée avec patch en Composite	53
Fig3-3 : Modèle géométrique de la plaque réparée avec un raidisseur en aluminium	54
Fig3-4 : Modèle géométrique d'une plaque avec patch et raidisseur sur la même face	54
Fig3-5 : Modèle géométrique d'une plaque avec patch et raidisseur sur la face opposé	55
Fig3.6 : Maillage de la plaque non renforcée	57
Fig3.7 Maillage de la structure renforcée par raidisseur	58
Fig3.8 : Maillage de la structure réparée par patch en composite	58
Fig3.9 : Maillage de la structure réparée par patch et par raidisseur sur la même face	59
Fig3.10 : Maillage de la structure réparée par patch et par raidisseur placés sur des faces opposées de la plaque	59
Fig3.7 : Comparaison de renforcement par patch et par raidisseur	62
FIG 3.12 : Effet de l'épaisseur du raidisseur	63
FIG 3.13 : Effet de l'épaisseur du patch	64
FIG 3.14 : comparaison entre le renforcement par patch et le renforcement combinée des deux techniques : patch et raidisseur sur les faces opposées	66
FIG 3.15 : comparaison entre la réparation par patch et celle par patch et raidisseur sur la même face	66

FIG 3.16 : comparaison entre la réparation par patch et celle par patch et raidisseur sur les faces opposées **67**

FIG 3-17 : contraintes de cisaillement τ_{xz} dans le cas d'un patch en composite **69**

FIG 3-18 : contraintes de cisaillement τ_{yz} dans le cas d'un patch en composite **70**

FIG 3-19 : Comparaison entre les contraintes de cisaillement de l'adhésif d'une plaque réparée par raidisseur dans le plan (xz) **72**

FIG 3-20 : Comparaison entre les contraintes de cisaillement d'adhésive d'une plaque réparée par raidisseur dans le plan (yz) **72**

FIG 3-21 : Comparaison entre les contraintes de cisaillement d'adhésive en patch d'une plaque réparée par patch avec raidisseur sur la face opposée dans le plan (xz) **73**

FIG 3-22 : Comparaison entre les contraintes de cisaillement de l'adhésif d'une plaque réparée par patch avec raidisseur sur la face opposée dans le plan (yz) **74**

FIG 3-23 : Comparaison entre les contraintes de cisaillement de l'adhésif d'une plaque réparée par patch avec raidisseur sur la face opposée dans le plan (xz) **75**

FIG 3-24 : Comparaison entre les contraintes de cisaillement de l'adhésif d'une plaque réparée par patch avec raidisseur sur la face opposée dans le plan (xz) **75**

Sommaire :

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Mécanique d'adhésion	
1.1 Introduction	3
1.2 Historique sur le collage	5
1.3 Généralités sur les assemblages	7
1.4 Les différents types d'assemblages collés	8
1.5 Avantages du collage structural	10
1.6 Méthodologie associée au collage structural	11
1.7 Différent type du collage	13
a-Colles à séchage par évaporation	15
b-Colles thermoplastique	15
C-Colles contact	15
D-Colles auto-adhésives (PSA)	16
E-Colles polyuréthane	16
F-Colles à base de résine époxy	16
G-Colles anaérobiques	17
H-Colles cyanoacrylates	17
I-colles à base polymères silylés	17
J-colles silicone	18
1.8 Les différents types d'assemblage	18
a- Le collage	18
b- Le soudage	21
c- Le boulonnage	24
d- Le rivetage	25
1.9 Modes de rupture des assemblages collés	27

1.10 Les secteurs d'application du collage	29
1.10.1 Les secteurs d'application traditionnels	29
1.10.1.1 L'emballage	29
1.10.1.2 La construction	29
1.10.1.3 Le transport	30
1.10.1.4 Le bois	30
1.10.2 Les secteurs d'application en développement	30
1.10.2.1 Le secteur du matériel électrique	30
1.10.2.2 Le secteur du matériel électronique	30
1.10.2.3 Le secteur de la chaussure	31
1.10.2.4 Le secteur médical	31
Chapitre 2 : Mécanique de la rupture	
2-1 Historique	32
2-2 Introduction	34
2-3 Etude d'un milieu fissuré	36
2-3-1. La zone d'élaboration	36
2-3-2. La zone singulière	36
2-3-3 La zone des champs lointains	36
2-4 Modes de rupture	37
2-5 Théorie de Griffith	39
2-6 Mécanique de la rupture application aux joints collés	41
2-6-1 Approche énergétique	42
2-6-2 Concept du Facteur d'Intensité des Contraintes	43
2-7 Intégrales de contour	46
2-7-1 L'intégral J	46
2-7-2 Calcul de l'intégral J	48

Chapitre 3 : Etude comparative entre les techniques des raidisseurs et des patches en composites dans la réparation des structures

3.1 Introduction	51
3.2 Présentation des modèles géométriques	51
3.3 Modélisation par élément fini	55
3.3.1 Présentation de logiciel de calcul	55
3.3.2 Modèles en éléments finis utilisés dans le calcul	57
3.4 Résultats et discussions	60
3.4.1 Analyse du facteur d'intensité de contraintes	60
3.4.1.1 Comparaison entre les deux techniques de réparation	60
3.4.1.2 Combinaison des deux techniques	64
3.4.2 Analyse de la distribution des contraintes adhésives	67
Conclusion	76
Conclusion générale	77

Introduction générale

I. Introduction générale :

Les problèmes d'amorçage et de propagation des fissures dans les ailes d'avion constituent une source d'ennuis permanente pour les professionnels du domaine. Les recherches accomplies sur ce terrain visent, dans un premier temps, à tenter de comprendre le phénomène de propagation des fissures pour prédire la durée de vie des structures aéronautiques. Actuellement, de nouvelles techniques sont développées pour réduire la vitesse de propagation de la fissure. La technique la plus répandue est l'assemblage d'une plaque en composite par collage sur la région fissurée qui atténue l'intensité des contraintes en pointe de fissure. Le choix des composites est dû à leur faible densité.

De nombreuses recherches utilisant le « boron-époxy » et le « graphite-époxy » pour réparer les fissures dans les structures aéronautiques primaires ont été menées depuis 1977. La majorité de ces travaux sont basés sur des analyses simples obtenues expérimentalement. Avec le développement rapide de la technologie informatique, la conception des patches en composite a connu un développement considérable permettant de comprendre le comportement des fissures réparées par collage de composites et améliorer ainsi l'efficacité de la réparation.

L'approche scientifique permettant la conception et l'application du collage des composites pour la réparation des fissures et des défauts dans l'industrie aéronautique a débuté, probablement, dans les années "70". Des travaux scientifiques dans ce domaine ont eu lieu dans les laboratoires de recherche aéronautique et maritime à la Royal Australian Air Force (RAAF) sous la direction de Alan Baker. Les Américains ont pris la relève au cours des années "80". Actuellement, plus de 10000 applications sont recensées dans le domaine de l'aviation civile et militaire. En raison de leurs excellentes caractéristiques de transfert d'effort, les renforcements collés ou les pièces attachées par collage (patch) peuvent être utilisés efficacement pour réparer les fissures. A l'inverse,

Introduction générale

la réparation par fixation mécanique de pièces (rivetage ou boulonnage), présente plusieurs inconvénients qui rendent leur application moins efficace.

Le but de ce travail de magister est de comparer les performances des techniques du patch en composite et du raidisseur dans la réparation des structures aéronautiques. La méthode des éléments finis a été utilisée pour réaliser cet objectif. La comparaison est faite sur l'évolution du facteur d'intensité de contraintes en tête de fissure réparée ainsi que sur la distribution des contraintes dans la couche d'adhésif. Le mémoire comprend trois chapitres.

Le mémoire est divisé en trois chapitres : le premier est consacré au comportement des assemblages collés, dans le second chapitre nous avons étalé les principes de base de la mécanique de la rupture et dans le troisième chapitre les résultats obtenus par la méthode des éléments finis ont été présentés et discutés.

Chapitre1 : Mécanique de l'adhésion

1.1 Introduction :

Depuis longtemps, l'homme réalise des assemblages par collage pour créer des objets utilitaires ou décoratifs. Au cours de l'histoire, l'adhésif a subi diverses transformations jusqu'à la conception aujourd'hui de résines synthétiques, qui sont largement employées dans de nombreux processus de fabrication.

Ces résines offrent, entre autres, la possibilité de rassembler des matériaux qui jusqu'alors ne pouvaient pas être collés.

A partir du milieu du vingtième siècle, les avancées dans le domaine des sciences des matériaux et la constante nécessité de disposer de structures plus performantes, plus légères, plus résistantes et plus fiables, ont motivé le développement de nouvelles méthodes d'assemblage structural.

L'assemblage par collage semble être une technique prometteuse avec des avantages comme la réduction du poids, la possibilité d'unir différents matériaux, une bonne résistance à la fatigue, l'atténuation du choc et la facilité de rassembler les formes les plus complexes.

Les collages sont de plus en plus employés dans l'industrie, aussi bien pour les liaisons entre pièces métalliques qu'entre pièces composites.

Les assemblages collés sont parfois plus intéressants que les méthodes classiques car les concentrations de contraintes dues aux trous et aux éléments de liaison, comme rivets et vis, n'y sont pas présentes.

Les tensions sur les extrémités sont aussi réduites car la colle remplit tout l'espace entre les deux éléments rassemblés, ce qui favorise la répartition des efforts.

Dans l'industrie aérospatiale, l'utilisation de plaques de matériaux composites collées à structures métalliques, afin de renforcer ou de réparer ces structures, est déjà reconnue comme une technique efficace.

Dans l'industrie automobile, quatre à cinq kilogrammes de colle interviennent actuellement dans l'assemblage des différents éléments d'une voiture de tourisme et il faut s'attendre à voir croître cette masse de colle.

L'utilisation des adhésifs présente pourtant quelques inconvénients comme la faible résistance à la température et l'absorption de l'eau.

Les composants collés peuvent aussi présenter des défauts qui réduisent la qualité de l'assemblage comme les porosités et les espaces vides.

Une bonne qualité d'adhésion est garantie par les essais avec lesquels on est capable de déterminer les caractéristiques mécaniques de l'assemblage ou bien de détecter les défauts à l'intérieur de la couche de colle.

Il existe deux types d'essais : les premiers provoquent la rupture de l'éprouvette, les deuxièmes sont des contrôles non destructifs.

Les essais destructifs les plus fréquemment utilisés consistent à mesurer la force nécessaire pour faire propager une fissure dans l'interface collée.

Selon le mode de sollicitation, on peut envisager divers types d'essais destructifs.

Les plus utilisés sont les essais DBC (Double Cantilever Beam), ENF (End Notched Flexure) et MMF (Mixte Mode Flexure).

Parmi les tests non destructifs, les principaux mis en œuvre en vue de détecter des défauts de collage sont les méthodes ultrasonores, l'interférométrie holographique et la thermographie infrarouge.

Les mécanismes de l'adhésion, de même que les mécanismes de vieillissement dans les collages, restent encore mal connus. Le manque d'outils numériques fiables et efficaces pour la prédiction de la capacité de charge de ce type d'assemblage limite encore son application.

Pour essayer de comprendre ces mécanismes, il existe beaucoup de modèles qui permettent d'expliquer certains des comportements observés, mais nous sommes encore loin de voir paraître une théorie unifiée de l'adhésion et du collage.

La rupture d'un joint collé est le résultat de l'évolution et de l'interaction de plusieurs processus complexes de dégradation dans la couche de colle.

Ces processus commencent par l'énucléation et l'augmentation de microcavités, qui amènent progressivement à la perte de l'adhésion et au développement de fissures macroscopiques.

La simulation de ces mécanismes de dégradation est analysée à partir de deux approches différentes.

La première est basée sur des méthodes qui utilisent directement la mécanique élastique linéaire de la rupture.

La position et la longueur de la fissure initiale doivent ici être définies.

Dans ce cadre, on part du postulat suivant :

Le matériau est uniformément élastique, même à la tête de la fissure où des tensions infinies sont analytiquement obtenues.

Cette approche n'est jamais complète pour des vrais matériaux dans lesquels il y'a toujours une zone en état de progressif endommagement localisé à la tête de la fissure.

Notamment pour des joints collés, cette zone doit être considérée comme longue, et son influence sur le comportement général de la structure ne peut pas être négligée.

Plus grande est la zone, plus stable est la propagation de la fissure.

La deuxième approche s'appuie sur les formulations basées sur l'endommagement.

Ces méthodes sont très intéressantes pour des calculs pratiques car les efforts de rupture peuvent être obtenus sans utilisation d'un critère de fracture.

En outre, dans une description avec endommagement, le comportement de la fracture est d'une certaine façon contenu dans le modèle constitutif, dans la mesure où un domaine formé par un matériau complètement endommagé constitue une fente.

Les modèles d'interface, qui peuvent être considérés comme une généralisation du concept de fissure fictive de Hillerborg, sont aussi dans cette catégorie.

La principale idée dans les modèles d'interface est que le processus de dégradation, qui apparaît dans les structures formées par assemblage d'éléments individuels, peut être décrit à une échelle intermédiaire :

La méso-échelle. Cette approche, qui a été développée principalement pour la simulation de la dégradation des matériaux composites, considère que la séparation entre les plis se développe à l'intérieur d'une couche mince de matériel fibreux : les interfaces inter-laminaires, largement traitées dans la littérature, sont définies comme des surfaces d'épaisseur nulle, capables d'assurer la continuité des efforts et des déplacements entre les éléments adjacents.

L'introduction de ces composants mésoscopiques permet la simulation effective de l'amorçage et de la propagation de la fissure.

La difficulté, en utilisant ce type de modèle, est justement l'identification des paramètres de l'interface.

Une interface isolée n'existe pas physiquement et ne peut pas être testée.

La réalisation d'essais sur une couche de colle, par exemple, peut donner les caractéristiques physiques de cette colle, mais ces caractéristiques ne sont pas les paramètres utilisés dans un modèle d'interface.

L'interface ne peut pas être décrite en dehors du cadre de l'assemblage étudié.

Les paramètres d'interface sont valables uniquement pour la colle, le matériau et les traitements de surface pour lesquels ils ont été identifiés.

Les essais sur les structures collées sont donc indispensables.

1.2 Historique du collage :

Le collage est l'une des premières techniques d'assemblage d'une structure utilisée par l'homme.

Ce dernier s'est en effet servi très tôt des produits d'origine végétale, animale et minérale tels que la gomme arabique, le latex, les farines de céréales, le goudron etc. pour concevoir de la colle.

Dès la plus haute antiquité, la cire d'abeille fut par exemple utilisée pour les sceaux.

Cette technique permettait de fermer un pli et de graver, par moulage, une signature attestant l'identité de l'expéditeur.

Au début du XX^{ème} siècle, d'autres techniques d'application de colles naturelles se développent comme l'emballage et l'étiquetage.

Jusqu'alors, les industriels restaient toujours dépendants plus ou moins directement des produits naturels.

Cette situation change brutalement avec la fabrication des résines synthétiques et le développement de la chimie des macromolécules.

La notion de colle structurale apparaît dans les années 1940.

Les études entreprises sur les collages caoutchouc-métal et bois-métal et la mise au point des polyuréthanes et des colles phénoliques impulsent le développement des techniques de collage métal-métal.

Ces colles, qui permettent une très grande résistance, commencent à être utilisées dans la construction des avions.

Les résines époxy (permettant d'effectuer des collages sous faible pression) et les polymères silicones (utilisés soit pour coller, soit pour jouer un simple rôle de joints d'étanchéité et/ou de dilatation thermique) sont découverts à la même époque.

C'est après la deuxième guerre mondiale que le collage empirique devient véritablement une science.

Les laboratoires de recherche et de développement commencent à étudier les lois du collage, le vieillissement et la durée de vie des assemblages collés.

Diverses théories et modèles sont proposés pour comprendre les mécanismes du collage, pour déterminer les principaux paramètres actifs ainsi que leurs importances respectives selon les conditions de réalisation de l'assemblage souhaité.

Les domaines d'application sont dès lors de plus en plus vastes, ils ne sont plus cantonnés à l'aérospatial et à l'industrie.

Les médecins et dentistes sont en effet intéressés par ces techniques de collages. Des colles biocompatibles ont été mises au point pour résoudre des problèmes de fixation en chirurgie et en odontologie.

Par exemple, en orthopédie dento-faciale, les verrous sont collés sur la face externes des dents pour modifier la denture en cas de malocclusion et d'esthétisme ingrat.

1.3 Généralités sur les assemblages :

Mis à part les systèmes taillés à partir d'un bloc de matière, la fabrication d'une structure passe généralement par l'assemblage de pièces les unes avec les autres. Ainsi, une structure constituée de pièces différentes, en particulier au niveau de la nature des matériaux utilisés pour les réaliser, est construite par l'assemblage de ces différentes pièces.

Il est naturel de penser que, plus la structure est complexe, plus le nombre de pièces à assembler et nécessaires à la construction de la structure est élevé.

Les trois figures suivantes (Fig. 1.1 à Fig. 1.3) sont des vues éclatées de la structure de systèmes complexes. Le premier exemple (Fig. 1.1) concerne le projet MOSAIC de RENAULT [1] qui vise à fabriquer des automobiles par l'assemblage de pièces en aluminium et en matériau composite. Le second exemple (Fig. 1.2) est une vue éclatée de l'AIRBUS A330. Le troisième exemple (Fig. 1.3) représente une vue éclatée de la plate-forme PROTEUS du satellite COROT [2].

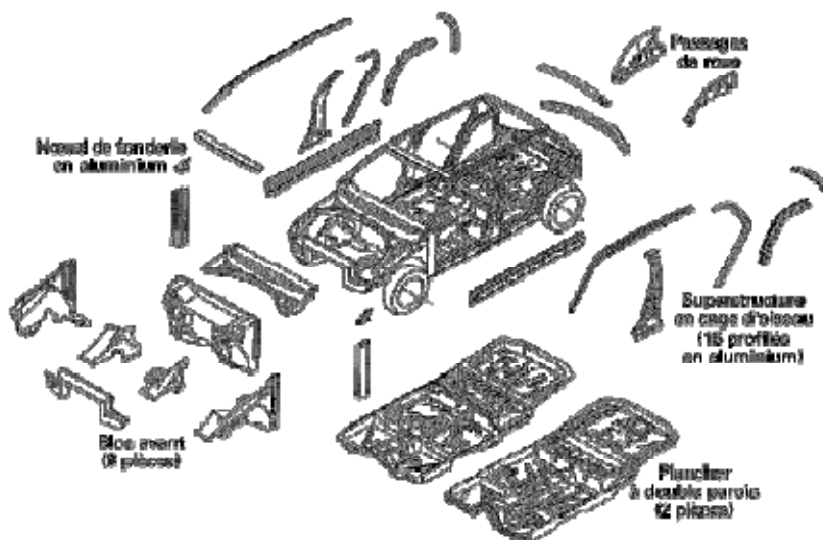


Fig. 1.1 - Vue éclatée des différentes portions d'une automobile

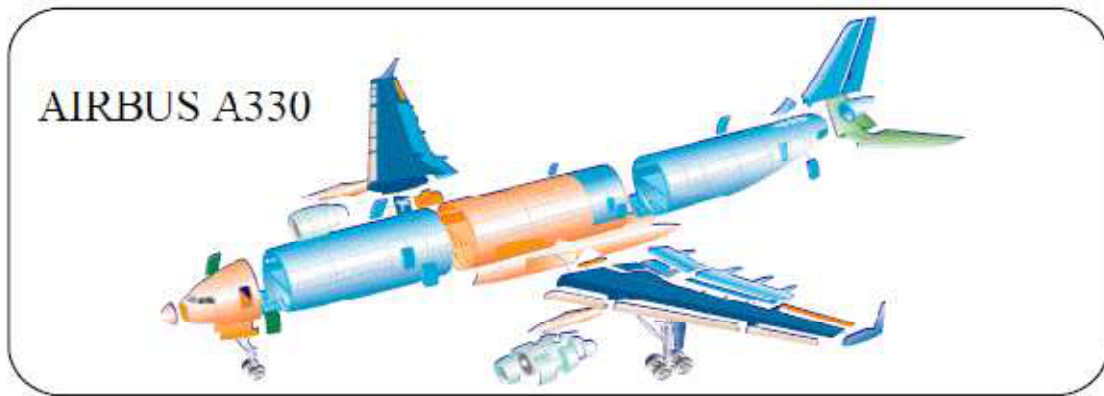


Fig. 1.2 - Vue éclatée des différentes portions à assembler d'un A330

La conception et la réalisation des assemblages sont déterminantes pour la durée de vie. Pour rester dans l'exemple précédent issu de l'industrie aéronautique, nous pouvons noter que ce type d'avion compte près de 300 000 boulons et plus d'un million de rivets [3]. La durée de vie d'un assemblage boulonné sur avion est de l'ordre de 25 ans. La maîtrise de la durée de vie des assemblages est donc prédominante.

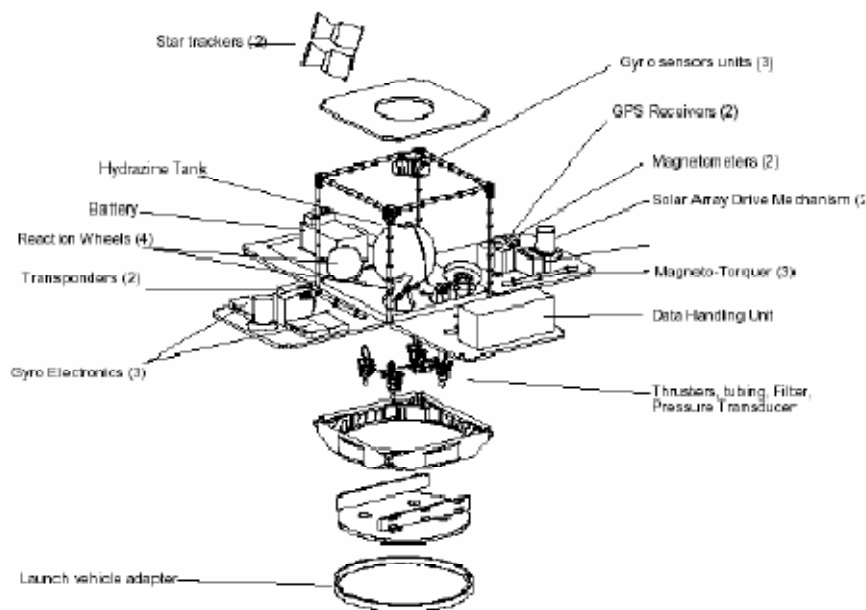


Fig. 1.3 - Vue éclatée de la plate-forme PROTEUS

Au-delà de rendre possible la construction d'une structure, l'assemblage assure la transmission des charges d'une pièce à l'autre, et par conséquent la technique d'assemblage devient un facteur prépondérant. Il existe de nombreux modes d'assemblage (par exemple l'agrafage des boîtes de conserve, les reliures des

livres, le clouage ...) mais de manière générique les trois grandes techniques d'assemblage structural sont le soudage, le collage et le boulonnage. Chacun de ces modes possède ses avantages et ses inconvénients et sera ainsi à adapter aux sollicitations appliquées à la structure et donc aux pièces assemblées, aux fonctions particulières à remplir par les pièces et à la nature même de ces pièces. Par exemple, si les pièces à assembler doivent, au cours de leur vie, pouvoir être démontées, le boulonnage sera plutôt choisi.

Un autre exemple est l'assemblage de deux pièces en matériaux composites pour lequel le collage est répandu.

Par ailleurs, il est possible de combiner entre eux ces différents modes d'assemblage.

1.4 Différents types d'assemblages collés :

Les assemblages collés ont une très grande efficacité. Ils permettent de distribuer les efforts transférés sur une plus grande surface. Nous parlerons alors de mode continu de transfert de charge. Pour les applications aéronautiques qui nous intéressent, ces assemblages collés sont tels que le joint de colle travaille en cisaillement dans son plan. Les divers assemblages collés employés dans le secteur aéronautique peuvent être classés en trois catégories. On retrouve principalement :

- les joints à simple et double recouvrement ("single and double lap joints") (figure 1-4),
- les joints massiques et annulaires en torsion ("torsion butt joint and napkin ring ")
- et les joints massiques sollicités en traction ("butt joints").

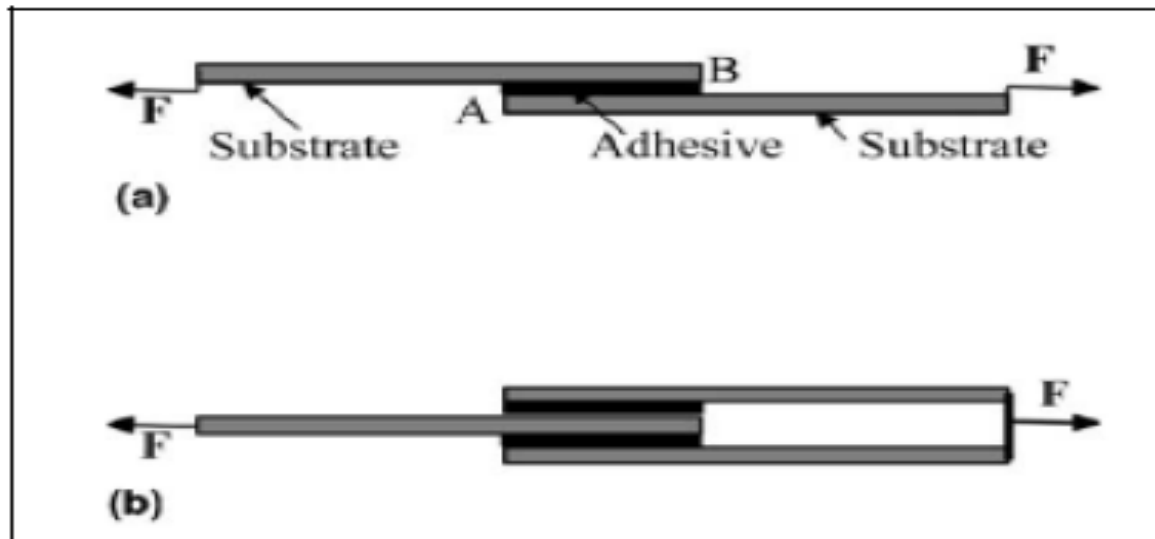


Figure 1-4 : Représentation schématique d'un joint à simple et double recouvrement

Le choix de la géométrie utilisée correspond à un compromis entre la simplicité d'élaboration et le type de sollicitation envisagé.

1.5 Avantages du collage structural :

L'assemblage par collage présente de nombreux avantages par rapport aux techniques traditionnelles employées en aéronautique comme le rivetage ou le soudage. Elle est tout d'abord très rapide à mettre en œuvre, d'autant plus que son application est souvent automatisée. Elle s'adapte lorsqu'il faut assembler des matériaux différents, fragiles ou minces. L'assemblage entre les matériaux est continu ce qui permet de répartir uniformément les efforts et d'éviter les concentrations de contraintes. Il en résulte une résistance mécanique supérieure à celle produite par le rivetage par exemple. Elle ne nécessite pas d'échauffement local important, comme pour le soudage, et ainsi ne modifie pas les propriétés des matériaux à assembler. Le gain de poids est important, les adhésifs absorbent une partie des vibrations et apportent une isolation aussi bien thermique, phonique qu'électrique.

Répartition homogène des contraintes : Les techniques d'assemblage qui font intervenir des connecteurs traditionnels de type rivets, vis, ..., modifient, voire détruisent les substrats et induisent des concentrations de contraintes locales qui

sont préjudiciables à la tenue des pièces dans le temps. L'assemblage par collage forme un joint qui assure généralement une bonne continuité des efforts et une meilleure répartition des contraintes.

Gain de poids : La suppression des pièces d'assemblage traditionnel permet également un abaissement de poids non négligeable. Dans le domaine aéronautique par exemple, les assemblages collés permettent d'alléger de 20% le poids des avions.

Assemblage de matériaux très minces : Il permet d'assembler des matériaux minces, qui ne pourraient pas être assemblés par rivets ou vis par exemple ou des matériaux de natures trop différentes (impossibles à souder) tels que l'aluminium sur le titane, métaux sur les plastiques,

Atténuation des vibrations : Cette méthode d'assemblage a des propriétés antivibratoires donc insonorisantes si l'épaisseur du joint est suffisante (par exemple, collage de raidisseurs de capot et de portes en construction automobile).

Design : du point de vue esthétique, l'assemblage est peu visible et on peut obtenir des pièces à l'aspect lisse, sans surépaisseurs.

1.6 Méthodologie associée au collage structural :

Le collage nécessite toutefois quelques précautions d'utilisation. Tout d'abord, il faut choisir le bon adhésif en fonction de la nature des solides à assembler, des sollicitations auxquelles sera soumis l'assemblage, des conditions et des durées de solidification.

Après s'être assuré que les géométries des solides à unir ne vont pas entraîner la localisation de contraintes qui constitueraient des points de faiblesse, il est nécessaire dans la plupart des cas d'effectuer des traitements de surface préalables des solides à coller afin de permettre ou d'améliorer l'adhésion.

De nombreuses études ont démontré l'intérêt du traitement de surface quant à la tenue mécanique des assemblages [4,5] collés.

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 grandes catégories de traitements de surface les plus couramment utilisés sont :

- l'ablation mécanique telle le sablage ;
- les traitements chimiques et/ou électrochimiques ;
- les dépôts plasma ;
- l'utilisation de primaires d'adhérence.

A l'issue de **l'étape de mise en œuvre**, différents défauts sont susceptibles d'être créés au niveau des différentes zones de l'assemblage (figure 1-5).

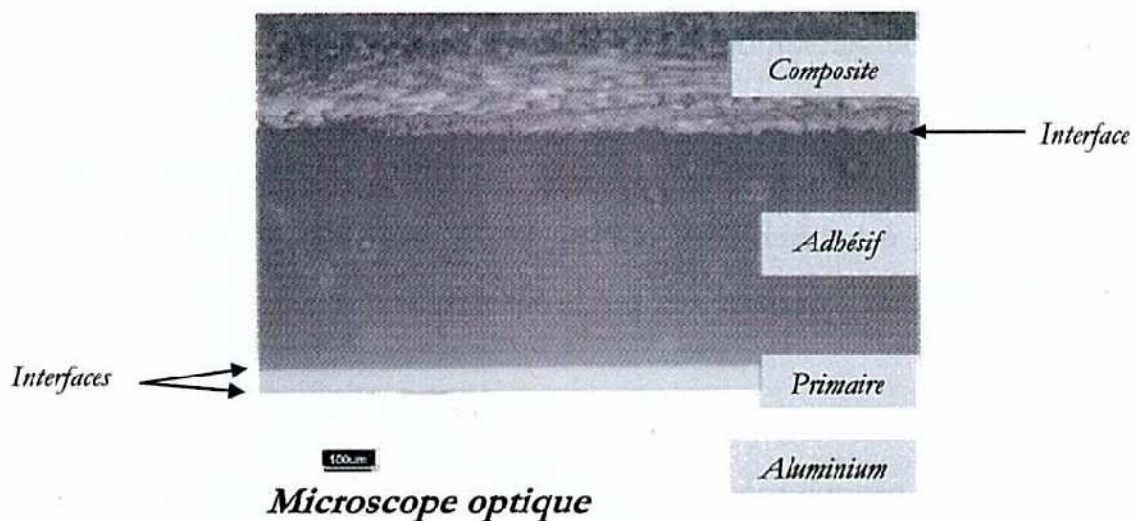


Figure 1-5 : Vue en coupe d'un assemblage structural

La présence de **porosités** au sein du joint résulte du 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.

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. 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.

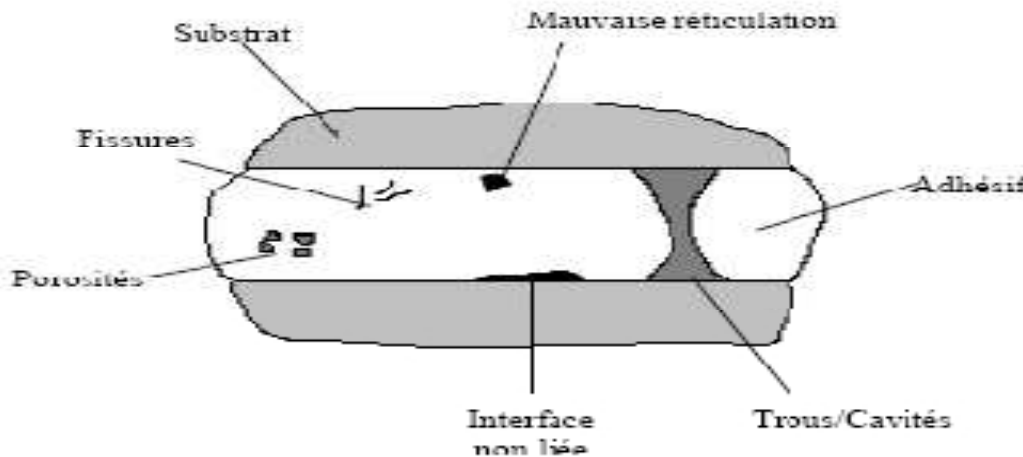


Figure 1-6 : Défauts typiques d'un assemblage collé

Il est évident que ces types de défauts sont des zones privilégiées à la dégradation de l'interface par l'eau ou par l'oxygène. Une grande attention devra donc être portée au protocole associé au collage afin de minimiser au maximum la présence de ces derniers.

L'évaluation des performances d'un assemblage collé après sa mise en œuvre s'effectue soit par des tests mécaniques destructifs, soit par des contrôles non destructifs (CND) qui, du fait de l'intérêt que leur portent les industriels, se développent considérablement. Citons, par exemple, la caractérisation d'assemblages collés par ultrasons [6].

1-7 Différents types de collage :

Il existe une multitude de colles, et la technique du collage n'est pas récente, puisque l'on colle depuis l'antiquité. Depuis les « colles » ancestrales : bitumes, cires etc. jusqu'aux colles les plus modernes : de plus en plus impliquées dans les procédés industriels, le monde du collage est en constante évolution. Il est

possible de classer les colles selon de nombreux critères en fonction par exemple de :

Leur origine : « naturelle » ou « synthétique » ;

Leur usage : colle à bois, colles de freinage ;

Leur composition : vinylique, acrylique ;

Leur méthode de prise.

Nous proposerons une vision plus transversale et simplificatrice :

Une colle sera chaude ou froide, réactive ou non réactive.

La colle sera dite chaude si de manière extemporanée à sa dépose sur le premier support, un conditionnement thermique a permis de l'amener à sa fluidité optimale afin d'assurer un bon pouvoir mouillant gage d'une bonne adhésion.

Il en est ainsi des résines thermo fusibles « Hotmelt» mais aussi des gélatines etc. La colle sera froide si son usage ne réclame pas d'opération de réchauffement particulier pour sa dépose. Etant entendu que toutes les colles correctement conditionnées se conservent et s'utilisent à température ambiante.

Il en est ainsi des colles blanches en solutions ou dispersions, des cyanoacrylates des polyuréthanes etc. La prise de la colle (cohésion) se fait totalement ou partiellement par le biais de réactions chimiques vraies, que l'on nomme réaction de polymérisation et/ou de réticulation. Les interactions entre les molécules de résines sont fortes. La cohésion du joint est élevée. La tenue du collage l'est aussi, l'évolution est le plus souvent irréversible. La prise de la colle se manifeste par le rapprochement des molécules de résine l'une de l'autre, leur interpénétration physique et l'apparition de forces d'attraction faibles. Les interactions entre les molécules de résine sont faibles, la cohésion du joint est faible à modeste, le collage est souvent réversible.

a-Colles à séchage par évaporation :**Technologie utilisée**

Ces colles sont constituées de polymères dissous dans un solvant (Polychloroprène, Polyuréthane) ou dispersés dans l'eau (colle blanche vinylique), (Composition à base d'acétate de polyvinyle, de cellulose, de caséine, d'alcool polyvinylique ou de polyvinylpyrrolidone).

Procédé de collage

Le procédé de collage est obtenu par évaporation de solvant ou d'eau ou par coalescence d'un polymère en dispersion à base d'eau : lorsque l'eau ou le solvant est évaporé, les molécules de polymère se rapprochent de plus en plus jusqu'à former un film de colle continu.

Applications

Selon la composition chimique de la colle, l'adhérence à différents matériaux se fera à un degré plus ou moins important. Ces colles sont généralement utilisées pour des supports à base de cellulose (papier, carton et bois) ou pour des applications ménagères.

b-Colles thermoplastiques :**Technologie utilisée**

Ces colles sans solvant sont fabriquées à base de matériaux thermoplastiques. Un matériau thermoplastique est un polymère qui se liquéfie sous l'effet de la chaleur et qui se solidifie en refroidissant

Procédé de collage

La colle thermoplastique est chauffée et appliquée à l'état liquide à l'aide d'un pistolet à colle ou d'une buse de collage. La prise se fait en quelques secondes par refroidissement.

Applications

Les colles thermoplastiques sont utilisées dans les emballages, la reliure, l'industrie textile et de la chaussure, les meubles, l'automobile et la fabrication de composants électroniques.

c- Colles de contact :**Technologie utilisée**

Ces colles sont constituées de caoutchouc naturel et de polychloropropène (Néoprène).

Procédé de collage

Ces colles doivent être appliquées sur les deux surfaces à joindre. Laisser les sécher un certain temps avant de les appliquer l'une contre l'autre. Une fois les deux surfaces jointes, la prise est très rapide, et il n'est donc généralement pas

nécessaire d'appliquer une pression prolongée. Les serre-joints sont donc inutiles.

Applications

Les colles de contact sont utilisées dans l'industrie du meuble et de la chaussure.

D-Colles auto-adhésives (PSA) :**Technologie utilisée**

Le terme auto-adhésif est couramment utilisé pour désigner une catégorie bien précise de colles à base de matériaux élastomères tels que les copolymères en bloc de styrène qui, à l'état sec, conservent leurs propriétés adhésives à température ambiante ou à basse température.

Procédé de collage

Ces colles forment une zone d'adhérence lorsqu'une pression est appliquée afin de lier la colle au support.

Applications

Les colles auto-adhésives sont conçues pour des applications permanentes ou temporaires et certaines PSA haute performance à application permanente présentent des valeurs d'adhérence élevées. Elles sont utilisées, entre autres, pour les rubans auto-adhésifs, les étiquettes, les bloc-notes, les garnitures d'automobiles.

e- Colles polyuréthane :**Technologie utilisée**

Les colles polyuréthane sont basées sur la chimie des Polyisocyanates et Polyéther / Polyols polyesteriques. Elles existent en structure mono ou bi-composants.

Procédé de collage

Les colles mono composant (PU1K) réagissent à l'humidité de l'air et peuvent être appliquées à température ambiante (PUR) ou à température élevée comme pour les colles thermoplastiques (HMPUR). Les colles bi-composants (PU2K) doivent être mélangées selon des proportions précises avant utilisation.

Applications

Ces colles sont utilisées dans l'assemblage industriel, les emballages souples et le collage des pare-brise.

f- Colles à basse de résine époxy :**Technologie utilisée**

Les colles époxy représentent une part importante dans la catégorie des colles appelées "colles structurelles". Comme pour les colles polyuréthane, elles sont disponibles en structure mono ou bi-composants.

Procédé de collage

Les colles époxy mono-composant doivent être durcies à température élevée alors que les colles époxy bi-composantes offrent une adhérence à température ambiante. Elles peuvent être rendues souples ou rigides, transparentes ou opaques/colorées, à prise rapide ou à prise extrêmement lente.

Applications

Ces colles hautes performance sont utilisées dans diverses applications, comme les transports, les clubs de golf, les skis, les snowboards, ou des applications ménagères nécessitant des zones d'adhésion de forte résistance.

g- colles anaérobiques :**Technologie utilisée**

Les colles anaérobies basées sur la chimie des diacrylates sont des colles mono-composant qui durcissent rapidement pour former une surface d'adhésion résistante entre deux surfaces ne pouvant présenter aucune inclusion d'air.

Procédé de collage

L'oxygène est un inhibiteur pour les colles anaérobies. En présence d'oxygène dans l'air, le produit ne réagit pas et reste à l'état liquide. Les deux conditions suivantes sont nécessaires pour un durcissement correct :

- Contact avec une surface métallique.
- Absence d'oxygène ou d'air.

Applications

Ces colles sont recommandées pour une utilisation sur des surfaces métalliques, pour le freinage d'écrous et de boulons.

h- Colles cyanoacrylates :**Technologie utilisée**

Les colles au cyanoacrylate sont des colles acrylate mono-composant souvent appelées "Super glues".

Procédé de collage

Les colles au cyanoacrylate durcissent instantanément lorsqu'elles sont en contact avec des surfaces de jointement par une réaction avec l'humidité de surface (polymérisation anionique).

Applications

Ces colles sont utilisées dans les colles industrielles et domestiques, dans les colles vétérinaires et dans les applications médicales.

I-colles à base polymères silylés :**Technologie utilisée**

Les mastics et les colles silylés durcissables à l'humidité sont le résultat des développements récents des dernières années. Les colles et les mastics en silane modifié basés sur les SMP (polymère en silane modifié) sont conçus comme des structures mono-composantes.

Procédé de collage

Les colles SMP doivent être appliquées entre 5°C et 30°C et la prise demande 10 à 30 minutes par réaction avec l'humidité de l'air.

Applications

De par leur structure chimique, ces types de polymères offrent une bonne résistance aux intempéries et au vieillissement ainsi qu'une capacité d'adhésion sur quasiment tous les supports, sans avoir recours à des primaires. Ces colles se distinguent surtout dans les cas où des joints de construction élastiques sont nécessaires.

J-colles silicone :**Technologie utilisée**

Les colles au silicone sont basées sur la chimie des poly-siloxanes, ce qui offre une grande souplesse même à des températures peu élevées et qui présentent une bonne résistance à l'humidité et à la température. Elles existent en structure mono ou bi-composants.

Procédé de collage

Les deux types de structure durcissent par polycondensation amorcée par l'humidité pour les structures mono-composant et par réaction d'un ester d'acide silicique avec du poly-siloxanes pour les structures bi-composants.

Applications

Les colles au silicone offrent des joints résistants à l'humidité sur des supports en verre et en céramique et sont, par conséquent, principalement utilisées pour les joints d'étanchéité dans les installations sanitaires.

1-8 Différents types d'assemblages :**a- le collage :**

Une colle est un produit chimique destiné à l'assemblage de deux matériaux. Solide.

Une colle est un produit qui en développant une bonne **adhésion** respectivement sur les deux supports à joindre, reprendra toute sa **cohésion** lorsque sa **prise** sera faite. Telle est la règle pour un bon collage.

On l'applique à l'état fluide sur le ou les matériaux à assembler sur lesquels elle doit donc d'abord accrocher par divers phénomènes physico-chimiques.

Une différence existe entre les termes "adhésion" et "adhérence". En effet, on peut définir l'adhésion comme l'étude des mécanismes qui participent à la formation d'une interface plus ou moins forte et stable entre deux matériaux, alors que l'adhérence est la résistance à rupture de l'assemblage.

Les colles et adhésifs se caractérisent donc par deux éléments essentiels l'adhésion et la cohésion finale.

a.1 L'adhésion

L'adhésion est une liaison interfaciale. Les forces de liaison peuvent être soit d'origines physiques, soit d'origines chimiques. Le phénomène d'adhésion fait intervenir plusieurs facteurs. Les forces rentrant en jeu dans les processus d'adhésion sont multiples et complexes ; elles font d'ailleurs toujours l'objet de recherches.

Retenons :

L'énergie de surface : forces d'interactions faibles intermoléculaires, forces électrostatiques,

La géométrie de la surface au niveau microscopique et macroscopique.

Dans tous les cas, un adhésif ou une colle est un produit :

- qui est, au départ, pâteux ou liquide, ce qui lui permet d'être étalé sur les matériaux à assembler ;

L'adhésif doit alors s'accrocher sur ces matériaux, nécessitant de mouiller correctement les supports) ;

- puis, qui durcit à un moment donné, afin d'assurer une liaison solide, mécaniquement résistante entre les deux matériaux (phénomène de la prise de la colle, ou durcissement, ou séchage, selon le cas).

Par le terme de prise il faut entendre, une fois l'adhésion acquise, l'ensemble des phénomènes qui permettent au joint de colle de développer sa propre cohésion. Si l'adhérence est quasi immédiate : le développement de la cohésion demandera un certain temps : le **temps de prise**. On dit que la colle développe sa cohésion.

a.2 Cohésion de l'adhésif

Ensemble des forces qui s'appliquent à l'intérieur même des matériaux et en assurent la solidité.

Le métal, les plastiques, le papier ont leur propre cohésion.

Celle-ci peut varier en fonction de paramètres externes : températures, pression, humidité.

L'adhésif doit durcir pour faire sa prise. On dit qu'il doit développer sa cohésion, c'est-à-dire mettre en place les forces qui lient les molécules dont il est constitué (figure 1.7).

Ces énergies de liaisons peuvent être variables selon le type de liaisons primaires (chimiques) ou des liaisons secondaires (Van Der Waals).



Figure 1.7: Adhésion et cohésion

a.3 Mouillage

a. 3.1 Définition

Le mouillage se définit par le contact très intime entre la colle et les matériaux à assembler.

Pour que les liaisons puissent se faire, il faut d'abord un contact très rapproché entre la colle et les matériaux. Ce mouillage dépend de la tension superficielle notée γ .

Le concept de mouillabilité est régi par l'équation de Young qui décrit ce qui se passe lorsqu'une goutte de liquide est déposée sur un solide

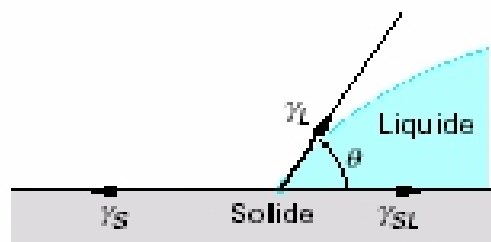


Figure 1.8 : Mouillage des substrats

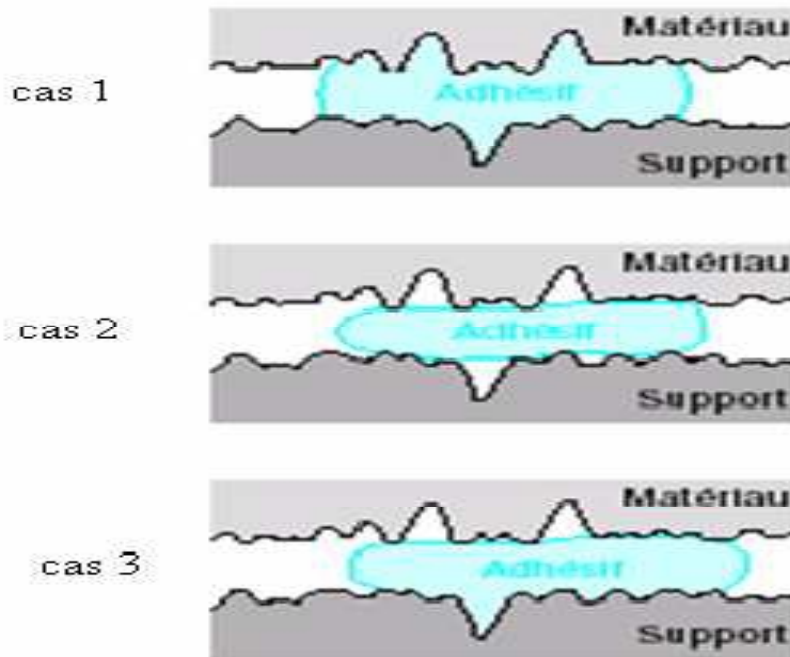


Figure 1.9 : Mouillage des substrats encollés

Chaque liquide mouille plus ou moins un solide donné et on a toujours $\theta > 0^\circ$ et $\theta < 180^\circ$ (Figure 1.8).

La mouillabilité dépend donc à la fois de la nature de la colle et des substrats (Figure 1.9).

b- soudage :

b.1 introduction

La soudure est en théorie le moyen le plus souple et le plus efficace pour réparer ou renforcer un ouvrage. Son utilisation pose cependant des problèmes parfois difficiles à résoudre. En effet, il est rare de trouver un acier ancien dont la soudabilité soit équivalente à celle des aciers modernes ; de plus, les soudures étant réalisées in-situ et en position, l'utilisation de certaines techniques de soudage est exclue. Le soudage relève de la métallurgie. La soudabilité des aciers (des fers puddlés de la fin du XIX^{ème} siècle aux aciers modernes) a évolué considérablement.

Depuis 1950 environ, les sidérurgistes ont basé le développement des aciers en privilégiant leur soudabilité. Avant toute opération, il faut connaître le matériau, sa composition chimique, son élaboration et la façon dont il interagit dans la structure (les efforts qu'il transmet, son niveau de bridage, de sollicitation en fatigue, ...) pour le souder de façon efficace. Cette connaissance est d'autant plus cruciale que les assemblages seront fortement sollicités.

b.2définition

Le soudage est l'opération d'assemblage qui assure la continuité métallique de deux pièces par phénomène de fusion locale.

Les aciers modernes se caractérisent par leur soudabilité : aptitude à être soudé, d'où la nécessité dans le cadre d'une réparation d'ouvrage ancien de s'assurer de la soudabilité des matériaux en présence.

La recommandation R 581/1967 de l'ISO définit ainsi la soudabilité : «On considère qu'un matériau métallique est soudable à un degré donné par un procédé et pour un type d'application donné, lorsqu'il se prête, moyennant les précautions correspondant à ce degré, à la réalisation d'une construction entre les éléments de laquelle il est possible d'assurer la continuité métallique par la constitution de joints soudés qui, par leurs caractéristiques locales et les conséquences globales de leur présence satisfont aux propriétés requises et choisies comme base de jugement. »

> Derrière cette définition typiquement normative, il est possible de distinguer plusieurs définitions de la soudabilité en fonction des paramètres qu'elle fait intervenir :

- La soudabilité métallurgique, qui est fonction du matériau et uniquement de lui, tout autre paramètre étant fixé ;
- La soudabilité opératoire, qui est fonction du matériel et du personnel nécessaire à la réalisation de la soudure ;
- La soudabilité globale, qui fait intervenir le tracé des pièces destinées à la réalisation du joint soudé.

> Dans la notion de soudabilité métallurgique, on peut encore distinguer trois aspects de jugement, qui sont fonction du type de défauts métallurgiques constatés :

■ **fissuration à chaud** : se traduit par la présence de fissures, le plus souvent dans le métal fondu, attribuables à la présence de contraintes importantes au moment où le métal est encore très chaud.

Ces incidents sont facilement décelables par un contrôle correct à la fabrication;

■ **fissuration par «arrachement lamellaire** », conséquence d'une fissuration, se produit dans des plans parallèles à la peau du produit laminé, au droit d'une soudure sollicitant ce matériau dans la direction de l'épaisseur ;

■ **fissuration à froid**, qui apparaît généralement dans le métal de base, est, de loin, le type de défaut le plus redouté dans le soudage des aciers, au point que la notion de soudabilité des aciers est souvent confondue avec leur susceptibilité à ce défaut.

b.3 Les défauts des soudures

> Les défauts des soudures peuvent être nocifs de différentes façons.

Ils peuvent:

- affaiblir la résistance statique de l'assemblage;
- initier une fissure de fatigue;
- provoquer une rupture fragile, si d'autres facteurs défavorables sont réunis.

La nocivité des défauts dépend de leur taille et de leur forme géométrique.

Une forme de défaut est d'autant plus nocive à l'égard de la rupture fragile qu'elle produit un effet d'entaille plus marqué. Il est possible de classer les défauts en cinq groupes suivant la norme NF EN ISO 5817 Classement des défauts dans les soudures par fusion des métaux :

1. Fissures - Elles peuvent être dues à de la fissuration à froid ou à chaud.

Ce sont les défauts les plus nocifs et toute fissure est interdite quelle que soit la classe de qualité de la soudure.

2. Cavités - Il s'agit notamment des soufflures dues à des inclusions gazeuses. Elles sont plus ou moins nocives en elles-mêmes ; elles peuvent aussi gêner la détection d'autres défauts.

Les soufflures débouchantes sont interdites dans les classes de qualité 1 et 2, les autres sont tolérées dans certaines limites.

3. Inclusions solides - Elles peuvent être constituées de résidu de laitier ou de flux emprisonné dans la soudure. Elles ont les mêmes conséquences que les soufflures.

4. Manques de fusion ou de pénétration - Les manques de fusion sont un défaut de liaison entre le métal déposé et le métal de base, ou entre deux couches contiguës de métal déposé.

Les manques de fusion ou de pénétration sont dus à un mode opératoire inadapté.

Comme ils peuvent avoir un effet d'entaille analogue à celui des fissures, ils sont interdits dans les classes de qualité 1 et 2.

5. Défauts de forme - Ils peuvent concerner, soit la position des éléments l'un par rapport à l'autre (défaut d'alignement, défaut angulaire...), soit la soudure elle-même (défaut de raccordement des soudures aux éléments, surépaisseur, manque d'épaisseur, effondrement, caniveau, bombement excessif, dissymétrie d'une soudure d'angle, etc.).

Les défauts de forme des soudures sont dus soit à un mode opératoire inadapté, soit, dans le cas des soudures d'angle, à une mauvaise tenue de l'électrode ou du pistolet par le soudeur.

Les caniveaux sont interdits en classe 1 et limités en classe 2, les manques d'épaisseur sont interdits en classes 1 et 2.

Sur des matériaux anciens, ces défauts peuvent représenter plus de risques que sur les matériaux modernes de meilleure ténacité.

En conséquence, le dessin des pièces devra éviter les effets de bridage et les concentrations de contraintes.

De plus, il sera porté une attention particulière à l'élaboration et au suivi des DMOS (descriptif de mode opératoire de soudage) et QMOS (qualification de mode opératoire de soudage).

C-Boulonnage :**c-1 Généralités**

La construction des ponts à poutres en treillis au XIX^{ème} siècle et début du XX^{ème}, avant le développement de la soudure, a fait appel au mode d'assemblage par rivetage et par boulonnage ordinaire. En France, il subsiste peu d'ouvrages présentant ce type d'assemblage par boulons ordinaires, en revanche de nombreux ouvrages sont encore en exploitation dans les pays constituant les anciennes colonies des pays européens. Ainsi, on rencontre de nombreux ouvrages de type « Pont Pigeaud », par exemple, constitués d'éléments de 2.5 m montés à l'avancement et assemblés par boulons ordinaires.

Des boulons à haute résistance ont été utilisés en France dès les années 1950 pour la réparation et le renforcement de ponts-rails rivés. Leur utilisation s'est étendue ensuite aux ouvrages neufs dans les années 1960.

Sur certains ouvrages, tous les assemblages étaient des assemblages boulonnés ; sur d'autres, les assemblages en atelier étaient soudés, ceux sur chantiers boulonnés.

Quand le soudage s'est généralisé en atelier et sur chantier, l'usage des boulons a été restreint aux assemblages difficiles, par exemple ceux des ponts à poutres triangulées. Puis, ces ponts eux-mêmes ont pu être entièrement soudés, ce qui a diminué encore le champ d'utilisation des boulons.

Dans le cas de grands ouvrages, le boulonnage convient mal à l'assemblage des pièces épaisses et fortement sollicitées : il nécessite un nombre élevé de boulons et n'assure qu'un placage imparfait.

Les assemblages boulonnés, quand ils sont utilisés, servent donc surtout à assembler sur chantier les entretoises ou les pièces de pont aux poutres principales. Le boulonnage est aussi utilisé pour assembler aux tabliers des éléments secondaires (rails de passerelles de visite) et des éléments provisoires (avant-becs de lançage, entretoisements de montage).

Pour certains petits ouvrages, le boulonnage peut permettre d'éviter tout assemblage soudé.

Dans le cadre de réparation d'ouvrages in-situ, la technique du boulonnage est utilisée sur ouvrages anciens en remplacement du rivet ou en cas de difficultés de soudage métallurgique et / ou opératoire.

Dans ce qui suit, on désigne par boulon l'ensemble de l'élément de fixation composé d'une vis à tête hexagonale, d'un écrou hexagonal et de rondelles.

c-2 Pathologie des assemblages boulonnés

> Les principales pathologies des assemblages boulonnés sont :

- Les défauts de pose : principalement liés au mauvais dimensionnement et choix des boulons, longueur de tige insuffisante, non respect des conditions de pose.

- La corrosion peut prendre plusieurs aspects, d'abord en surface par défaut de protection anticorrosion pouvant aller jusqu'à la dégradation des boulons. La corrosion spécifique des écrous sur ouvrages anciens en boulonnage ordinaire est généralement la conséquence de l'utilisation d'aciers resulfurés dans le but d'améliorer l'usinabilité.

- La corrosion entre pièces peut entraîner des efforts de traction sous tête excessif.

- La déconsolidation de boulons ordinaires par suite de serrage insuffisant et/ou de sollicitations répétées excessives se manifeste par le desserrage de boulons qui se propage à l'ensemble des boulons de l'assemblage et engendre le mouvement relatif des pièces et par suite le mauvais transfert des efforts.

- Le glissement des pièces par suite de dépassement de la résistance de l'assemblage sur un assemblage précontraint peut intervenir en conditions extrêmes.

L'assemblage est non réparable partiellement, la reprise de l'ensemble (en l'absence de désordres autres) sera nécessaire par remplacement des couvre-joints, l'élimination de l'ovalisation des perçages des tôles à rabouter et l'utilisation de boulons de diamètre supérieur.

- Ruptures brutales, soit fragiles, soit ductiles sous chargement statique ou sous l'effet de chocs.

- Ruptures progressives de fatigue sous sollicitations d'amplitudes variables.

Les ruptures sous tête ont souvent eu pour cause la fragilisation par l'hydrogène qui avait pour origine la préparation par bain acide du traitement de surface par galvanisation. Ce procédé est maintenant abandonné.

D-Rivetage :

d-1 Généralités

Un **rivet** est un élément d'assemblage définitif. Il se présente sous la forme d'une tige cylindrique, généralement métallique, pleine, qui est munie à l'une de ses extrémités d'une "tête" c'est-à-dire une partie de section plus grande.

L'autre extrémité sera forgée à chaud, de façon à former une tête seconde pour solidariser les éléments à assembler. Cette opération est désignée sous le terme de **rivetage**.

La construction des ponts en arc, à poutres treillis ou âme pleine, au XIX^{ème} siècle et début du XX^{ème}, avant le développement de la soudure, a largement fait appel à ce mode d'assemblage par rivetage.

Le rivetage a constitué le principal mode d'assemblage de pièces métalliques jusqu'au développement de la soudure, qui, avec la technique du boulon à haute résistance, l'ont progressivement remplacé dans les années 1960.

Aujourd'hui, cette technique est réservée au domaine de la réparation des ouvrages métalliques anciens rivés.

Dans ce qui suit, on désigne par rivet l'ensemble de l'élément de fixation composé d'une tige avec sa tête première formée en usine. La tête seconde sera réalisée en atelier ou sur site lors de la réalisation de l'assemblage.

La pose des rivets s'exécute à chaud par forgeage du métal de la tige au moyen d'outils spécifiques (bouterolles, tas...).

> Schématiquement le rivetage s'effectue en 4 phases :

■ Réalisation du trou par perçage, ou poinçonnage avec alésage.

Le perçage au chalumeau est interdit ;

■ Mise en place du rivet à chaud, avec maintien ;

■ Refoulement du métal de la tige ;

■ formation de la tête seconde au moyen d'une bouterolle.

> Le rivetage permet la réalisation de différents modes d'assemblages :

■ Assemblage bout à bout par couvre-joint.

■ Assemblage d'angle par l'intermédiaire de cornières.

■ Assemblage de semelles par superposition.

d.2 Pathologie des assemblages rivés

✓ **défauts de pose**

> Les défauts de pose se détectent par l'examen de la tête seconde sur l'assemblage, ce sont :

■ Tête mal pincée

■ Tête excentrée

■ Gerçure du métal.

■ Tige trop courte : se caractérise par le marquage de la bouterolle autour de la tête de rivet.

■ Tige trop longue : se caractérise par une collerette de métal autour de la tête de rivet.

■ Développement de fissures autour du trou, initiées lors de la réalisation du trou.

✓ **Corrosion**

La corrosion des têtes peut prendre plusieurs aspects en fonction du formage de la tête. Le résultat est la dégradation du métal des têtes avec à court ou moyen terme la déconsolidation de l'assemblage.

✓ **Déconsolidation des rivets et assemblages**

Le desserrage des rivets et assemblages rivés est un phénomène lent de mise en mouvement des pièces les unes par rapport aux autres. C'est surtout un phénomène qui concerne les ponts ferroviaires de conception ancienne et à pose de voie directe (absence de ballast).

> Les déconsolidations sont révélées par :

- La rupture du film de peinture ;
- Un léger ressuage d'oxyde sur la peinture ;
- Le mouvement du rivet ou assemblage ;
- L'ovalisation des trous ;
- La rupture du rivet ou assemblage.

✓ **Rupture des rivets**

> La rupture des rivets peut être la conséquence :

- De phénomène de corrosion ;
- De déconsolidation ;
- De cisaillement sous effet de chocs, ou d'efforts anormaux.

1.9 Modes de rupture des assemblages collés :

De manière générale, la rupture correspond à la séparation de deux corps initialement solidaires. La fissuration est le plus souvent amorcée à partir d'une entaille ou d'un défaut préexistant. Sa vitesse de propagation et son aspect dépendent des propriétés des matériaux, des contraintes internes au système et de celles exercées sur celui-ci par le milieu extérieur (température, forces appliquées, ...), de la géométrie des solides.

Selon IRWIN, les mouvements possibles des lèvres de la fissure sont des combinaisons de trois modes indépendants (Figure I.10) :

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

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

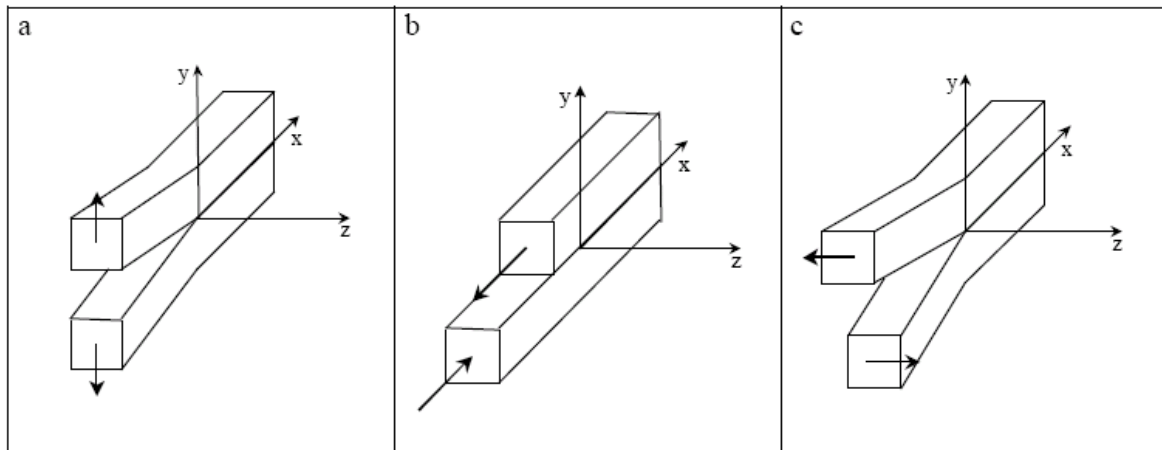


Figure I-10: Représentation des modes de déplacement des surfaces de fissures (a) ouverture (mode I), (b) cisaillement plan (mode II), (c) cisaillement anti-plan (mode III).

Dans le cas des assemblages collés, on peut également distinguer différents modes de rupture en fonction de l'endroit où intervient la fissuration (Figure I-11) :

- la rupture peut être confinée dans l'un des deux substrats ou dans l'adhésif, ce qui signifie que la cohésion d'un de ces matériaux est plus faible que l'adhésion entre constituants. On parle alors de rupture cohésive,
- la rupture peut intervenir à l'interface et on parle alors de rupture adhésive ou Inter faciale.

Cependant, la rupture se fait parfois non pas à l'interface stricto-sensu, mais très proche de celle-ci.

On parle de rupture dans l' « interphase » car la proximité d'une interface peut être synonyme de gradient de propriétés.

- la rupture peut également être *mixte* si elle est cohésive par endroit et adhésive à d'autres.

La localisation précise de la fissure (par microanalyse X des faciès de rupture) est très utile pour identifier précisément le mode de rupture.

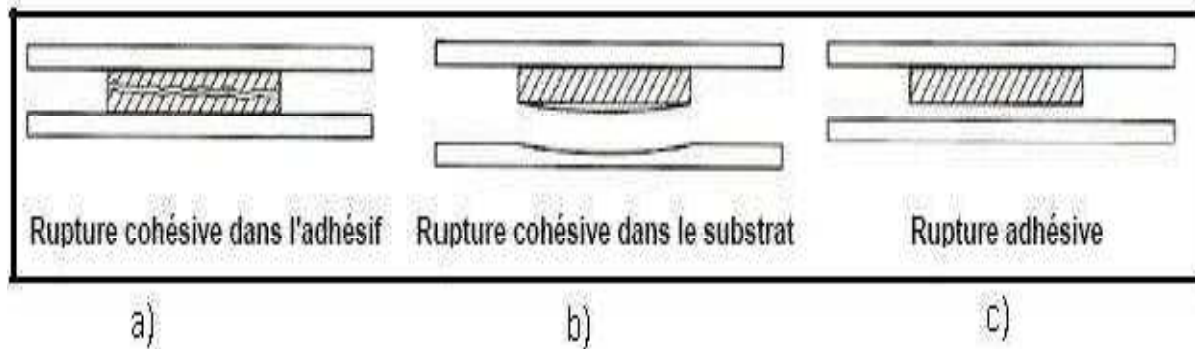


Figure I.11: Présentation schématique des modes de rupture des joints collés [7]

1.10 Secteurs d'application du collage

1.10.1 Secteurs d'application traditionnels

Les principaux secteurs d'application des adhésifs sont l'emballage, la construction et le transport représentant plus des 2/3 des débouchés des adhésifs. Le marché du bricolage, non détaillé dans cette étude, couvre environ 8% du marché mondial par des applications diverses, principalement à usage domestique.

1.10.1.1 L'emballage

Le marché de l'emballage, représentant environ 390 milliards d'euros, repose prioritairement sur l'Amérique du Nord et l'Europe de l'Ouest. Ces deux zones représentent environ 60% du marché mondial.

Au sein de ce marché, le papier et le carton arrivent pratiquement en position équivalente avec respectivement 141 milliards d'euros et 133 milliards d'euros.

Le secteur de l'emballage comprend aussi bien le papier, le carton, le plastique, le métal, le bois et le verre.

L'emballage est le premier débouché des adhésifs, représentant environ de 40% à 45% de la demande mondiale pour environ 8,9 milliards d'euros.

1.10.1.2 La construction

Le secteur de la construction reste globalement au niveau mondial l'une des plus importantes activités, représente environ 10% de l'activité mondiale avec 3 550 milliards d'euros.

Les premières applications sont les revêtements de sols et le papier peint. Toutefois, de nombreuses applications se développent eu égard à la facilité d'utilisation des colles et leur faible coût, dans l'isolation, les évacuations et les joints soudés.

Le secteur de la construction, comprenant toutes les activités professionnelles (hors bricolage), représentent de 15 à 20% de la consommation mondiale d'adhésifs pour 3,6 milliards d'euros.

1.10.1.3 Le transport

Le marché mondial des véhicules représentent environ 55 millions de véhicules, dont 70% sont des voitures particulières.

L'utilisation des adhésifs est souvent liée à l'usage des plastiques mais aussi justifiée par les propriétés de rigidité, d'étanchéité et anti vibratoire. Le secteur des transports est fortement utilisateur d'adhésifs. Il représente environ 10% de la demande mondiale d'adhésifs et 2,1 milliards d'euros.

1.10.1.4 Le bois

Le secteur du bois comprend les planches, le contreplaqué et les panneaux de particules. Le collage est traditionnellement une technologie très présente utilisant des adhésifs peu coûteux le plus souvent à base de solvants du fait de leur emploi facile. Les adhésifs utilisés dans le secteur du bois représentent entre 8 et 10% du marché mondial des adhésifs.

1.10.2 Secteurs d'application en développement

Quatre autres secteurs se démarquent, à savoir le secteur électrique, le secteur électronique, la chaussure et le médical.

1.10.2.1 Le secteur du matériel électrique

Ce secteur a vu le nombre d'application fortement augmenter du fait du besoin d'assembler des matériaux différents. Les adhésifs sont aussi utilisés pour atténuer le son et les vibrations ainsi que pour assurer l'isolation et l'emballage. Entre 2 et 4% des adhésifs mondiaux sont consommés dans ce secteur. Annuellement, ce marché peut être estimé à environ 222 millions de pièces uniquement pour les équipements ménagers, allant depuis le réfrigérateur en passant par la machine à laver et le four à micro-ondes.

1.10.2.2 Le secteur du matériel électronique

Ce secteur est une niche pour les adhésifs, représentant moins de 2% de la demande mondiale d'adhésifs. Le développement des ordinateurs et téléphones portables a conduit à une croissance rapide durant ces dernières années.

1.10.2.3 Le secteur de la chaussure

Le marché de la chaussure représente un secteur fortement consommateur d'adhésifs souples. L'obligation de remplacer les colles solvantes par des colles aqueuses, plus coûteuses et souvent moins performantes sur ces applications, a favorisé les pays à faible coût de main d'œuvre, souvent moins largement dotés en matière de législations contraignantes à cet égard.

1.10.2.4 Le secteur médical

Le développement du collage dans le secteur **médical** repose à la fois sur le développement de nouveaux adhésifs remplaçant le suturage et sur le développement de l'usage des matières plastiques.

Chapitre2 : Mécanique de la rupture

2-1 Historique

Grâce aux progrès réalisés dans le domaine de la mise en forme des métaux durant les trois derniers siècles, le fer et l'acier ont progressivement remplacé le bois et le ciment comme matériaux structuraux de base. Malgré leurs hautes caractéristiques mécaniques, les structures réalisées à partir de ces matériaux ont connu des accidents importants dès le milieu du 19^{ème} siècle.

L'origine de ces accidents était la rupture inattendue de composants critiques de ces structures.

L'un des premiers incidents enregistré sur une structure importante fut la rupture d'une chaîne du pont suspendu Montrose en Mars 1830 en Grande Bretagne. Depuis, il y a eu un nombre important d'effondrements de ponts, dont le King's Bridge à Melbourne (1962) ou encore le Point Pleasant Bridge en Virginie (1967).

Les accidents ferroviaires dus à une rupture brutale des essieux, des roues ou encore des rails ont également été très nombreux. Entre 1860 et 1870, le nombre de personnes victimes d'accidents de train en Grande Bretagne s'élevait à environ deux cents (200) par an.

De nombreux accidents intervinrent également sur des pipelines, des pétroliers, ou encore sur des avions. En 1950, deux (02) avions Comet se sont brisés à haute altitude à cause d'un problème de rupture par fatigue sur les trous des rivets près des hublots, lesquels étaient de forme carrée !

Ces risques d'accidents étaient d'autant plus grands que l'utilisation d'alliages à hautes caractéristiques mécaniques (ténacité, rigidité, ...), permettant la réalisation de structures de plus en plus complexes et sollicitées, a énormément augmenté.

En fait, les estimations de tenue des structures, fondées sur les caractéristiques mécaniques classiques, ne tenaient pas compte de la ténacité des matériaux en conditions réelles de service, et les chercheurs étaient alors incapables d'expliquer le phénomène de rupture brusque sous des sollicitations bien inférieures à celles de la limite d'élasticité.

Si Griffith est souvent cité comme le premier chercheur à avoir introduit la mécanique de la rupture (en tant que science), ces travaux restent basés sur des études antérieures.

On peut notamment citer l'article de Wieghardt, paru en 1907 et récemment traduit en anglais [Wieghardt 1995], dans lequel l'existence de la singularité

du champ des contraintes en pointe de fissure dans un matériau élastique linéaire fut reconnue.

A partir de ces résultats, Griffith [Griffith 1920] s'est intéressé en 1920 au problème de la rupture, dans un milieu élastique fissuré, d'un point de vue énergétique. Il a ainsi mis en évidence une variable (appelée plus tard **taux de restitution d'énergie**) caractérisant la rupture, et dont la valeur critique est une caractéristique du matériau.

Vinrent ensuite les premiers développements théoriques d'analyse des champs de contraintes et de déformations au voisinage d'une fissure en élasticité. Ces études, menées notamment par Sneddon en 1946 [Sneddon 1946], puis Irwin [Irwin 1957] en 1957, ont permis de définir les **facteurs d'intensité de contraintes**, caractérisant l'état de sollicitation de la région dans laquelle la rupture se produit.

Entre 1960 et 1980, la mécanique de la rupture connaît un grand succès scientifique, avec notamment l'apparition de la mécanique non linéaire de la rupture qui a permis de mieux prendre en compte le comportement plastique des matériaux.

De nombreux travaux sont publiés à cette période ; on peut citer par exemple Rice [Rice 1968] et Bui [Bui 1973] qui introduisent la notion d'**intégrales indépendantes du contour** telles que l'intégrale J, dont les propriétés ont permis de caractériser la ténacité d'un matériau lorsque la plasticité n'est plus confinée à la pointe de fissure.

C'est également à cette période que les premiers travaux concernant la mécanique de la rupture dans les matériaux multicouches sont réalisés (Sih(1964), Erdogan (1965) et Comninou (1977)).

Tous les développements théoriques réalisés à cette époque ont permis de déterminer la forme exacte de la singularité, et des champs asymptotiques en pointe de fissure nécessaires à l'analyse et à l'interprétation des résultats expérimentaux. De plus, ils représentent une solution précise à de nombreux problèmes de géométries simples, et peuvent donc être utilisés comme solutions approchées pour des problèmes plus complexes.

L'apparition de la méthode des éléments finis a permis d'étudier la mécanique de la rupture d'un point de vue numérique, proposant ainsi des solutions plus précises à des problèmes plus complexes.

Apparurent alors une multitude de méthodes permettant de calculer les facteurs d'intensité de contraintes, le taux de restitution d'énergie, ou encore de découpler les différents modes de rupture.

Parmi ces nombreuses méthodes, les plus facilement implémentables donnent bien souvent des résultats approchés, ou dépendant du maillage, alors que les autres nécessitent des techniques éléments finis avancées.

Ce chapitre bibliographique a pour but de présenter les méthodes numériques les plus utilisées pour l'analyse mécanique d'une pièce fissurée. La mécanique de la rupture couvrant un domaine extrêmement vaste, nous commencerons par spécifier de façon précise le cadre de l'étude. Puis nous introduirons les notions fondamentales liées aux approches locales et globales en mécanique linéaire de la rupture.

Cela nous amènera à faire un tour d'horizon des différentes méthodes numériques utilisées pour le calcul de grandeurs caractéristiques telles que les facteurs d'intensité de contraintes, ou le taux de restitution d'énergie.

Enfin, nous terminerons cette partie bibliographique par la mécanique non linéaire de la rupture, et l'élastoplasticité.

2-2Introduction :

Toute structure mécanique présente des défauts microscopiques dus aux matériaux utilisés ou à leur procédé de fabrication.

Lors d'une sollicitation mécanique, une concentration de contraintes apparaît au niveau de ces défauts pouvant provoquer l'apparition d'une fissure à l'échelle macroscopique. Ces défauts macroscopiques sont préjudiciables à la stabilité de ces structures à cause des concentrations de contraintes plus importantes à leur voisinage. Ceci est d'autant plus vrai lorsque les fissures commencent à se propager et à atteindre des proportions non négligeables par rapport à l'échelle de la structure.

Cependant, la présence de défauts macroscopiques peut être supportée par la structure sans pour autant lui être fatale tant qu'il n'y a pas propagation.

Savoir différencier les défauts et ce qu'ils pourraient avoir comme conséquences s'est ainsi avéré nécessaire pour éviter d'avoir à remplacer des structures entières alors que celles-ci pourraient être utilisées sans risque malgré la présence de ces défauts.

Afin de pouvoir évaluer ces risques, surveiller et prévoir l'évolution de ces défauts, ainsi que d'appréhender au mieux les problèmes qui leur sont liés, la discipline de la mécanique de la rupture a été créée sur les bases de la mécanique des milieux continus en palliant les manques de celle-ci concernant la prise en compte de défauts.

Plusieurs facteurs environnementaux peuvent avoir une influence sur le risque de rupture, et donc sur la durée de vie des structures.

La température extérieure par exemple influe sur la nature de la fissure. En effet, lorsque la température s'abaisse, les matériaux deviennent cassants, on parle alors de rupture brutale et de comportement fragile. Dans ce cas, la théorie de l'élasticité peut être appliquée malgré l'apparition d'une petite zone plastique proche de la pointe de fissure. Ce caractère fragile existe pour tout solide, mais apparaît à différentes températures selon la nature du matériau.

A l'inverse, pour des températures plus élevées, une plus grande déformation plastique accompagne la rupture, la théorie de l'élasticité ne peut donc plus être utilisée dans ce cas, le comportement en fissuration est alors qualifié de ductile.

Dans le cas des matériaux à comportement fragile, la propagation de fissure est généralement plus préjudiciable et difficilement contrôlable que pour un cas de rupture ductile. En rupture fragile, l'approche qualitative des cas de fissuration négligeant la zone plastique et les éventuelles non-linéarités relève de la mécanique de la rupture linéaire. Cette discipline s'applique ainsi aux structures élastiques soumises à un chargement donné afin de prévoir les risques de rupture et le comportement des fissures macroscopiques.

La mécanique de la rupture est basée sur l'existence d'une discontinuité des champs de contraintes et de déformations dans un matériau. Ce phénomène à l'échelle macroscopique se traduit par la création d'une surface de discontinuité qu'on appelle fissure. Grâce à cette approche, il est alors possible théoriquement de lier les relations de la mécanique traditionnelle des milieux continus (équations d'équilibre, de compatibilité, loi de comportement du matériau, ...) avec les conditions aux limites relatives à la présence géométrique d'une fissure afin d'obtenir les champs de contraintes, déformations et déplacements dans un milieu fissuré.

Cependant, il est souvent difficile, voire impossible, d'obtenir les solutions analytiques permettant de créer ce lien entre relations mécaniques et conditions aux limites engendrées par la présence d'une fissure.

Dans le cas des matériaux fragiles, Inglis fut l'un des premiers à étudier formellement un problème de rupture au début du XX^{ème} siècle [8].

Pour ses travaux, Inglis considéra le cas d'un trou elliptique bidimensionnel inclus dans une plaque élastique soumise à une contrainte nominale σ non-uniformément répartie à l'infini et perpendiculaire au grand axe.

En utilisant la théorie de l'élasticité, il exprima la contrainte maximale (σ_{yy}) max. agissant au sommet du grand axe de l'ellipse dans la direction de σ nom :

$$(\sigma_{yy})_{max} = \sigma_{nom} \left(1 + 2 \left(\frac{a}{R} \right)^{1/2} \right) \quad (2-1)$$

(σ_{yy}) max. est ainsi reliée à la contrainte nominale par la quantité (a/R) , avec (a) représentant la longueur du demi-grand axe de l'ellipse et (R) le rayon de courbure au point considéré.

En notant (b) la longueur du demi-petit axe, (R) devient minimal à cet endroit avec pour valeur (b^2/a) . Si on considère que le trou est circulaire (soit $R=a$), la contrainte maximale (σ_{yy}) max vaut $3\sigma_{nom}$. En revanche, lorsque l'on se place dans le cas d'une fissure (soit $R \rightarrow 0$), la contrainte devient infinie, ceci signifiant qu'un milieu fissuré ne peut supporter aucune charge extérieure.

Afin de lever ce problème de contrainte infinie en pointe de fissure, deux types d'approches ont été utilisées : l'approche énergétique et l'approche locale.

2-3 Etude d'un milieu fissuré :

Dans un **milieu élastique** fissuré, la région proche de la pointe de fissure peut être décomposée en trois zones (figure 2-1) Bouchard [9]:

2-3-1. La **zone d'élaboration** : au voisinage direct de la pointe de fissure, l'étude de cette zone (considérée comme ponctuelle, d'un point de vue mécanique) est très complexe dans la mesure où les contraintes tendent vers l'infini (d'un point de vue théorique) par rapport à la pointe de fissure ;

2-3-2. La **zone singulière** : dans cette zone, le champ de contrainte présente une singularité en $r^{-1/2}$

2-3-3. La **zone des champs lointains** : extérieure aux deux précédentes, elle raccorde la zone singulière aux conditions aux limites de chargement et déplacement.

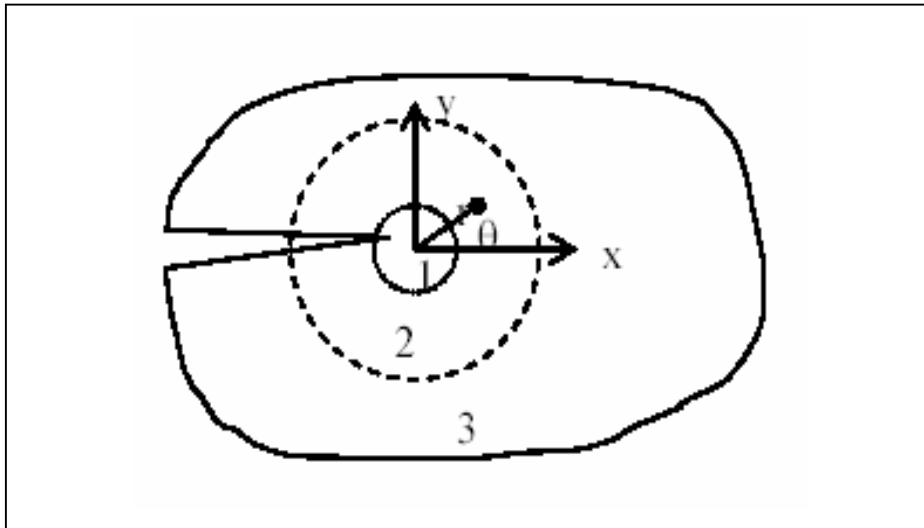


Figure 2-1 : Les zones de champs mécaniques

C'est la singularité d'ordre $-1/2$ dans la zone singulière qui caractérise la solution obtenue en élasticité pure. Cette solution n'est physiquement pas réaliste. En fait, les contraintes en pointe de fissure (figure 2-2) sont «écrêtées» par la plasticité Bouchard [9]. De plus, la signification énergétique de la rupture proposée par Griffith devient plus ambiguë, dans la mesure où elle consiste à représenter la propagation de la fissure comme un déchargement. Or, en plasticité, une partie de l'énergie est dissipée (phénomène irréversible) et on ne peut donc pas toujours évaluer la fraction d'énergie « disponible » pour la propagation

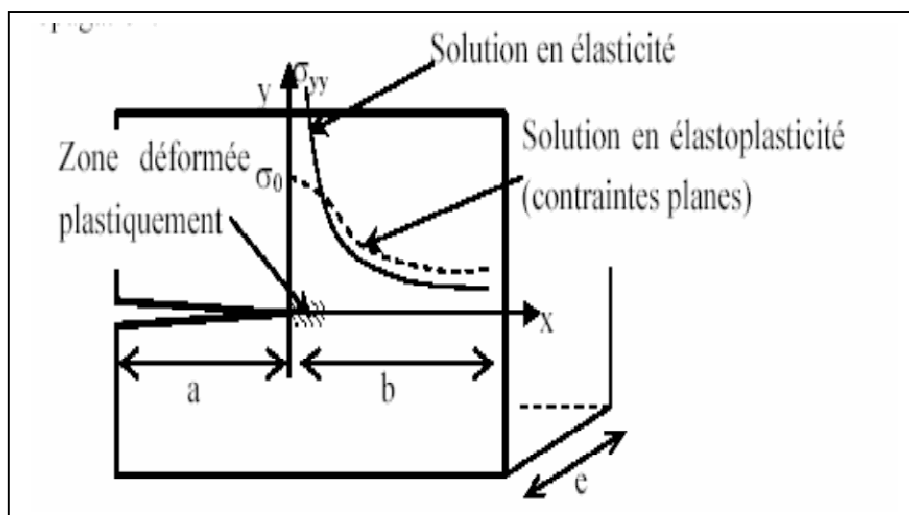


Figure 2-2 : Plasticité en pointe de fissure

2-4 Modes de rupture

Pour décrire les déplacements ou les contraintes dans une fissure, il est

nécessaire de distinguer trois modes, décrivant le mouvement relatif des deux surfaces de la fissure:

Mode I : (ou par ouverture), qui correspond à un écartement relatif des deux surfaces (lèvres) de la fissure par l'ouverture angulaire de cette dernière (figure 2-3);

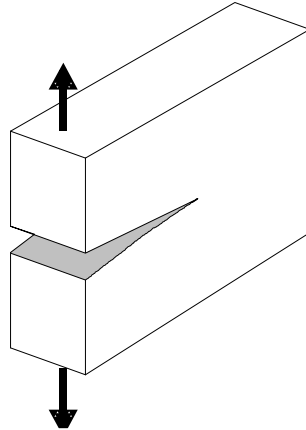


Fig. 2-3 : Mode de Rupture par Ouverture

Mode II : (ou par glissement longitudinal), qui correspond à un déplacement dans le même plan des deux surfaces de la fissure, en sens opposés, dans une direction perpendiculaire au front de la fissure (figure 2-4);

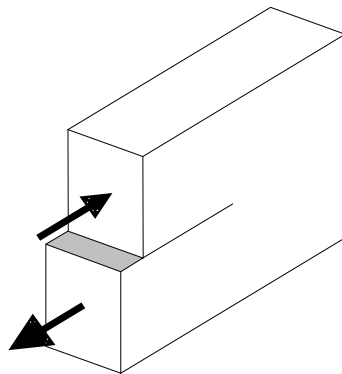


Fig. 2-4 : Mode de Rupture par Glissement Longitudinal

Mode III : (ou par glissement transversal), qui correspond à un déplacement dans le même plan des deux surfaces de la fissure, en sens opposés, mais dans une direction parallèle au front de la fissure (figure 2-5).

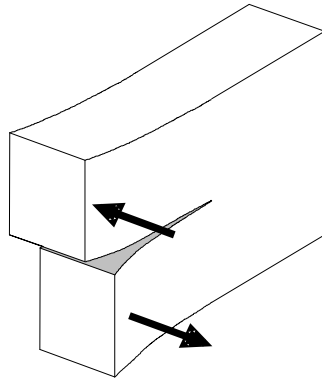


Fig. 2-5 : Mode de Rupture par Glissement Transversal

Le mode I est le mode principal de rupture ; il concerne les cas de chargement les plus importants et les plus dangereux.

2-5 Théorie de Griffith

L'approche énergétique est basée sur un bilan d'énergie globale prenant en compte une énergie de création de surface. Griffith supposa qu'une fissure ne pouvait se propager que si elle recevait une énergie suffisante nécessaire à la création d'une nouvelle surface de rupture [10].

En se plaçant dans le cas d'un matériau fragile idéal, pour un accroissement (da) de la longueur de fissure, Griffith suppose que l'énergie totale (E) ne varie pas, ce qui se traduit par :

$$dE = dW_{\text{pot}} + dW_s = 0 \quad (2 - 2)$$

Avec (W_s) représentant l'énergie de création de surface et (W_{pot}) l'énergie potentielle qui vaut $W_{\text{pot}} = W - W_{\text{ext}}$, avec (W) l'énergie de déformation du milieu et (W_{ext}) le travail des forces extérieures appliquées.

Pour un processus adiabatique, (W) correspond à l'énergie interne qui dépend alors uniquement du tenseur des déformations (ϵ).

En posant une hypothèse de milieu infini, la propagation de fissure n'a pas d'influence sur les conditions aux limites, ce qui signifie que le travail des forces extérieures ne varie pas. Avec cette hypothèse, on se retrouve donc dans un cas où $W_{\text{pot}} = W$. Or, d'après l'équation (2-2), la rupture n'est possible que si la variation d'énergie potentielle due à un accroissement (da) de la fissure est égale à l'énergie de création de surface.

Ainsi, en normalisant les quantités précédentes par rapport à l'unité d'épaisseur pour un milieu bidimensionnel, l'énergie (dWS) s'écrit :

$$dW_s = 2\gamma da \quad (2 - 3)$$

Avec (γ) l'énergie de création pour une surface libre créée, ce qui implique le coefficient 2 afin de prendre en compte les deux surfaces créées lors de l'accroissement de la fissure.

Le paramètre (G), appelé taux de restitution d'énergie, fut ensuite introduit et estimé à partir de l'équation (2-3) :

$$G = -\frac{d}{da} W_{\text{pot}} = 2\gamma \quad (2 - 4)$$

Tant que l'égalité est respectée, on parle de rupture contrôlée ou de croissance stable de la fissure [11].

En se basant sur les travaux d'Inglis sur les défauts elliptiques de longueur, (2a), Griffith put calculer l'énergie de déformation (W) avec l'hypothèse de plaque infinie :

$$W = -\frac{\pi a^2 \sigma_{\text{nom}}^2}{E^*} \quad (2 - 5)$$

Avec $E^* = E / (1-\nu^2)$ en déformations planes et $E^* = E$ en contraintes planes Griffith conduisit ensuite des expériences sur des barres de verres qu'il supposa porteuses de nombreuses microfissures assimilées à des entailles elliptiques.

A partir de cela, il introduisit deux critères de rupture (σ_r) [12]. Le premier d'entre eux fut un critère considérant que la rupture se produit lorsque la contrainte maximale de tension au voisinage de l'entaille est égale à la contrainte de cohésion du matériau. En utilisant les équations (2-1) et (2-2), il établit le critère de rupture suivant :

$$\sigma_r = \left(\frac{E\gamma\rho}{4ab_0} \right)^{1/2} \quad (2 - 6)$$

Avec (b_0) la distance interatomique et $\rho = b^2 / a$ petit devant (a).

Avec cette expression, (σ_r) tend vers 0 lorsque (ρ) tend vers 0, ce qui n'est pas concevable physiquement.

Face à ce problème, Griffith élaborait un second critère en considérant que la rupture se produit lorsque la variation d'énergie de déformation élastique due à un accroissement de longueur ($d2a$) est égale à la variation d'énergie de surface due à la variation de surface ($2d2a$).

Ainsi, à partir des équations (2-2), (2-3) et (2-4), il put établir ce nouveau critère :

$$\sigma_r = \left(\frac{2E^* \gamma}{\pi a} \right)^{1/2} \quad (2 - 7)$$

Ce critère de rupture a été vérifié pour des matériaux parfaitement élastiques comme le verre et a fait l'objet d'études complémentaires afin d'apporter un terme correctif permettant son utilisation dans des cas ductiles [13].

2-6 Mécanique de la rupture application aux joints collés :

On peut définir la rupture par la séparation de deux corps initialement solidaires, ou la séparation de parties d'un corps formant initialement une seule entité. Elle est généralement amorcée à partir d'une entaille ou d'un défaut [14]. Sa vitesse de propagation dans le système et son aspect dépendent des matériaux, des contraintes internes au système et de celles exercées sur celui-ci par le milieu environnant (température, forces appliquées, ...) et de la géométrie des solides. Les liaisons existant entre les deux parties qui se séparent se brisent les unes après les autres, on parle de fissuration. L'énergie dépensée pour amorcer une fissuration dans un corps est appelée «énergie de cohésion». Dans le cas de la séparation de deux corps distincts, on parle d'«énergie de décohésion inter faciale» ou d'énergie d'adhésion. Il existe trois modes de fissurations illustrés sur la figure 2.6.

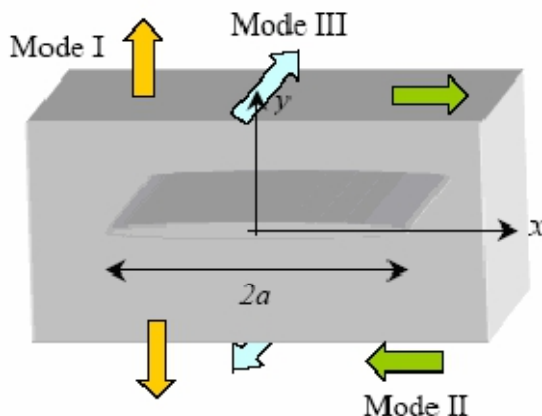


Figure 2.6 : Modes de sollicitation [14].

On traite brièvement quelques éléments de la mécanique de la rupture et des tests mécaniques normalisés pour qualifier le fonctionnement structural du collage.

2-6-1 Approche énergétique :

Cette approche consiste à faire un bilan énergétique global dans le système afin de définir des critères de rupture.

Soit un matériau contenant une fissure de longueur a (Figure 2.7). Une extension Δa de cette fissure s'accompagne des variations d'énergie suivantes :

$$\Delta W_{\text{ext}} = \Delta W_{\text{elast}} + \Delta U \quad (2-8)$$

ΔW_{ext} : Variation d'énergie appliquée (due aux forces extérieures),

Avec :

ΔW_{elast} : Variation d'énergie élastique (emmagasinée), ΔU : Energie dépensée lors de la propagation de la fissure sur la longueur Δa .

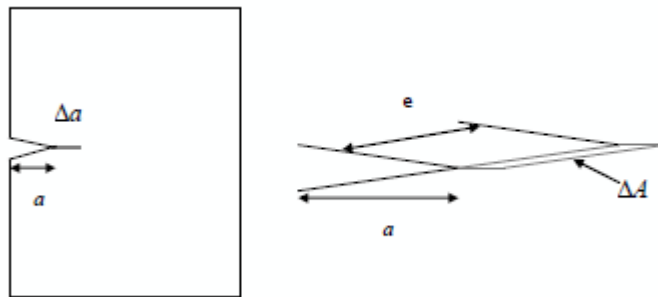


Figure 2.7 : Propagation de la fissure sur une longueur Δa [14]

Dans la théorie initiale de Griffith s'appliquant à une rupture fragile, l'énergie ΔU correspond à l'énergie nécessaire pour créer de nouvelles surfaces dans le matériau ($\Delta U = W_{\text{sep}}$ avec ΔW_{sep} l'énergie de séparation des surfaces). L'énergie de Griffith G est rapportée à l'unité de surface ; elle est définie à partir de ΔU par

$$G = \lim \frac{\Delta U}{\Delta A} = \frac{\delta U}{\delta A} \quad (2 - 9)$$

Où $\Delta A = e \Delta a$ est la surface fissurée lors de la propagation de la fissure sur la longueur Δa dans une éprouvette d'épaisseur e (épaisseur unitaire).

$$G = \lim \frac{\Delta U}{\Delta a} = \frac{\delta U}{\delta a} \quad (2 - 10)$$

Si on considère γ_s l'énergie spécifique de création de surface, on a :

$$G = \frac{\delta U}{\delta A} = 2\gamma_s \quad (2 - 11)$$

Cela amène à la déduction d'un critère énergétique de la propagation de fissure :

Critère de Griffith :

$$\left\{ \begin{array}{l} G < 2 \gamma_s \implies \text{l'arrêt de fissure.} \\ G \geq 2 \gamma_s \implies \text{propagation de fissure} \end{array} \right.$$

2-6-2 Concept du Facteur d'Intensité des Contraintes :

La description du champ de contrainte au front d'une fissure peut être effectuée par un paramètre nommé le Facteur d'Intensité de Contraintes (FIC). La forme générale du champ de ces contraintes dans une structure dont le comportement est reconnu être linéairement élastique est sous la forme :

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + \sum_{m=0}^{\infty} \alpha_m r^{m/2} g_{ij}^{(m)}(\theta) \quad (2 - 12)$$

Les coordonnées polaires (r,θ) sont repérées par rapport au front de la fissure (figure 2-8).

Les fonctions adimensionnelles f_{ij} et g_{ij} dépendent du mode de sollicitation, en plus g_{ij} dépend de l'état de contrainte et de la géométrie de la structure fissurée. Les contraintes présentent une singularité en $1/\sqrt{r}$, d'où les autres termes d'ordre plus élevé sont négligeables.

La zone la plus critique est donc le voisinage immédiat du front de la fissure et on ne considère alors que les termes en $1/\sqrt{r}$. les champs de contraintes asymptotiques sont de la forme :

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (2 - 12)$$

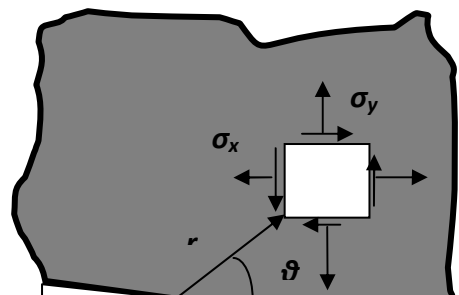
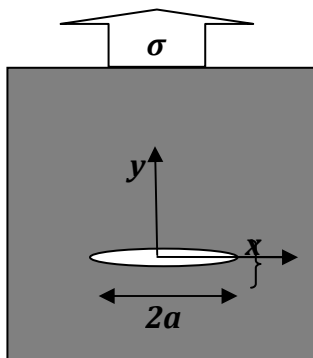


Fig. 2-8 : Définition des Coordonnées (plaque Infinie avec une Fissure – Mode I)

Ces champs peuvent être décrits à l'aide de l'approche de Westergaard.

Selon le mode de sollicitation (Mode I, Mode II ou Mode III), ces champs s'expriment comme suit :

Mode I :

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2 - 13)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2 - 14)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (2 - 15)$$

Mode II :

$$\sigma_{xx} = -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2 - 16)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (2 - 17)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2 - 18)$$

Mode III :

$$\sigma_{12} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \quad (2-19)$$

$$\sigma_{23} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \quad (2-20)$$

Lorsque $\theta=0$; on se place alors dans le plan de la fissure et si on ne considère que le Mode I seulement, alors :

$$\sigma_{xx}(\theta = 0) = \sigma_{yy}(\theta = 0) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (2-21)$$

Le plan (x,y) est donc principal pour le Mode I. la figure 2-9 est une représentation schématique de la variation de $\sigma_{yy}(\theta = 0)$.

La figure 2-9, illustre la zone où la singularité domine. Au-delà de cette zone, on retrouve les conditions limites loin de la zone fissurée et la contrainte σ_{yy} tend alors progressivement vers la contrainte appliquée.

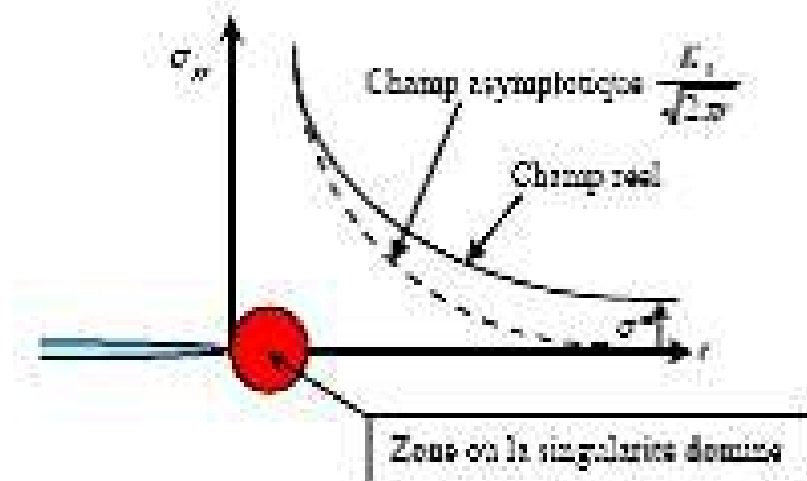


Fig. 2-9 : Contrainte σ_{yy} ($\theta=0$) perpendiculaire au plan de fissuration

Le facteur d'intensité des contraintes (FIC) K_I définit l'amplitude de la zone de singularité. Les contraintes de cette zone augmentent proportionnellement à K_I qui caractérise alors complètement les conditions à l'extrémité de la fissure.

Si K_I est connu, on peut déterminer le champ des contraintes, des déformations et des déplacements en fonction des coordonnées (r,θ) . D'où

le facteur d'intensité des contraintes (FIC) est l'un des concepts les plus importants de la mécanique de la rupture [15].

2-7 Intégrales de contour

La singularité du champ des contraintes au voisinage de la pointe d'une fissure peut également être étudiée grâce à certaines intégrales de contour, déduites de la loi de conservation de l'énergie [9].

Ces intégrales ont la particularité d'être équivalentes au taux de restitution d'énergie et indépendants du contour d'intégration choisi. Parmi les plus connues, on peut citer l'intégrale J de Rice [9].

L'intégrale duale I de Bui [11]. L'intégrale hybride s'appuyant sur le super élément de Tong et Pian (Bouchard [9]). Ou encore les intégrales T et A proposés par Bui et Proix [9] et mises en œuvre et étudiés par Zhang [9].

Pour l'**intégrale de Rice**, on considère un milieu bidimensionnel fissuré, dont la fissure sera supposée rectiligne. Le contour C est un contour ouvert orienté dont les extrémités se trouvent sur les faces supérieure et inférieure de la fissure.

2-7-1 L'intégrale J

Rice (1968) présente une intégrale de contour, le long d'un chemin qui entoure les lèvres de la fissure, permettant d'évaluer l'effort de propagation de la fissure (figure 2-10). Il montra que la valeur de cette intégrale est égale au taux de restitution d'énergie non linéaire.

Cette intégrale se définit par :

$$J = \int_{\Gamma} (\mathbf{w} dy - \mathbf{T}_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds) \quad (2 - 22)$$

Où : $\mathbf{w} = \int s_{ij} d\mathbf{e}_{ij}$ densité d'énergie de déformation, $T_i = s_{ij} n_j$ composantes du vecteur contrainte et u_j vecteur déplacement induit par le chargement

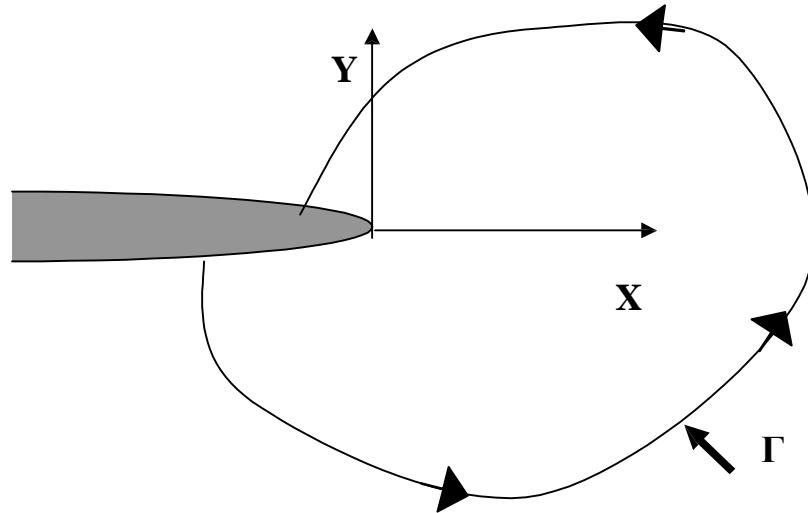


Figure 2-10. Contour arbitraire autour de l'extrémité d'une fissure

La figure 2-11 représente la variation d'énergie lors de la propagation de la fissure pour un déplacement imposé

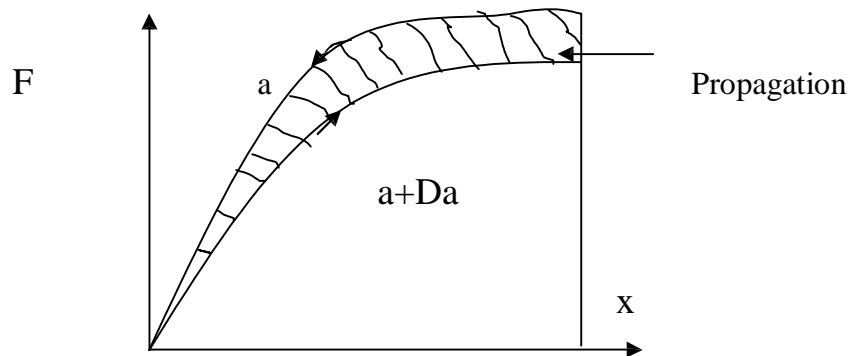


Figure 2-11. Variation d'énergie lors de la propagation

Hutchinson, Rice et Rosengren ont opté pour l'intégrale J pour caractériser les champs de contraintes et déformations au voisinage de l'extrémité d'une fissure dans un matériau élasto-plastique obéissant à la relation de Ramberg – Osgood :

$$\frac{e}{e_0} = \frac{s}{s_0} + a \left(\frac{s}{s_0} \right)^n \quad (2 - 23)$$

Où :

s_0, e_0 : respectivement la limite d'élasticité et la déformation, n- exposant d'écrouissage.

L'intégrale J prédit deux zones de singularité dominantes près de l'extrémité de la fissure. Dans la région élastique les contraintes varient en $1/r$ et dans la zone plastique $1/r^{n+1}$ quand r tend vers zéro, par conséquent, la répartition des tenseurs de contraintes et déformations peuvent s'écrire en général :

$$\mathbf{s}_{ij} = k_1 \left(\frac{j}{r}\right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (2 - 24)$$

$$\mathbf{e}_{ij} = k_2 \left(\frac{j}{r}\right)^{\frac{n}{n+1}} \quad (2 - 25)$$

Avec : k_1 et k_2 des constantes

Le calcul précis montre que le champ HRR (Hutchinson, Rice et Rosengren) donné par les relations précédentes, s'écrit :

$$\mathbf{s}_{ij} = s_0 \left(\frac{j}{as_0^2 I_n r}\right)^{\frac{1}{n+1}} \tilde{\mathbf{s}}_{ij}(n, q) \quad (2 - 26)$$

$$\mathbf{e}_{ij} = \frac{as_0}{E} \left(\frac{Ej}{as_0^2 I_n r}\right)^{\frac{n}{n+1}} \tilde{\mathbf{e}}_{ij}(n, q) \quad (2 - 27)$$

Où : I_n constante d'intégration qui dépend de n , $\tilde{\mathbf{s}}_{ij}$ et $\tilde{\mathbf{e}}_{ij}$ des fonctions adimensionnelles de n et θ .

2-7-2 Calcul de l'intégrale J

Considérons un solide fissuré limité par le contour « Γ » et de surface A' (figure 2-12). L'énergie potentielle peut s'écrire en l'absence des forces de volumes :

$$\mathbf{E}_p = \int_{A'} w dA - \int_{\Gamma'} \mathbf{T}_i u_i ds \quad (2 - 28)$$

Où : Γ' la portion du contour Γ sur laquelle s'exerce le chargement de traction \mathbf{T}_i .

La variation de l'énergie potentielle associée à une propagation virtuelle de « da » de la fissure suivant l'axe x , conduit à écrire la relation suivante :

$$\frac{dE_p}{da} = \int_{A'} \frac{dw}{da} dA - \int_{\Gamma'} \mathbf{T}_i \frac{du_i}{da} ds \quad (2 - 29)$$

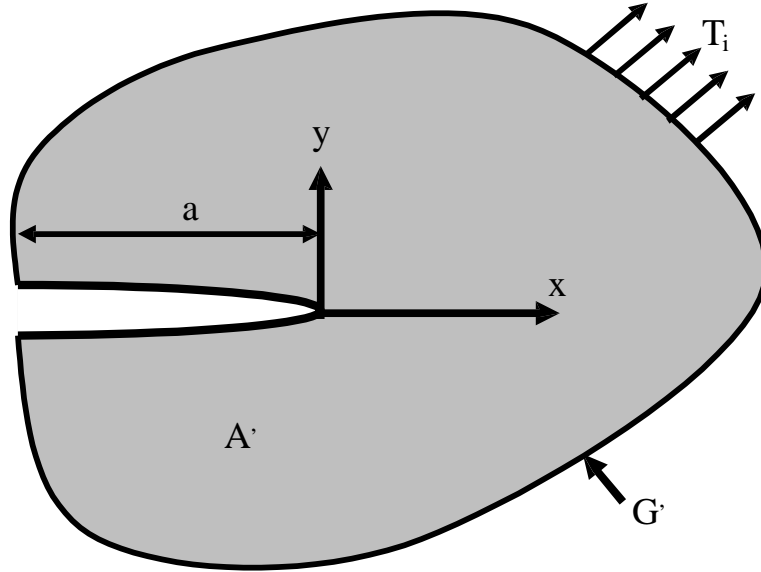


Figure 2-12. Solide fissuré

Les déplacements ne varient pas sur la portion ($G'-G''$), l'intégrale peut être prise sur tout le contour Γ' , pour une extension da , la dérivée par rapport à a s'écrit :

$$\frac{d}{da} = \frac{\partial}{\partial a} + \frac{\partial x}{\partial a} \frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial a} - \frac{\partial}{\partial x} \quad (2 - 30)$$

La relation (2-29) devient alors :

$$\frac{dE_p}{da} = \int_{A'} \left(\frac{\partial w}{\partial a} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) dA - \int_{\Gamma'} T_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial a} - \frac{\partial u_i}{\partial x} \right) ds \quad (2 - 31)$$

Avec :

$$\frac{\partial w}{\partial a} = \frac{\partial w}{\partial e_{ij}} \frac{\partial e_{ij}}{\partial a} = s_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial a} \right)$$

Le principe des travaux virtuels permet d'écrire :

$$\int_{A'} s_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial a} \right) dA = \int_{\Gamma'} T_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial a} \right) ds \quad (2 - 32)$$

L'énergie potentielle peut s'exprimer alors :

$$\frac{dE_p}{da} = \int_{\Gamma'} T_i \frac{\partial u_i}{\partial a} ds - \int_{A'} \left(\frac{\partial x}{\partial a} \right) dA \quad (2 - 33)$$

Appliquons le théorème de Stokes pour transformer l'intégrale de surface en intégrale de contour :

$$\frac{dE_p}{da} = \int_{\Gamma'} \left(T_i \frac{\partial u_i}{\partial a} ds - w n_x \right) ds \quad (2 - 34)$$

Et comme : $n_x ds = dy$, l'intégrale aura finalement pour expression :

$$J = - \frac{dE_p}{da} = \int_{\Gamma'} \left(w dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right) \quad (2 - 35)$$

Le paramètre J est défini pour une structure :

$$J = \left(\frac{\partial E_p}{\partial a} \right)_x = - \left(\frac{\partial}{\partial a} \int_0^x F dx \right) = - \int_0^x \left(\frac{\partial F}{\partial a} \right)_x dx \quad (2 - 36)$$

Dans le cas d'un comportement linéaire élastique $J=G$

$$J = G = \frac{K_i^2}{E} \quad \text{Etat plan de contrainte}$$

$$J = G = \frac{K_i^2}{E} (1 - \nu^2) \quad \text{Etat plan de déformation}$$

Chapitre3 : Etude comparative entre les techniques des raidisseurs et des patches en composites dans la réparation des structures

Chapitre 3 : Etude comparative entre les techniques des raidisseurs et des patches en composites dans la réparation des structures

3.1 Introduction :

Le but de cette étude est de comparer les performances des techniques de réparation par patch en composite et par raidisseur dans les structures aéronautiques. La méthode des éléments finis a été utilisée pour réaliser ce travail. La comparaison comprend deux volets : le premier consiste à évaluer le facteur d'intensité de contraintes en tête de fissure réparée pour comparer les efficacités de réparation des deux techniques. Le second volet consiste à déterminer la distribution des contraintes de cisaillement dans la couche adhésive pour comparer la durabilité des deux techniques de réparation.

3.2 Présentation des modèles géométriques :

Nous avons considéré une plaque rectangulaire avec un entaille semi-circulaire latérale de dimensions : hauteur $H_p = 150\text{mm}$, largeur $W_p = 90\text{mm}$, épaisseur $e_p = 5\text{mm}$, rayon d'entaille $r_e = 12.5\text{mm}$. La plaque est en aluminium 2024T3 dont les propriétés élastiques sont les suivantes :

Module de Young $E_p = 72\text{GPa}$, coefficient de Poisson $\nu_p = 0.33$.

La plaque est sollicitée en traction uni axiale suivant la direction de sa hauteur «y» avec la contrainte appliquée d'amplitude $\sigma = 70\text{MPa}$ (figure 3-1). On suppose l'existence d'une fissure émanant du fond d'entaille de longueur (a) réparée par les techniques suivantes :

1) un patch en Bore - époxyde (Figure 3-2) de dimensions :

Hauteur $H_{pa} = 60\text{mm}$, largeur $W_{pa} = 60\text{mm}$ et épaisseur $e_{pa} = 2\text{mm}$ $r_e = 12.5\text{mm}$.

Le Bore/époxyde est considéré comme un matériau orthotrope ayant les propriétés élastiques suivantes :

Chapitre3 : Etude comparative entre les techniques des raidisseurs et des patches en composites dans la réparation des structures

Module de Young longitudinal $E_{rL} = 172369\text{MPa}$

Module de Young transversal $E_{rT} = 10342\text{MPa}$

Module de Cisaillement $G_r = 4826\text{MPa}$

Coefficient de Poisson longitudinal $\nu_L = 0.3$

Coefficient de Poisson transversal $\nu_T = 0.2$

2) Un raidisseur en aluminium (Figure 3-3) collé à la plaque de dimensions suivantes :

Hauteur $H_r = 60\text{mm}$, largeur $W_r = 20\text{mm}$ et épaisseur $e_r = 5\text{mm}$.

Nous avons analysé dans toute notre étude le cas limite où la pointe de la fissure est tangente de l'arrête du raidisseur. L'adhésif utilisé pour coller les deux structures est le FM73 avec les propriétés élastiques suivantes :

Le module de cisaillement $G_a = 420\text{MPa}$ et l'épaisseur $e_a = 0.15\text{ mm}$.

3) La réparation est faite en combinant les deux techniques (patch et raidisseur). Dans ce cas les deux outils de réparation sont placés sur une même face de la plaque (Figure 3-4).

4) La réparation est faite en combinant les deux techniques (patch et raidisseur). Dans ce cas les deux outils de réparation sont placés sur des faces opposées de la plaque d'aluminium (Figure 3-5).

Chapitre3 : Etude comparative entre les techniques des raidisseurs et des patches en composites dans la réparation des structures

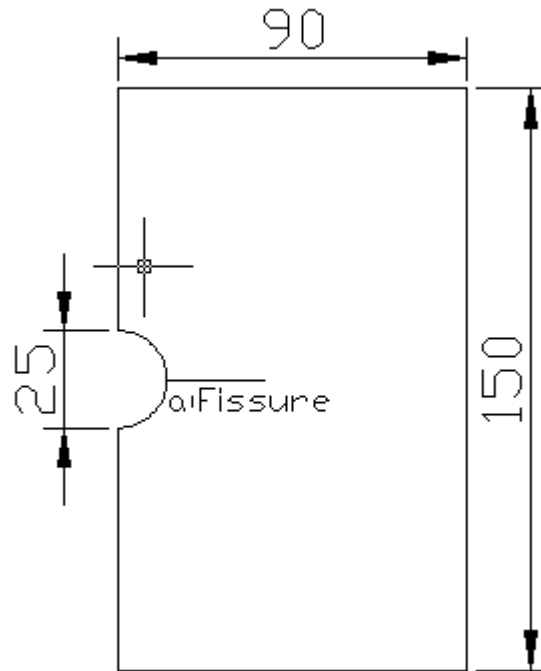


Fig3-1 : Modèle géométrique de la plaque non réparée

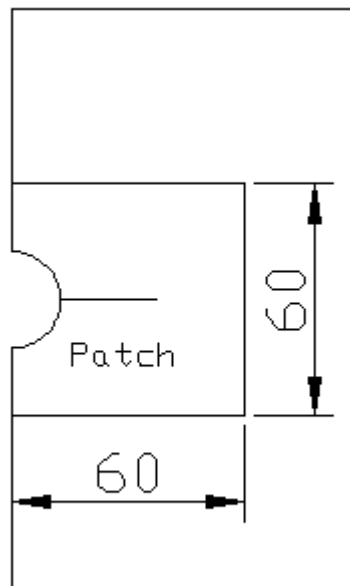


Fig3-2 : Modèle géométrique de la plaque réparée avec patch en composite

Chapitre3 : Etude comparative entre les techniques des raidisseurs et des patches en composites dans la réparation des structures

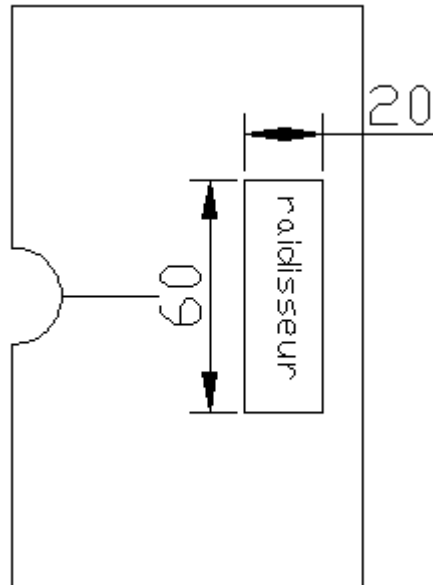


Fig3-3 : Modèle géométrique de la plaque réparée avec un raidisseur en aluminium

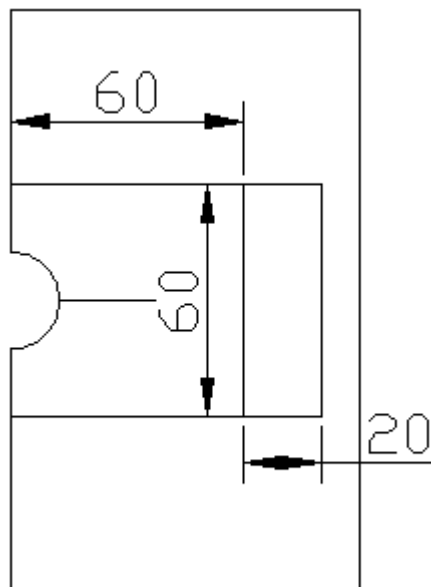


Fig3-4 : Modèle géométrique d'une plaque avec patch et raidisseur sur la même face

Chapitre3 : Etude comparative entre les techniques des raidisseurs et des patches en composites dans la réparation des structures

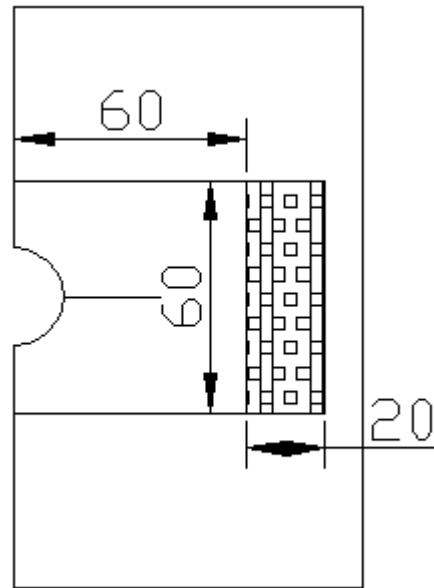


Fig3-5 : Modèle géométrique d'une plaque avec patch et raidisseur sur la face opposé

3.3 Modélisation par éléments finis :

3.3.1 Présentation du logiciel de calcul :

Nous avons utilisé pour nos calculs le logiciel de calcul par éléments finis, FRANC 2D/L (fracture analysis code bi-dimensionnel), développé par le groupe de recherche en mécanique de la rupture (CFG) à l'université Cornell aux États Unis d'Amérique sous la direction du professeur A.INGRAFFEA.

Cet outil a été spécialement élaboré en vue de la résolution des problèmes bidimensionnels de la mécanique de la rupture. Il a été catalogué par le centre de recherche langley à la NASA. FRANC2D est un code de calcul utilisant la méthode des éléments finis pour l'analyse des structures dans le domaine de la rupture.

FRANC2D/L est un programme fortement interactif pour la simulation de la fissure croissance en structures. Le programme est une prolongation de FRANC2D à rendre la représentation possible des structures telles que des joints de recouvrement ou réparations collées. Chaque couche est représentée par une

Chapitre3 : Etude comparative entre les techniques des raidisseurs et des patches en composites dans la réparation des structures

maille séparée qui peut recouvrir avec d'autres mailles et être liée aux éléments de rivet ou d'adhésif.

Dans le programme de FRANC2D/L, tous les ordres d'utilisateur sont faits en cliquant avec la souris sur une des options montrées sur le menu qui apparaît toujours à la droite **des opérations fenêtre**.

Les commandes sont disposées dans un arbre, et les voyages d'utilisateur vers le haut ou vers le bas à chaque branche périodiquement en choisissant l'option désirée avec le bouton gauche de la souris. **Une fenêtre de message** est toujours présente au-dessous **de la fenêtre d'opérations** à inciter l'utilisateur sur la prochaine étape du procédé demandé.

Pour certains les opérations FRANC2D/L crée une fenêtre mobile isolée séparée appelée **la fenêtre auxiliaire**. Parfois, il peut être nécessaire de déplacer cette fenêtre afin de regarder l'information dans un certain nombre de fenêtres simultanément. Entrée dans FRANC2D/L, saisie de quelques données, et opérations d'I/O appelées pendant courir de FRANC2D/L sont faits à partir **de la fenêtre de commande de programme**.

Le code d'analyse de rupture (FRANC2D) a été à l'origine développé par Paul Wawrzynek à l'université de Cornell. FRANC2D a représenté une étape significative dans le développement des programmes discrets d'analyse de rupture en raison de sa conception modulaire de logiciel et structure de données topologiques.

Le logiciel de calcul par éléments finis, FRANC2D/L décomposé dans plusieurs fenêtres CASCA générateur du maille CASTOFRANC générateur d'assemblage et FRANC2D/L générateur de calcul par éléments finis. L'analyse par éléments finis de la configuration a été réalisée par FRANC2D/L ; la structure est maillée par des éléments iso-paramétriques quadrilatéraux à huit nœuds. La zone commune de la plaque et du patch doit avoir un maillage identique nous avons représenté le maillage de la structure fissurée, réparée et non réparée par un patch. Le maillage est raffiné pour augmenter la résolution, on remarque que la

Chapitre3 : Etude comparative entre les techniques des raidisseurs et des patches en composites dans la réparation des structures
région adjacente au front de la fissure est maillée avec des éléments singuliers pour affiner les résultats.

3.3.2 Modèles en éléments finis utilisés dans le calcul :

Les modèles en éléments finis utilisés dans le calcul sont représentés dans les figures 3-6 à 3-10. Elles représentent les maillages des 5 structures représentant les techniques de réparation utilisées : par patch en composite, par raidisseur en aluminium et par les deux techniques combinées.

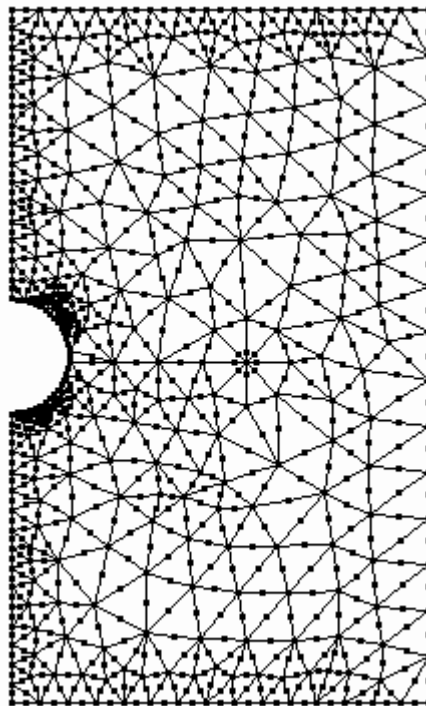


Fig3.6 : Maillage de la plaque non renforcée

Chapitre3 : Etude comparative entre les techniques des raidisseurs et des patchs en composites dans la réparation des structures

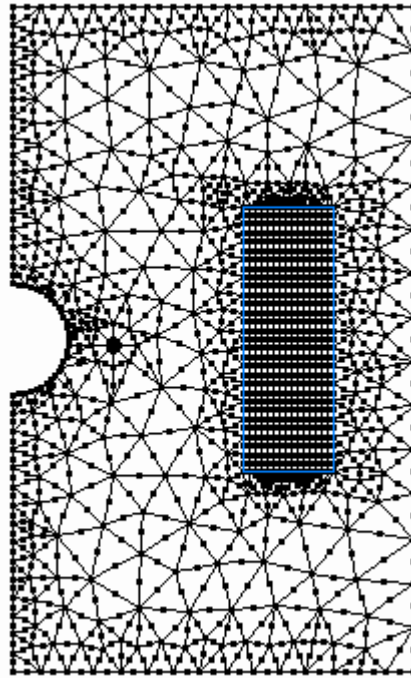


Fig3.7 Maillage de la structure renforcée par raidisseur

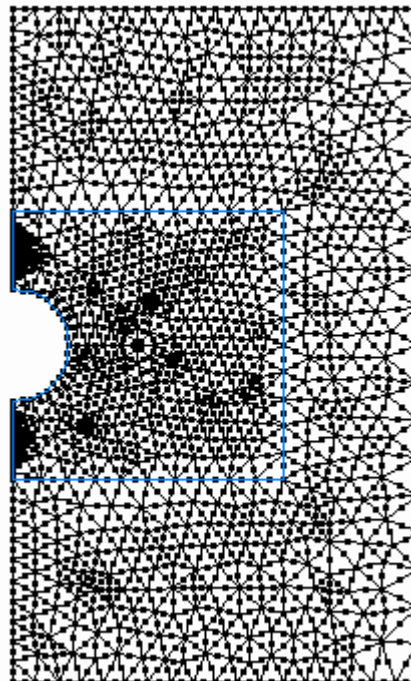


Fig3.8 : Maillage de la structure réparée par patch en composite

Chapitre3 : Etude comparative entre les techniques des raidisseurs et des patchs en composites dans la réparation des structures

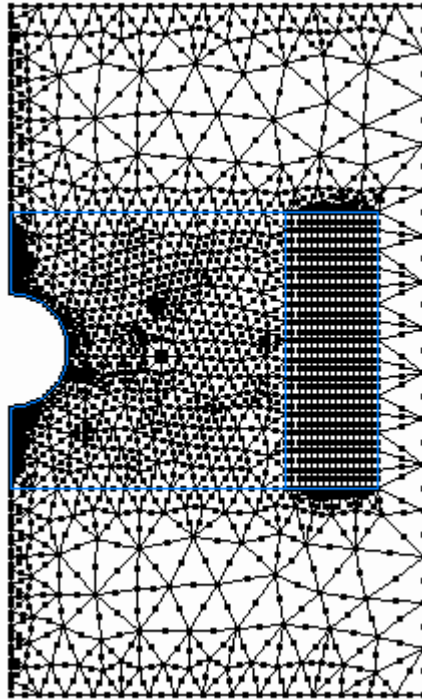


Fig3.9 : Maillage de la structure réparée par patch et par raidisseur sur la même face

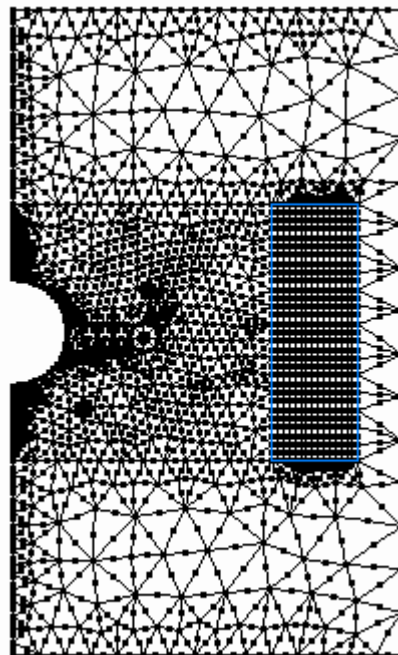


Fig3.10 : Maillage de la structure réparée par patch et par raidisseur placés sur des faces opposées de la plaque.

Chapitre3 : Etude comparative entre les techniques des raidisseurs et des patches en composites dans la réparation des structures

3.4 Résultats et discussions :

3.4.1Analyse du facteur d'intensité de contraintes :

3.4.1.1 Comparaison entre les deux techniques de réparation

Nous avons commencé notre étude comparative entre les techniques des raidisseurs et de patch en composite dans la réparation des structures aéronautiques par l'évaluation du facteur d'intensité de contrainte en tête de la fissure réparée. Cette évaluation permet de comparer l'efficacité des deux techniques car le taux de réduction du FIC permet de quantifier cette efficacité. Il est connu que le facteur d'intensité de contraintes en tête de fissure est lié directement à la vitesse de propagation de la fissure. La plus simple relation reliant ses deux paramètres est la loi de Paris :

$$\frac{da}{dN} = c(dK)^n \quad 3.1$$

C et n sont des paramètres caractérisant les matériaux. On peut remarquer d'après cette loi que la valeur du facteur d'intensité de contraintes influe directement sur la vitesse de propagation en fatigue. La réduction du FIC est donc le facteur essentiel permettant d'évaluer l'efficacité de toute technique de réparation des fissures de fatigue dans les structures aéronautiques.

Nous avons, en premier lieu, comparé les valeurs du facteur d'intensité de contraintes pour une plaque non réparée, une plaque avec patch et une plaque avec raidisseur. La figure 3-11 présente la variation du FIC en fonction de la longueur de la fissure pour les trois configurations. On peut voir dans cette fissure que la réparation par patch en composite est beaucoup plus efficace que la technique du raidisseur. En effet, en comparant les valeurs du FIC pour les deux techniques avec le cas de la fissure non réparée, on remarque que la technique du raidisseur donne une réduction maximale du FIC de l'ordre 25 alors que la technique du patch réduit le facteur d'intensité de contrainte avec un

Chapitre3 : Etude comparative entre les techniques des raidisseurs et des patches en composites dans la réparation des structures

taux maximal de l'ordre de 80%. Ces réductions maximales sont enregistrées pour des longueurs de fissure dépassant les 40mm. On peut donc affirmer que la technique de patch est trois fois plus efficace que la technique des raidisseurs, si la longueur de fissure est importante, ce comportement peut s'expliquer par le fait que dans la technique du patch l'absorption des contraintes de la région fissurée vers le patch se fait directement à travers la couche adhésive avec une grande surface de recouvrement. Alors que pour la technique de raidisseur la surface de recouvrement est faible. De plus, les propriétés mécaniques du composite sont plus grandes que celles de l'aluminium ce qui donne un transfert de contraintes plus important pour le composite comparé à l'aluminium. On remarque aussi pour la technique du patch que le FIC prend une allure asymptotique lorsque la longueur de la fissure augmente. Ce comportement est dû au fait que le transfert de contrainte augmente avec l'augmentation de la longueur de la fissure. Ce comportement a été remarqué par plusieurs auteurs dans la littérature [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29 et 30]. Le comportement asymptotique n'apparaît pas dans le cas des raidisseurs ce qui réduit encore plus l'efficacité de cette technique par rapport à celle du patch. On remarque par ailleurs que pour des faibles longueurs des fissures ($a < 7\text{mm}$), les valeurs du FIC pour la technique de raidisseur sont inférieures à celle enregistrée pour la technique du patch, mais la différence est assez faible. Ceci nous permet de confirmer que la technique du raidisseur est relativement plus efficace si la longueur de la fissure réparée est faible. Ce comportement s'explique par le fait que pour des faibles longueurs de fissures le transfert de contrainte à travers la couche adhésive est faible, ce qui avantage la technique du raidisseur. Un autre aspect qui désavantage la technique du patch est la présence de contrainte résiduelle d'origine thermique dans les structures réparées par patch. Ces contraintes sont dues au chauffage de la plaque d'aluminium avant collage du patch pour assurer la polymérisation de l'adhésif. Après refroidissement, le composite empêche la plaque d'aluminium de reprendre sa taille initiale après

Chapitre3 : Etude comparative entre les techniques des raidisseurs et des patches en composites dans la réparation des structures
dilatation, ce qui entraîne des contraintes résiduelles dans la structure [31, 32 et 33]. Les contraintes résiduelles sont dues essentiellement à la différence entre les propriétés mécaniques et physiques du composite et de l'aluminium. Ces contraintes sont absentes dans la technique du raidisseur du fait que le raidisseur et la plaque sont constitués du même matériau (aluminium).

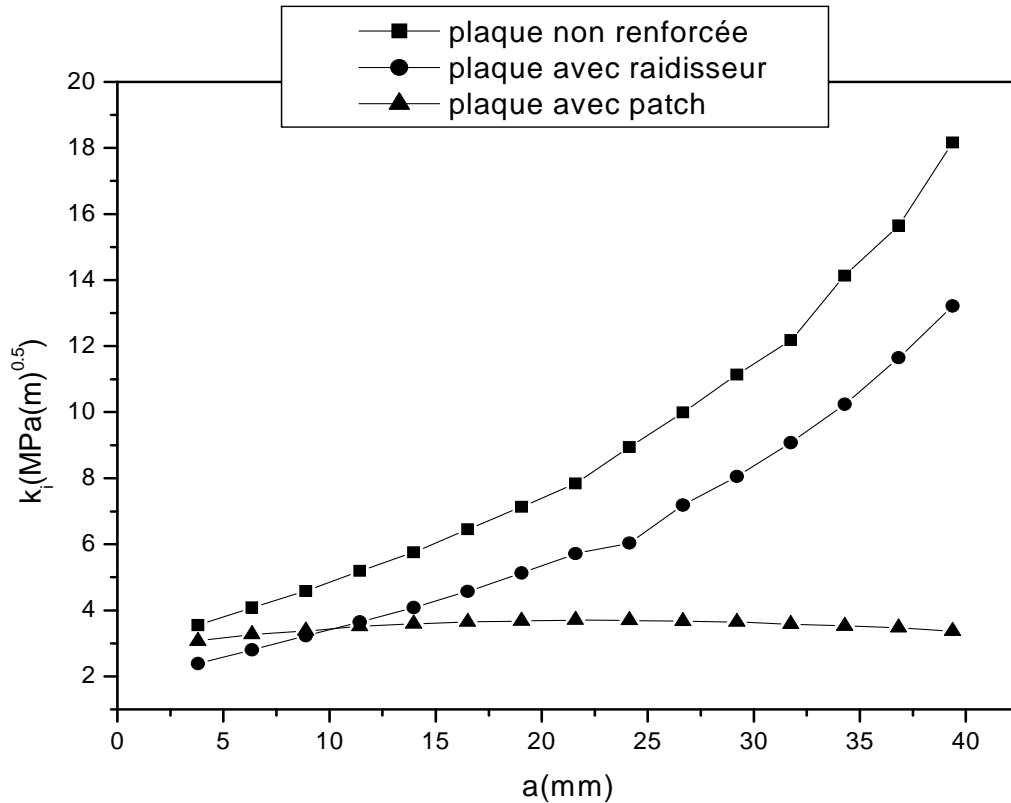


Fig3.11 : Comparaison de renforcement par patch et par raidisseur

Afin d'analyser les effets des épaisseurs du patch et du raidisseur, nous avons tracé sur les figures 3-12 et 3-13 la variation du FIC en fonction de la longueur de fissure pour différentes épaisseurs du raidisseur et différentes épaisseurs du patch respectivement. On remarque, d'après la figure 3-12 que l'épaisseur du raidisseur n'a pas un effet important sur la variation du FIC en tête de fissure réparée. En effet, pour des longueurs de fissure inférieures à 30 mm ($a < 30 \text{ mm}$), l'effet de l'épaisseur du raidisseur est négligeable et cet effet sera légèrement sensible pour des longueurs de fissure dépassent 30mm. Ceci s'explique par le

Chapitre3 : Etude comparative entre les techniques des raidisseurs et des patches en composites dans la réparation des structures

fait que les raidisseurs sont placés au niveau de la tête de la fissure, leur épaisseur n'a donc pas un effet significatif sur l'évolution du FIC. Le comportement est totalement opposé pour l'épaisseur du patch, les résultats de la figure 3-13 montrent que l'épaisseur du patch influe considérablement sur la variation du FIC. A titre indicatif, pour une longueur de fissure de 25mm, la réduction du FIC entre une épaisseur du patch de 1 mm et une épaisseur de 5mm est de l'ordre de 40%. Ce comportement peut s'expliquer par le fait que, plus le patch est épais, plus le transfert de contraintes à travers la couche adhésive est important. Cependant, on remarque que le taux de réduction du FIC par l'augmentation de l'épaisseur du patch est moins important lorsque celle-ci augmente. L'optimisation de l'épaisseur du patch est donc nécessaire pour assurer un bon transfert de contraintes et éviter une augmentation inutile du poids de la structure aéronautique.

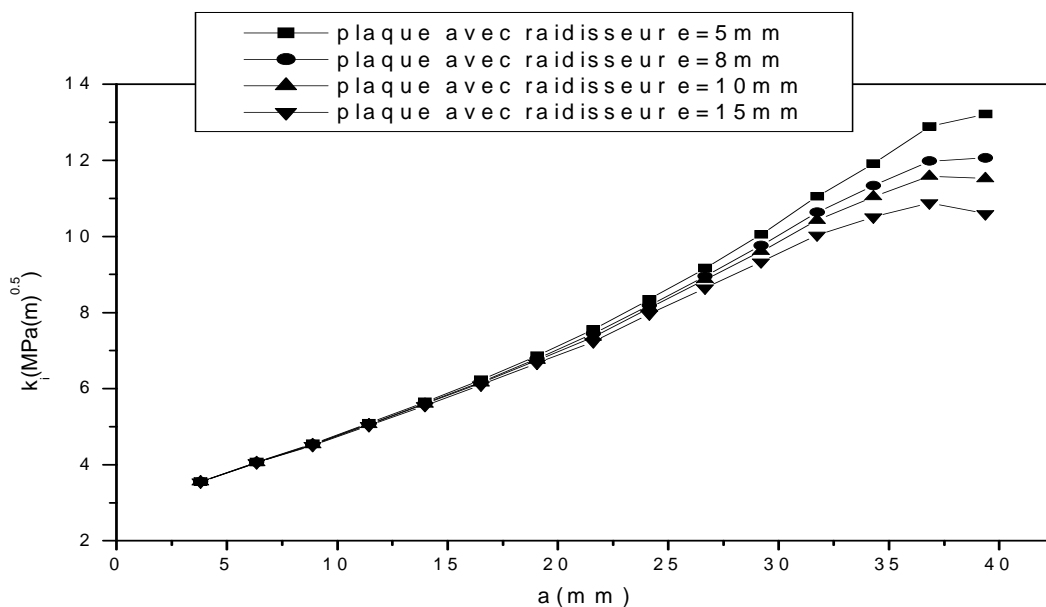


FIG 3.12 : Effet de l'épaisseur du raidisseur

Chapitre3 : Etude comparative entre les techniques des raidisseurs et des patches en composites dans la réparation des structures

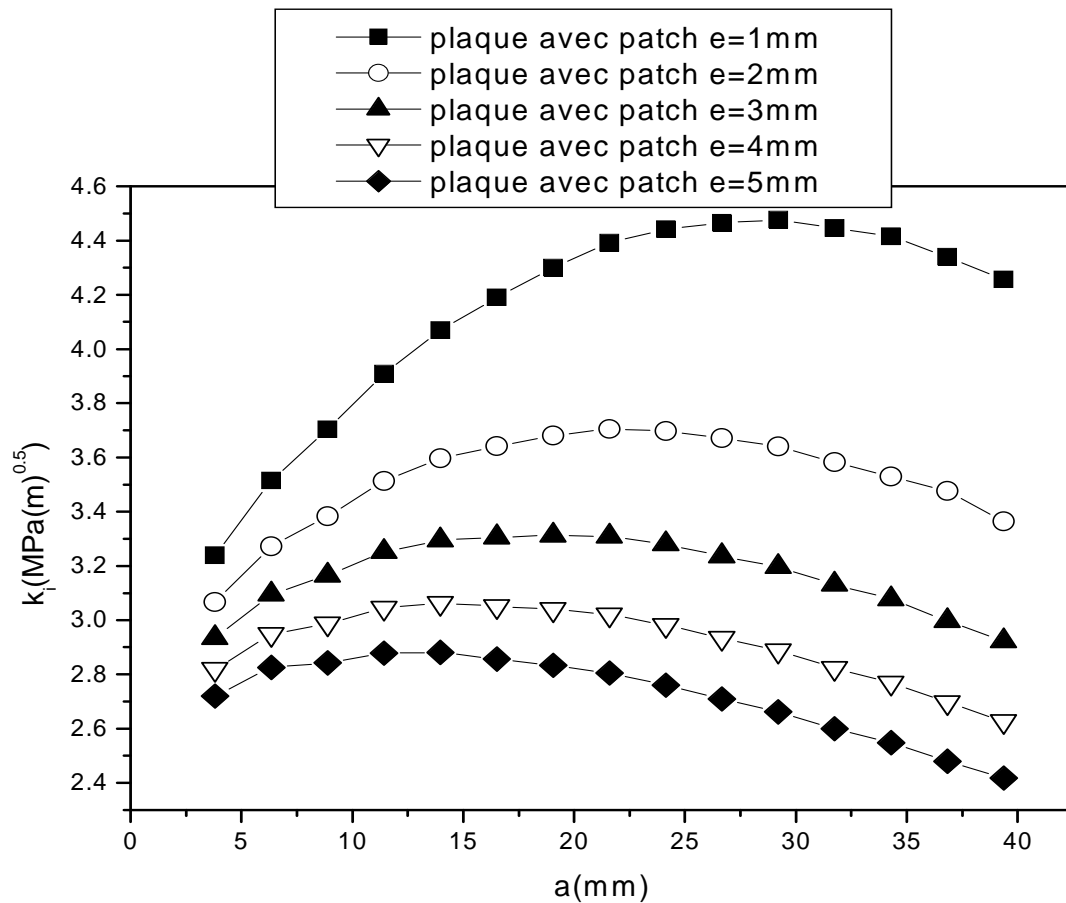


FIG 3.13 : Effet de l'épaisseur du patch

3.4.1.2 Combinaison des deux techniques

Afin d'enrichir cette étude, nous avons jugé intéressant de voir l'évolution de la fissure réparée en combinant les deux techniques. A cet effet, nous avons représenté sur la figure 3-14, la variation du FIC en fonction de la longueur de la fissure lorsque les deux outils de réparation sont placés dans des faces opposées de la plaque, l'épaisseur du raidisseur a été variée. On remarque d'après les résultats de cette figure que la combinaison des deux techniques n'est pas efficace lorsque la longueur de la fissure est inférieure à 15mm. La différence du FIC entre le cas d'un patch seul et celui des deux techniques combinées est négligeable pour $a < 15$ mm. Lorsque la longueur de la fissure est supérieure à

Chapitre3 : Etude comparative entre les techniques des raidisseurs et des patches en composites dans la réparation des structures

15mm, cette différence augmente de manière importante lorsque la longueur de la fissure augmente. Le taux de réduction du FIC par la combinaison des deux techniques comparées à celle du patch seul est de l'ordre de 20%, pour $a=40\text{mm}$ et l'épaisseur du raidisseur de 5mm. La combinaison des deux techniques peut améliorer considérablement la durée de vie des structures aéronautiques.

Les résultats de la figure 3-15 confirment ceux de la figure précédente. Cette dernière présente la variation du FIC pour un patch et un raidisseur placés dans la même face de la plaque.

On remarque une Influence sensible de la combinaison des deux techniques lorsque la longueur de la fissure dépasse 15mm et la réduction maximale du FIC due à la combinaison des deux techniques est de l'ordre de 15%.

On peut donc conclure que l'emplacement du patch et du raidisseur sur les faces opposées de la plaque est plus avantageux par que lorsqu'ils sont alignés sur la même face de la plaque. Cette conclusion est confirmée par les résultats de la figure 3-16 où nous avons présenté une comparaison entre les valeurs du FIC dans les deux cas (patch et raidisseur sur les faces opposées et sur la même face de la plaque).

Le FIC est tracé en fonction de longueur de la fissure : on remarque que la différence entre les valeurs du FIC pour les deux configurations est négligeable pour de faibles longueurs de fissure et cette différence augmente sensiblement avec la propagation de la fissure.

Chapitre3 : Etude comparative entre les techniques des raidisseurs et des patches en composites dans la réparation des structures

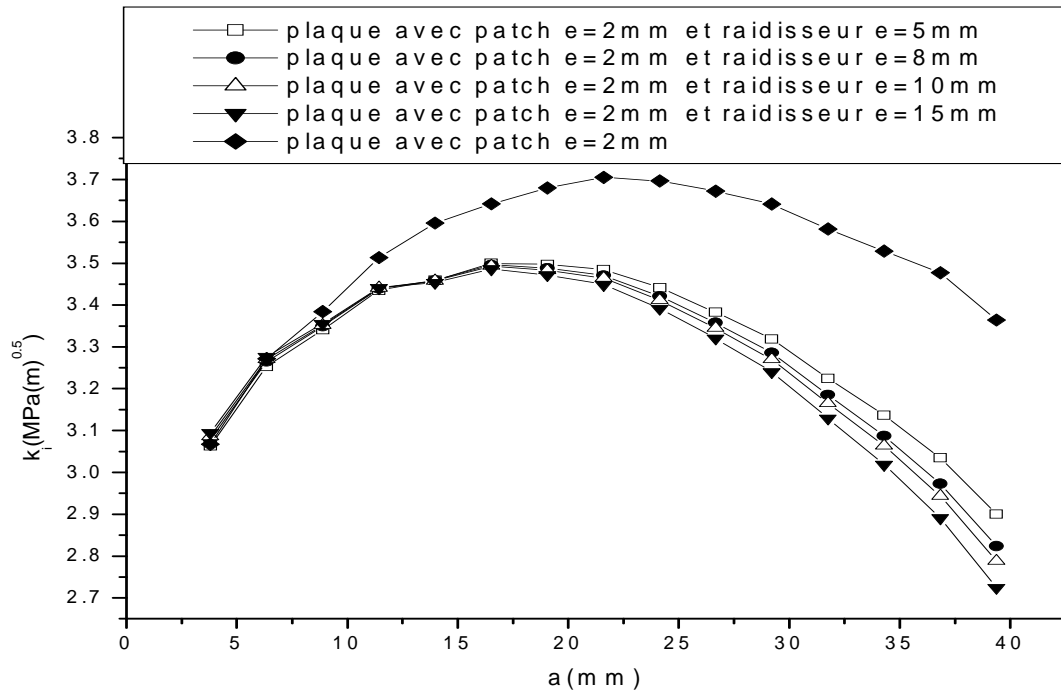


FIG 3.14 : comparaison entre le renforcement par patch et le renforcement combinée des deux techniques : patch et raidisseur sur les faces opposées

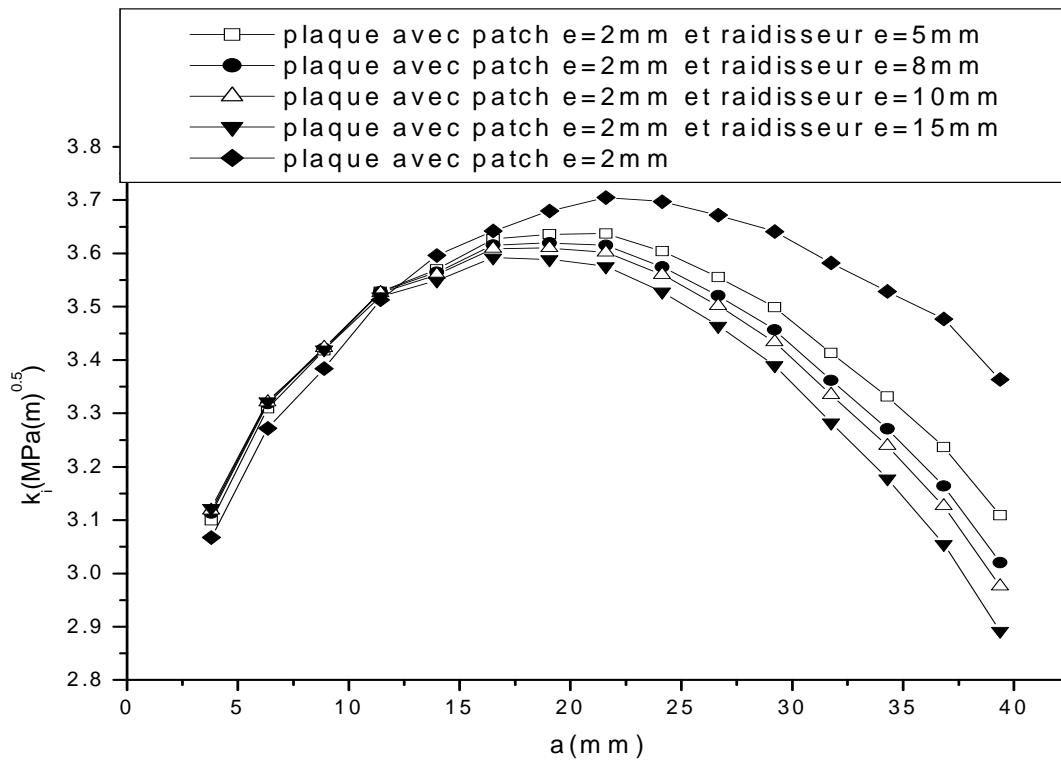


FIG 3.15 : comparaison entre la réparation par patch et celle par patch et raidisseur sur la même face

Chapitre3 : Etude comparative entre les techniques des raidisseurs et des patches en composites dans la réparation des structures

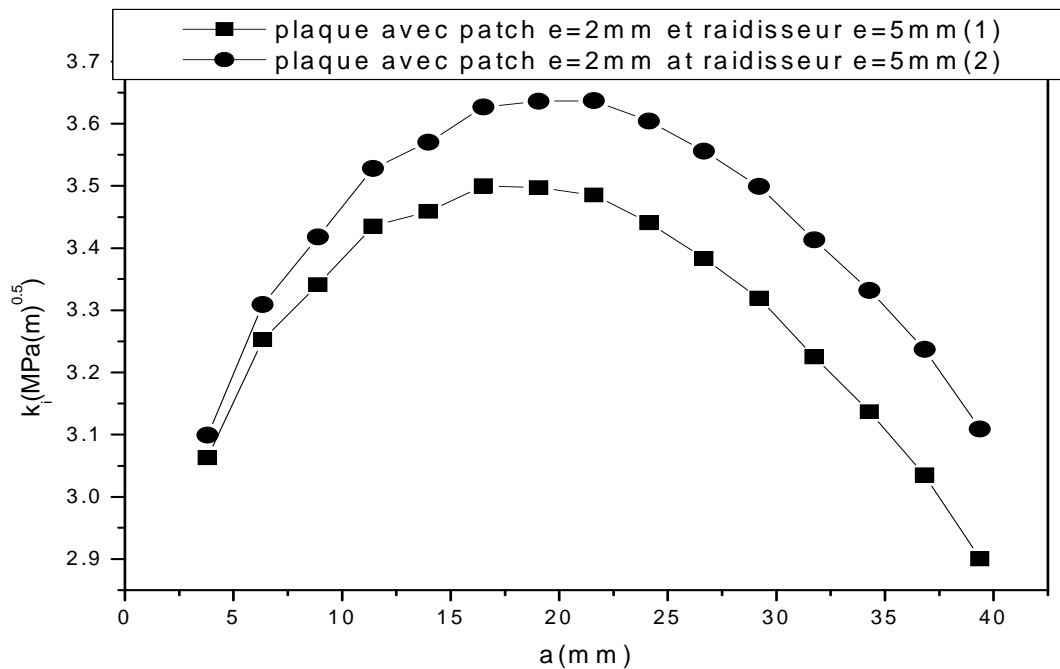


FIG 3.16 : comparaison entre la réparation par patch et celle par patch et raidisseur sur les faces opposées.

3.4.2 Analyse de la distribution des contraintes adhésives :

La durabilité de la réparation peut être estimée par les contraintes de cisaillement l'adhésif. En effet, le risque de rupture de l'adhésion est plus faible si les contraintes de cisaillement dans la couche adhésive sont faibles. Dans cette partie du travail, une comparaison de la distribution des contraintes adhésives entre la réparation par patch en composite et par raidisseur a été réalisée. La distribution des contraintes a été évaluée sur la longueur de la couche adhésive. Dans les deux configurations, ces contraintes ont été évaluées le long d'une ligne adjacente à la tête de la fissure, sur les plans xz et yz. Pour calculer ces contraintes nous avons fait les hypothèses suivantes :

- chaque couche est considérée comme une structure bidimensionnelle sous un état de contraintes planes;
- les couches peuvent être assemblées deux à deux par joint adhésif.

Chapitre3 : Etude comparative entre les techniques des raidisseurs et des patches en composites dans la réparation des structures

On suppose que :

- la couche adhésive est homogène, linéaire et isotrope;
- la couche adhésive se déforme uniquement en cisaillement et cette déformation est uniforme à travers l'épaisseur de l'adhésif;
- les contraintes de cisaillement transmises à travers la couche adhésive agissent comme des contraintes normales sur les substrats.

Les contraintes de cisaillement dans la couche adhésive sont données par la relation :

$$\tau = \frac{G_a}{e_a} (u_2 - u_1) \quad 3 - 2$$

u: le déplacement dans les plaques 1 et 2.

Les forces dans la couche adhésive sont obtenues en intégrant les contraintes de cisaillement dans la couche adhésive. Les forces de traction étant proportionnelles au déplacement, cette formulation permettra d'exprimer les forces dans la couche adhésive en termes de déplacement nodal permettant d'obtenir la matrice de rigidité de l'élément adhésif.

La figure 3-17 présente la distribution des contraintes adhésives dans le plan (x,z) (τ_{xz}). Dans le cas d'un patch en composite sous un chargement en traction uni axiale d'amplitude 70MPa et pour trois longueurs de fissure (a=4mm, a=10mm et a=40mm). On remarque que les contraintes τ_{xz} dans la couche adhésive sont assez faibles, leur intensité maximale en valeur absolue ne dépasse pas 3MPa pour une longueur de fissure de 40mm. Cette valeur de la contrainte représente 1/8 de la contrainte de rupture en cisaillement de la couche adhésive qui est de l'ordre de 25MPa. D'autre part, on peut noter que la contrainte maximale est enregistrée dans la région de la couche adhésive qui couvre les lèvres de la fissure ; le risque de décollement est donc important au niveau de la région fissurée de la plaque. Les contraintes τ_{xz} sont relativement faibles au

Chapitre3 : Etude comparative entre les techniques des raidisseurs et des patches en composites dans la réparation des structures

niveau de l'arrête libre entre le patch et la plaque réparée. On peut expliquer ce comportement par le fait que l'adhésif n'est pas directement sollicité, il reçoit les contraintes directement de la plaque réparée. La région entourant la tête de la fissure étant la plus sollicitée ; elle transmet le maximum de contraintes vers la couche adhésive et vers le patch en composite.

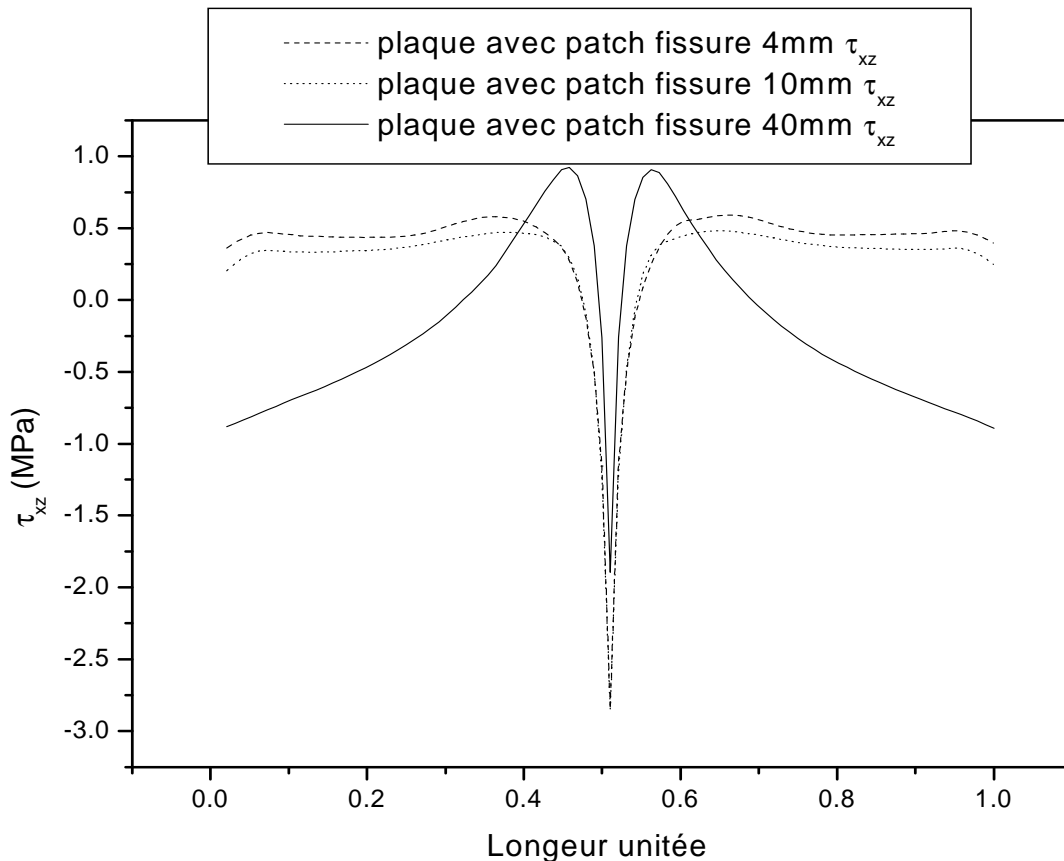


FIG 3-17 : contraintes de cisaillement τ_{xz} dans le cas d'un patch en composite

La figure 3-18 présente de la distribution des contraintes adhésive τ_{yz} pour le cas d'un patch avec un chargement de 70MPa et pour les trois longueurs de fissure ($a=4\text{mm}$, $a=10\text{mm}$ et $a=40\text{mm}$). On peut donc clairement voir que les contraintes dans le couche adhésive τ_{yz} sont trois plus faibles quelle que soit la longueur de la fissure. Leur valeur maximale ne dépasse pas 1.2MPa ce qui représente 1/20 de la contrainte à la rupture en cisaillement de l'adhésif FM 73.

Chapitre3 : Etude comparative entre les techniques des raidisseurs et des patches en composites dans la réparation des structures

On peut donc conclure que les contraintes dans le couche adhésive sont très faibles dans le cas d'un patch en composite. Cet état nous permet d'affirmer que le risque de rupture de l'adhésif dans le cas d'un patch est assez faible, sauf si l'adhésif présente des défauts tels que les cavités ou des décollements initiaux.

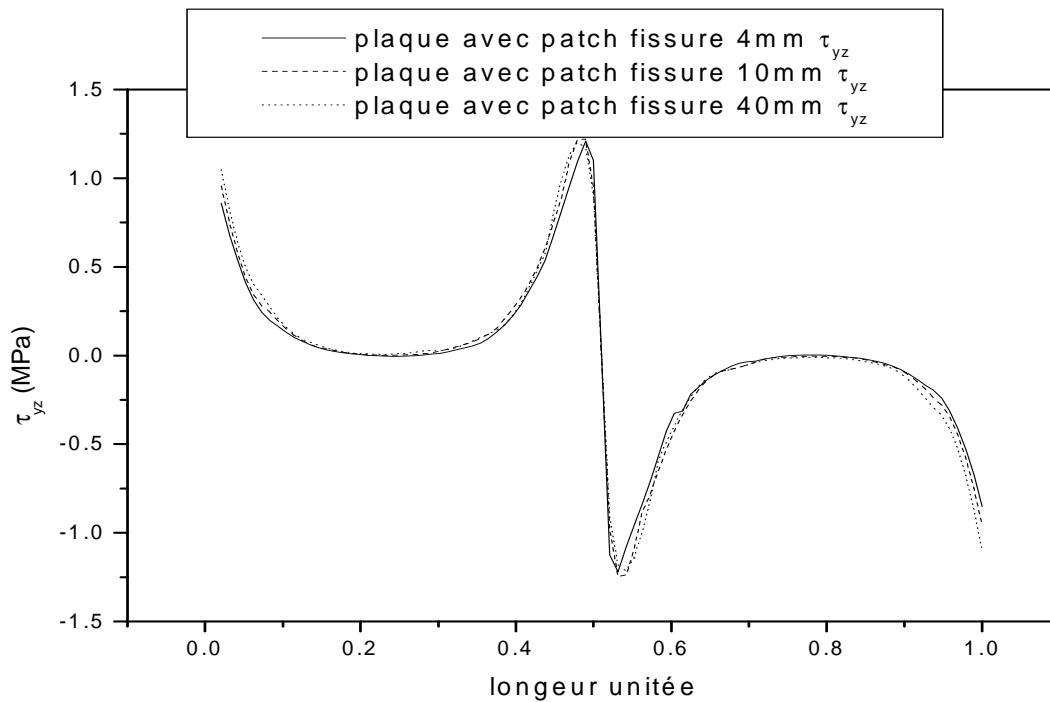


FIG 3-18 : contraintes de cisaillement τ_{yz} dans le cas d'un patch en composite

Les figures 3-19 et 3-20 présentent respectivement la distribution des contraintes dans l'adhésif τ_{xz} et τ_{yz} pour le cas d'un raidisseur en aluminium. Nous avons pris le cas extrême où la pointe de la fissure est tangente à l'arrête libre du raidisseur.

Le chargement considéré est une traction uni-axiale d'amplitude 70MPa, trois longueurs de fissure ont été considérées pour le calcul des contraintes dans l'adhésif ($a=4\text{mm}$, $a=10\text{mm}$, $a=40\text{mm}$).

On remarque d'après les résultats présentés sur la figure 3-19 que la longueur de fissure a un effet considérable sur la distribution des contraintes τ_{xz} dans la couche adhésive. Pour une longueur de fissure $a=4\text{mm}$, les contraintes τ_{xz} sont

Chapitre3 : Etude comparative entre les techniques des raidisseurs et des patches en composites dans la réparation des structures

assez faibles et la contrainte maximale ne dépasse pas 2.5MPa. Alors que pour une longueur de fissure de 10mm, la contrainte de cisaillement maximale augmente légèrement et s'approche de 4MPa.

Elle reste assez faible par rapport à la contrainte de rupture de l'adhésif. Cependant, la tendance est totalement inversée dans le cas d'une longueur de fissure de 40mm, la contrainte maximale τ_{xz} augmente de manière significative et dépasse légèrement la contrainte de rupture de l'adhésif qui est de l'ordre de 25MPa.

Cette augmentation de la contrainte est due essentiellement au fait que lorsque la pointe de fissure est tangente au raidisseur, le champ de contrainte, qui est élevé autour de cette pointe, va entraîner une augmentation de contraintes dans la couche adhésive. On peut donc affirmer que du point de vue durabilité, le patch en composite est plus performant en particulier pour les fissures longues.

Cette conclusion est confirmée pour les résultats de la figure 3-20 où la contrainte maximale, pour une longueur de fissure de 40mm, est de l'ordre de 18MPa ; elle est enregistrée au niveau de l'arrêt libre de la jonction plaque-patch.

Le risque de rupture de l'adhésion dans le cas d'un raidisseur est double puisqu'il peut être localisé simultanément au niveau de la fissure et au niveau de l'arrêt libre de la jonction. On peut donc affirmer une seconde fois que du point de vue durabilité, la réparation par patch est beaucoup plus efficace.

Chapitre3 : Etude comparative entre les techniques des raidisseurs et des patches en composites dans la réparation des structures

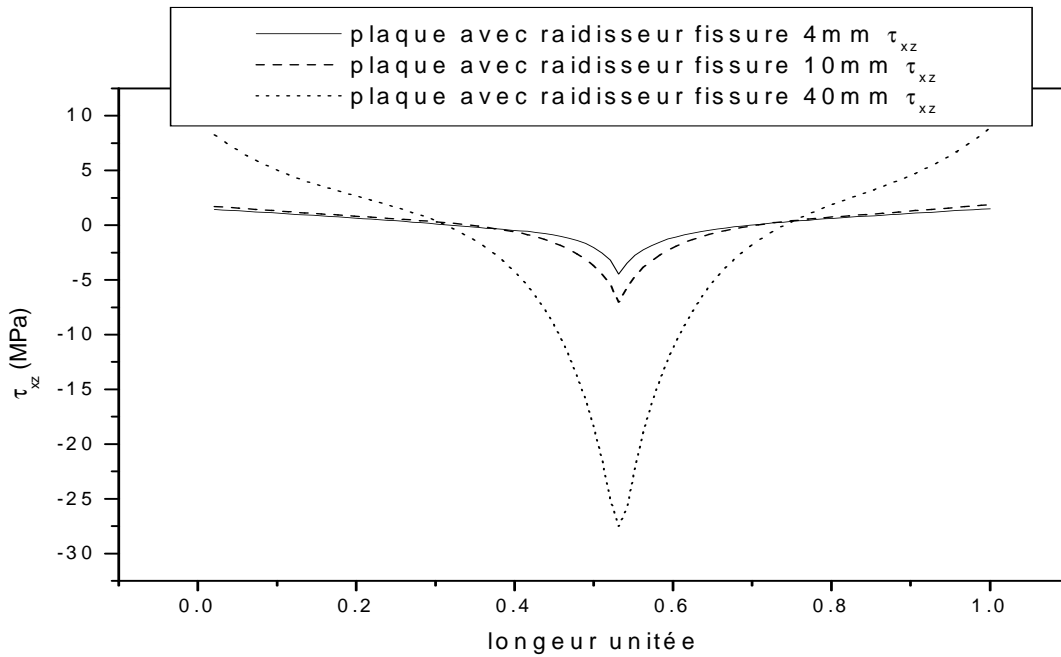


FIG 3-19 : Comparaison entre les contraintes de cisaillement de l'adhésif d'une plaque réparée par raidisseur dans le plan (xz)

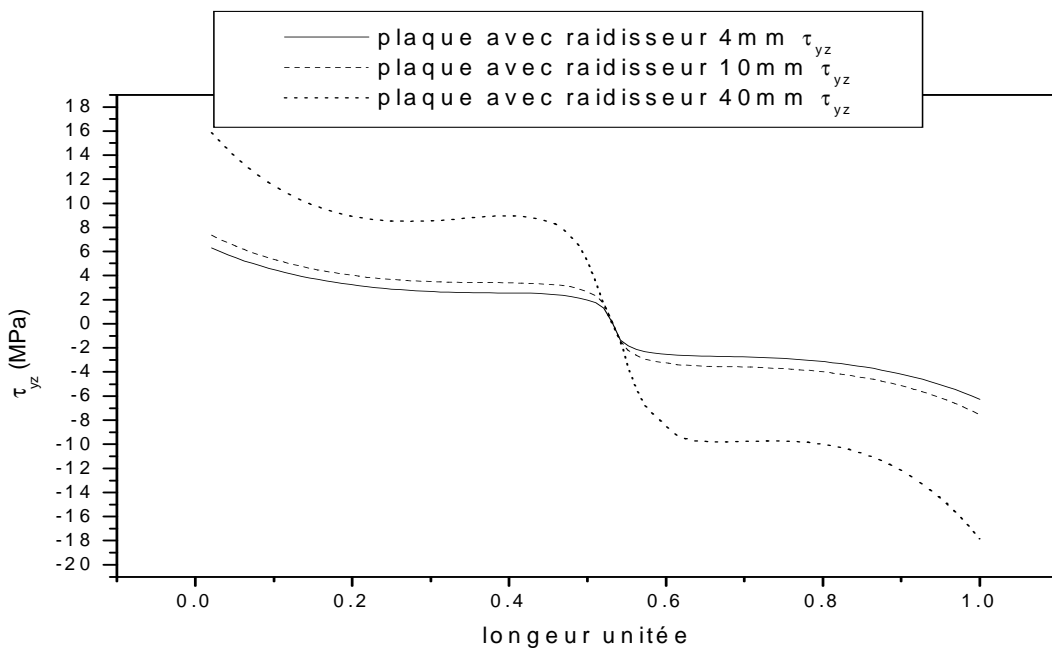


FIG 3-20 : Comparaison entre les contraintes de cisaillement d'adhésive d'une plaque réparée par raidisseur dans le plan (yz)

Chapitre3 : Etude comparative entre les techniques des raidisseurs et des patches en composites dans la réparation des structures

Les figures 3-21 et 3-22 présentent les distributions des contraintes dans le patch pour les deux réparations combinées.

On remarque que les contraintes maximales dans le patch ne varient pas assez par rapport au patch seul. La contrainte maximale τ_{xz} reste voisin de 2.5MPa et la contrainte τ_{yz} maximale est de 1.2MPa ce qui nous permet d'affirmer que la combinaison des deux technique n'influe pas sur le risque de rupture de l'adhésive dans le patch.

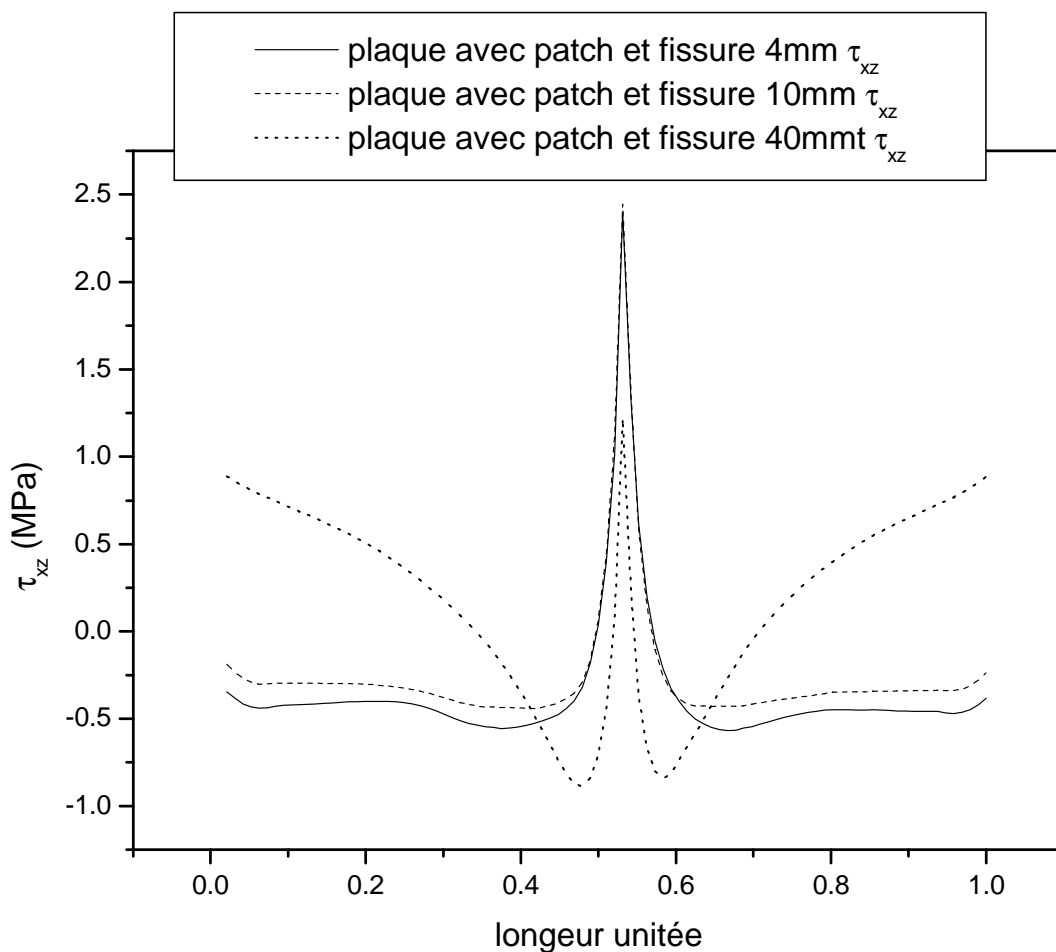


FIG 3-21 : Comparaison entre les contraintes de cisaillement d'adhésive en patch d'une plaque réparée par patch avec raidisseur sur la face opposée dans le plan (xz)

Chapitre3 : Etude comparative entre les techniques des raidisseurs et des patches en composites dans la réparation des structures

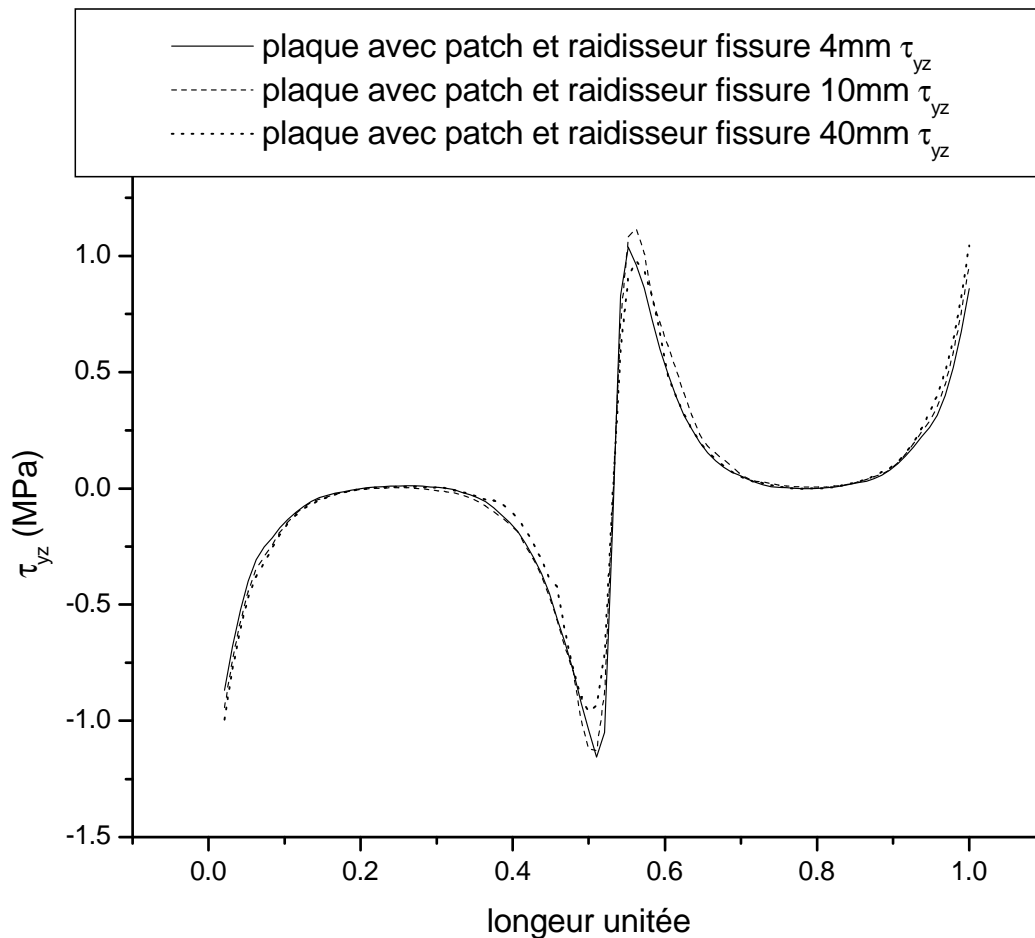


FIG 3-22 : Comparaison entre les contraintes de cisaillement de l'adhésif d'une plaque réparée par patch avec raidisseur sur la face opposée dans le plan (yz)

Les figures 3-23 et 3-24 présentent les distributions des contraintes dans la couche adhésive du raidisseur pour les deux configurations combinées. On peut voir dans ces deux figures que les contraintes adhésives augmentent dans le raidisseur si on combine les deux techniques. En effet, la contrainte τ_{xz} maximale est de l'ordre de 3.5MPa et la contrainte τ_{yz} maximale est de 5MPa. Le risque de rupture de l'adhésif augmente du double si on combine les deux techniques. Cette rupture peut se produire essentiellement dans le plan yz.

Chapitre3 : Etude comparative entre les techniques des raidisseurs et des patches en composites dans la réparation des structures

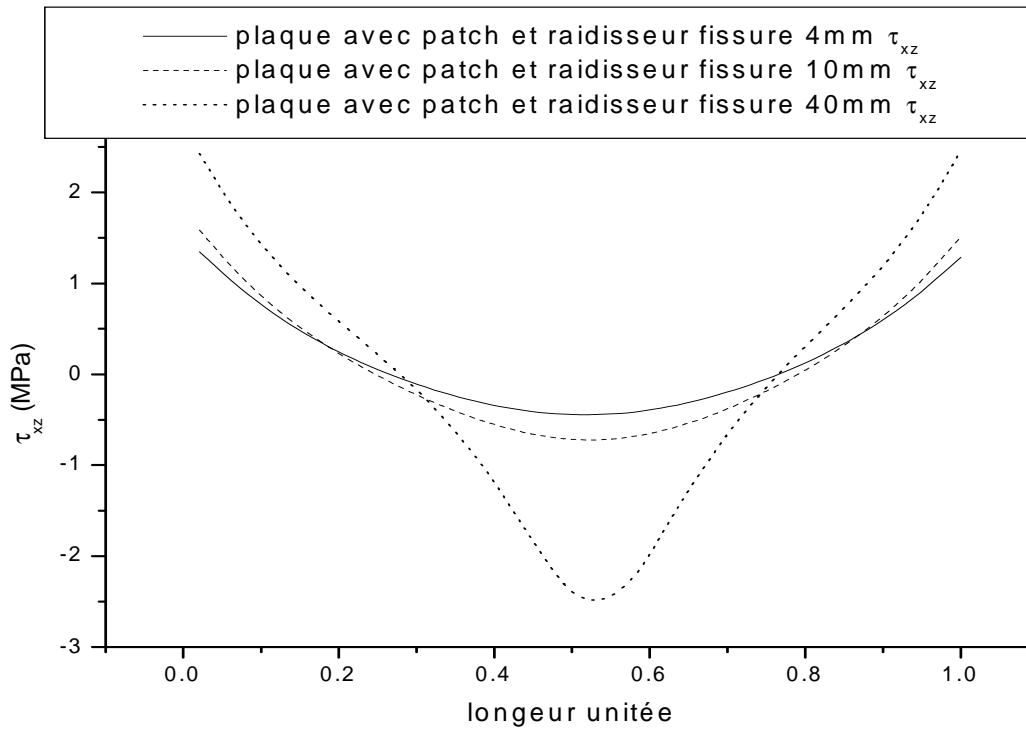


FIG 3-23 : Comparaison entre les contraintes de cisaillement de l'adhésif d'une plaque réparée par patch avec raidisseur sur la face opposée dans le plan (xz)

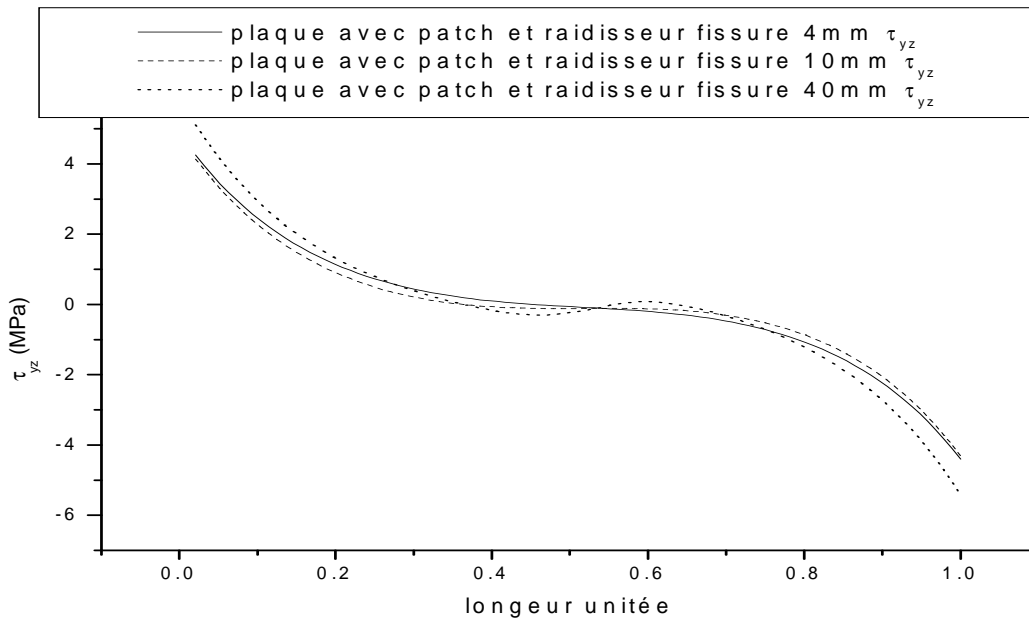


FIG 3-24 : Comparaison entre les contraintes de cisaillement de l'adhésif d'une plaque réparée par patch avec raidisseur sur la face opposée dans le plan (xz).

Chapitre3 : Etude comparative entre les techniques des raidisseurs et des patchs en composites dans la réparation des structures

Conclusion :

L'étude comparative réalisée dans ce chapitre, nous a permis de montrer clairement que la réparation par patch en composite est plus performante que la technique de raidisseur. Cette performance englobe les deux aspects de la réparation : efficacité et durabilité. Toutefois, la combinaison des deux techniques peut améliorer sensiblement la technique du patch du point de vue efficacité. La durée en fatigue de la structure réparée peut être augmentée de manière significative en ajoutant au patch un raidisseur.

La durabilité du patch n'est pas réduite par la combinaison des deux techniques même si les contraintes de cisaillement dans l'adhésif du côté du raidisseur sont relativement importante par rapport à l'adhésif recouvrant le patch.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

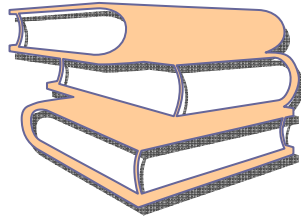
Cette étude a été faite dans le but de comparer les performances des techniques de réparations des structures aéronautiques par patch en composites et par raidisseurs métalliques. En raison de la non-disponibilité des moyens expérimentaux au sein de notre laboratoire nous nous sommes contentés d'une analyse numérique par la méthode des éléments finis. La comparaison s'est faite sur l'efficacité et la durabilité de la réparation. L'efficacité a été quantifiée par le facteur d'intensité de contraintes en tête de fissure et la durabilité par les contraintes dans la couche adhésive. Les résultats obtenus nous permettent de déduire les conclusions suivantes :

- la technique de patch est trois fois plus efficace que la technique des raidisseurs, si la longueur de fissure est importante. La technique du raidisseur donne une réduction maximale du FIC de l'ordre 25 alors que la technique du patch réduit le facteur d'intensité de contrainte avec un taux maximal de l'ordre de 80%.
- pour des faibles longueurs des fissures ($a < 7\text{mm}$) les valeurs du FIC pour la technique de raidisseur sont inférieures à celle enregistrée pour la technique du patch, La technique de raidisseur est relativement plus efficace si la longueur de la fissure réparée est faible
- la combinaison des deux techniques n'est pas efficace lorsque la longueur de la fissure est inférieure à 15 mm. Lorsque la longueur de la fissure est supérieure à 15mm, la combinaison des deux techniques peut améliorer considérablement la durée de vie des structures aéronautiques réparées
- Dans le cas de la réparation par patch en composite, les contraintes τ_{xz} maximale dans la couche adhésive est assez faible, elle représente 1/25 de la contrainte de rupture en cisaillement de l'adhésif. Alors que dans le plan yz la contrainte maximale représente 1/18 de la contrainte de rupture de l'adhésif
- Dans le cas d'une réparation par raidisseur, la contrainte maximale dans la couche adhésive peut dépasser la contrainte à la rupture particulièrement si la pointe de la fissure est tangente à bord du raidisseur. Du point de vue durabilité, le patch en composite est plus performant que le raidisseur.
- La combinaison des deux techniques influe négativement sur la durabilité de la réparation. Mais cette influence n'est pas sensible puisque les contraintes

Conclusion Générale

tangentielles dans la couche adhésive restent largement inférieures à la contrainte de rupture de l'adhésif.

REFFENCES BIBLIOGRAPHIQUES



- [1] : Valesteinas P., projet mosaïce Renault, www.techniqueingenieur.fr.
- [2] : Jouret M., Dubois J.B., le satellite d'astronomie COROT, premier successeur de Jason1 sur la plate -forme PROTEUS, CNES/center spatial de Toulouse.
- [3] : Koffi K. (1999) Etude numérique et expérimentale des éclissages de structure aéronautique soumis a des chargements de traction et flexion, mémoire de thèse, INSA, TOULOUSE, FR
- [4] : A. J. Kinloch, "Adhésion and adhésives", Ed. Chapman and hall, London, 1987.
- [5] : R. D. Adams, w. c. Wake,"structural adhesive joints in engineering", Elsevier Appl. Sci. Publishers, London, 1984.
- [6] : P. Fraisse, "caractérisation mécanique et ultrasonore de structures collées : cas des assemblages verre-époxy", Thèse de doctorat de l'université de paris v. r, 1991.
- [7] : COGNARD J., science et technologie du collage, presses polytechniques et universitaires Romandes 2000,322 pages.
- [8] : Inglis C.E. stresses in a plat due to the presence of cracks and Sharp corners. Transaction of the institution of naval architects 60, p.219-242, 1913.
- [9] : Bouchard. ANALYSE MECANIQUE D'UNE PIECE FISSUREE, chapitre 2, 2004.
- [10] : Griffith A.A .The phenomena of rupture and flow in solids. Philosophical Transactions of the royal society of London 221, p.163-198, 1920.

- [11] : Bui H.D. Mécanique de la rupture fragile. Edition Masson, 1978.
- [12] : Mianary P. Mécanique de la rupture vol1.Monographie et Materiologie les Edition de physique, 1995.
- [13] : Orowan E. Fracture and streighth of solids. Reports on Progress in physics 12(1), P. 185-232, 1949.
- [14] : A. Zegheloul, Concepts fondamentaux de la mécanique de la rupture. Université de Metz 2003-2004.
- [15] : G. Pluinage : Fracture and Fatigue Emanating from stress concentrators ; Kluwer Academic publishers (2003).
- [16] : B. Bachir Bouiadjra, W. Oudad, A. Albedah, F. Benyahia, M. Belhouari, Effects of the adhesive disband on the performances of bonded composite repairs in aircraft structures , Materials & Design, 2012, 37: 89-95.
- [17] : A.Albedah, M. Berrahou, M. Es-Saheb, F. Benyahia, B. Bachir Bouiadjra, Mass gain estimation between double and single bonded composite repairs in aircraft structures, Journal of thermoplastic composites materials, 2012,25:181-191.
- [18] : Mhamdia Rachid, B. Serier, B. Bachir Bouiadjra, M. Belhouari, Numerical analysis of the patch shape effects on the performances of bonded composite repair in aircraft structures , Composites Part B: Engineering, 2012,43:391-397.
- [19] : D. Ouinas, B. Bachir Bouiadjra, S. Himouri, N. Benderdouche, Progressive edge cracked aluminium plate repaired with adhesively bonded composite patch under full width disbond , Composites Part B: Engineering, 2012, 43:805-811.
- [20] : A. Albedah, B. Bachir Bouiadjra, R. Mhamdia . Es-Saheb, F. Benyahia, Comparison between double and single sided bonded composite repair with circular shape, Materials and Design 32 (2011) 996–1000.
- [21] : A.Albedah, B. Bachir Bouiadjra, W.Ouddad, . Es-Saheb, F. Benyahia, Elastic plastic analysis of bonded composite repair in cracked aircraft structures, Journal of reinforced plastics and composites, 30, (2011),66-72.
- [22] : B. Bachir Bouiadjra, M. Fari Bouanani, A. Albedah, F. Benyahia, M. Es-Saheb, Comparison between rectangular and

trapezoidal bonded composite repairs in aircraft structures: A numerical analysis , *Materials & Design*, 32, 2011, s 3161-3166.

[23] : B. Bachir Bouiadjra, T. Achour, M. Berrahou, D. Ouinas, X. Feugas Numerical estimation of the mass gain between double symmetric and single bonded composite repairs in aircraft structures *Materials & Design*, Volume 31, Issue 6, June 2010, Pages 3073-3077.

[24] : B. Bachir Bouiadjra, H. Fekirini, M. Belhouari, B. Serier, B. Benguediab, and D. Ouinas, SIF for Double- and Single-sided Composite Repair in Mode I and Mixed Mode, *Journal of reinforced plastics and composites* 30, 2010, 416-424.

[25] : L. Rezgani, B. Bachir Bouiadjra, M. Belhouari, K. Madani, B. Serier, and X. Feugas Effect of composite hygrothermal aging on the SIF variation in bonded composite repair of aircraft structures. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, December 2010; vol. 29, 24: pp. 3631-3636.

[26] : D. Ouinas, B. Bachir Bouiadjra, B. Achour, N. Benderdouche, Modelling of a cracked aluminium plate repaired with composite octagonal patch in mode I and mixed mode, *Materials & Design*, Volume 30, 2009, pp: 590-595.

[27] : D. Ouinas, M. Sahnoune, N. Benderdouche, B. Bachir Bouiadjra, Stress intensity factor analysis for notched cracked structure repaired by composite patching *Materials & Design*, Volume 30, 2009, pp: 2302-2308.

[28] : B. Bachir Bouiadjra, H. Fekirini, B. Serier, M. Belhouari and M. Benguediab, Energy Release Rate for Repaired Inclined Cracks with Bonded Composite Patch Having Two Adhesive Bands in Aircraft Structures, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Volume 27, 2008, pp:1135-1145.

[29] : B. Bachir Bouiadjra, H. Fekirini, M. Belhouari and B. Serier, Numerical analysis of the behaviour of repaired inclined cracks with bonded composite patch having two adhesive bands in aircraft structures, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, Volume 222, 2008, pp : 963-968.

- [30] : M. Bezzerrouki, B. Bachir Bouiadjra, D. Ouinas, SIF for cracks repaired with single composite patch having two adhesive bands and double symmetric one in aircraft structures, *Computational Materials Science*, Volume 44, 2008, pp: 542-546.
- [31] : L. Aminallah, T. Achour, B. Bachir Bouiadjra, B. Serier, A. Amrouche, X. Feaugas, N. Benssediq, Analysis of the distribution of thermal residual stresses in bonded composite repair of metallic aircraft structures, *Computational Materials Science*, Volume 46, 2009, Pages 1023-1027.
- [32] : R. Mhamdia, B. Bachir Bouiadjra, Stress intensity factor for repaired crack with bonded composite patch under thermo-mechanical loading, *Journal of reinforced plastic and composites*, 30, 2011,416-424.
- [33] : A.Albedah, B. Bachir Bouiadjra, L. Aminallah, . Es-Saheb, F. Benyahia, Numerical analysis of the effect of thermal residual stresses on the performances of bonded composite repairs in aircraft structures, *Composites: Part B* 4 2 (2011) 511–516.