

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
المركز الجامعي لعين تموشنت
Centre Universitaire d'Ain Témouchent

Institut de Technologie
Département de Génie Mécanique



PROJET DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master en :

Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

Filière : GENIE MECANIQUE

Spécialité : MECANIQUE ET ENERGETIQUE

Thème

**MODELISATION PAR ELEMENT FINIE D'UNE
TECHNIQUE DE REPARATION COMBINEE**

Présenté en : ...03/05/2018 Par :

1) BOUKACEM Abbes

2) SLIMANI BELKHIER Brahim

Devant le jury composé de :

Président

Dr. AMIRAT Mohamed

Examineur 1

Dr. BELHAMIANI Mohamed

Encadreur

Dr. OUDAD Wahid

Année universitaire 2017/2018

Remerciement

Ce travail a été effectué au département de Génie Mécanique de l'Institut des sciences et de la technologie au Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain Temouchnet.

A mon encadreur de thèse, Monsieur OUDAD WAHID, j'adresse mes sincères remerciements pour m'avoir accueilli ainsi que pour son soutien et son aide, tant technique, scientifique que moral.

J'exprime ma sincère gratitude aux membres des jurys, qui m'en fait l'honneur de m'accorder de leur précieux temps pour ma thèse.

Je tiens aussi à exprimer ma reconnaissance à mademoiselle BOUZITOUNA W. N, pour leurs précieux conseils et aides et je les en remercie vivement.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté à me rencontrer et répondre à mes questions durant la rédaction de ce travail.

Je remercie ma famille, qui m'ont permis de poursuivre mes études jusqu'à aujourd'hui et qui m'ont aidé moralement et financièrement.

Résumé

L'objet de la présente étude porte sur modélisation numérique par la méthode des éléments finis tridimensionnelle, de la réparation des structures métalliques présentant des dommages de type entaille par une technique combinée (perçage/composite) dite hybride, dans cette étude le rayon de trou de perçage et d'autres configurations de réparation d'entaille sont mis en évidence. La réparation hybride offre une complémentarité entre les deux techniques de réparation et augmente l'efficacité de la réparation jusqu'à 89% pour un rayon de 2 mm.

Abstract

The objective of the present study concerns a numerical modeling by the three-dimensional finite element method, the repair of metal structures presenting notch-type damage by a combined technique (stop hole / composite) repairs called hybrid technique. In this study the radius of the stop hole and other notch repairs configurations are highlighted. A complementarily was offer from the hybrid method and it increases the repair efficiency about 89% for the radius of 2mm.

ملخص

الهدف من هذه الدراسة يعتمد على النمذجة بالطريقة الرقمية ثلاثية الابعاد، لعملية اصلاح الهياكل المعدنية و التي تتواجد بها تصدعات من نوع شق نصف دائري.

نعمد هنا على طريقة الاصلاح بتجميع تقنية الثقب مع تقنية اللواصق المركبة و تسمى بالتقنية الهجينة.

تأثير قطر الثقب بالاضافة الى اعتماد طرق اخرى للاصلاح بنزع المادة تم اخذهم بعين الاعتبار.

النتائج المحصل عليها اظهرت فاعلية التقنية الهجينة في خفض الاجهادات عند طرف الشق.

و خصوصا بنسبة 89% من اجل نصف القطر 2 مم.

Sommaire

Remerciement.....	i
Résumé	ii
Sommaire.....	iii
Liste des figures.....	vi
Nomenclature.....	viii
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : GENERALITE SUR LA MECANIQUE DE LA RUPTURE.....	1
Introduction :.....	2
1. Principes importants de la mécanique de la rupture	2
2. Mécanique linéaire élastique de la rupture	2
2.1. Différent mode de rupture:.....	3
2.2. Utilisation de la mécanique de la rupture en conception	4
2.3. L'idée de Griffith	4
2.4. Critère de Griffith calcule simple :	5
2.5. Facteur d'intensité des contraintes :	6
2.6. Critère d'Energie :	7
2.7. Concept d'intensité des contraintes :	8
2.8. Concept d'intégrale J :	8
2.9. Ouverture de fissure (CTOD)	10
2.10. L'amorçage des fissures de fatigue :	10
2.11. L'amorçage par glissement cyclique :.....	10
2.12. Influence des propriétés des matériaux sur la rupture :.....	11
Conclusion	13

SOMMAIRE

CHAPITRE II : TECHNIQUES DE REPARATIONS DES FISSURES.....	15
Introduction :.....	16
1. Définition d'endommagement :.....	16
2.1. Contrôle par examen visuel (VT) :.....	17
2.2. Contrôle par ressuage (PT) :.....	17
2.3. Contrôle radiologique (RT) :.....	18
2.4. Contrôle par ultrasons (UT) :.....	18
3. Méthodes existantes pour détecter des modes de rupture d'une structure composite :.	18
4. Méthodes de réparation des structures fissurées :	20
4.1. Méthode d'infiltration :	20
4.2. La méthode du cycle de surcharge :.....	20
4.3. L'empreinte de billes :.....	21
4.4. Méthode du perçage avec expansion (cold working) :.....	22
4.5. Technique de grenailage	22
4.6. Technique du meulage :	23
4.7. Technique de collage du patch en composite :.....	24
4.8. Méthodes de réparation :.....	27
4.9. Réparation par composite:.....	28
4.10. Définition du composite	29
4.11. Historique des réparations par composites :.....	30
4.12. Éléments composants :	30
4.13. Classification des composites.....	31
4.14. Réparation par perçage	32
4.15. Réparation hybride :	34
Conclusion	34

SOMMAIRE

CHAPITRE III MODELISATION DE LA REPARATION HYBRIDE (PATCH/PERÇAGE) DES FISSURES	36
Introduction.....	37
1. Présentation du logiciel ABAQUS/CAE™.....	37
- Le module Part.....	38
- Le module Property	39
- Le module Assembly	40
- Le module Step	40
- Le module Interaction	40
- Le module Load	41
- Le module Mesh	42
- Le module Job.....	42
2. Résultats et interprétations :	43
2.1. Modèle géométrique étudié.....	43
2.2. Technique de perçage :.....	43
2.3. Comparaison entre la réparation combinée (perçage /composite) et perçage:.....	46
2.4. Le décollement	49
Conclusion	50
CONCLUSION GENERALE	52

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I- 1: Définition des modes de sollicitation	4
Figure I- 2 : Comparaison de l'approche classique et de l'approche utilisant la MLR [5]	4
Figure I- 3 : Fissure débouchante dans une éprouvette chargée en mode I.....	5
Figure I- 4 : Champ de contraintes aux abords du front de fissure	6
Figure I- 5 : Fissure traversant de longueur $2a$ dans une plaque infinie	7
Figure I- 6 : Contraintes près de l'extrémité d'une fissure [3]	8
Figure I- 7 : Interprétation de l'intégrale J	9
Figure I- 8 : Définition du CTOD.....	10
Figure I- 9 : Illustration de l'irréversibilité de glissement : formation d'une paire intrusion/extrusion à la surface d'un matériau sollicité en fatigue.[6]	11
Figure I- 10 Comportement en fonction de la ténacité [3]	12

Chapitre II :

Figure II- 1: Méthode de l'empreinte de bille	22
Figure II- 2: Exemple d'utilisation de la technique de grenailage	23
Figure II- 3 : Schéma de principe du meulage.....	23
Figure II- 4 : La méthode de meulage	24
Figure II- 5 : Disques coupants utilisés	24
Figure II- 6 : Réparation plaque en aluminium par patches composite	25
Figure II- 7 : Réparation d'un pipe avec patch en composite.....	25
Figure II- 8 : Réparation par patch externe	26
Figure II- 9 : Réparation par patch interne	26
Figure II- 10 : Schéma de réparation par patch externe	27
Figure II- 11 Schéma de la réparation biseautée par patch.....	28
Figure II- 12 : Schéma de réparation en escalier par patch interne	28
Figure II- 13- Éléments d'un matériau composite.....	29
Figure II- 14: Constitution d'un matériau composite	31
Figure II- 15 : Perçage en fond de fissure	32
Figure II- 16 Courbes de fissuration : évolution de a en fonction de N avec ou sans perçage avec rayon du trou $p_1 < p_2$	33
Figure II- 17 :- Configurations équivalentes d'entailles	33

LISTE DES FIGURES

Figure II- 18 : Trou en fond de fissure avec la distance d au bord de la surface libre	34
Chapitre III :	
Figure III- 1 Etapes à suivre pour la modélisation du modèle CAE [3]	38
Figure III- 2 Modèle géométrique de la plaque	39
Figure III- 3 Assemblage des structures	40
Figure III- 4 Déclaration des interactions	41
Figure III- 5 Déclaration des conditions aux limites	41
Figure III- 6 Maillage du modèle géométrique	42
Figure III- 7 perçage en fond de fissure	43
Figure III- 8 Configurations équivalentes d'entailles [5]	43
Figure III- 9 exemple d'une distribution de la contrainte σ_{22}	44
Figure III- 10 L'Effet du rayon de perçage	44
Figure III- 11 variation de la contrainte $\sigma_{22 \max}$ en fonction de l'angle d'enlèvement de matière symétrique	45
Figure III- 12 variation de la contrainte $\sigma_{22 \max}$ en fonction de l'angle d'enlèvement de matière asymétrique	45
Figure III- 13 variation de la contrainte $\sigma_{22 \max}$ en fonction de l'angle d'enlèvement de matière inclinée (β)	46
Figure III- 14 variation de contrainte σ_{22} le long du ligament de la fissure pour les trois techniques de réparation	47
Figure III- 15 variation de contrainte maximale σ_{22} pour les trois techniques de réparations ..	47
Figure III- 17 distribution de la contrainte le long du ligament pour la méthode de réparation combinée	48
Figure III- 16 Comparaison entre la méthode de réparation combinée et la méthode de perçage	48
Figure III- 18 variation de la contrainte σ_{22} en fonction de l'orientation des fibres du composite pour la méthode de réparation combinée	49
Figure III- 19 distribution de la contrainte de pelage σ_{13} suivant la ligne normalisée	50

Nomenclature

symbole	description	unité
σ	Contrainte Normales	[MPa]
σ_c	Contrainte critique	[MPa]
k_1	Facteur d'intensité des contraintes	[MPa.m ^{0.5}]
k_T	Facteur de concentration de contrainte	[-]
k_{eq}	Facteur d'intensité de contrainte équivalent	[MPa.m ^{0.5}]

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La rupture est un problème auquel l'homme devra faire face aussi longtemps qu'il construira des édifices ou fabriquera des structures. Ce problème est de plus en plus crucial avec le développement, lié aux progrès technologiques, de structures complexes. Les avancées dans la connaissance de la mécanique de la rupture permettent aujourd'hui et plus précisément depuis le milieu du 20^e siècle, de mieux prévenir le risque de rupture. [1]

Actuellement des technologies de réparation des structures fissurées ont été développées surtout en aéronautique dans le but de retarder l'apparition ou la propagation de fissures.

Une alternative à la réparation de ces structures consiste à les renforcer préventivement, avant que les défauts n'apparaissent.

Mettre en place des technologies efficaces et rentables afin de réparer ou de prolonger la vie des structures aéronautiques devient nécessaire dans la plupart des pays.

En effet, les budgets de maintenance nécessitent des coûts de plus en plus élevés. De ce fait, les industriels sont amenés à rechercher une méthode de réparation fiable et économique permettant de maintenir la structure en service et en toute sécurité pour une durée de vie limitée. Plusieurs techniques de réparation ont été élaborées [2].

Le contexte de ce travail est celui de la maintenance préventive de structures métalliques aéronautiques par renforts composites, enlèvement de matière (perçage) dans le but de développer une technique de réparation qui combine ces deux dernière (composite et trou percé) basé sur la méthode d'éléments finis tridimensionnelle.

Dans cette étude, nous allons exposer, dans le premier chapitre, un rappel sur la mécanique linéaire de rupture et ces différents modes.

Dans le deuxième chapitre, nous allons essayer de présenter les différentes techniques de réparation des fissures.

Dans le chapitre III, nous allons présenter les résultats de la modélisation numérique par la méthode des éléments finis.

Référence

[1]. Abderrahim ZEGHLOUL, CONCEPTS FONDAMENTAUX DE LA MECANIQUE DE LA RUPTURE ; 2015

[2]. Jean-Denis MATHIAS, Etude du comportement mécanique de patchs composites utilisés pour le renforcement de structures métalliques aéronautiques,

CHAPITRE I :
GENERALITE SUR LA MECANIQUE
DE LA RUPTURE

Introduction :

La mécanique de la rupture a pour objet essentiel l'étude des fissures macroscopiques : elle s'applique lorsqu'il existe dans le matériau des discontinuités telles dans la matière qu'elles viennent modifier l'état de contrainte, déformation et déplacement, si bien que l'homogénéisation du milieu n'a plus de sens. La mécanique de la rupture a été introduite par Griffith vers 1920. L'objectif de la mécanique de la rupture est de caractériser le comportement à la fissuration des structures à l'aide des paramètres quantifiables au sens de l'ingénieur, notamment le champ de contraintes, la taille de la fissure et la résistance à la fissuration du matériau. Les premiers développements théoriques d'analyse des champs de déplacements, déformations et contraintes au voisinage d'une fissure ont été entrepris par Westergaard vers 1940. L'extension de la discipline a été amorcée par Irwin vers 1960.

Depuis cette date, le développement de la mécanique de la rupture s'étend aux problèmes non linéaires matériellement et géométriquement, aux problèmes de bifurcation des fissures en modes mixtes et plus récemment aux composites, aux techniques numériques de résolution et à l'état de l'art relatif au dimensionnement de diverses structures complexes. La séparation en deux parties disjointes d'un corps se produit à la suite de la phase d'amorçage, qui a vu le développement de microcavités, microfissures... sous l'action de sollicitations mécaniques, thermiques, chimiques... La propagation de la ou des fissures macroscopiques peut conduire à la séparation complète de plusieurs morceaux, ou bien au contraire les fissures peuvent s'arrêter. Le mode de rupture peut être fragile, la rupture se produisant alors souvent sans déformation plastique, ou ductile, en présence d'une déformation plastique importante. L'énergie nécessaire pour produire la rupture, caractérisée par la résilience (rapport de l'énergie nécessaire pour rompre une pièce sur la section droite de matière rompue), est bien plus grande dans le cas de la rupture ductile.

Dans ce chapitre, nous allons présenter la mécanique linéaire de la rupture qui nous permet de répondre à la plupart des problématiques rencontrées.

1. Principes importants de la mécanique de la rupture

La mécanique de la rupture est une étude qui met en jeu les paramètres habituels de la mécanique à partir d'une discontinuité existante: fissure ou défaut. Elle permet dans certains cas de prévoir, en fonction des dimensions d'une fissure et de l'état de chargement, la vitesse de propagation de la fissure et la dimension à partir de laquelle cette fissure peut entraîner une rupture brutale. Cette dimension, appelée couramment taille critique du défaut caractérise la nocivité du défaut, c'est-à-dire la dimension de la fissure à partir de laquelle la structure mécanique n'est plus apte à l'emploi du fait de la perte de performance engendrée.

Dans ce contexte, il est légitime de se poser la question suivante: pourquoi des accidents outils néanmoins lieu (bien que rares) ? Il existe plusieurs éléments de réponse. La première raison est bien entendu que les industriels ne connaissent parfaitement bien leurs pièces qu'après avoir accumulé de l'expérience sur celles-ci, notamment afin de garantir qu'à l'issue du cycle de fabrication, les pièces sont exemptes de fissures détectables. Une autre raison.[2]

2. Mécanique linéaire élastique de la rupture

La rupture est un problème auquel l'homme aura à faire face aussi longtemps qu'il construira des édifices ou fabriquera des structures. Ce problème est actuellement plus crucial avec le développement de structures complexes lié au progrès technologique. Les avancées dans la

connaissance de la mécanique de la rupture permettent aujourd'hui et plus précisément depuis le milieu du 20^{esi}ècle, de mieux prévenir le risque de rupture.

Cependant, beaucoup de mécanismes de rupture sont encore mal connus notamment lorsqu'on utilise de nouveaux matériaux ou de nouveaux procédés. Le coût des ruptures catastrophiques représente, d'après une étude économique de début des années 80, près de 4% du PNB dans les pays industriels développés. On pourrait réduire ce coût d'environ 30% si on appliquait correctement les concepts connus de la mécanique de la rupture et de 25% supplémentaires par le développement des recherches dans le domaine de la rupture. [4]

On distingue deux catégories de rupture des structures:

- soit une négligence dans la conception, dans la construction ou dans l'utilisation de la structure
- soit l'utilisation d'un nouveau matériau ou d'un nouveau procédé, qui peut provoquer une rupture inattendue.

Dans le premier cas, le risque de rupture peut être évité dès lors que la structure est bien dimensionnée avec un choix de matériaux adaptés et que les chargements sont correctement évalués.

Dans le deuxième cas, la prévention de la rupture est plus délicate. Lorsqu'on utilise un nouveau matériau ou un nouveau procédé, il y a souvent un certain nombre de facteurs que le concepteur ne maîtrise pas toujours car la mise en œuvre de nouvelles techniques, bien qu'elle procure des avantages, conduit inévitablement à des problèmes potentiels.

Un exemple bien connu du deuxième cas est la rupture de ce qu'on appelait les bateaux de la liberté pendant la deuxième guerre mondiale. Ces bateaux, dont la coque était assemblée par soudage et non par rivetage, coûtaient moins chers et étaient fabriqués plus rapidement.

Ce changement de procédé de fabrication qui constituait un progrès indéniable, conduisait cependant à des ruptures catastrophiques qui se développaient dans les joints de soudure. Aujourd'hui, la plupart des bateaux sont assemblés par soudage mais le progrès des connaissances et l'utilisation des doubles coques en aciers plus adaptés permettent de mieux maîtriser ce risque de rupture.[3]

2.1. Différent mode de rupture:

La mécanique de la rupture est à cheval entre la mécanique des matériaux et la mécanique des

Structures car il est difficile de formuler une règle de changement d'échelle.

L'importance de l'effet des conditions aux limites, qui est un effet de structure, rend utile la définition de modes de rupture (Figure I-1)

a. Mode I : ou mode d'ouverture est caractérisé par un chargement et un Déplacement des surfaces de la fissure perpendiculaire au plan de fissuration, il est considéré comme étant le plus fréquente n mécanique de la rupture pour beaucoup de matériaux.

b. Mode II : glissement dans le plan les surfaces de la fissure se déplacent Dans le même plan et dans une direction perpendiculaire au front de la fissure

c. Mode III : glissement anti plan : les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction parallèle au front de la fissure.

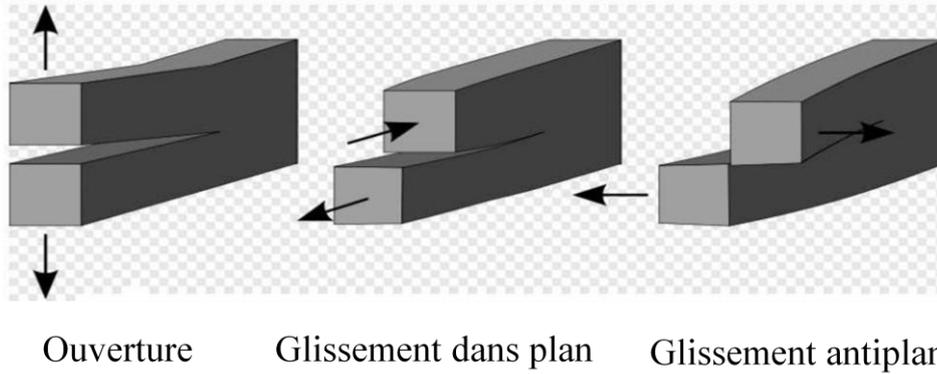


Figure I- 1: Définition des modes de sollicitation

2.2. Utilisation de la mécanique de la rupture en conception

Deux approches sont utilisées pour le dimensionnement des structures. La première, la plus classique, repose sur la limite d'élasticité du matériau σ_e , alors que la seconde s'appuie sur le concept de ténacité K_c issu de la mécanique linéaire de la rupture (MLR) (figure I-2) .[5]

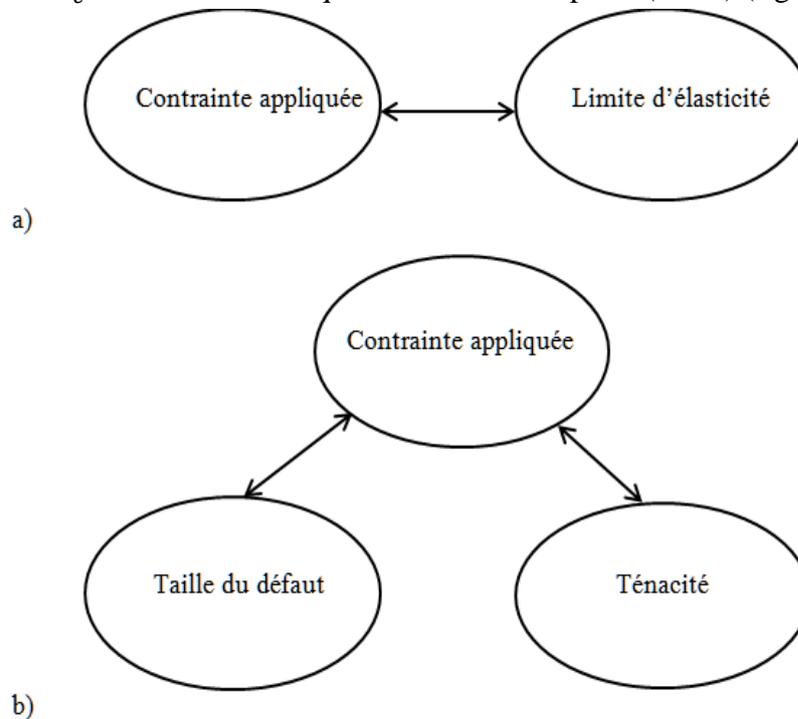


Figure I- 2 : Comparaison de l'approche classique et de l'approche utilisant la MLR [5]

2.3. L'idée de Griffith

La mécanique de la rupture a été inventée pendant la Première Guerre mondiale par l'ingénieur aéronautique anglais, **A. A. Griffith**, pour expliquer la rupture des matériaux fragiles¹. Le travail de Griffith a été motivé par deux faits contradictoires :

- la contrainte nécessaire pour rompre un verre courant est d'environ 100 MPa ;
- la contrainte théorique nécessaire à la rupture de liaisons atomiques est d'environ 10 000 MPa.

Une théorie était nécessaire pour concilier ces observations contradictoires. En outre, les expérimentations sur les fibres de verre que Griffith lui-même a mené suggèrent que la contrainte de rupture augmente d'autant plus que le diamètre des fibres est petit. Par conséquent il en déduit que le paramètre de résistance uni axiale à la rupture R_f , utilisé jusqu'alors pour prédire les modes de défaillance dans le calcul des structures, ne pourrait pas être une valeur indépendante des propriétés du matériau.

Griffith suggère que la faiblesse de la résistance à la rupture observée dans ses expériences, ainsi que la dépendance de l'intensité de cette résistance, étaient due à la présence de défauts microscopiques préexistants dans le matériau courant.

Pour vérifier l'hypothèse de défauts préexistants, Griffith a introduit une discontinuité artificielle dans ses échantillons expérimentaux. La discontinuité artificielle était une forme de fissure débouchant plus importante que les autres discontinuités supposées préexistantes dans l'échantillon.[6]

Les expériences ont montré que le produit de la racine carrée de la longueur de défauts (a) et la contrainte à la rupture (σ_f) était à peu près constant (Figure I- 3), ce qui est exprimé par l'équation :

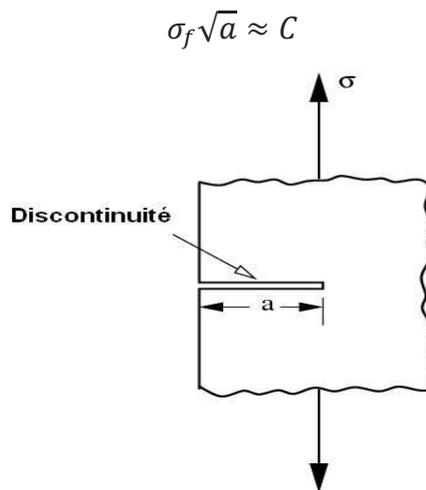


Figure I- 3 : Fissure débouchante dans une éprouvette chargée en mode I.

2.4. Critère de Griffith calculé simple :

Si l'on suppose la présence d'une fissure de taille a , le calcul de la valeur σ_f . De la contrainte à partir de laquelle cette fissure grandit peut s'estimer simplement.

L'explication de cette relation en termes de théorie de l'élasticité linéaire pose un problème de point singulier. En élasticité linéaire, la théorie prédit que la contrainte (et par conséquent l'effort) à l'extrémité d'une fissure dans un matériau idéalement élastique est infinie. Pour éviter ce problème, Griffith a développé une approche thermodynamique pour expliquer la relation qu'il a observée.

Le développement d'une fissure nécessite la création de deux nouvelles surfaces et donc une augmentation de l'énergie de surface. Griffith a trouvé une expression pour la constante C sur le plan de l'énergie de surface de la fissure en résolvant le problème de l'élasticité d'une fissure finie dans une plaque élastique. En bref, l'approche était la suivante :

- Calculer l'énergie potentielle stockée dans un échantillon parfait sous une charge de traction uniaxiale,
- Ajuster la contrainte de sorte que la charge appliquée ne déforme pas (plastiquement) l'échantillon, puis introduction d'une fissure dans l'éprouvette. La fissure relaxe la contrainte et, par voie de conséquence, relaxe l'énergie élastique aux abords des faces de la fissure. D'autre part, de par son existence, la fissure augmente l'énergie de surface totale de l'échantillon.

Calculer la différence d'énergie libre (énergie de surface - énergie élastique) en fonction de la longueur de la fissure. La rupture se produit lorsque l'énergie libre atteint une valeur maximale pour une longueur critique de fissure, au-delà de laquelle l'énergie libre diminue du fait de la propagation de la fissure (augmentation de l'énergie de surface) c'est-à-dire de l'augmentation de la longueur de la fissure jusqu'à provoquer la rupture. Grâce à cette méthode, Griffith a constaté que

$$c = \sqrt{2E\gamma/\pi}$$

Où :

E est le module de Young du matériau, et
 γ est la densité d'énergie de surface du matériau.

2.5. Facteur d'intensité des contraintes :

Lorsqu'un corps fissuré est sollicité par un champ de force il se produit au voisinage de la fissure une très grande concentration de contraintes, dans ces conditions qui représentent d'un point de vue pratique la réalité des pièces et structures. Les théories de l'élasticité permettent d'exprimer la contrainte proche du front de fissure par une série de Taylor en coordonnées polaires (Figure I- 4).[3]

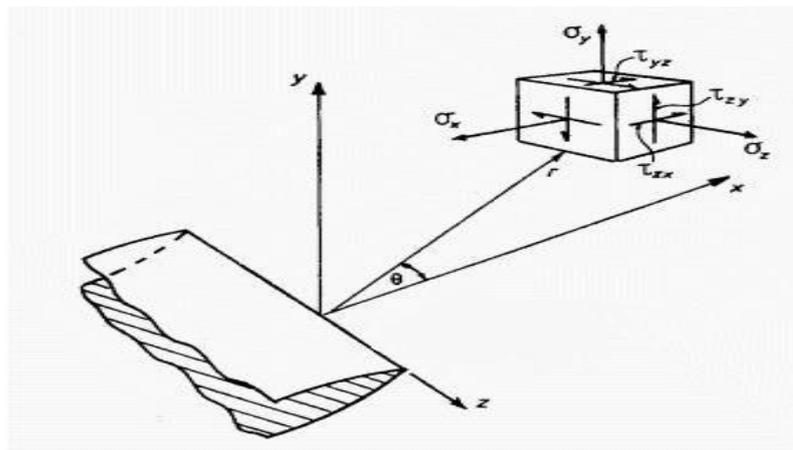


Figure I- 4 : Champ de contraintes aux abords du front de fissure

$$\sigma_{ij} = \frac{KI}{\sqrt{2\pi r}} f(\theta) + \dots + \dots + \dots$$

KI représente le facteur d'intensité de contraintes en mode I définis par IRWIN.

IRWIN a cherché une expression pouvant définir le champ de contraintes au voisinage de la fissure en tenant compte de la zone plastique par l'accroissement de la fissure. Il suggère que la fissure devient instable et se propage lorsque le facteur d'intensité de contraintes K atteint

une valeur critique K appelée ténacité qui caractérise quantitativement la résistance d'un matériau à la propagation brutale d'une fissure en mode I (Figure I- 5). Il énonça ainsi le critère de contrainte par la relation:

$$K_{Ic} = \sigma_c \cdot Y \cdot \sqrt{a}$$

Y : Représente un coefficient de forme, c'est une fonction géométrique de l'éprouvette et de la longueur de fissure, il est donné pour les principales pièces par des tables. Dans le cas de la flexion trois points :

$$Y = 1.93 - 3.07 \left(\frac{a}{w}\right) + 14.53 \left(\frac{a}{w}\right)^2 - 25.11 \left(\frac{a}{w}\right)^3 + 25.80 \left(\frac{a}{w}\right)^4$$

2.6. Critère d'Énergie :

L'approche énergétique est basée sur le postulat suivant : l'extension d'une fissure qui conduit à la rupture se produit lorsque l'énergie fournie est suffisante pour vaincre la résistance du matériau. Cette résistance se compose de l'énergie de création de surface, de l'énergie de plastification de l'extrémité de la fissure, et éventuellement d'autres types d'énergies dissipatives associées à la propagation d'une fissure.

Griffith fut le premier à proposer un critère d'énergie pour la rupture des matériaux fragiles, critère ensuite étendu aux matériaux ductiles par d'autres auteurs (dont Irwin et Orowan).

L'énergie de Griffith notée G (qu'on appelle aussi taux de restitution d'énergie),

Est définie en liaison avec la variation d'énergie par unité de surface fissurée, associée à la propagation d'une fissure dans un matériau linéaire élastique. La rupture se produit

Lorsque G atteint une valeur critique C_G . Cette valeur est en fait une mesure de la ténacité du matériau

Pour une fissure de longueur $2a$ (Figure I- 5), dans une plaque de dimensions infinies

(C'est à dire lorsque la longueur de fissure est très petite par rapport aux dimensions de la plaque dans la plan de chargement) constituée d'un matériau de module d'Young E

Et soumise à une contrainte nominale de traction s , l'énergie de Griffith G par unité de surface fissurée est donnée par :



Figure I- 5 : Fissure traversant de longueur $2a$ dans une plaque infinie

La rupture se produit lorsque la contrainte appliquée, devenue trop grande, atteint une certaine valeur R . Par conséquent,

Si G_c désigne la valeur critique de l'énergie obtenue pour la contrainte appliquée R , la relation précédente donne la formule :

$$G_c = \frac{\sigma^2 R a}{E}$$

2.7. Concept d'intensité des contraintes :

La (Figure I- 6) Schématise l'ensemble des contraintes appliquées sur un élément centré en un point M de coordonnées polaires (r, θ) par rapport à l'extrémité d'une fissure sollicitée en mode d'ouverture ou mode I.

Ces contraintes, pour le mode d'ouverture ou mode I indiqué sur la figure I-6 Sont décrites par les relations suivantes :

$$\sigma_{xx} = \frac{KI}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad [3]$$

$$\sigma_{yy} = \frac{KI}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad [3]$$

$$\tau_{xy} = \frac{KI}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad [3]$$

Ces relations peuvent s'écrire sous la forme condensée suivante :

$$\sigma_{ij} = \frac{KI}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta)$$

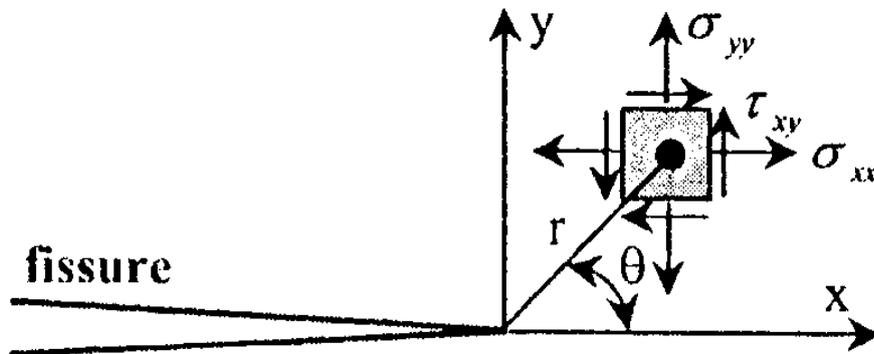


Figure I- 6 : Contraintes près de l'extrémité d'une fissure [3]

La formule de calcul du KI , que l'on peut trouver dans les manuels spécialisés, sont établies pour différentes configurations de chargement,. Dans le cas décrit par la figure I.2, le facteur KI est donné par :

$$KI = \sigma^\infty \sqrt{\pi a}$$

2.8. Concept d'intégrale J :

En 1968, Riche propose de quantifier l'énergie liée à une fissure dans un matériau élastique linéaire ou non-linéaire par l'intégrale de contour suivante : [3]

$$J = \int_{\Gamma} (\mathbf{w} \cdot d\mathbf{y}) - \mathbf{T} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} \cdot d\mathbf{s} \quad (4)$$

Où:

Γ : un contour fermé quelconque entourant la pointe de fissure

T le vecteur contrainte ($T_i = \sigma_{ij} n_j$),

u : le vecteur déplacement,

s : l'abscisse curviligne et w : la densité d'énergie de déformation.

Les champs de contraintes et déformation sont donc directement reliés à l'intégrale J . Des tests de rupture ont été réalisés par pour la détermination expérimentale de J_c comme paramètre de rupture. Il est à noter que dans le cas d'un matériau élastique linéaire, $J_c = G_c$.

Le paramètre J peut s'exprimer également, lors d'un essai de traction sur éprouvette, à partir de l'aire sous la courbe expérimentale force déplacement. En effet, cette aire correspond à l'énergie reçue par l'éprouvette. En exprimant alors la variation de cette aire avec une extension de fissure, peuvent apparaître des relations du type:

$$J = \frac{k_1^3}{E^*} + \frac{\eta u}{Bb} \quad \text{avec} \quad E^* = E \text{ en contraintes planes}$$

$$E^* = \frac{E}{1-\nu^2} \text{ en déformation planes}$$

Où U est la composante plastique de l'aire sous la courbe force-ouverture des lèvres de la fissure, B l'épaisseur, b la longueur du ligament et K_I le facteur d'intensité de contrainte en mode 1. η est une fonction dépendant de la géométrie.

Cette propriété est illustrée dans le cas d'un solide soumis à un déplacement ou un effort imposé.

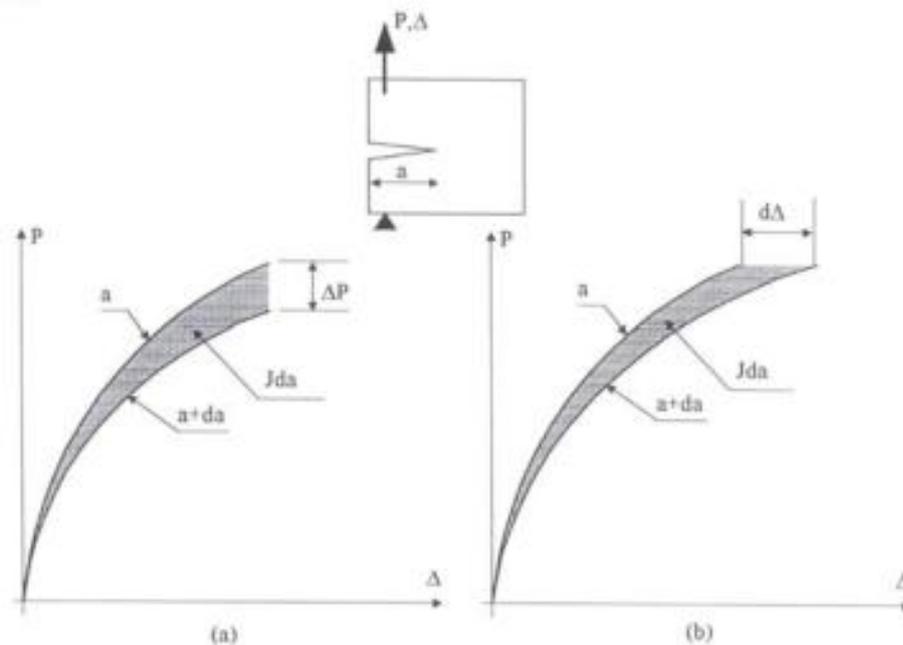


Figure I- 7 : Interprétation de l'intégrale J

$$J = \int_0^p \frac{\partial \Delta(p,a)}{\partial a} Dp$$

$$J = \int_0^\Delta \frac{\partial P(p,a)}{\partial a} d\Delta$$

(Figure I- 7) schématisé L'ensemble de ces propriétés, numériques et analytiques, explique le statut de quasi-monopole dont dispose l'intégrale J pour la définition de critères d'amorçage et de propagation en mécanique de la rupture non linéaire.

2.9. Ouverture de fissure (CTOD)

Lors d'une étude sur la ténacité d'un acier très ductile que la déformation en pointe de fissure est d'autant plus importante que le matériau est tenace, ces résultats l'ont conduit à proposer le déplacement d'ouverture en pointe de fissure noté CTOD comme critère de mesure de la ténacité à la rupture

Selon Wells le CTOD est défini par :

$$\text{CTOD} = 2 \cdot \delta_y$$

Où: δ_y est le déplacement de la fissure suivant l'axe y défini sur la (Figure I- 8)

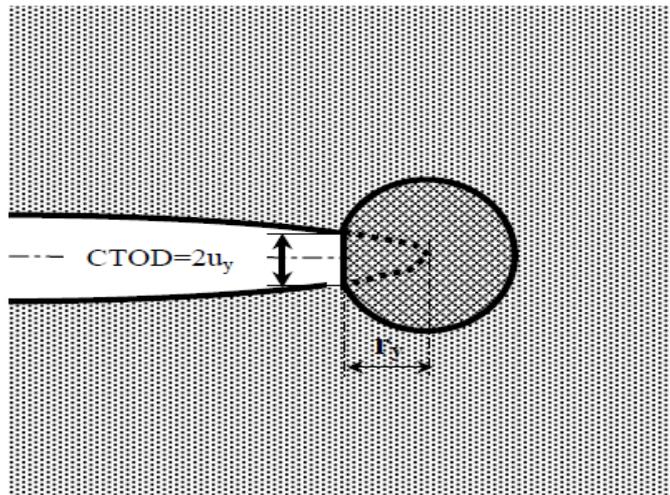


Figure I- 8 : Définition du CTOD

2.10. L'amorçage des fissures de fatigue :

L'amorçage dans les matériaux métalliques cristallins peut essentiellement naître de trois sources différentes :

- le glissement cyclique irréversible ;
- l'amorçage à partir de micro-hétérogénéités de la microstructure ;
- l'amorçage à fond d'entaille

2.11. L'amorçage par glissement cyclique :

L'application d'une contrainte mécanique lors du chargement de fatigue entraîne le mouvement des dislocations sur les plans de glissement cristallographiques au sein des différents grains du matériau sous l'effet de la contrainte de cisaillement cyclique locale.

Tant que ce glissement reste réversible, le comportement local du matériau reste élastique. Dans le cas particulier d'un grain débouchant à la surface, si le vecteur de Burgers du système actif pointe vers la surface, le glissement des dislocations dans ce grain va provoquer l'apparition de marches à la surface par le mécanisme de création d'une paire intrusion/extrusion (Figure I-9). Ces marches sont connues sous le nom de bandes de glissement persistantes et constituent des micro-fissures potentielles ; on parle alors de glissement irréversible.

Une démarche expérimentale pour caractériser ce phénomène est possible en mesurant l'évolution de la hauteur de bandes de glissement grâce à un microscope à force atomique.

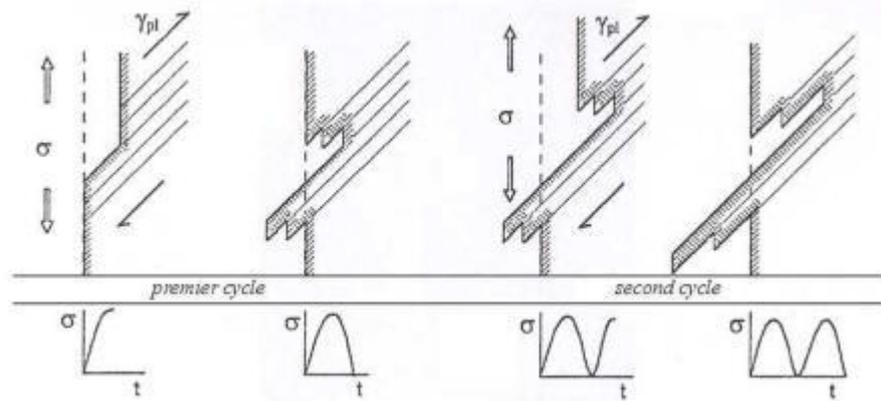


Figure I- 9 : Illustration de l'irréversibilité de glissement : formation d'une paire intrusion/extrusion à la surface d'un matériau sollicité en fatigue.[6]

a. L'amorçage à partir de micro-hétérogénéités de la micro structure :

Les matériaux métalliques industriels sont généralement des alliages de composition complexe avec un grand nombre d'éléments d'addition. Ces matériaux sont micro hétérogènes car ils contiennent des particules intermétalliques (ségrégation des éléments d'addition), des joints de grains,

Des porosités qui créent localement une incompatibilité de déformation et/ou une concentration de contrainte.

Une micro-fissure peut alors s'amorcer par accumulation de dislocation sur le défaut, si la cristallographie locale y est favorable ;La rupture des particules de seconde phase est également souvent observée du fait d'une incompatibilité de déformation avec la matrice. Cette micro rupture peut ensuite se propager par accumulation de dislocation si les grains avoisinants sont bien orientés.

La localisation de l'amorçage sur les différents sites possibles dépend de la contrainte appliquée. Pour les alliages d'aluminium, en absence de tout effet de concentration de contrainte par une entaille (voir paragraphe suivant), l'amorçage à basse contrainte se produit principalement sur les phases intermétalliques; sous une forte contrainte par contre, l'amorçage par glissement cyclique ou décohésion de joints de grains devient possible.

b. L'amorçage à fond d'entaille :

Dans une structure réelle, les coins, congés ou trous ne peuvent généralement pas être évités. Le fait que ces particularités géométriques soient des sites préférentiels d'amorçage des fissures de fatigue est connu sous le nom d'effet d'entaille. Celui-ci est dû à la concentration de contrainte qu'ils génèrent à leur voisinage. On définit le facteur de concentration de contrainte K_t (théorique) comme le rapport entre la contrainte pic σ_{pic} et la contrainte nominale σ_{nom}

$$K_t = \frac{\sigma_{pic}}{\sigma_{nom}}$$

2.12. Influence des propriétés des matériaux sur la rupture :

En mécanique de la rupture, le choix du concept varie selon le comportement physique du matériau sur la. (Figure I- 150)

La classification usuelle de ces concepts est la suivante :

- La mécanique linéaire de la rupture (MLR) pour les matériaux dont le Comportement Est essentiellement linéaire élastique, tels les alliages d'aluminium à précipitation Durcissant, les aciers à haute limite élastique, les céramiques...
- La mécanique élastoplastique de la rupture (MEPR), pour les matériaux ductiles tels les aciers à faible ou moyenne résistance, les inox ou aciers austénitiques, les alliages de cuivre...
- La mécanique dynamique de la rupture (MDR), linéaire ou non linéaire, pour Les Métaux sollicités à grandes vitesses de déformation – dans ces conditions, Le Comportement peut aussi être viscoplastique.
- La mécanique viscoélastique de la rupture (MVER), essentiellement pour les Polymères sollicités à des températures au dessous de la température de transition vitreuse.
- La mécanique viscoplastique de la rupture (MVPR) pour les polymères au dessus De la température de transition ou encore les métaux et les céramiques sollicités à Haute température.

Remarque :

- 1/ Si le temps n'agit pas en MLR et en MEPR, il intervient explicitement en MDR, MVER et MVPR.
- 2/ La MEPR, la MDR, la MVER et la MVPR sont souvent regroupées dans le Domaine élargi de la mécanique non linéaire de la rupture (MNLR).
- 3/ Pour les matériaux à très haute ténacité, la MLR n'est plus valable puisque les Propriétés d'écoulement du matériau gouvernent le mécanisme de rupture. Une Simple analyse de chargement limite permet alors de dimensionner les structures.
- 4/ Pour les matériaux à ténacité intermédiaire, la MNLR est souvent appliquée.[3]

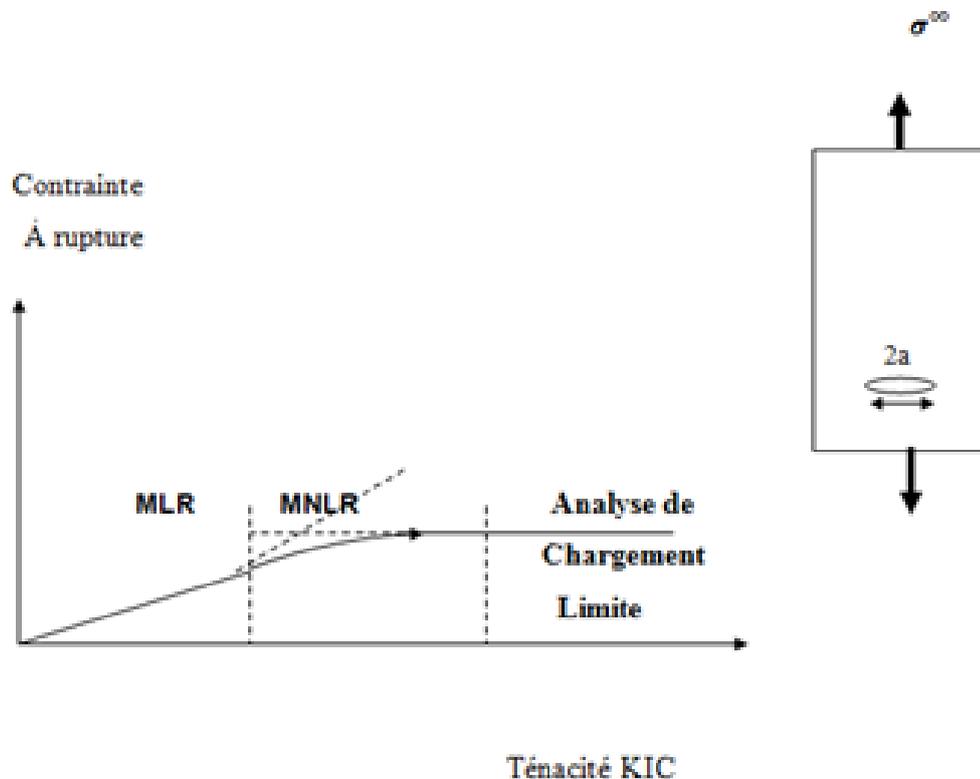


Figure I- 10 Comportement en fonction de la ténacité [3]

Conclusion

La mécanique de la rupture est devenue un élément essentiel dans les processus de dimensionnement des industriels.

Dans ce chapitre, nous avons présenté la mécanique linéaire de la rupture qui nous permet de répondre à la plupart des problématiques rencontrées

Références

- [1] f_mecarup_poly, chapit1 : éléments de mécanique de la rupture.
- [2] Techniques de l'Ingénieur/ Mécanique de la rupture/ Juan-Antonio RUIZ-SABARIEGO
- [3] DJEBLOUN Youcef , mécanique linéaire élastique de la rupture Thèse Pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences 2010
W. Oudad, Analyse par la méthode des éléments finis tridimensionnelle de l'étendue de la zone plastique en tête de fissure réparée par patch en composite. Thèse Pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences 2010
- [4] concept fondamentaux de la mécanique de la rupture abderahim zegueloul
Henry PROUDHON, Identification des mécanismes de fissuration dans un alliage d'aluminium sollicité en frétting et en fatigue, formation doctorale : génie des matériaux, 2005
- [5]
- [6]

CHAPITRE II :
TECHNIQUES DE REPARATIONS
DES FISSURES

Introduction :

Les fissures sont présentes dans toutes les structures, elles peuvent exister sous forme de défaut de base dans le matériau ou peuvent être induites durant la construction, ces fissures sont responsables de la majorité des ruptures qui se produisent dans les structures et pièces de machines en service, soumises à des efforts statiques ou dynamiques.

Ceci implique de devoir développer des solutions simples, peu coûteuses en termes de procédé de réparation et rapide dans le but de réduire le temps d'immobilisation de l'appareil.

Les technologies de la réparation sont actuellement largement exploitées surtout en aéronautique dans le but de réduire la vitesse de propagation des fissures et prolonger, ainsi la durée de vie des structures.

Afin d'aborder à la réparation avec patch composite et du perçage ainsi la méthode hybride, les différents domaines comme l'endommagement des composites, les moyens de contrôle et les procédés de réparation existants seront présentés dans ce chapitre. Nous verrons notamment que l'histoire des réparations a fortement marqué les procédés de réparation des composites.

1. Définition d'endommagement :

L'endommagement est l'apparition de dommages dans un matériau caractérisé par une extension de surface libre à l'intérieur du matériau, accompagnée d'une augmentation de fraction volumique de vide. Cette apparition est causée par une attaque physique ou chimique. Il conduit à une dégradation de ses capacités physiques pouvant conduire à la rupture. Un niveau d'endommagement peut être relié directement à des propriétés physiques parce que l'endommagement est caractérisé par des modifications en principe observables. Les phénomènes d'endommagement tels que les microdéformations, la dégradation des surfaces, les microcavités, la corrosion, et le vieillissement. Sont tous observables, mais parfois ils sont difficiles à mettre en évidence. [1]

2. Les moyens de détection l'endommagement :

L'inspection est l'ensemble des théories et procédés aptes à fournir les informations sur la santé d'une pièce ou d'une structure sans qu'il en résulte des altérations préjudiciables à leur utilisation ultérieure. L'opération de contrôle d'un objet ne se limite généralement pas à la détection d'éventuels défauts. En effet, même si le choix du procédé, de la méthode et du matériel a été effectuée au préalable, il faut envisager toute une procédure ayant les objectifs suivants : fiabilité de l'examen, localisation des défauts, identification, caractérisation de

ceux-ci, en particulier par leur taille, présentation visuelle, enfin archivage des résultats et les conditions d'examen. Parmi les moyens, nous avons : [2]

2.1. Contrôle par examen visuel (VT) :

Le contrôle visuel est une technique essentielle lors du contrôle non destructif. L'état extérieur d'une pièce peut donner des informations essentielles sur l'état de celle-ci: des défauts évidents (comme des pliures, des cassures, de l'usure, de la corrosion ou fissures ouvertes). Un examen visuel doit être effectué dans de bonnes conditions assurant avant tout un éclairage suffisant. Le niveau d'éclairage minimum requis est de l'ordre de 350 Lux. L'accessibilité de la partie à examiner doit permettre d'approcher l'oeil à au moins 60 cm, sous une incidence de 30°. Lorsque la partie de la pièce à contrôler n'est pas accessible par un examen direct, on utilise un appareil appelé endoscope. Il s'agit d'un appareillage constitué de miroirs et lentilles. La méthode est appelée contrôle par endoscopie. Des défauts cachés sous-jacents présentant une irrégularité sur la surface extérieure peut être une indication de défaut plus grave à l'intérieur. Choisir la technique la plus adaptée en CND pour des examens approfondis déterminer des limitations des autres techniques CND choisies (accès, état de surface, etc). Les tests d'étanchéité, les tests pneumatiques et les épreuves hydrauliques comportent aussi un examen visuel pour mettre en évidence des fuites éventuelles.

2.2. Contrôle par ressuage (PT) :

C'est une méthode destinée à révéler la présence de discontinuités ouvertes en surface de pièces métalliques, essentiellement, mais aussi en céramique. Elle consiste à badigeonner (par immersion ou par pulvérisation électrostatique, parfois mais rarement, au pinceau) la cible avec un liquide fluorescent ou coloré en rouge, qui pénètre dans les discontinuités. Après nettoyage de la cible, un révélateur est appliqué et, en faisant « ressuage » le liquide resté dans les fissures, va les révéler.

Cette méthode semble très simple à mettre en œuvre et elle est sensible aux discontinuités ouvertes. On peut mettre en évidence des discontinuités de 1 µm d'ouverture, 100 fois plus fines qu'un cheveu. De plus, elle nécessite l'utilisation de produits non récupérables, voire contaminés après utilisation (ex. : centrale nucléaire : on essaie de réduire le volume des déchets), mais cette méthode est irremplaçable pour la mise en évidence de discontinuités débouchantes présentes dans les matériaux non ferromagnétiques ou non conducteur d'électricité.

2.3. Contrôle radiologique (RT) :

C'est une méthode qui utilise la propriété des rayons X ou γ de faible longueur d'onde, aptes à traverser la matière. L'intensité du rayonnement est modifiée durant sa traversée selon qu'il rencontre le matériau sain ou les défauts inclus.

Le récepteur radiographique placé derrière l'objet enregistre les variations du faisceau émergent ce qui se traduit par une image ou un film comportant des différences de densité ou contraste, montrant les imperfections de la matière.

Ce contraste entre l'image d'un domaine contenant un défaut et celle d'un domaine exempt de défaut permet à l'observateur de distinguer l'imperfection.

2.4. Contrôle par ultrasons (UT) :

Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'une onde ultrasonore se propageant dans la pièce à contrôler. Le train d'onde émis se réfléchit sur les défauts puis revient vers le traducteur (qui joue souvent le rôle d'émetteur et de récepteur). L'interprétation des signaux permet de positionner le défaut et de définir ses dimensions relatives. Cette méthode présente une résolution spatiale élevée et la possibilité de trouver des défauts aussi bien dans le volume de la matière qu'en surface. L'étape d'inversion est simple, du moins pour les pièces géométriquement et matériellement simples. Cette méthode nécessite d'effectuer un balayage mécanique exhaustif de la pièce. Il est d'ailleurs souvent nécessaire de contrôler plusieurs surfaces de la pièce pour pouvoir faire une représentation tridimensionnelle des défauts.

D'autres techniques, telle que la méthode TOFD (Time of flight diffraction), utilisent le principe de diffraction des ondes ultrasonores pour la détection et la caractérisation des défauts. Les développements technologiques récents permettent également la mise en œuvre de "multiéléments", c'est-à-dire l'équivalent de plusieurs capteurs ultrasonores utilisés en même temps, ce qui permet de maîtriser la "forme" du train d'ondes émis. Par comparaison avec le contrôle par radiographie qui est également mis en œuvre pour la recherche de défauts dans le volume de la matière.

3. Méthodes existantes pour détecter des modes de rupture d'une structure composite :

Jusqu'à présent, il y a pas mal de méthodes de mesure qui sont utilisées pour détecter des modes de rupture d'une structure composite. Parmi elles, certaines méthodes sont capables de suivre la procédure de rupture.

3.1. Jauge de déformation

Cette méthode est très classique et elle est capable de mesurer des déformations locales sur la surface où se trouvent des jauges utilisées. Sa performance dépend de la sensibilité de jauge et sa mise en place.

3.2. Extensomètre optique

L'extensomètre optique applique une technique susceptible de délivrer un champ de grandeurs cinématiques (déplacement, flèches, pentes...) lors des essais mécaniques pratiqués sur éprouvettes composites. Cette méthode est utilisée très rarement.

3.3. Thermographie infrarouge

La technologie de thermographie infrarouge est de plus en plus mûre. Pour une composite structure réparée, on a essayé de l'utiliser à inspecter la fiabilité de réparation ou à suivre la propagation d'endommagement dans un système réparé. Une source de chaleur est obligée pour l'utilisation de cette méthode. Afin de réussir le suivi de révélation des endommagements, des essais en fatigue sont indispensables.

3.4. Mesure de champs pleins par caméra optique :

En utilisant cette méthode, on peut mesurer des déplacements d'un champ plein en fonction son maillage présélectionné. Mathias et al [2] ont utilisé cette méthode à mesurer des patches de réparation dans un système réparé avec des essais statiques en traction. Gill et al ont testés des éprouvettes trouées et ont suivi la propagation des Endommagements avec cette méthode.

3.5. Capteur de fibre optique

On peut surveiller attentivement une structure composite avec l'utilisation des capteurs de fibre optique. Des capteurs peuvent être placés entre des plis avant la polymérisation de la structure composite. Cette méthode est assez sensible, mais elle coûte cher. McKenzie et al [3] ont réussi à suivre la procédure de rupture d'un système réparé en utilisant cette méthode.

3.6. Transducteur piézoélectrique :

L'utilisation des transducteurs piézoélectriques permet d'inspecter une large structure composite avec un convenable arrangement. La mise en place des transducteurs influence la performance de mesure. White et al [4] ont utilisé

Cette méthode à détecter des endommagements dans un système réparé. S.H. Diaz et C. Soutins ont détecté des propagations de délamination en utilisant aussi cette méthode.

3.7. C-Scan

C-scan est utilisé couramment sur structure composite. Elle est obligée de fonctionner dans l'eau. Autrement dit, on ne peut pas suivre une procédure de rupture sans arrêt.

3.8. Emission acoustique :

La méthode émission acoustique est très pratique à utiliser. Mais le traitement des résultats n'est pas évident. On peut trouver facilement quand et où l'endommagement a lieu. Cependant le suivi de sa propagation devient compliqué.

4. Méthodes de réparation des structures fissurées :

La détection des défaillances se fait par contrôle aux ultrasons où un outil intelligent va inspecter des structures et déceler les éventuelles défaillances. L'interprétation des résultats de l'outil déterminera les défaillances où les défauts ont été constatés qui devront être remplacés ou réparés selon la gravité et les dimensions du défaut.

Présentant les techniques suivantes :

4.1.Méthode d'infiltration :

Le principe de cette méthode est d'infiltrer au fond de la fissure une résine afin de provoquer artificiellement la fermeture de la fissure. Ainsi, l'amplitude du chargement, conduisant à l'ouverture et à la propagation de la fissure, est restreinte. Comme. La vitesse de propagation qui dépend essentiellement de ce chargement est ralentie par ce procédé.

Song et autre sont montrés que l'infiltration de la résine époxy était capable d'arrêter la propagation d'une fissure à de faibles niveaux du facteur d'intensité de contrainte.

La nature du matériau pour l'infiltration et la taille des particules de ces matériaux ont un effet améliorant sur durée de vie. Le niveau de fermeture de la fissure est quantifié

Par la fonction U:

$$U = \frac{k_{max} - k_{op}}{k_{max} - k_{min}} = \frac{\Delta k_{eff}}{\Delta k}$$

k_{max}, k_{op}, k_{min} Sont les facteurs d'intensité de contrainte maximal, d'ouverture de la fissure et minimal ΔK_{eff} et ΔK sont les amplitudes du facteur d'intensité de contraintes effective et nominale.

D'une manière générale, l'efficacité de la méthode d'infiltration pour réparer les structures fissurées dépend de plusieurs paramètres:

Le type de résine,

- La taille des particules de la poudre,
- La densité des particules de la poudre utilisée [3]

4.2.La méthode du cycle de surcharge :

Un élément de structure sollicité en fatigue possède dans la plupart des cas un spectre de chargement aléatoire. L'approximation la plus simple d'un chargement cyclique réel est d'utiliser comme paramètre de sollicitation la charge moyenne et l'amplitude moyenne de ce spectre. En fatigue, l'histoire du chargement est donc un facteur primordial pour le calcul du

nombre de cycles à rupture d'un élément fissuré. L'interaction des niveaux de chargement influe fortement sur les vitesses de propagation de fissure. En effet, une surcharge appliquée lors d'un chargement d'amplitude constante provoque un retard sur la propagation de fissure. De même, si une sous-charge intervient dans ce type de chargement, une accélération du taux de propagation peut être observée. Il est donc important d'étudier l'influence de l'interaction des niveaux de charge en fissuration par fatigue. Comme le montre le (Tableau II-1), il existe plusieurs façons d'évaluer les interactions des niveaux de chargement. Les chargements d'amplitude variable de type stationnaire permettent d'étudier de manière globale la courbe de fissuration (de l'amorçage à la rupture). Les chargements de type instationnaire permettent, eux, d'étudier les zones de transition entre deux chargements et d'évaluer les vitesses de propagation suite à la variation de la charge. En effet, l'application d'un cycle de plus grande amplitude au sein d'un chargement à amplitude constante entraîne une zone de transition de la propagation durant laquelle le taux d'accroissement de fissure diminue dans un premier temps pour atteindre un minimum, puis augmente jusqu'au total recouvrement de la vitesse initiale de propagation. De plus, de par son effet bénéfique sur la durée de vie en fatigue, la surcharge peut être considérée comme un moyen de réparation lors de l'apparition d'une fissure sur un élément de structure métallique.

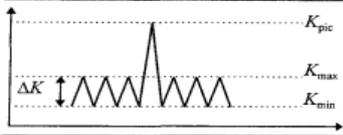
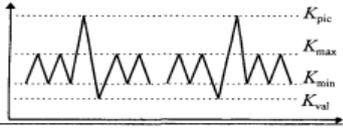
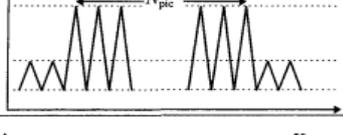
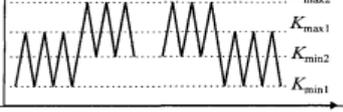
Chargements	Désignations	Grandeurs caractéristiques
	Surcharge unique (instationnaire)	$R_{pic} = \frac{K_{pic}}{K_{max}}$ $\tau_{pic} = \frac{K_{pic} - K_{min}}{K_{max} - K_{min}} \times 100$
	Surcharge précédée ou suivie d'une sous-charge (instationnaire)	
	Surcharges multiples (instationnaire)	N_{pic} : nombre de pics de surcharges
	Blocs de charge (instationnaire)	R_1 et R_2 : Rapports de charge 1 et 2 ΔK_1 et ΔK_2 : amplitude des chargement 1 et 2

Tableau II- 1 : Méthodes de réparation des structures fissurées

4.3.L'empreinte de billes :

(Figure II- 1) schématise L'empreinte de bille permis d'évaluer l'influence d'empreintes de billes placées de part et d'autre du chemin présumé de la fissure. En effet, quand la fissure passe dans l'axe des empreintes, elle ralentit. Ce phénomène est dû essentiellement aux

contraintes résiduelles de compression induites par la plastification engendrée par les empreintes de billes. [4]

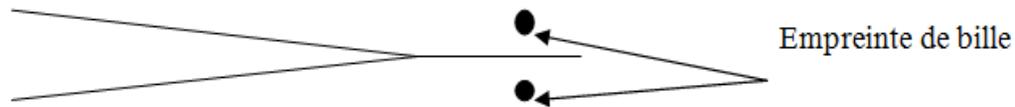


Figure II- 1: Méthode de l'empreinte de bille

4.4. Méthode du perçage avec expansion (cold working) :

La méthode du trou ou du trou expansé Cette méthode consiste à percer un trou au fond de la fissure, qui est aigu. Cette opération est effectuée dans le but d'augmenter le rayon du fond de la fissure et donc de conduire à un réamorçage de celle-ci. Ceci conduit à retarder sa propagation. Cette technique peut être utilisée en perçant un trou loin du fond de la fissure en vue de dévier le chemin de propagation. Cette déviation lui fait alors changer de mode de propagation, ce qui induit un effet bénéfique sur la durée de vie. Cette technique a été améliorée par l'expansion du trou, on introduit ainsi des contraintes résiduelles de compression. Elle apporte manifestement un gain au niveau de la durée de vie des structures. Cette durée de vie augmente avec l'augmentation [4] :

- du diamètre du trou,
- du degré de son expansion

4.5. Technique de grenailage

Cette méthode repose sur l'intromission de contraintes résiduelles de compression en fond de fissure. En effet, les déformations plastiques obtenues par ces traitements provoquent en avant de la fissure de fatigue des contraintes résiduelles de compression. Ces contraintes diminuent la force motrice de propagation de la fissure. La Figure II-2 montre un exemple d'application du grenailage au cours de la propagation d'une fissure sur une éprouvette CT. Dans ce travail, l'auteur a analysé les effets de la surface grenillée et de sa position par rapport au fond de la fissure.[4]

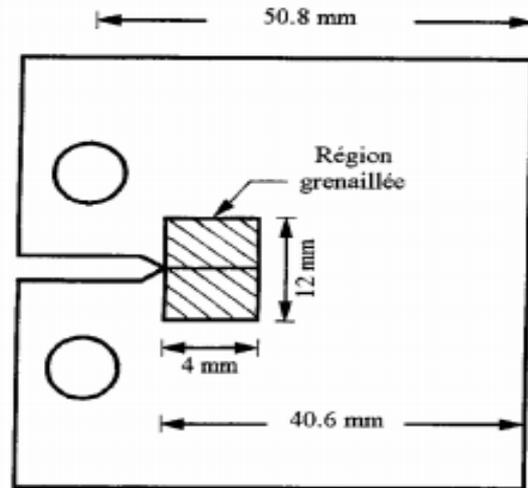


Figure II- 2: Exemple d'utilisation de la technique de grenailage

4.6. Technique du meulage :

Cette technique de réparation est basée sur le principe d'élimination des fissures par enlèvement de matière (figure II-3). Elle permet ainsi d'éliminer la singularité créée par le front de la fissure. C'est une technique simple qui nécessite un matériel moins encombrant et moins coûteux. Le meulage peut engendrer de bons résultats en termes de durée de vie bénéfique moyennant quelques précautions élémentaires au niveau de sa mise en œuvre. Cependant, cette technique peut fragiliser la structure du fait de la diminution localisée de la section. Cela nécessite une vérification par les calculs de la tenue mécanique de telles structures après réparation.[5]

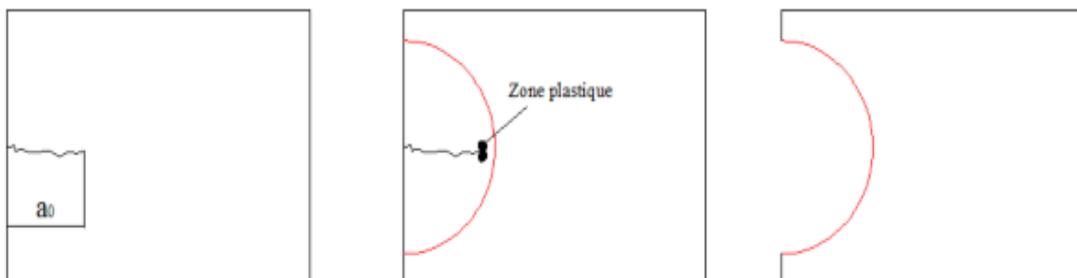


Figure II- 3 : Schéma de principe du meulage

La technique de meulage est particulièrement intéressante pour des structures soudées. La concentration de contrainte a été étudiée en utilisant la théorie des éléments finis dans la (figure II-4). La concentration de contrainte est toujours localisée aux extrémités longitudinales du sillon de la réparation.

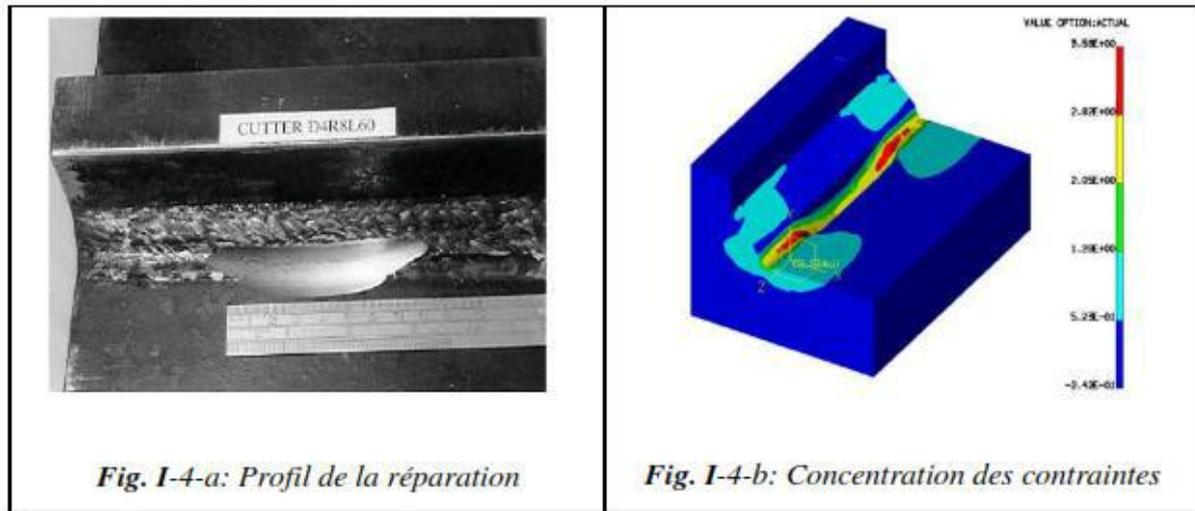


Figure II- 4 : La méthode de meulage

Dans le cas d'un cordon des ou dure et Té fissurée, à l'aide d'un disque coupant piloté par une machine à commande numérique. La figure II-6 montre les disques coupants utilisés avec des rayons de 4, 8 et 12 mm .Une série d'essais a été réalisée en vue d'évaluer la durée de vie résiduelle en fatigue des éprouvettes fissurées après l'opération de meulage. (Figure II- 5): montre les éprouvettes examinées et les paramètres expérimentaux.



Figure II- 5 : Disques coupants utilisés

4.7. Technique de collage du patch en composite :

Réparation par collage de patches composite Aujourd'hui, des structures composites sont utilisés couramment non seulement dans le domaine aéronautique mais aussi dans les domaines navals, véhicule de sport, bicycle, ski, etc. Donc toutes les applications posent peut-être un besoin de réparation. I. Grabovac et D. Whittaker ont conclu concrètement des applications de patches composites pour la réparation des grands bateaux métalliques (Figure II-6) en profitant une expérience pratique de 15 ans. Grâce à leurs travaux dans l'équipe Honda Racing F1, G. Savage et M. Oxley ont exprimé leurs moyens de réparations pour des structures composites: insertion, injection de résine, patches composites (Figure II-7), etc. Ils ont donné pas mal de conseils sur la conception de réparation et les considérations pratiques.

En outre, des patchs composites sont appliqués également dans l'ingénierie civile. Yao et al ont fait une étude expérimentale pour vérifier la performance de collage entre patchs composites et bétons (simple recouvrement et double recouvrement) sous la traction. [6]

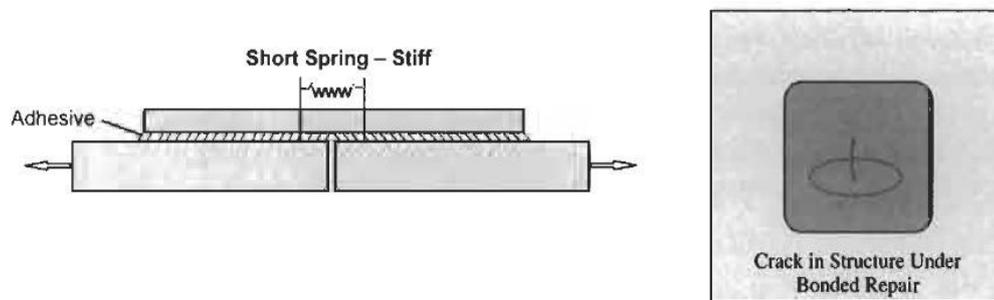


Figure II- 6 : Réparation plaque en aluminium par patchs composite



Figure II- 7 : Réparation d'un pipe avec patch en composite

Types de patch :

Les patchs utilisés pour réparer une structure composite endommagée sont classés en deux catégories : patchs externes et patchs internes.

Les patchs externes sont collés sur la surface des zones endommagées (Figure II.8).

Différentes formes géométriques sont utilisées afin de couvrir au mieux la zone endommagée.

Nous rencontrons des patchs circulaires, carrés, rectangulaires, elliptiques, hexagonaux, etc.

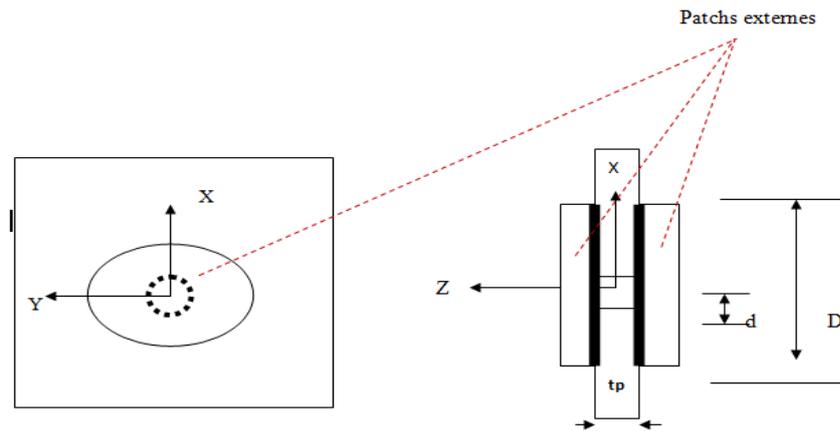


Figure II- 8 : Réparation par patch externe

Les patches internes servent à remplacer la zone endommagée soustraite à la structure (Figure-II 9), en reprenant la forme de celle-ci [8].

Selon l'état du matériau, les patches de réparation en composite peuvent également être classés en deux types : patches durs et patches mous.

Les patches « dits » durs sont solidifiés avant leur mise en place. Les patches mous sont appliqués à l'état non solidifiés. Leur solidification est réalisée après leur mise en place sur la structure.

Notons que les caractéristiques des patches en composite peuvent varier sensiblement selon les caractéristiques du pli élémentaire et la séquence d'empilement du composite utilisés.

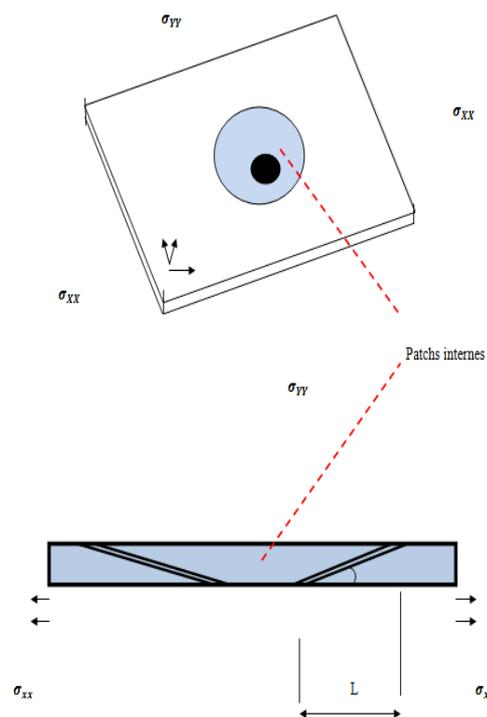


Figure II- 9 : Réparation par patch interne

4.8.Méthodes de réparation :

Dans la littérature [15], on récence trois méthodes typiques pour la réparation des matériaux composites par collage de patchs :

1) Réparation par patchs externes (*Figure II.10*)

La réparation par patch externe consiste à insérer un bouchon dans la zone « nettoyée », puis à appliquer une couche de colle et un patch externe.

Cette méthode demande peu de préparation. Sa mise en œuvre est simple et rapide. Par contre, la réparation induit un alourdissement de la structure ainsi qu'une augmentation de l'épaisseur de celle-ci. Bien entendu, la qualité de cette réparation, la qualité de cette réparation dépend grandement de la qualité du joint collé.

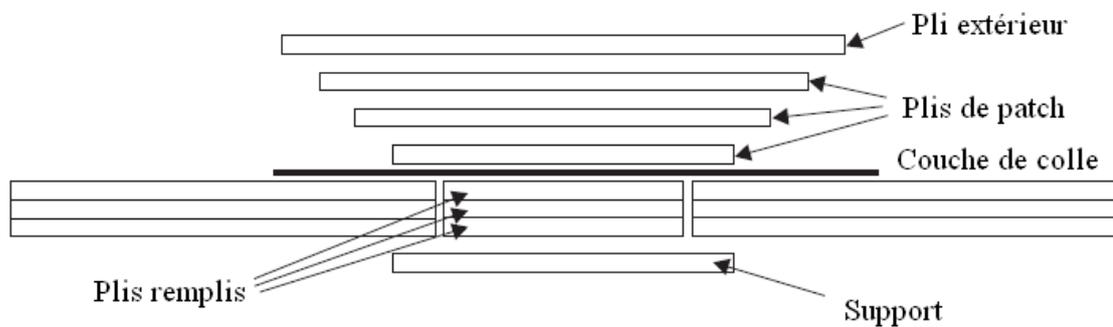


Figure II- 10 : Schéma de réparation par patch externe

2) Réparation par patch intérieur biseauté (*Figure II .11*)

Nettoyer la partie endommagée avec un angle biseauté de 2 à 3° afin d'obtenir une Surface de collage importante. Ensuite, le remplissage se fait couche par couche. Les charges sont transmises essentiellement par l'interface

Entre le patch et la plaque composite. Cette méthode, couramment utilisée dans l'industrie, est réputée du fait des bonnes performances

Mécaniques finales obtenues. En plus, la géométrie du système

Réparé est peu modifiée. En revanche, il est relativement difficile d'obtenir un petit angle biseauté.

Certains équipements sont nécessaires et le temps de réalisation est

Conséquent. Enfin, la réparation demande une bonne technique de réalisation.

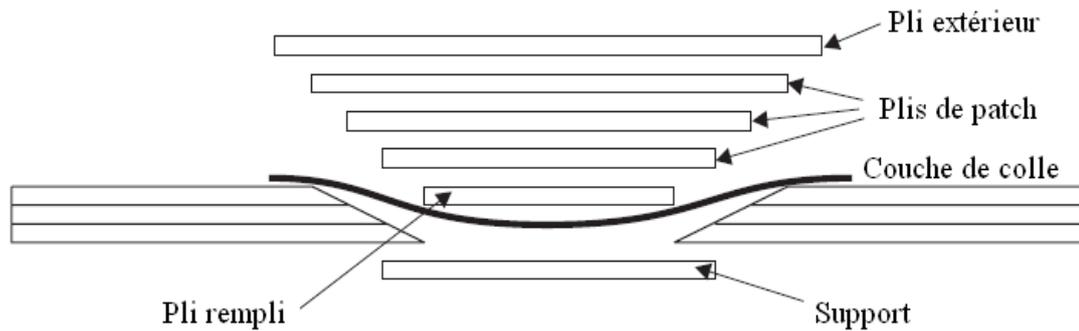


Figure II- 11 Schéma de la réparation biseautée par patch

3) Réparation en escalier par patch interne (Figure II.12)

Cette méthode dérive de la méthode précédente. Au lieu de créer une surface biseautée lisse avec un très petit angle, on réalise une surface biseautée en escalier. Cette méthode a pratiquement les mêmes avantages et les inconvénients que la méthode schématisée à la (Figure II.12)

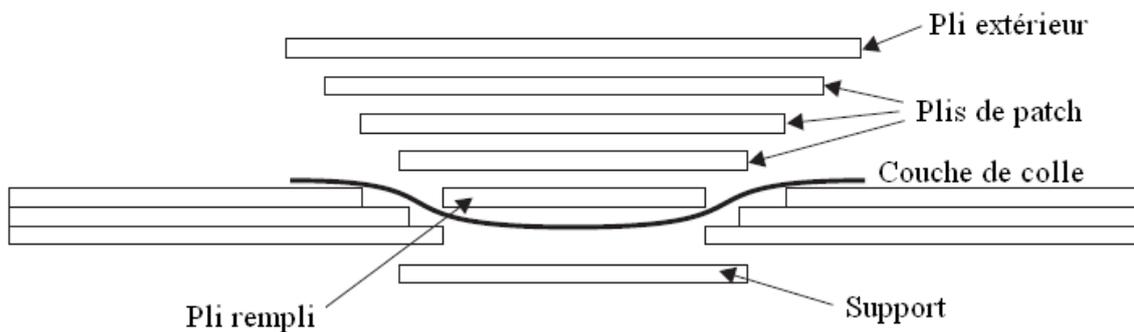


Figure II- 12 : Schéma de réparation en escalier par patch interne

4.9.Réparation par composite:

Les composants aéronautiques sont soumis en service à des sollicitations mécaniques donnant lieu à des états de contraintes généralement multiaxiaux et à amplitude variable, ce qui provoque un phénomène d'endommagement par fatigue et par corrosion. En raison des contraintes de sécurité qui amènent à utiliser les avions dans de bonnes conditions de fiabilité, maîtrisées aussi longtemps que possible, des inspections sont périodiquement mises en place pour détecter les défauts ou les dommages. Cependant, le coût du remplacement des parties importantes de la structure ou de grands composants tels que la voilure est très souvent rédhibitoire. Une alternative consiste à utiliser des patchs composites pour réparer les composants endommagés. La conception des réparations nécessite une optimisation des

caractéristiques du patch : géométrie, nombre de plis uni directionnels, orientation des plis les uns par rapport aux autres, positionnement autour de la zone à soulager.

4.10. Définition du composite

Le mot composite, dans le terme matériau composite, signifie que deux matériaux ou plus sont combinés à une échelle macroscopique nettement inférieure à celle de la pièce pour former un troisième matériau. Une interphase se crée entre les deux constituants et aura pour rôle de transmettre les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement d'où l'établissement d'une bonne adhérence (Figure II.13).

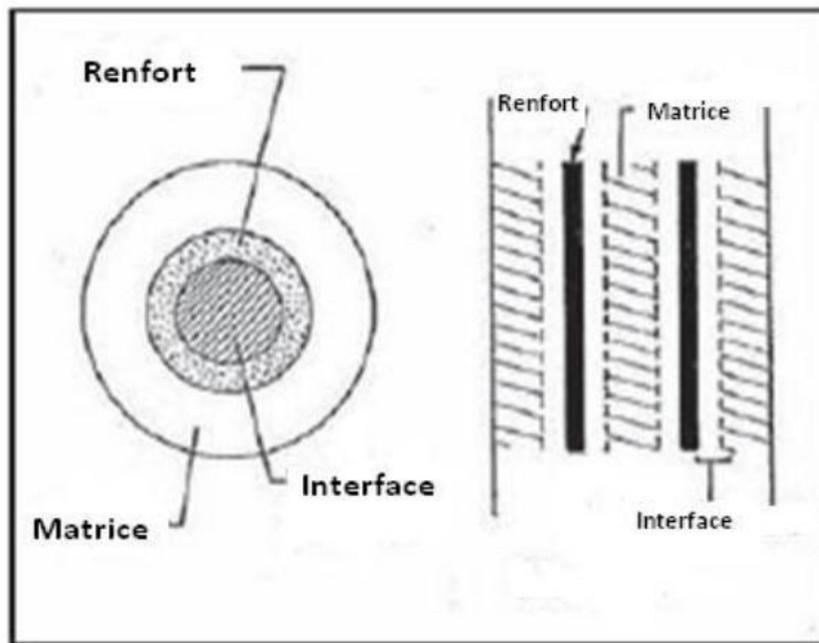


Figure II- 13- Éléments d'un matériau composite

L'identification des composants peut être identifiée à l'œil nu, mais il existe différents matériaux qui sont combinés à l'échelle microscopique, telle que les alliages des métaux. Le matériau qui résulte est en pratique homogène macroscopiquement, et ces composants ne peuvent être considérés qu'un seul élément.

L'avantage de l'utilisation d'un matériau composite s'il est bien conçu, est qu'il possède des propriétés supérieures à celle des éléments qui le constituent. Parmi les propriétés améliorées en formant les matériaux composites on peut citer : résistance, rigidité résistance à la corrosion légèreté, résistance au vieillissement.....etc.

Toutes ces propriétés ne peuvent être améliorées en même temps, car l'ensemble ne peut plus être une obligation pour être réalisé, et en réalité certaines entre elles se contredisent, comme la conductivité thermique et l'isolation thermique. L'objectif tout simplement est d'élaborer un matériau ayant les caractéristiques nécessaires pour accomplir la tâche de conception [1] .

4.11. Historique des réparations par composites :

Les premiers travaux connus concernant les réparations des composites sont dus à R. Jones & al. en 1979 [Jones, 1979], qui proposent une réparation grâce au collage d'un patch composite sur les fissures observées sur structures métalliques. D'après Baker & al, la DSTO (Defence Science and Technology Organisation) australienne a mené des recherches sur ces réparations depuis le début des années 70. Ils soulèvent un certain nombre de problèmes que pose ce type de réparation comme la taille des patches, la forme des patches, l'épaisseur de la colle, la qualité de la colle, du collage, la préparation des surfaces, etc.

La NASA propose d'ailleurs en 1982 un des premiers rapports sur la réparation des structures à base de carbone/polyimide. En 1984, la NASA publie de nouveau un large volume sur la réparation des composites, allant plus loin dans la recherche, tout comme la DSTO. Les thèmes de l'angle de la réparation pour les patches, l'efficacité des patches, les méthodes de contrôle non destructif du dommage (CND), les processus de réparation sur des structures monolithiques, sandwichs et plaques raidies y sont abordés en détails. Cependant, les techniques abordées bien qu'optimisées, ne permettaient pas de garantir la complète réparation notamment vis-à-vis du test de compression, cas considéré comme un des plus critiques pour les matériaux composites.

Le groupe AGARD (Advisory Group for Aerospace Research & Development) récemment absorbé par RTO (Research & Technology Organisation) de l'OTAN en 1997, organise des conférences scientifiques spécialisées en matériaux composites entre 1980 et 2000 qui traitent en partie du problème des réparations composites. Le contexte historique aéronautique avec une large proportion de structures métalliques explique la grande part d'études dédiées à la réparation par "patch composites" sur structures métalliques.

Cependant, les problématiques actuelles et l'augmentation de la quantité de matériaux composites dans les structures aéronautiques, orientent les recherches vers la réparation de structures composites. La réparation par patch est la méthode la plus employée. En revanche, malgré les efforts de nombreuses équipes de recherche, ce type de réparation n'est pas certifié sur les structures primaires aéronautiques. La principale cause de cet échec, repose sur la difficulté de garantir la durée de vie de la qualité du collage. L'utilisation de cette technique est ainsi très développée, mais la confiance dans ce type de réparation n'est pas absolue.[7].

4.12. Éléments composants :

Un matériau composite, comme il est représenté dans la (Figure II.14) est constitué essentiellement d'un matériau fibreux, jouant le rôle de renfort (armature, squelette...), et il assure la tenue mécanique (résistance à la traction et rigidité), souvent de nature filamentaire

(fibres organiques ou inorganiques) et, un matériau résineux, appelé matrice, qui lie les fibres renforts, répartit les efforts (résistance à la compression ou à la flexion) et assure une bonne protection chimique du matériau.[1]

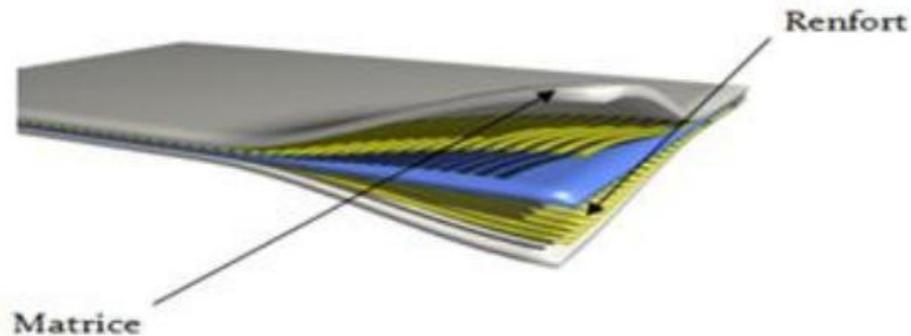


Figure II- 14: Constitution d'un matériau composite

4.13. Classification des composites

Il existe aujourd'hui un grand nombre de matériaux composites que l'on classe généralement en trois familles en fonction de la nature de la matrice.[1]

- Les composites à matrices organiques (CMO) qui constituent, de loin, les volumes les plus importants aujourd'hui à l'échelle industrielle.
- Les composites à matrices céramiques (CMC) réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme dans les domaines spatial, nucléaire et militaire, ainsi que le freinage.
- Les composites à matrices métalliques (CMM). Les composites trouvent leurs principales applications dans le transport aérien, maritime, ferroviaire, le bâtiment, l'aérospatial ainsi
- que les sports et loisirs, notamment grâce à leur bonne tenue mécanique comparable aux matériaux homogènes, plus résistants que l'acier et plus légers que l'aluminium.
- Généralement, la mise en oeuvre d'un matériau composite se fait selon un rapport renfort matrice de 3/7. En plus, les deux entités doivent être compatibles, sinon des modifications sont apportées sur le renfort pour le rendre compatible.
- En fait, le marché des matériaux composites est caractérisé par le pouvoir d'innovation. Par exemple, il n'y a pas d'Airbus A380 sans composites. On peut aussi citer les progrès obtenus sur les skis, les raquettes de tennis, les coques des bateaux, les pneumatiques de l'isolation ou les emballages. L'innovation tient aux performances mais plus encore à l'adaptabilité quasi parfaite du composite à la fonction requise. C'est un matériau conçu à la carte et en même temps que la structure fabriquée.

4.14. Réparation par perçage

Le perçage d'un trou en fond d'une fissure permet un arrêt temporaire de la propagation de la fissure. Cette méthode est basée sur la modification géométrique en fond de la fissure. Le perçage est effectué en fond de fissure comme le montre le schéma de la (figure II.15). C'est une méthode ancienne et largement répandue pour la réparation des composants mécaniques fissurés. Elle est effectuée dans le but d'en augmenter la durée de vie ce qui entraîne une réduction du facteur local de concentration de contrainte Kt ce qui a pour conséquence la réduction de la contrainte maximale. Cette opération stoppe la fissure pendant un certain nombre de cycles correspondant au réamorçage Na . Cette technique apporte différents avantages : elle est simple à réaliser, reproductible et utilisable pour des structures qui ne sont accessibles que d'un seul côté. Elle permet de garder la structure en service en attendant un éventuel changement de la pièce endommagée La (figure II.16)..illustre cet arrêt de la propagation. L'amorçage de la fissure est retardé par le perçage du trou et la durée de vie augmente avec l'accroissement du diamètre du trou. [5]

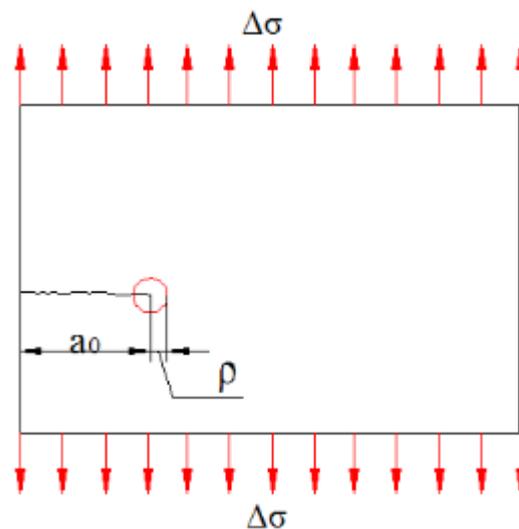


Figure II- 15 : Perçage en fond de fissure

a_0 Longueur initiale de la fissure de fatigue

ρ : Rayon du trou percé

$a_0 + \rho$: longueur de la fissure après perçage

N : nombres des cycles

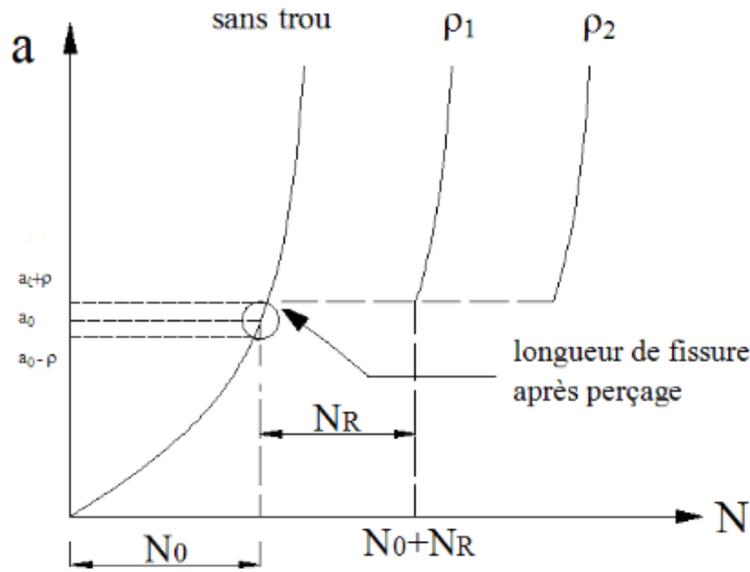


Figure II- 16 Courbes de fissuration : évolution de a en fonction de N avec ou sans perçage avec rayon du trou $\rho_1 < \rho_2$

Ce processus de réamorçage cause le retard de propagation de la fissure. Un plus grand rayon de trou réduit le facteur de concentration de contrainte de la combinaison de fissure/trou plus important et donc un plus grand rayon de trou permet une plus grande prolongation de la résistance à la fatigue, mais il faut cependant faire attention à la diminution de la section du ligament restant.

Dans d'autres travaux a proposé cinq configurations de réparations de fissure par perçage (figure II-17) (a) trou débouchant, (b) trou en fond d'entaille, (c) trou avec entaille à faces inclinées symétriques, (d) trou avec entaille à faces inclinées asymétriques, (e) trou et entaille inclinée,

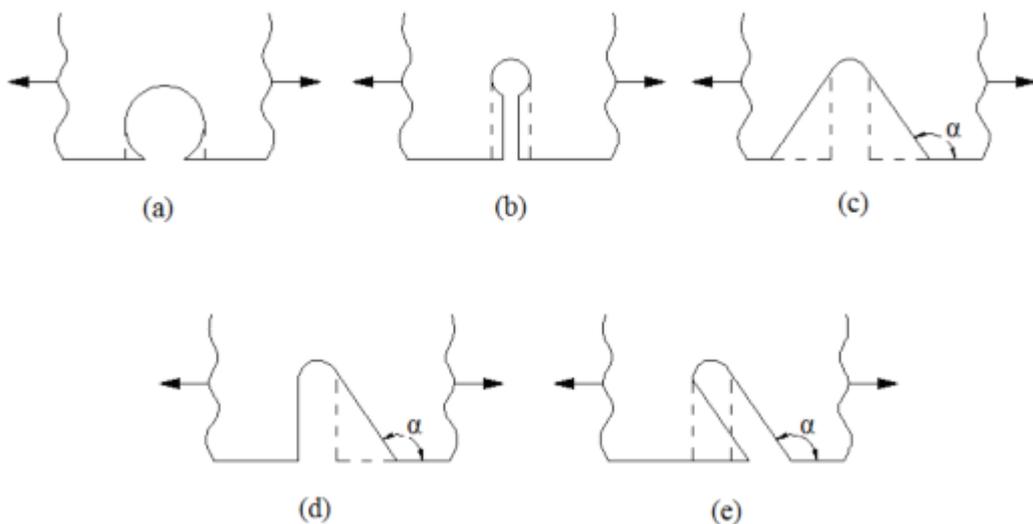


Figure II- 17 :-Configurations équivalentes d'entailles

Le profil de trou peut être considéré comme une entaille elliptique comme indiqué dans la (Figure II- 18): ...Par exemple, un trou percé en fond d'une fissure engendre une diminution du ligament la pièce fissurée. On note que la longueur totale de la fissure est égale à

$$l = d + \rho \text{ et } \rho = D/2.$$

Dans ce cas, Inglis propose une approximation pour le facteur de concentration de contraintes:

$$k_t = 1 + 2 \sqrt{\frac{l}{\rho}}$$

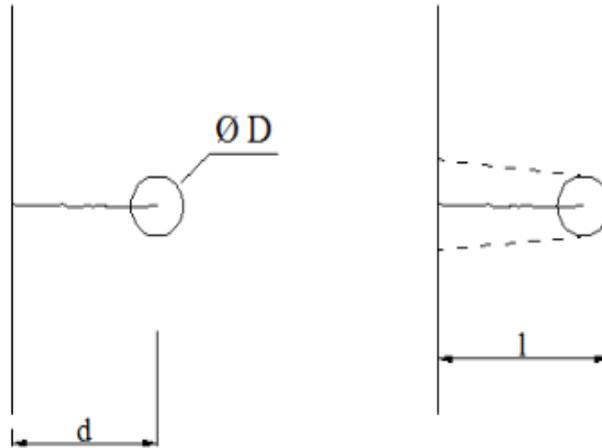


Figure II- 18 : Trou en fond de fissure avec la distance d'au bord de la surface libre

4.15. Réparation hybride :

Nous obtenons un assemblage hybride quand nous combinons deux techniques d'assemblage différentes. Le but est de profiter d'une possible complémentarité et de diminuer les inconvénients de chacune des deux techniques. Ici, nous nous intéressons aux techniques du patch composite et du perçage

La combinaison de ces deux techniques d'assemblage vise à :

- ❖ □ tirer avantage d'une possible complémentarité ;
- ❖ □ minimiser les aspects négatifs de chacune des deux techniques.

Ce type d'assemblage associe un mode de transfert discret (au niveau des fixations) et un mode de transfert continu (au niveau de l'adhésif). Nous pouvons noter aussi que ces modes, discret et continu, assument chacun un transfert entre deux milieux continus.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes méthodes de réparation des structures fissurées ensuite nous avons détaillé la réparation avec patch composite et du perçage ainsi la méthode hybride.

Référence

- [1] Toufik ACHOUR, ÉTUDE DES TECHNIQUES DE RÉPARATION DES STRUCTURES COMPOSITES ENDOMMAGÉES, mémoire de magister en génie mécanique magister en génie mécanique université MENTOURI Constantine,2011
- [2] « Formation et certification END pour le CCPM-Fonderie », sur *ctif.com*
- [3] OUDAD Wahid, Analyse par la méthode des éléments finis tridimensionnelle de l'étendue de la zone plastique en tête de fissure réparée par patch en composite, Thèse de doctorat, université de Sidi Bel Abbes,2010
- [4] Xavier DECOOPMAN, Influence des conditions de chargement sur le retard à la propagation d'une fissure de fatigue après l'application d'une surcharge,THESE DE DOCTORAT, Université des Sciences et Technologies de Lille, 1999
- [5] HaoWU , Modélisation de l'extension de la durée de vie des structures fissurées après réparation par la technique de perçage, THESE DE DOCTORAT, université de Lille 1, 2009
- [6] Pengcheng CHENG, Etude et optimisation de la réparation des composites stratifiés par collage des patchs externes, THESE de doctorat,Université de Bourgogne, 2010
- [7] Mathieu Hautier, Analyse des réparations des matériaux composites : mise en œuvre d'un procédé par infiltration et étude du comportement mécanique, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2010.
- [8] Chun H. Wang ,Andrew J Gunnion.On the design methodology of scarf to composite laminates.Composites Science and Technology ,68(2008)35-46.

CHAPITRE III

MODELISATION DE

LA REPARATION HYBRIDE

(PATCH/PERÇAGE)

DES FISSURES

Introduction

Le secteur industriel doit faire face au remplacement des structures ou des composants présentant des signes de rupture, des fissures ou des anomalies diverses. En raison des contraintes de sécurité qui amènent à utiliser les structures dans de bonnes conditions de fiabilité, maîtrisées aussi longtemps que possible, des inspections sont périodiquement programmées pour détecter les défauts ou les dommages. Les composants aéronautiques sont soumis en service à des sollicitations mécaniques donnant lieu à des états de contraintes généralement multiaxiaux et à amplitude variable, ce qui provoque un phénomène d'endommagement par fatigue. Une alternative à la réparation de ces structures consiste à les renforcer préventivement, avant que la fissure n'apparaisse. Ce renforcement de structures par patchs composites retarde l'apparition de ces fissures.

L'utilisation du patch composite pour réparer des structures endommagées est très largement utilisée aujourd'hui surtout dans l'industrie aéronautique, [1,2]. Cependant, les études concernant le renforcement préventif restent peu nombreuses. L'apport bénéfique du renforcement par patchs composites en termes de durée de vie des structures est donc de d'optimiser leur exploitation.

Notre étude se place dans ce contexte, elle porte sur une analyse numérique par la méthode des éléments finis tridimensionnelle, de la réparation d'une plaque comportant une entaille en U (semi-circulaire) réparé par patch en composite et perçage et hybride (patch +perçage). Une approche locale de la mécanique linéaire de la rupture fondée sur la contrainte d'ouverture σ_{yy} en fond d'entaille qui est utilisée pour décrire le comportement d'une fissure réparée et sollicitée en mode d'ouverture.

L'analyse est portée sur une comparaison entre une méthode combinée et autre méthode d'enlèvement de matière basée sur l'effet du rayon de perçage et d'autres configurations de réparations équivalentes d'entaille, l'orientation des fibres de composite.

1. Présentation du logiciel ABAQUS/CAETM

ABAQUS/CAETM est un code de calcul qui résout les problèmes de divers champs par la technique des éléments finis (M.E.F). Dans ce cadre il présente un système complet intégrant non seulement les fonctions de calculs proprement dites mais également des résultats (post-traitement). ABAQUS/CAETM est un programme qui traite des problèmes d'élasticité linéaire dans les domaines statiques et dynamiques, des problèmes non linéaires, des problèmes thermiques etc...

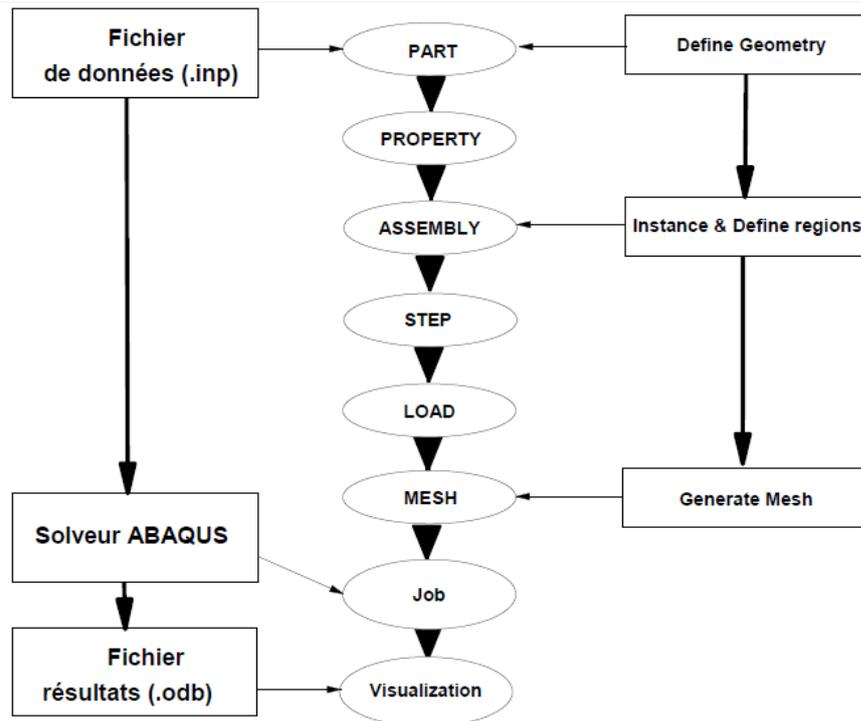


Figure III- 1 Etapes à suivre pour la modélisation du modèle CAE [3]

Comme le présente la figure III.1 ABAQUS/CAE est divisé en unités fonctionnelles appelés modules. Chaque module contient les outils qui sont propres à une partie de la tâche de modélisation.

- Le module Part

Le module part nous permet de créer tous les objets géométriques rentrant dans le cadre de notre modèle soit en les dessinant dans ABAQUS CAE soit en les important d'un logiciel de dessin.

Dans cette modélisation, on considère une plaque en **Aluminium 2024-T3** fissurée avec un fond d'entaille circulaire (Fig.1)

La plaque est caractérisée par les dimensions suivantes :

Longueur $L_p=160\text{mm}$, largeur $W_p= 39\text{mm}$, épaisseur $e_{pp}= 3\text{mm}$ la fissure est modélisée par une entaille en U caractérisée par les dimensions suivantes :Longueur de l'entaille $L_e=10\text{mm}$, rayon d'entaille $R_e=0.25\text{mm}$

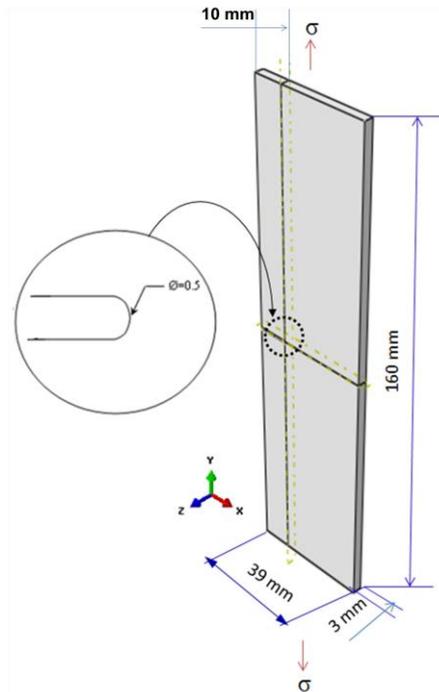


Figure III- 2 Modèle géométrique de la plaque

Cette plaque présente une fissure débauchant réparée par un patch en Glass-epoxy composite de dimension $25 \times 25 (\text{mm}^2)$ et épaisseur $e_{\text{patch}} = 1.5 \text{ mm}$, L'adhésif utilisé est de type FM37 de dimension $25 \times 25 (\text{mm}^2)$ et d'épaisseur $e_{\text{ad}} = 0.1 \text{ mm}$. La plaque est soumise à une traction de 70MPa et les fibres du composite sont parallèle à l'axe de chargement. (FigureIII-2)

- Le module Property

Le module property nous permet de définir les propriétés de nos différents composants, Les propriétés mécaniques de la plaque, de l'adhésif ainsi que du patch sont illustrées dans le tableau suivant.

Propriété	Matériaux 1	Matériaux 2	Matériaux3
	Aluminium 2024	Glass époxy composite	Adhésif (FM 37)
$E_1(\text{GPA})$	72	200	2.210
$E_2(\text{GPA})$		25	
$E_3(\text{GPA})$		25	
$G_{12}(\text{GPA})$		0.21	
$G_{13}(\text{GPA})$		0.21	
$G_{23}(\text{GPA})$		0.21	
ν_{12}	0,3	7.2	0,43
ν_{13}		5.5	
ν_{23}		5.5	

Tableau III.1 : Propriétés mécaniques des différentes structures

– **Le module Assembly**

Le module assembly nous permet d'assembler les différents objets géométriques créés dans un même repère. (Figure III-3)

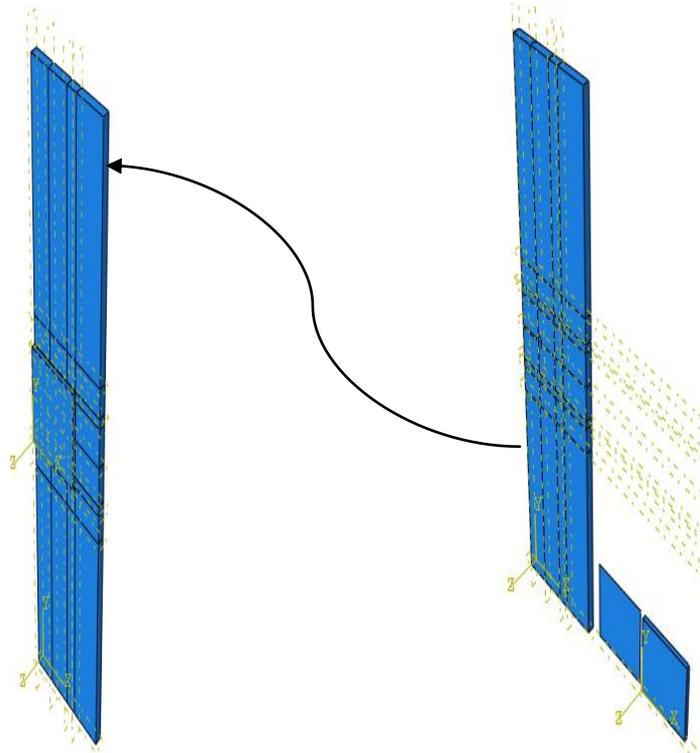


Figure III- 3 Assemblage des structures

– **Le module Step**

Ce module permet de définir toutes les étapes pour le post traitement, il est possible de créer des forces ou des conditions limitent qui s'activent à des moments donnés.

Dans notre étude le step : satatic général est utiliser avec les paramètres de défaut, pour les structure avec fissure, l'historique des incréments de calcul du facteur d'intensité de contrainte est activé.

– **Le module Interaction**

Le module interaction permet de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du model, la seule proximité ou contacte entre les points n'étant pas suffisant.

Dans ce module les interactions sont déclarés à savoir :

-Une interaction parfaite de type « TIE »entre le pipe/adhésif et adhésif/patch, tous le paramètres de cette option sont à défaut, a noté que l'adhésif est déclaré toujours comme esclave puisqu'il possède le plus faible module Young. (Figure III-4)

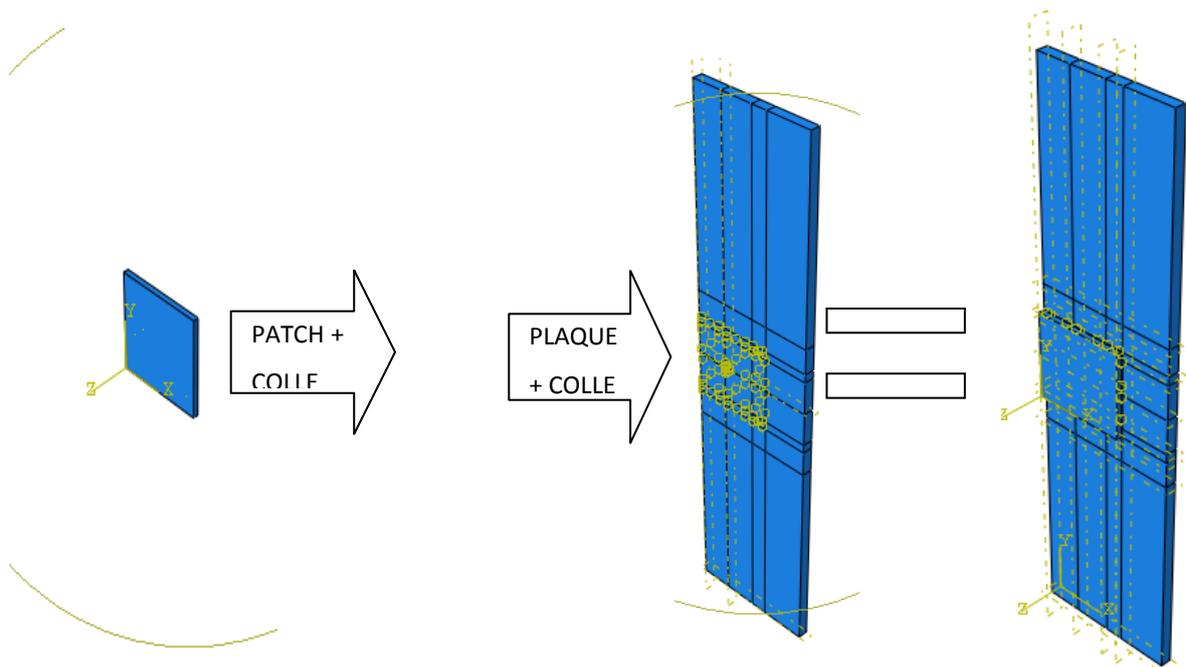


Figure III- 4 Déclaration des interactions

- Le module Load

Le module **load** permet de déterminer toutes les conditions aux limites, tel que la pression les encastremets suivant les différents axes. Les surfaces supérieure et inférieure sont sollicitées par une pression de 65MPa.(Figure III-5)

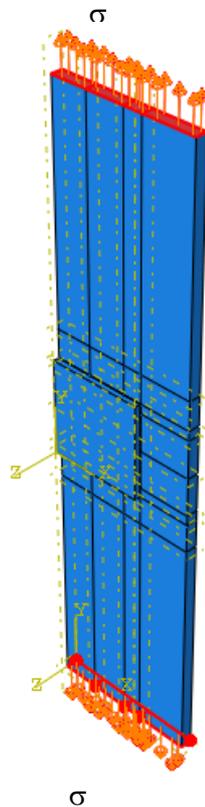


Figure III- 5 Déclaration des conditions aux limites

- Le module Mesh

Le module mesh permet de générer un maillage en élément fini sur un assemblage. Le maillage utilisé est représenté par la figure III.6. La forme rectangulaire du patch composite est identifiable sur cette figure. Un maillage régulier est effectué pour toute la structure. Ce maillage reste le même tout au long du calcul afin d'éviter toute influence du maillage sur les résultats. A ce niveau nous précisons que le maillage est de type quadratique à 20 nœuds (C3D20R).

La fissure dans la plaque entraîne une singularité géométrique provoquant une concentration de contrainte. Par conséquent, un maillage raffiné est effectué autour de la fissure ou la taille des éléments au voisinage du front de la fissure est de 0,05mm.

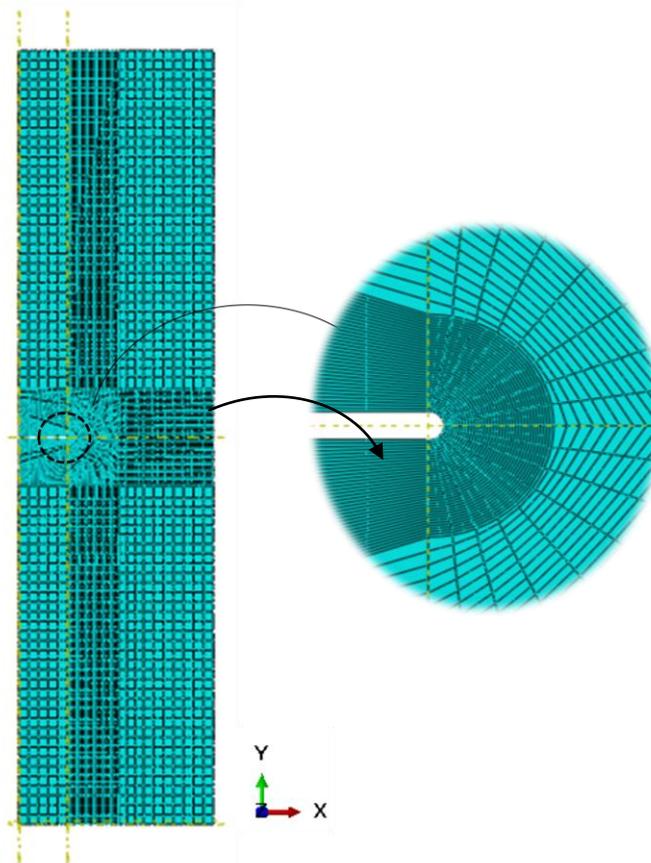


Figure III- 6 Maillage du modèle géométrique

Un collage parfait est créé entre la plaque et l'adhésif ainsi que l'adhésif et le patch. Le nombre total d'éléments finis de la structure étant de 102744 c'est-à-dire 94104 éléments pour la plaque, 4320 éléments pour l'adhésif et 4320 éléments pour le patch. La taille des éléments au voisinage de la fissure est de 0,05mm.

- Le module Job

Une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, le module Job est utilisé pour analyser ce modèle. ABAQUS va alors réaliser tous les calculs nécessaires et en tirer des résultats dans un fichier (odb).

2. Résultats et interprétations :

2.1. Modèle géométrique étudié

Le modèle géométrique de la plaque réparé par le composite et perçage est représenté sur la figure III.2. La plaque en aluminium 2024 est caractérisé par les dimensions suivantes : Longueur $L_p=160\text{mm}$, largeur $w_{\text{plaque}}=39\text{mm}$, épaisseur $e_{\text{plaque}}=3\text{mm}$. Cette plaque présente une fissure débauchant réparé par un composite en Glass-epoxy de dimension $25 \times 25(\text{mm})$ et épaisseur $e_{\text{patch}}=1.5\text{mm}$. L'adhésif utilisé est une colle de type FM37 de dimension $25 \times 25(\text{mm})$ et d'épaisseur $e_{\text{ad}}=0.1\text{mm}$. La plaque est soumise à une traction de $\sigma = 65\text{MPa}$.

2.2. Technique de perçage :

Le perçage est une des techniques anciennes de réparation et elle très réponde pour la réparation des composants mécaniques. Elle est réalisée en fond de fissure comme le montre le schéma de la figure III-7 [4]

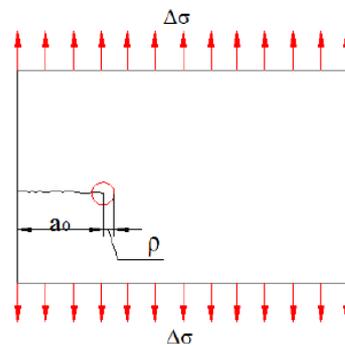


Figure III- 7 perçage en fond de fissure

Dans cette partie d'étude et en s'appuyant sur les travaux Rodriguez et al qui a proposé cinq configurations de réparations de fissure par perçage (figure III-8) : (a) trou débouchant, (b) trou en fond d'entaille, (c) trou avec entaille à faces inclinées symétriques, (d) trou avec entaille à faces inclinées asymétriques, (e) trou et entaille inclinée, [5], nous essayons d'évaluer cette technique en fonction de la contrainte maximale σ_{22} (figure III. 9) en fond d'entaille.

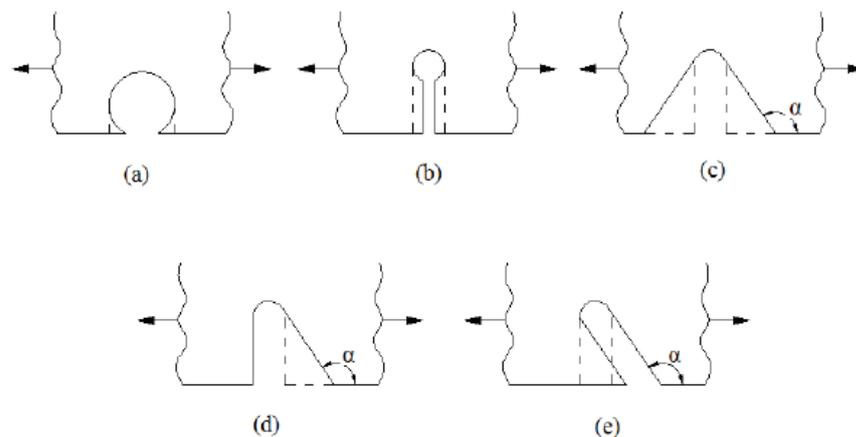


Figure III- 8 Configurations équivalentes d'entailles [5]

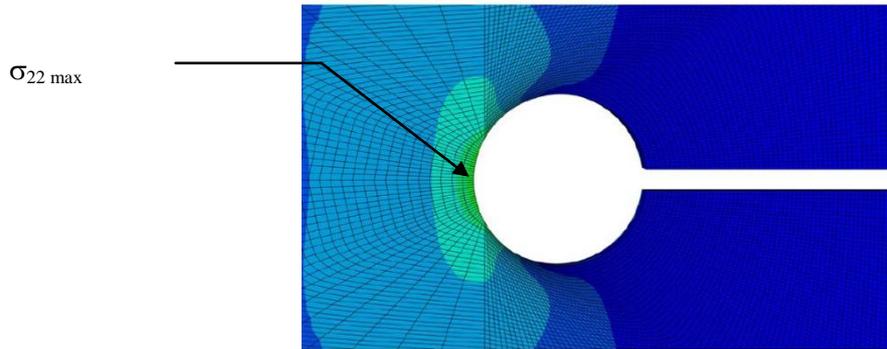


Figure III- 9 exemple d'une distribution de la contrainte σ_{22}

a) L'Effet du rayon de perçage cas (a) et (b) :

La figure III.10 présente la variation de la contrainte maximale $\sigma_{22 \text{ max}}$ en font d'entaille en fonction du rayon de perçage pour les méthodes (a) et (b). On remarque que cette technique réduit la contrainte maximale en fond d'entaille de 7% et de 23% par rapport à la structure en présence d'entaille circulaire. Ces résultats confirment celle de GHF et al et SON et al. [6]

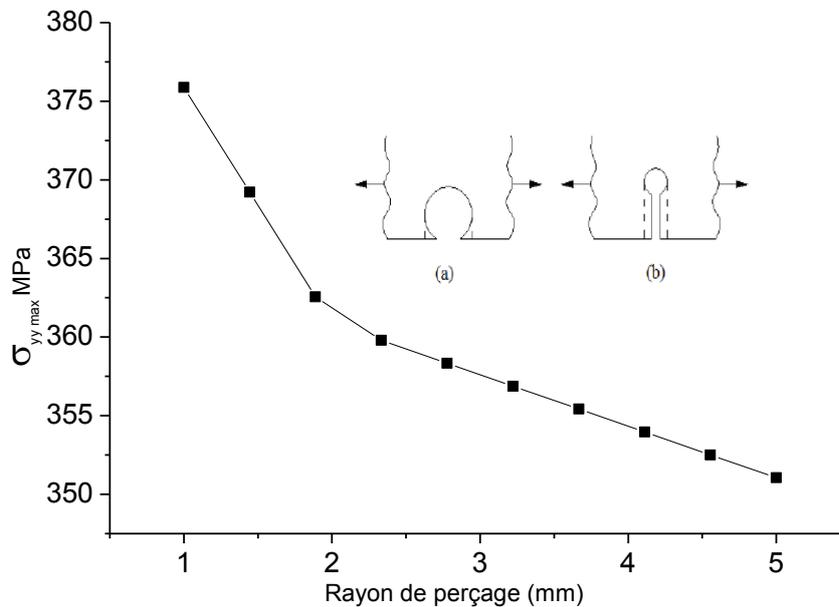


Figure III- 10 L'Effet du rayon de perçage

b) L'effet d'enlèvement de matière symétrique (c):

Un enlèvement de matière symétrique est réalisé dans ce cas d'étude. La figure III.11 montre l'évolution de la contrainte maximale $\sigma_{22 \text{ max}}$ par rapport a un enlèvement symétrique.

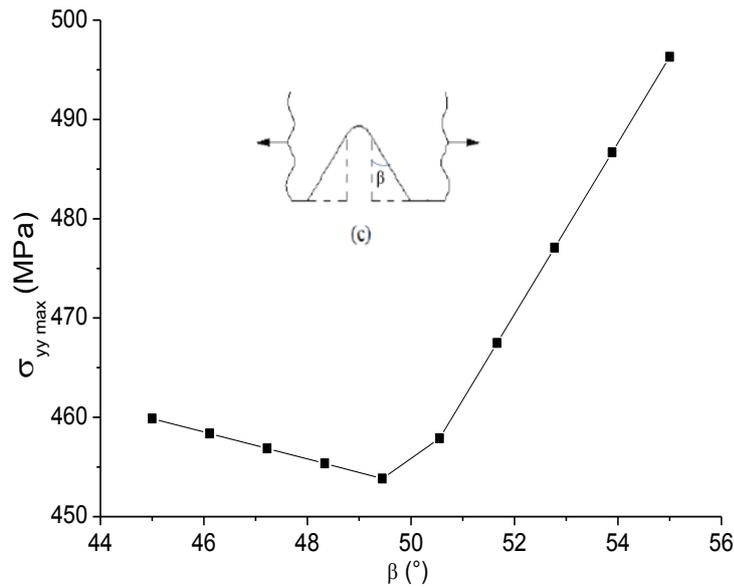


Figure III- 11 variation de la contrainte $\sigma_{22 \max}$ en fonction de l'angle d'enlèvement de matière symétrique

On note que la contrainte $\sigma_{22 \max}$ diminue sensiblement avec l'augmentation de l'angle β , au-delà de 50° la contrainte augmente excessivement avec l'angle β , donc cette méthode ne présente aucun effet par rapport à la structure fissurée.

c) L'effet d'enlèvement de matière asymétrique (d) :

Une autre méthode (d) d'enlèvement de matière consiste à enlever asymétriquement la matière de plaque fissurée. La figure III.12 expose la variation de la contrainte $\sigma_{22 \max}$ en fonction de l'angle d'enlèvement β .

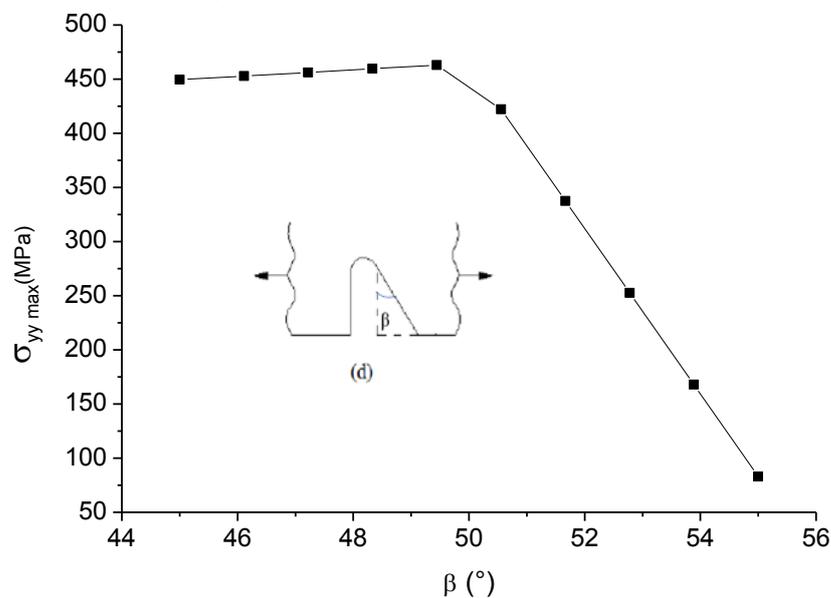


Figure III- 12 variation de la contrainte $\sigma_{22 \max}$ en fonction de l'angle d'enlèvement de matière assymétrique

Il est clair que la contrainte $\sigma_{22 \max}$ reste sensiblement constante pour $\beta < 50$ jusqu'à la valeur de $\beta = 50^\circ$ ou cette contrainte décroît rapidement avec un taux de réduction de 89%.

CHAPITRE III : MODELISATION DE LA REPARATION HYBRIDE (PATCH/PERÇAGE) DES FISSURES

Cette méthode s'avère prometteuse et offre un taux de réduction concentration de contrainte considérable.

d) L'effet d'enlèvement de matière asymétrique inclinée (e) :

Dans cette méthode l'entaille est supposée inclinée et la figure III.13 présente la variation de la contrainte maximale σ_{22} en fonction de l'angle d'inclinaison (β).

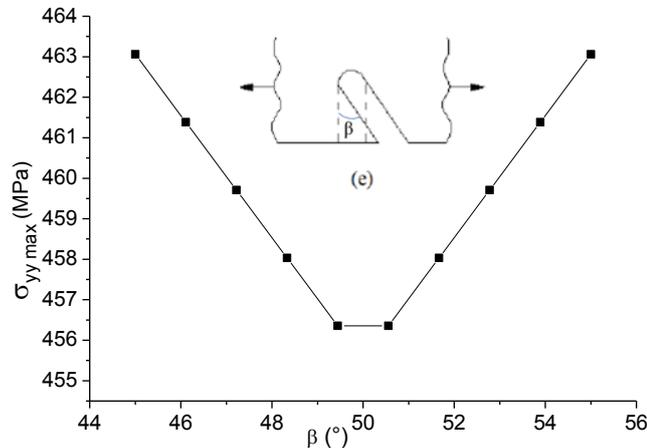


Figure III- 13 variation de la contrainte $\sigma_{22 \max}$ en fonction de l'angle d'enlèvement de matière inclinée (β)

A partir de la Figure III 13 on peut remarquer que cette technique ne présente aucun effet par rapport à la réparation de la structure entaillée mais la technique est sensible à l'angle β .

2.3.Comparaison entre la réparation combinée (perçage /composite) et perçage:

Dans cette étude on cherche à exploiter et tirer une complémentarité des deux techniques de réparation afin de contourner les faiblesses de chaque une de ces techniques réparation afin de contourner les faiblesses de chaque une de ces techniques.

Vu que le problème qui nous a beaucoup freinés est le paramètre comparatif entre les trois méthodes de réparations pour cela on a opté pour la distribution de contrainte de σ_{yy} suivant l'axe X.

Pour évaluer la réparation par les deux techniques de réparations à savoir le perçage la combinaison entre composite collé et le perçage on a tracé la figure III.14 qui témoigne de la distribution de contrainte σ_{22} suivant la ligne normalisée.

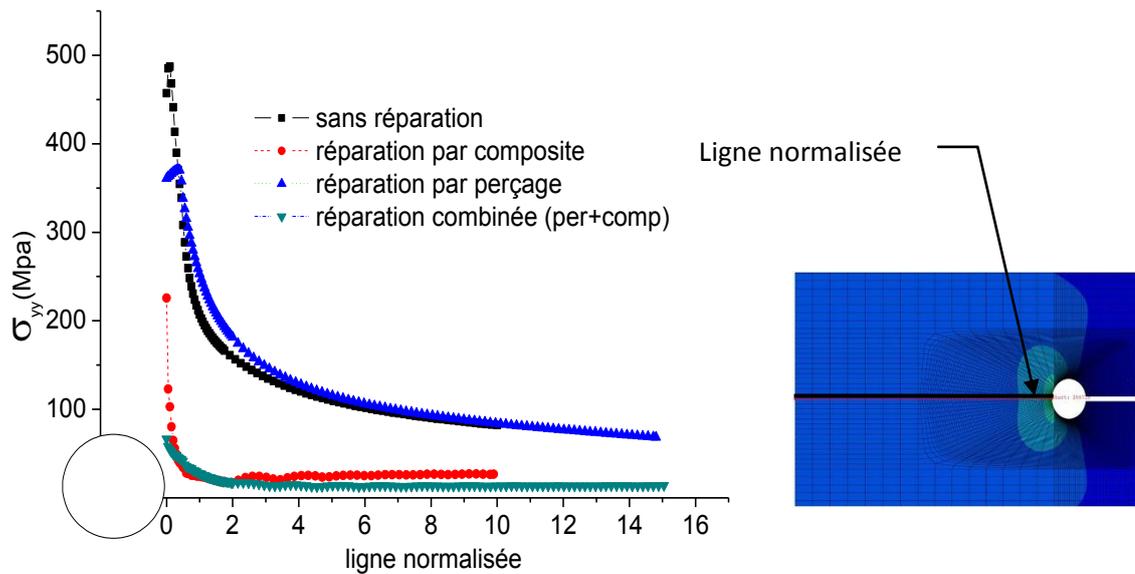


Figure III- 14 variation de contrainte σ_{22} le long du ligament de la fissure pour les trois techniques de réparation

Il est distinct que la technique combinée offre les meilleurs résultats ou on voit clairement la diminution de contrainte σ_{22} en pointe de fissure de 99% ce qui est très bénéfique pour les structures fissurées, cette décroissance est justifiable par l'élimination des concentrations des contraintes en pointe de fissure par le perçage et l'absorption de ce qui reste de ces contraintes par le composite a travers la colle. Pour mielleux illustrer le taux de réduction des contrainte normales, un histogramme est tracé pour les valeurs max de la contrainte σ_{22} en fonction des différentes techniques proposé, en effet la figure III-15 confirme les constatations de la figure précédente ou en peut dire que la technique combinée somme les taux de réductions des deux méthodes de réparations.

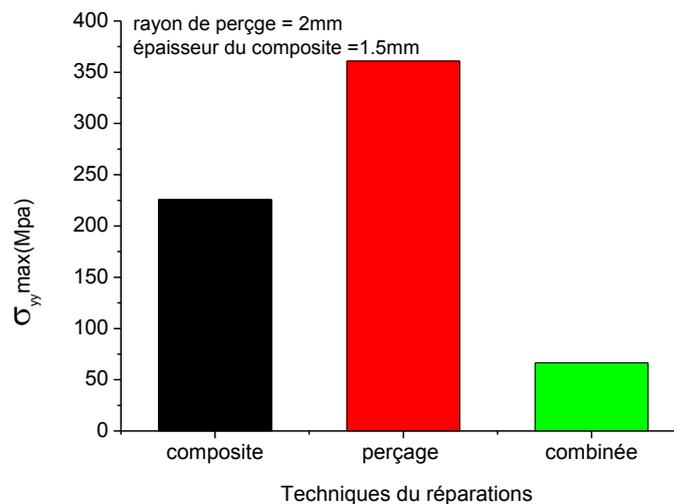


Figure III- 15 variation de contrainte maximale σ_{22} pour les trois techniques de réparations

CHAPITRE III : MODELISATION DE LA REPARATION HYBRIDE (PATCH/PERÇAGE) DES FISSURES

En fin pour certifier cette technique combinée on la appliqué sur tous les methodes de perçage (a) ,(b),(c), (d) et (e) pour les angle de 50°. Les résultats sont présenté dans la figure III.16 ou il est exposé la variation de la contrainte $\sigma_{22 \max}$ pour les méthodes de perçages et c'elle combinées.

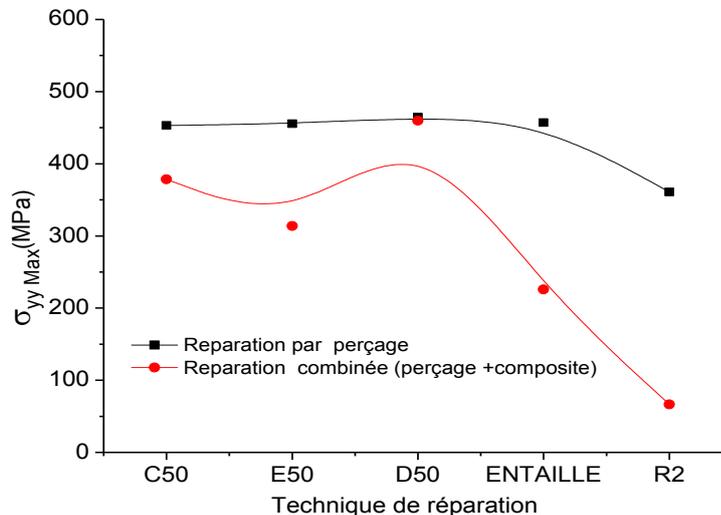


Figure III- 16 Comparaison entre la méthode de réparation combinée et la methode de perçage

Sur cette figure on constatent que la méthode combinée offre un effet bénéfique considérable quelque soit la méthodes de perçage, le meilleur résultat est enregistré pour un rayon de 2mm on a une reduction 89% . Affin d'exploiter la tehchnique de réparation combinée on propose une réparation avec un composite total et un composite perçé avec le même diamètre du perçage de la plaque , cet résultat et enregistré sur la figure III.17 qui montre la distribution de la contrainte σ_{22} le long du ligament de la fissure.

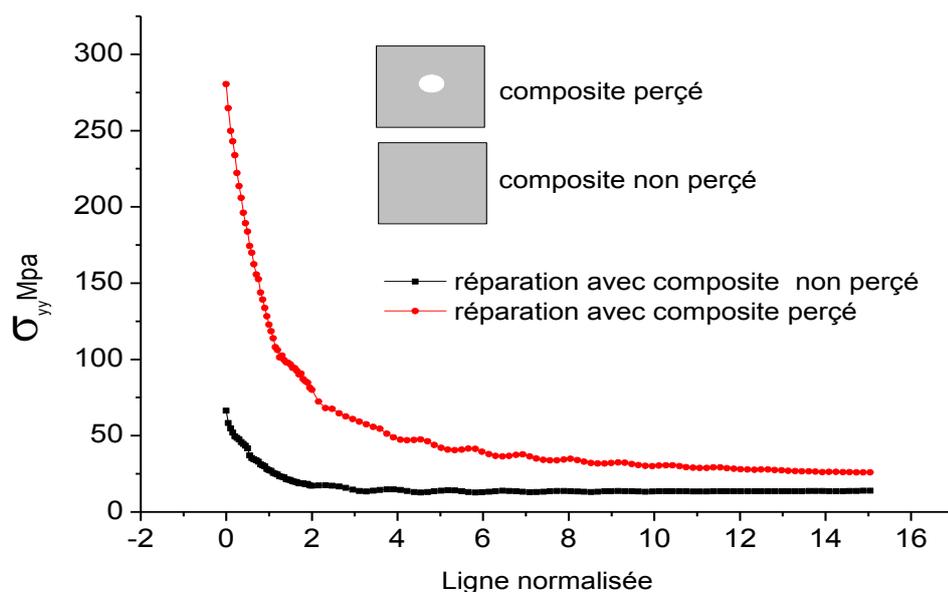


Figure III- 17 distribution de la contrainte le long du ligament pour la méthode de réparation combinée.

On note que le composite non percé offre une bonne réduction de contrainte σ_{22} qui influe beaucoup sur la tendance de propagation de fissure.

Ensuite une étude est proposée pour suivre le comportement de la plaque réparée par rapport à l'orientation des fibres unidirectionnel du composite ce comportement est présenté sur la figure III.18. L'angle de 90° enregistre la plus faible valeur de σ_{22} , cette configuration est la meilleur ou les fibre sont orienté en parallèle avec l'axe de chargement pour une bonne relaxation de la plaque sollicité.

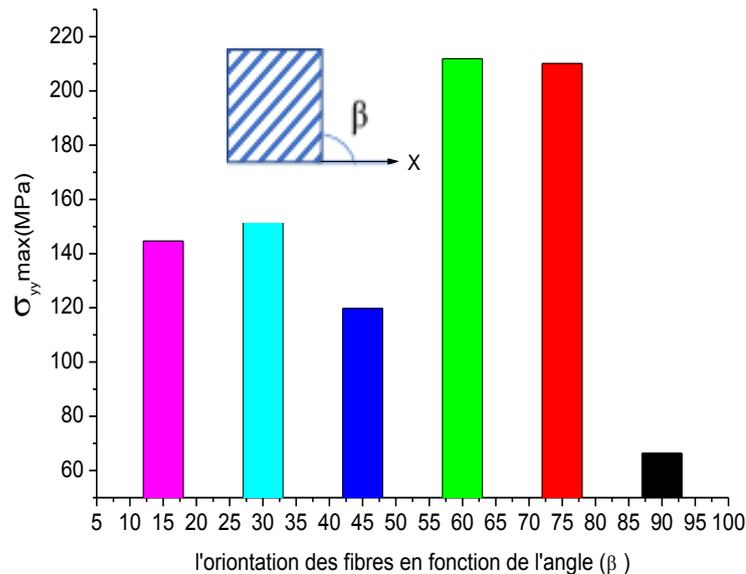


Figure III- 18 variation de la contrainte σ_{22} en fonction de l'orientation des fibres du composite pour la méthode de réparation combinée.

2.4. Le décollement

Les défauts dans les assemblages collés où la concentration en une région donnée de porosités, peut conduire à la création de trous ou de cavités. Lorsqu'elles sont localisées au voisinage proche de l'interface, les cavités créent des interfaces non liées ou des discontinuités géométriques. Elles peuvent donner naissance à des sites préférentiels à l'amorçage de fissure ou au décollement conduisant à la rupture de la jonction. De même, lorsque les supports des efforts ne sont pas sur le même plan, il apparaît un moment de flexion créant dans le joint et dans les supports des contraintes normales au plan de collage (dites contraintes d'arrachement, de décollement ou de pelage) qui viennent se superposer aux contraintes de cisaillement.

Le décollement présente un inconvénient majeur de la réparation par composite vue la localisation des concentrations de contrainte en pointe de fissure. Le perçage offre l'avantage d'éliminé cette zone de concentration en fond de fissure, ceci est illustré sur la figure III.19 qui montre la distribution de la contrainte de pelage σ_{13} suivant la ligne normalisée. Cette contrainte responsable du phénomène de décollement est minimisée à des valeurs très basse (1 à 2 MPa) pour les deux techniques, on note aussi que pour la méthode combinée le fond de la fissure est sollicité en traction alors que pour le perçage le front de fissure est sollicité en compression.

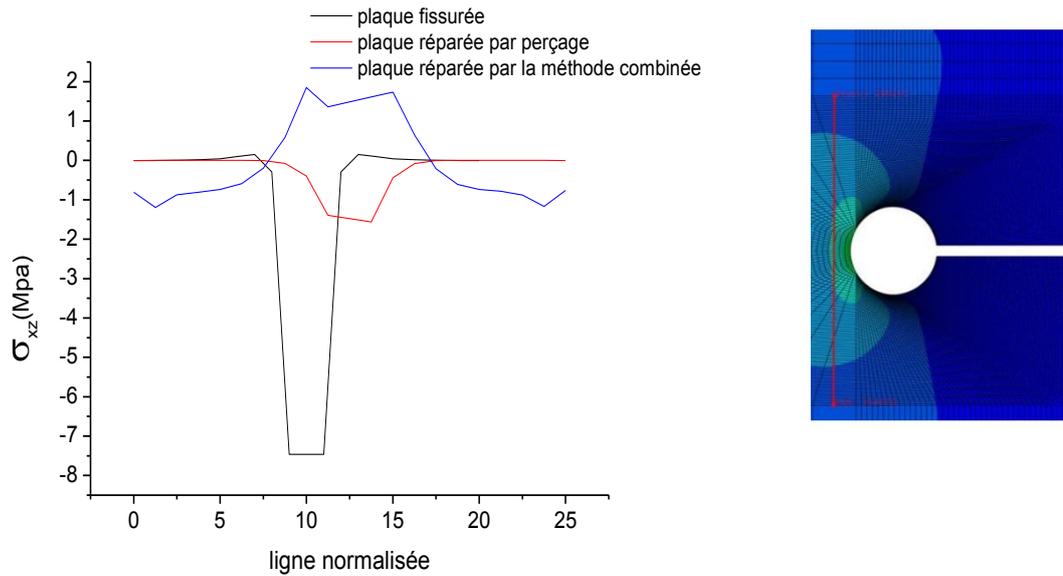


Figure III- 19 distribution de la contrainte de pelage σ_{13} suivant la ligne normalisée

Conclusion

Les résultats obtenus numériquement par la méthode des éléments finis tridimensionnelle nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Le perçage réduit la contrainte maximale en fond d'entaille de 7% et de 23% par rapport à la structure en présence d'entaille circulaire. Ces résultats confirment celle de GHF et al et SON et al.
- Dans la méthode (d) la contrainte σ_{22} max reste sensiblement constante pour $\beta < 50$, au-delà de $\beta = 50^\circ$ ou cette contrainte décroît rapidement avec un taux de réduction de 89%. Cette méthode s'avère prometteuse et offre un taux de réduction concentration de contrainte considérable.
- La technique combinée offre les meilleurs résultats ou on voit clairement la diminution de contrainte σ_{22} en pointe de fissure est de 99% ce qui est très bénéfique pour les structures fissurées.
- la méthode combinée offre un effet bénéfique considérable quel que soit la méthodes de perçage, le meilleur résultat est enregistré pour un rayon de 2mm on a une réduction 89%.
- L'angle de 90° enregistre la plus faible valeur de σ_{22} , cette configuration est la meilleur ou les fibres sont orienté en parallèle avec l'axe de chargement pour une bonne relaxation de la plaque sollicité.

Référence

- [1] Baker A.A., L.R.F. Rose and .R. Jones, A. Advances in the bonded composite repair of metallic aircraft structures, Published by Elsevier 2002.
- [2] Baker, A.,and Jones, R. Bonded repair of aircraft structures. Martinus Nijhoff Publishers, 1988.
- [3] Tahar Nateche, Réhabilitation et Renforcement des Canalisations souspression en présence des défauts de surfaces, Universite Mohamed Boudiaf (Oran)
- [4] J. MATHAR. Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled holes, Arch Eisenhüttenwesen, 6, p. 277-281 et Trans. ASME, V56 (4), p.249,1934.)

- [5] J.E. RODRIGUEZ-SANCHEZ, F.P.RENNAN, W.D. DOVER. Minimization of stress concentration factors in fatigue crack repairs. International Journal of Fatigue. v.20, Issue10, p.719-725, 1998.)

- [6] R. GHFIRI. Etude du retard à l'amorçage et à la propagation d'une fissure de fatigue après perçage d'un trou avec et sans expansion. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 2000.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Les résultats obtenus numériquement par la méthode des éléments finis tridimensionnelle nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Le perçage réduit la contrainte maximale en fond d'entaille de 7% et de 23% par rapport à la structure en présence d'entaille circulaire. Ces résultats confirment celle de GHF et al et SON et al.
- Dans la méthode (d) la contrainte σ_{22} max reste sensiblement constante pour $\beta < 50$, au-delà de $\beta = 50^\circ$ ou cette contrainte décroît rapidement avec un taux de réduction de 89%. Cette méthode s'avère prometteuse et offre un taux de réduction concentration de contrainte considérable.
- La technique combinée offre les meilleurs résultats ou on voit clairement la diminution de contrainte σ_{22} en pointe de fissure est de 99% ce qui est très bénéfique pour les structures fissurées.
- la méthode combinée offre un effet bénéfique considérable quel que soit la méthodes de perçage, le meilleur résultat est enregistré pour un rayon de 2mm on a une réduction 89%.

L'angle de 90° enregistre la plus faible valeur de σ_{22} , cette configuration est la meilleur ou les fibres sont orienté en parallèle avec l'axe de chargement pour une bonne relaxation de la plaque sollicité.