

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université -Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département Génie Mécanique



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Construction Mécanique
Thème

**Comportement en rupture d'une structure entaillée et fissurée
sous chargement mixte**

Présenté le 19/06/2023 Par :

- 1) Mr. BELHADJ Taher Idriss
- 2) Mr. HAMIDI Imad Alaa Eddine

Devant le jury composé de :

Pr. Wahid OUDAD	Pr	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr. Sofiane BELHENINI	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examinateur
Dr. Nourredine DJEBBAR	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant

Année universitaire 2022/2023

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

Remerciement

Nous remercions Allah tout puissant qui nous a donné la force et la volonté pour pouvoir finir ce mémoire de fin étude.

En premier lieu, nous tenons à exprimer notre gratitude à nos familles pour leurs encouragements et soutiens. Nos remerciements les plus s'adressent à monsieur DJEBBAR Nouredine pour la confiance et les précieux conseils qu'il nous a accordés durant ce travail.

Nous exprimons notre gratitude aux membres de jury d'avoir accepté d'évalué notre travail ; notamment le professeur OUDAD en sa qualité de présent de jury et Docteur BELHENINI en sa qualité d'examineur

Nos remerciements s'adressent également à nos collègues et nos amis et tous ce qui nous a aidés de près et loin.

Sans oublier de remercier vivement tous les enseignants de département de Génie mécanique.

Résumé :

L'objet de ce travail consiste à étudier et analyser les performances de la réparation par patch en composite par la méthode des éléments finis. Ces techniques de réparations peuvent s'appliquer dans différentes branches de l'ingénierie: mécanique, aérospatiale, civile, navale, etc. La méthode des éléments finis avec le code ABAQUS a été utilisée pour modéliser le comportement mécanique des différentes techniques de réparation. Le facteur d'intensité de contraintes KI décroît avec la diminution de la taille de la fissure située au coin. Quelle que soit la taille de la fissure le facteur d'intensité de contraintes est réduit aux extrémités du front de fissure avec un taux de 60 % et il est pratiquement nul au front de la fissure, ce qui signifie que la fissure n'avance pas.

Mots clés : Structure entaillée, Fissure, Réparation, Patch composites

Abstract:

The object of this work consists in studying and analysing the performance of composite patch repair by the finite element method. These repair techniques can be applied in different branches of engineering: mechanical, aerospace, civil, naval, etc. The finite element method with the ABAQUS code has been used to model the mechanical behaviour of different repair techniques. The stress intensity factor KI decreases with the decrease in the size of the crack located at the corner. Whatever the size of the crack, the stress intensity factor is reduced at the ends of the crack front with a rate of 60% and it is practically zero at the crack front, which means that the crack does not advance.

Keywords: Notched structure, Crack, Repair, Patch composites

تلخيص

يتمثل الهدف من هذا العمل في دراسة وتحليل أداء اصلاح التصحيح المركب بطريقة العناصر المحدودة يمكن تطبيق تقنيات الإصلاح هذه في فروع مختلفة من الهندسة الميكانيكية، والفضاء، والمدنية، والبحرية، وما إلى ذلك

تم استخدام طريقة العناصر المحدودة مع رمز اباكوس لنمذجة السلوك الميكانيكي لتقنيات الإصلاح المختلفة. ينخفض عامل شدة الاجهاد كي مع انخفاض حجم الكراك الموجود في الزاوية. مهما كان حجم الكراك، يتم تقليل عامل شدة الاجهاد في نهايات جبهة الكراك بمعدل 60% ويكون عمليا صفرا في مقدمة الكراك مما يعني ان كراك لا يتقدم

Table des matières

<i>Remerciement</i>	I
Résumé	II
Table des matières	III
Liste des figures	IV
Liste de tableaux	IV
Introduction générale	V
Chapitre I: Structure aéronautique et endommagement	VI
I.1. Introduction	1
I.2. Définition d'endommagement	1
I.3. Les dommages en aéronautique	2
I.4. Mécanisme d'endommagement des composites	4
I.4.1. Décohésion fibre-matrice	4
I.4.2. Fissuration matricielle	5
I.4.3. Délaminage	6
I.4.4. Rupture de la fibre	8
I.5. La détection et l'inspection de l'endommagement	9
I.5.1. Méthodes traditionnelles de Contrôle Non Destructif (CND)	9
I.5.1.1. Le contrôle visuel	9
I.5.1.2. Tests radiographiques	10
I.5.1.3. Emission acoustique	10
I.5.1.4. Test de pénétration (ressuage)	11
I.5.1.5. Courants de Foucault	12
I.5.1.6. Test ultrasonique	14
I.5.2. Les techniques de réparation des structures fissurées	15
I.5.2.1. Méthode de perçage d'un trou	15
I.5.2.2. Méthode d'infiltration	17
I.5.2.3. Méthode de la surcharge	18

I.5.2.4.	L’empreinte de billes	19
I.5.2.5.	Techniques de meulage	19
I.5.2.6.	Technique de grenailage	20
I.5.2.7.	Réparation par collage de patches composite	21
I.6.	Conclusion	222
	Références bibliographiques	23
Chapitre II :	Mécanique de rupture	25
II.1.	Introduction.....	25
II.2.	Objectif de la mécanique de la rupture	25
II.3.	Aperçu historique sur la mécanique de la rupture	26
II.4.	Modes de la rupture	29
II.4.1.	Facteur d’intensité des contraintes	30
II.5.	Concept d’intégrale J	31
II.5.1.	Intégrale J à les propriétés suivants.....	32
II.6.	Types de fissuration	33
II.6.1.	La fissuration brutale	33
II.6.2.	La fissuration successive	33
II.7.	Formation des fissures	34
II.8.	Energie de rupture	36
II.8.1.	Théorie de Griffith (PARAMETRE G)	36
II.8.2.	Application à un cas simple	37
II.9.	Relation entre G et K	37
II.10.	Endommagement et rupture	38
II.10.1.	Modes de chargement	38
II.10.2.	Classes de matériaux vis-à-vis la rupture	40
II.11.	Conclusion	41
	Références bibliographiques	42
Chapitre III :	Modélisation numérique de la réparation des fissures par patch composite	44
III.1.	Introduction	43

III.2.	Présentation du logiciel ABAQUS/CAE	43
III.2.1.	Le module Part	44
III.2.2.	Le module Property	45
III.2.3.	Le module Assembly	46
III.2.4.	Le module Step.....	47
III.2.5.	Le module Interaction.....	47
III.2.6.	Le module Load.....	48
III.2.7.	Le module Mesh	49
III.2.8.	Module Jobs	50
III.2.9.	Module Visualisation	50
III.3.	Modèle géométrique étudié	50
III.4.	Résultat et analyses	51
III.4.1.	Partie I : Plaque fissurée sans réparation	51
III.4.1.1.	1 ^{er} Modèle	51
III.4.1.2.	2 ^{ème} Modèle	53
III.4.1.3.	3 ^{ième} Modèle	55
III.4.1.4.	4 ^{ème} Modèle	57
III.4.2.	Partie II: Plaque fissurée et Réparée par patch	61
III.4.2.1.	1 ^{er} Modèle	61
III.4.2.2.	2 ^{ième} Modèle	63
III.4.2.3.	3 ^{ième} Modèle	64
	Références bibliographiques	66
	Conclusion générale.....	67

Liste des figures

Figure I.1 : Différents types de dommages rencontrés sur pièces composites	2
Figure I.2 : Présentation de la répartition des réparations sur d'avions Airbus	3
Figure I.3 : Décohésion fibre-matrice	5
Figure I.4: Fissuration de la matrice	6
Figure I.5: Délaminage d'un composite	7
Figure I.6: Rupture de la fibre	8
Figure I.7: Tests radiographiques	10
Figure I.8: Principe de base de l'émission acoustique	11
Figure I.9 : Test de ressuage	12
Figure I.10 : Courants de Foucault	13
Figure I.11 : Test ultrasonique	15
Figure I.12 : Schéma des lignes de chargement	16
Figure I.13 : Schéma du perçage au fond de la fissure	177
Figure I.14 : Evolution de la longueur de la fissure en fonction du nombre de cycles après une surcharge	188
Figure I.15 : Schéma de principe du meulage	20
Figure I.16 : Exemple d'utilisation de la technique de grenailage	200
Figure I.17: Maillage de la plaque réparée avec raidisseur et patch sur la face opposée	211
Figure II.1: Les trois modes de rupture	30
Figure II.2: Détermination des axes (x, y) et des coordonnées (r, θ) au voisinage de l'extrémité d'une fissure	30
Figure II.3 : Contour arbitraire autour de l'extrémité d'une fissure	31
Figure II.4 : Contour " Γ " montrant les composantes d'Intégral-J	32
Figure II.5 : Contour " Γ " fermé, avec $\rho \rightarrow 0$	33
Figure II.6 : Schématisation de la séquence de formation de fissures sous l'action d'un indenteur Vickers	34
Figure II.7 : Les différents types des fissures	35
Figure II.8 : Eprouvette d'essai	37

Figure II.9 : Charge limite et mode de pilotage du chargement	39
Figure II.10 : Chargement cyclique	39
Figure II.11 : Classes de matériaux vis-à-vis de la rupture en sollicitation monotone	41
Figure III. 1: Etapes à suivre pour la programmation	44
Figure III. 2 : géométrie de composent	45
Figure III. 3 : géométrie des structures répare.....	45
Figure III. 4 : Assemblage des plaques.....	47
Figure III. 5 : déclaration des interactions	48
Figure III. 6 : déclaration des conditions aux limites	49
Figure III. 7 : Maillage des structures.....	49
Figure III. 8: Modèle géométrique de la plaque fissurée.	51
Figure III. 9: Variation du facteur d'intensité de contraintes K_I à chaque état d'avancement du front de fissure pour différentes tailles de la fissure quart-elliptique	51
Figure III. 10: Variation de du facteur d'intensité de contraintes K_I à chaque état d'avancement du front de fissure pour différentes tailles de la fissure quart-elliptique.	52
Figure III. 11: Représentation graphique du modèle géométrique étudié.	53
Figure III. 12: Variation du facteur d'intensité de contraintes K_I le long du front de fissure et pour différente valeur de la profondeur a de la fissure.....	53
Figure III. 13: Variation de du facteur d'intensité de contraintes K_I le long du front de fissure et pour différente valeur de la profondeur a de la fissure.	54
Figure III. 14: Représentation graphique du modèle géométrique étudié.	55
Figure III. 15: Variation de facteur d'intensité de contrainte K_I le long du front de fissure et pour différente valeur du diamètre d de l'entaille.	55
Figure III. 16: Variation de facteur d'intensité de contrainte K_I le long du front de fissure et pour différente valeur du diamètre d de l'entaille.	56
Figure III. 17: Représentation graphique du modèle géométrique étudié.	57
Figure III. 18 : Variation de facteur d'intensité de contrainte K_I en fonction de front de fissure à différentes valeurs de la distance entre les deux fissures.....	57
Figure III. 19 : Variation de facteur d'intensité de contrainte K_I en fonction de front de fissure à différentes valeurs de la distance entre les deux fissures.....	58
Figure III. 20 : Variation de facteur d'intensité de contrainte K_I en fonction de front de fissure à différentes valeurs de la distance entre les deux fissures.....	59

Figure III. 21 : Variation de facteur d'intensité de contrainte K_1 en fonction de front de fissure à différents valeurs de la distance entre les deux fissures.	60
Figure III. 22 : Représentation graphique du modèle géométrique étudié.....	61
Figure III. 23 : Variation de facteur d'intensité de contrainte K_1 le long du front de fissure et à chaque avancement de la fissure.	62
Figure III. 24: Représentation graphique du modèle géométrique étudié.	63
Figure III. 25 : Variation de facteur d'intensité de contrainte K_1 le long du front de fissure et pour différentes valeurs de la profondeur a de la fissure.....	63
Figure III. 26 : Représentation graphique du modèle géométrique étudié.....	64
Figure III. 27 : Variation de facteur d'intensité de contrainte K_1 le long du front de fissure et pour différents diamètres de l'entaille circulaire.	65

Liste de tableaux

Tableau I.1: Durée de vie en fatigue N en kilocycles pour la propagation de la fissure	19
Tableau III.1: Propriétés des matériaux	46

Introduction générale

Introduction générale

Le comportement à la rupture des structures entaillées et fissurées sous chargement mixte est un domaine de recherche important en mécanique des matériaux et en génie civil. Les fissures et les éclats sont des défauts courants qui peuvent apparaître dans les structures en raison de l'utilisation, de la fatigue, de la corrosion, de la fabrication ou d'autres facteurs. La propagation de ces fissures et tranchées peut entraîner une défaillance structurelle catastrophique, qui peut avoir un impact énorme sur la sécurité et la fiabilité de la structure.

La défaillance des structures entaillées et fissurées sous chargement mixte dépend de nombreux facteurs, tels que la géométrie de la structure, les propriétés mécaniques du matériau, la taille et la forme des fissures et des encoches, et les conditions environnementales. Un chargement mixte combinant des contraintes normales et de cisaillement peut avoir un impact significatif sur la propagation des fissures et des entailles. Les mécanismes des dommages de croissance et de déformation des fissures peuvent différer de ceux sous chargement simple, il est donc important de comprendre comment les contraintes interagissent pour prédire la croissance des fissures.

Les méthodes analytiques couramment utilisées pour étudier le comportement de défaillance des structures entaillées et fissurées, comprennent l'utilisation des modèles à base d'éléments finis, d'essais en laboratoire et de simulations informatiques. Ces méthodes permettent de comprendre les mécanismes de croissance et de déformation des fissures des structures entaillées et fissurées sous chargement mixte et de prédire leur comportement à la rupture.

Brièvement, l'étude du comportement en rupture des structures entaillées et fissurées sous chargement mixte est essentielle pour garantir la sécurité et la fiabilité des structures. La compréhension des mécanismes de propagation de fissure et de déformation permet de développer des méthodes de prévention et de réparation efficaces pour éviter les dommages structurels.

Notre travail est divisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre nous présenterons la structure aéronautique et endommagement.

Dans le deuxième chapitre nous parlerons sur la mécanique de la rupture.

Dans Le troisième chapitre nous allons analyser par la méthode des éléments finis le comportement des structures entaillées émanant d'une fissure à différentes position et réparées par patch composite.

Chapitre I

Structure aéronautique et endommagement

Introduction :

Les matériaux composites sont conçus pour diverses applications thermo-structurales dans des domaines tels que l'aéronautique, les constructions civiles et l'industrie navale. Cette diversité d'applications industrielles est possible car ces matériaux peuvent supporter de manière satisfaisante tant les chargements mécaniques que d'autres types de sollicitations (abrasion, agents chimiques, hautes températures), issue des fonctionnalités spécifiques auxquelles sont destinées les structures impliquant ces matériaux, ou encore des environnements auxquels ces matériaux sont exposés. Lors d'une sollicitation quelconque sur un matériau composite, le développement de l'endommagement au sein du matériau commence assez tôt. Dans un composite les premiers dommages détectés commencent à se développer à l'échelle microscopique lorsque l'effort localisé atteint la limite de rupture d'un des constituants ou celle de l'interface qui les relie. Les microfissures qui se développent sont habituellement trop petites pour causer la rupture finale du composite. Ainsi, un nombre important de ces microfissures s'accumulent dans le composite avant la rupture finale. Les paramètres tels que la fraction volumique, l'orientation des fibres, l'épaisseur des plis et l'espacement entre fibres jouent un rôle très important dans la progression de l'endommagement. On peut constater aussi en conséquence que la nature de matrice et de la fibre jouent un rôle très essentiel dans le type et le mécanisme d'endommagement [1].

Définition d'endommagement :

L'endommagement est un endommagement qui se produit dans le matériau et se caractérise par l'extension de la surface libre à l'intérieur du matériau, accompagnée d'une augmentation de la fraction volumique des vides. Cette apparition est causée par une attaque physique ou chimique. Cela provoque une diminution de sa capacité physique, ce qui conduit à une rupture. Un degré d'endommagement peut être directement lié à des propriétés physiques, puisque l'endommagement se caractérise par des modifications qui peuvent, en principe, être observées. Microdéformation, dégradation de surface, microfissures, micro-vides, corrosion, vieillissement et autres phénomènes d'endommagement. Sont tous observables, mais parfois difficiles à mettre en évidence [2].

Les dommages en aéronautique :

D'après nos partenaires industriels, fabricants et utilisateurs de composites, les étapes de fabrication et d'assemblage sont des étapes critiques de la vie des pièces composites. Malheureusement, en général pour des raisons de confidentialité, les statistiques concernant les dommages rencontrés pendant ces phases ne sont pas disponibles. Ce qui est généralement admis, en revanche, c'est la sensibilité des composites aux délaminages pendant les phases d'usinage ou lors de chocs avec des outils ou d'autres pièces des assemblages. Si l'on s'intéresse plus largement aux endommagements que l'on retrouve sur pièces composites, on retrouve plusieurs scénarios d'endommagements liés à la complexité de ces matériaux (Figure I.1).

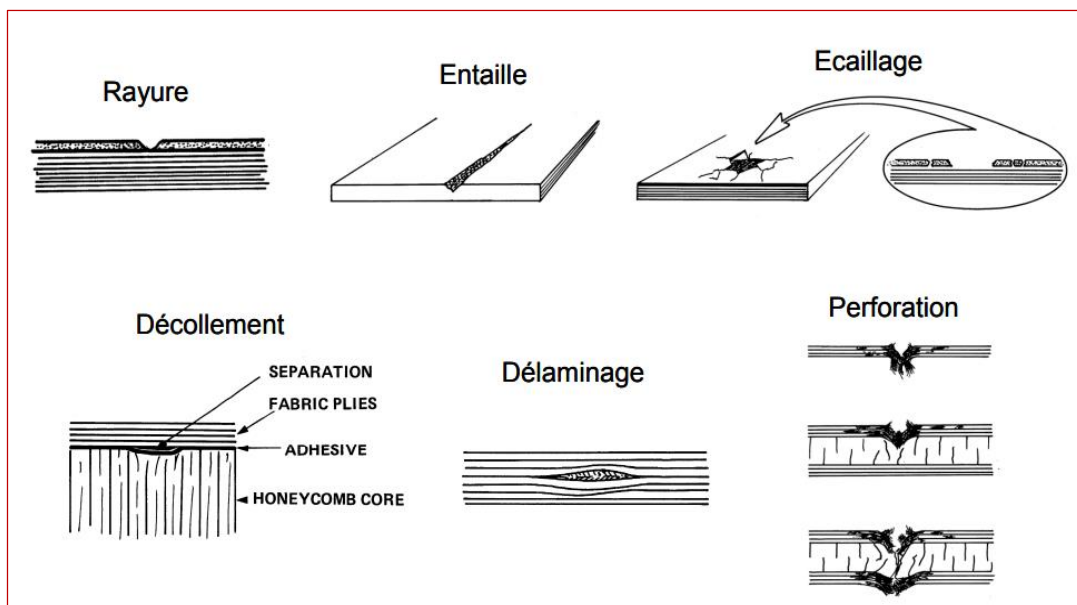


Figure I.1 : Différents types de dommages rencontrés sur pièces composites [2].

Ces différentes situations, sont très variées comparées aux dommages que l'on peut trouver sur les matériaux métalliques. On observe que plus de 50 % des dommages sont liés à des sollicitations d'impacts. Afin de compléter ces informations, la localisation des dommages sur les appareils permet de savoir quel type de structure est soumis à ces sollicitations. Comme la montre la répartition des réparations qui ont été rapportées par Airbus (Figure I.2), on observe que 85 % des dommages réparés se trouvent sur le fuselage et plus particulièrement, la peau du fuselage et les panneaux autour des portes (le karman et le radôme étant exclus de ces statistiques). Avec l'arrivée des avions dont le fuselage est principalement constitué de

matériaux composites, le remplacement de tronçons ou de panneaux semble difficile à concevoir d'un point de vue économique. La réparation est alors essentielle [2].

D'après les données internes d'Airbus, Morteau relate que l'endommagement typique qui concerne la réparation des surfaces extérieures des avions est un impact de 35 Joules avec une occurrence de 10-5 par heure de vol [Morteau, 2006]. Boeing et l'ensemble des intervenants aéronautiques contactés, s'accordent pour considérer cet endommagement dit de "faible énergie, faible vitesse" comme étant le plus critique pour les structures composites, notamment parce qu'il n'est pas facile à détecter et qu'il engendre une réduction très significative des propriétés des composites en compression. Ainsi, nous nous intéresserons essentiellement dans ces travaux à la réparation de ce type de dommage [2].

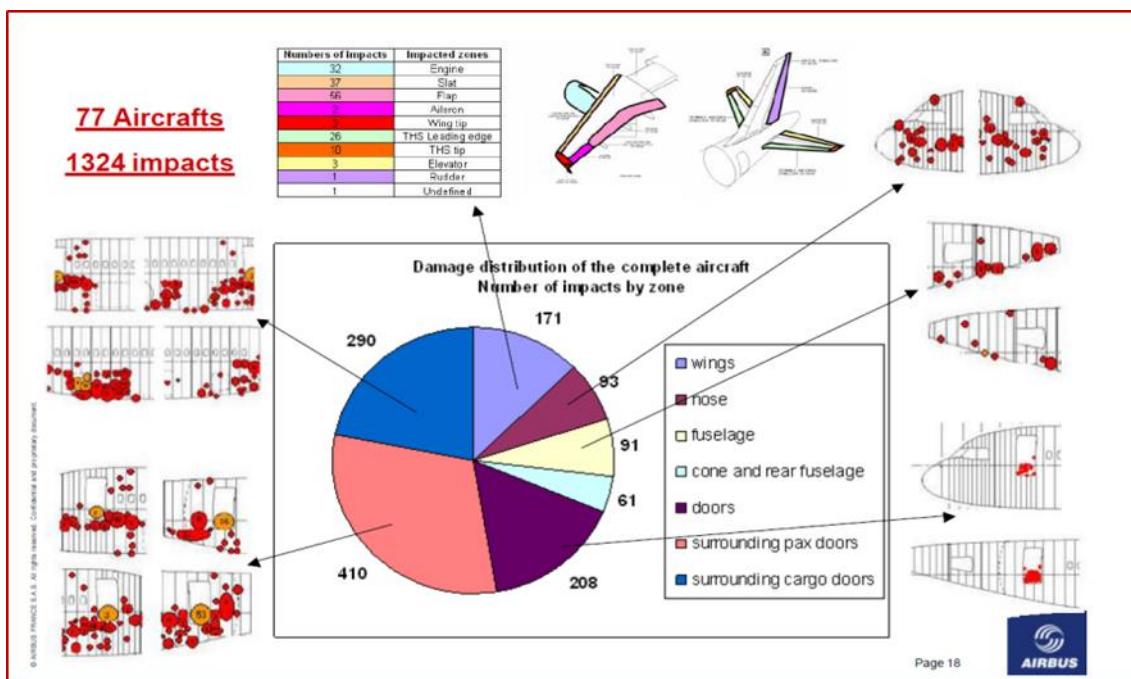


Figure I.2 : Présentation de la répartition des réparations sur d'avions Airbus [2].

Maintenant que nous savons que le dommage le plus fréquemment rencontré sur avion est un impact de faible énergie, il est nécessaire de connaître quelle est la forme que prend cet endommagement sur un matériau composite. Pour cela et comme les composites forment une microstructure à eux seuls, il est nécessaire de décrire correctement les mécanismes d'endommagement des composites afin de comprendre ce qu'il est nécessaire de réparer [2].

Mécanisme d'endommagement des composites :

L'identification des dommages par la microscopie a permis de développer l'analyse d'endommagement. La perte de rigidité du matériau endommagé permis de définir et de déterminer un seuil critique de déformation ou de contraintes qui amorce les mécanismes d'endommagement. Il a été montré que la température, la vitesse de sollicitation, les chocs, la nature chimique d'un environnement agressif, le chargement monotone ou cyclique influencent l'évolution de l'endommagement. La ténacité de la matrice et la qualité de l'interface influence la résistance aux dommages [3]. Les mécanismes d'endommagement potentiels d'un matériau hétérogène, notamment les composites soumis à une sollicitation mécanique, peuvent se regrouper en quatre principaux modes différents [4] selon le site où ils opèrent :

- Fissuration matricielle.
- Rupture de l'interface fibre-matrice et déchaussement de fibre, délaminage (décohésion étendue intra plis).
- Rupture des fibres.
- Délaminage.

I.4.1. DECOHESION FIBRE-MATRICE :

Dans la pratique même après avoir choisi les constituantes fibres et matrice avec soin en les soumettant à des contrôles précis, dont leur interface issue de leur interaction ne peut être totalement maîtrisée par les efforts d'analyse et de prévision. Dans le cas particulier où les fibres sont discontinues, la zone inter faciale est le siège d'initiation de fissures devient critique à l'accumulation de l'endommagement (Figure I.3). Cela est dû essentiellement à l'efficacité du transfert de charges à l'interface fibre-matrice ainsi qu'à la concentration des contraintes aux extrémités des fibres. Le comportement de l'interface fibre-matrice dépend essentiellement de ses propriétés mécaniques comparées à celles des fibres et de la matrice [5].

Généralement la décohésion a lieu dans deux cas :

- ✓ Lorsque la cohésion est inférieure à la contrainte de cisaillement à la rupture de la matrice.
- ✓ Lorsque l'adhérence fibre-matrice est faible : dans ce cas, la rupture de la matrice traverse sans qu'il y ait rupture de fibre mais avec décohésion de l'interface fibre matrice

Dans le cas d'une adhérence fibre-matrice élevée la rupture initiée soit par rupture de fibre soit par rupture de la matrice, induit en front de fissure des concentrations de contraintes conduisant à une propagation de la rupture successivement dans les fibres et dans les matrices.

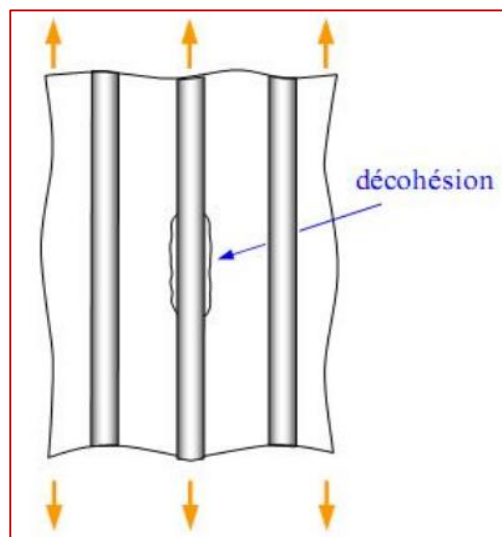


Figure I.3 : Décohésion fibre-matrice [5].

I.4.2. FISSURATION MATRICIELLE :

Dans la matrice, la fissuration peut être transverse ou longitudinale (Figure I.4). La première se produit lorsque la contrainte en traction dans la matrice atteint la contrainte de rupture de la matrice, alors que la seconde a lieu lorsque la contrainte de cisaillement dans la matrice atteint la contrainte en cisaillement à la rupture généralement au voisinage d'une fibre. Ce dernier

mode de rupture appelé « Splittent » se produit lorsque la contrainte de décohésion est supérieure à la contrainte de cisaillement à la rupture de la matrice. Dans le cas des composites industriels à fibres de verre, les performances à la rupture peuvent être limitées par une déformabilité trop faible de la matrice. Il apparaît donc nécessaire d'adapter au mieux les propriétés de la matrice à celles des fibres pour optimiser les performances à la rupture des matériaux composites [5].

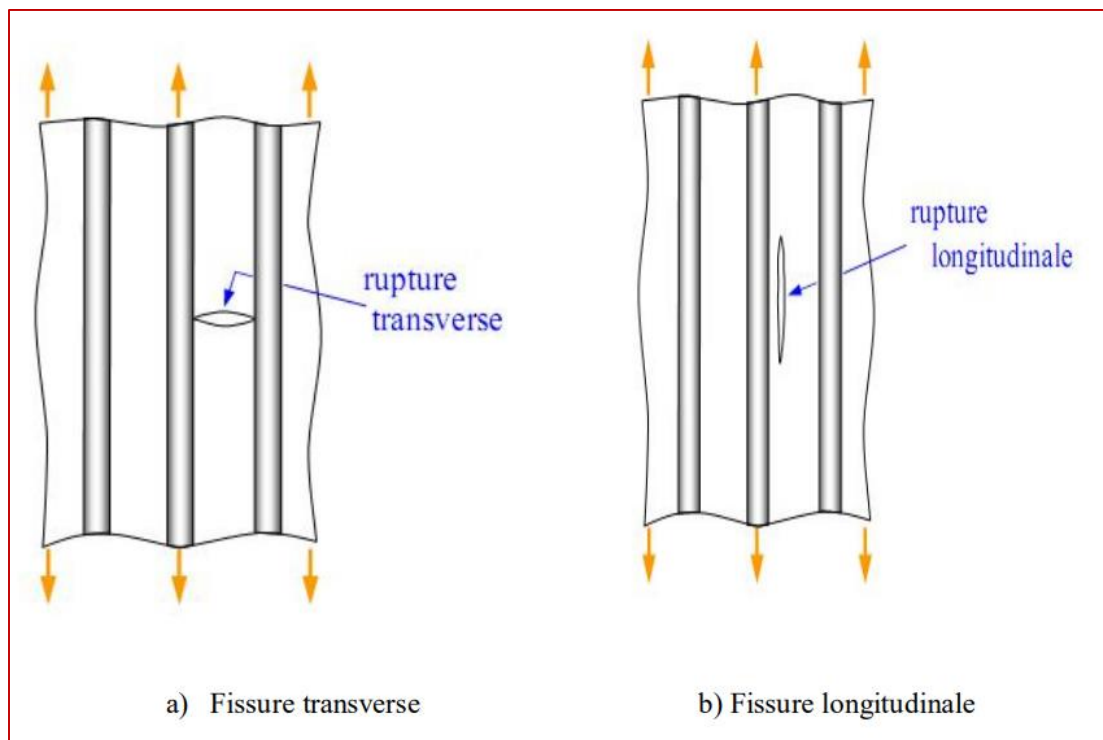


Figure I.4: Fissuration de la matrice [5].

I.4.3. DELAMINAGE :

Dans le cas d'un stratifié ou multicouche, aux mécanismes élémentaires précédemment décrits s'ajoute un mécanisme de rupture entre couches appelé rupture par « délaminage » ce type d'endommagement dépend de la nature de constituants, de l'architecture des couches et du mode de sollicitation mécanique imposé (Figure I.5). Le délaminage qui apparaît après la

phase d'endommagement intra laminaire commence souvent sur les bords avant de s'étendre sur toute l'éprouvette. Il correspond d'une fissuration qui a tendance à séparer les plis ou les couches du composite [5].

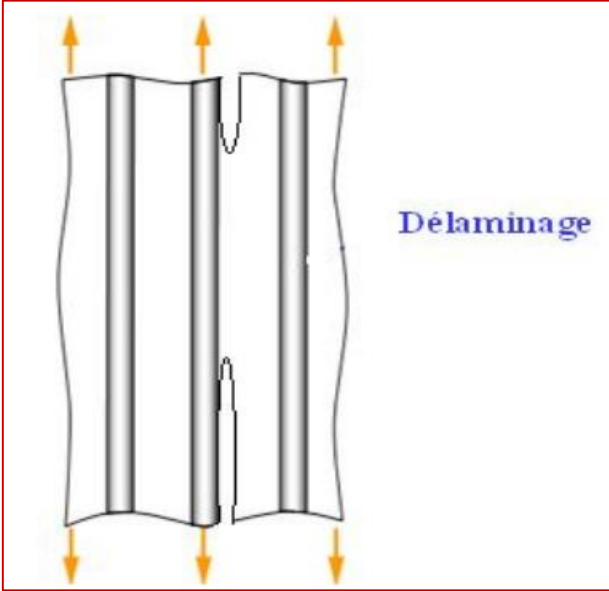


Figure I.5: Délaminage d'un composite [5].

I.4.4. RUPTURE DE LA FIBRE :

Dans certains cas, l'endommagement dans les composites est initié par une rupture de la fibre. Cela se produit en générale lorsque l'orientation des fibres coïncide plus ou moins avec l'axe de sollicitation du matériau composite. La rupture aura lieu lorsque la contrainte de rupture de la fibre est atteinte. L'endommagement se produit et ne cesse de se progresser à mesure que la contrainte est appliquée ce qui provoque ainsi la rupture de la matrice et de la fibre jusqu'à la rupture totale du matériau (Figure I.6) [5].

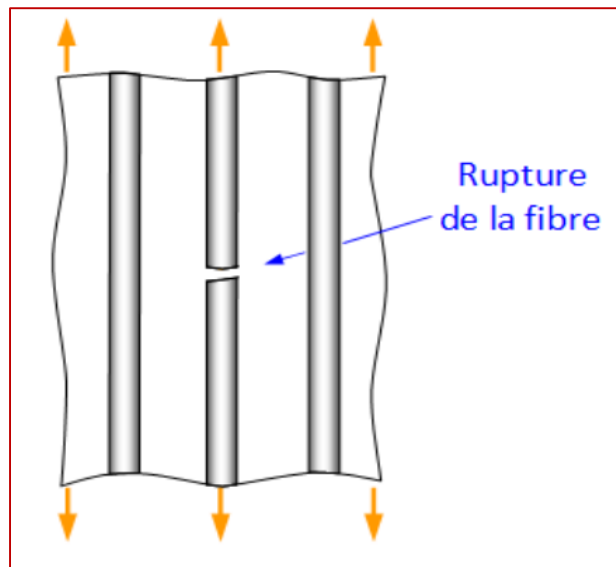


Figure I.6: Rupture de la fibre [5].

I.5. La détection et l'inspection de l'endommagement :**I.5.1. METHODES TRADITIONNELLES DE CONTROLE NON DESTRUCTIF (CND) :**

Dans cette section, certaines des techniques qui pourraient être utilisées pour le CND seront passées en revue. En particulier, pour plusieurs d'entre eux, seules des descriptions générales seront données, tandis que les ultrasons qui relèvent du sujet principal (qui sont les plus utilisés, également pour l'inspection des composites dans le secteur aérospatial) seront décrits plus en détail [6].

I.5.1.1. Le contrôle visuel :

L'inspection visuelle est l'une des méthodes de test non destructif de base, et c'est également le point final de la plupart des méthodes de test non destructif, et c'est aussi la plus simple et la plus polyvalente. En effet, il présente plusieurs atouts réels : simplicité, rapidité, faible coût, formation et équipement minimaux, et possibilité d'effectuer l'usinage pendant que la pièce est en cours d'utilisation ou en cours d'usinage. Diverses formes de produits peuvent être inspectées, y compris les pièces moulées, les pièces forgées, les composants usinés et les soudures. Il est généralement basé sur une inspection visuelle humaine. Bien sûr, il est impératif que la vue de l'inspecteur et une expérience modérée.

Fondamentalement, VT nécessite :

- Nettoyage de la surface de la pièce,
- Un éclairage adéquat de cette surface,
- Contact en visibilité directe avec la partie de la pièce à inspecter,
- Une compréhension approfondie de la nature et de l'origine des discontinuités et des défauts potentiels au sein de l'objet à tester.
- Familiarité avec les spécifications contrôlant le visuel est cohérent, éliminant le besoin des tests supplémentaires et les coûts associés. Parfois, il localise les zones qui nécessitent une inspection ultérieure par d'autres techniques CND [6].

I.5.1.2. Tests radiographiques :

Il s'agit d'une méthode CND qui exploite la capacité des photons électromagnétiques (haute énergie) à courte longueur d'onde à pénétrer divers matériaux. En fait, cette méthode utilise des rayons X pour produire une radiographie de la pièce examinée, montrant tous les changements d'épaisseur, les défauts (internes et externes) et les détails d'assemblage. En outre, les rayons gamma peuvent être utilisés pour des applications spécifiques. La RT consiste essentiellement à envoyer des rayons X à travers le matériau inspecté et à mesurer l'atténuation de l'intensité des rayons sortants. Le résultat est une image en noir et blanc dans laquelle les anomalies deviennent visibles sous la forme d'un changement local d'intensité lumineuse ; en fait, le rayonnement se désintègre de différentes manières à travers différents matériaux et épaisseurs (c'est-à-dire que l'effet lumière / ombre dépend fortement de la densité radiométrique locale et de l'épaisseur du matériau). Ainsi, un profil détaillé de la distribution des défauts internes peut être obtenu [6].

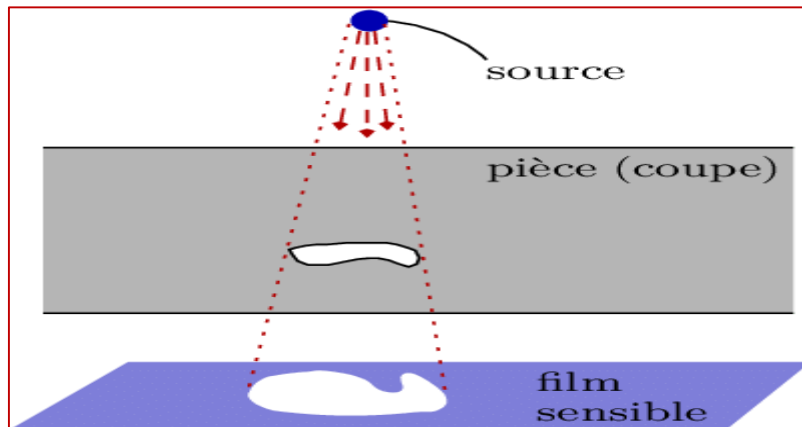


Figure I.7: Tests radiographiques [6].

I.5.1.3. Emission acoustique :

Le principe de base de l'émission acoustique se réfère à la génération d'ondes élastiques transitoires au sein d'un matériau produit par une redistribution soudaine des contraintes qu'il contient. Plus précisément, lorsqu'une structure est soumise à un stimulus externe (changement de pression, de charge ou de température), des sources localisées peuvent déclencher la libération d'énergie sous forme d'ondes de contrainte qui se propagent à la surface et peuvent

être enregistrées par des capteurs appropriés. De tels capteurs, généralement piézoélectriques, sont placés sur la surface du matériau, directement attachée à celle-ci, en des points clés. La détection et l'analyse des signaux acoustiques émis peuvent fournir des informations précieuses concernant l'origine et l'importance d'une discontinuité dans un matériau. Un croquis montrant la position de certains capteurs piézoélectriques et leur schéma de fonctionnement est donné dans :

Les tests AT sont souvent effectués sur les structures en fonctionnement, car cela fournit une charge adéquate pour la propagation des défauts et le déclenchement des émissions acoustiques. En raison de ses caractéristiques intrinsèques, l'AT est classée comme une technique de surveillance de la santé plutôt que comme une technique CND. Elle est utilisée dans de nombreuses applications industrielles, pour évaluer l'intégrité structurale, détecter les défauts, tester les fuites ou contrôler la qualité des soudures, et est largement utilisée comme outil de recherche. Cependant, l'AT souffre d'environnements de service bruyants qui contribuent à un bruit étranger aux signaux enregistrés, ce qui rend crucial la discrimination du signal pour une application réussie. Les systèmes AT ne peuvent évaluer qualitativement que les dommages contenus dans une structure [6].

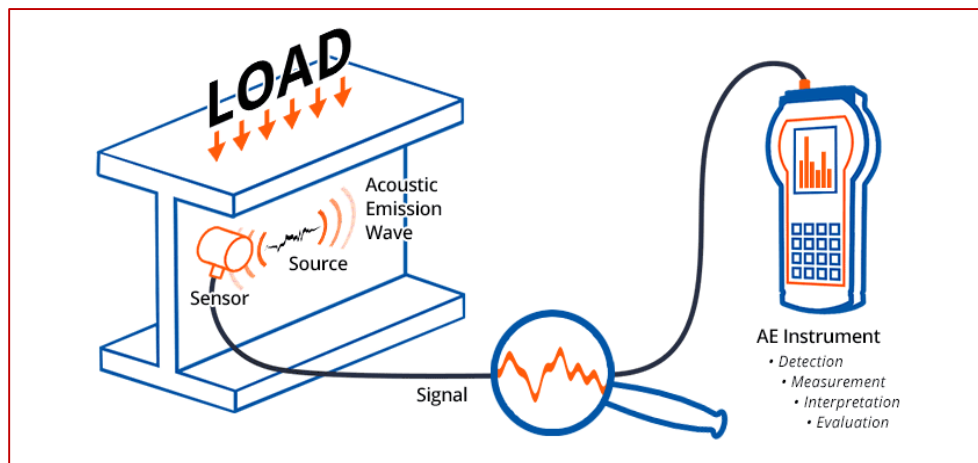


Figure I.8: Principe de base de l'émission acoustique [6].

I.5.1.4. Test de pénétration (ressuage) :

L'inspection avec des liquides pénétrants, également appelée inspection par ressauge, ou simplement appelée essai par ressauge, est une méthode CND largement utilisée pour localiser

les défauts de rupture de surface dans tous les matériaux non poreux (métaux, plastiques ou céramiques). Fondamentalement, un fluide à faible tension superficielle, qui peut être fluorescent ou non, selon le type de colorant utilisé, est appliqué sur la surface du composant testé en le trempant, en le pulvérisant ou en le brossant. Après une période de temps appropriée, appelée temps de séjour, qui est nécessaire pour que le liquide pénètre dans les cavités des défauts, l'excès de pénétrant est retiré de la surface et un révélateur est déposé sur cette dernière.

Cela donne la formation de motifs indicateurs dans la couche où se trouvent les défauts. Le développeur agit comme un buvard et aide à aspirer le pénétrant du défaut de sorte qu'une indication invisible devienne visible pour l'inspecteur. Cette méthode est assez simple et portable et est utilisée pour inspecter une variété de formes de produits. Cependant, contre la simplicité de la méthode, de nombreux aspects nécessitent une grande attention. Il s'agit notamment de l'environnement dans lequel le test est effectué, de l'état de surface de la pièce et de la taille des défauts recherchés. Comme condition préalable principale, la surface d'essai doit être nettoyée pour éliminer tout ce qui pourrait empêcher le pénétrant d'un défaut ou provoquer des avertissements non pertinents ou faux. Il faut également s'assurer que les produits chimiques d'essai sont compatibles avec le matériau de surface pour éviter que l'examen ne provoque une coloration ou une dégradation permanente [6].

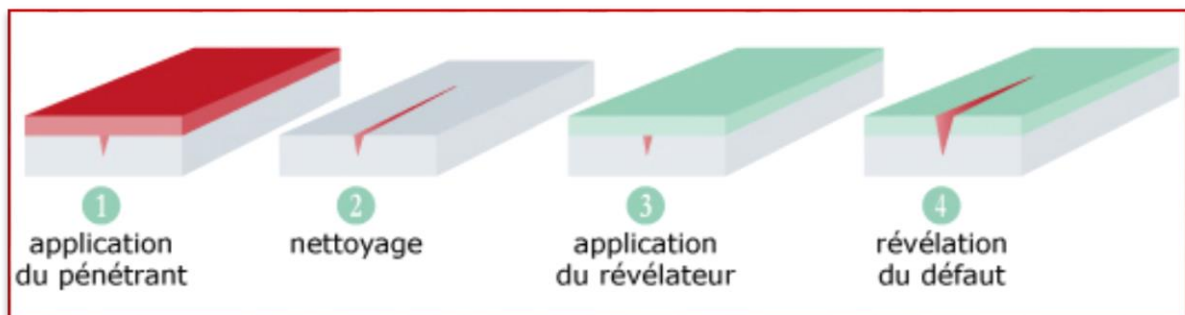


Figure I.9 : Test de ressuage [6].

I.5.1.5. Courants de Foucault :

Elle utilise l'induction électromagnétique pour détecter les défauts dans les matériaux électriquement conducteurs. Le principe de base concerne le champ magnétique variable créé par un courant alternatif (AC) traversant une bobine comme illustré sur la figure. Lorsque le

courant alternatif circule dans la bobine, qui est à proximité d'une surface conductrice, le champ magnétique de la bobine induira un courant de circulation (tourbillon) à proximité de cette surface. L'amplitude et la phase du courant de Foucault induit affecteront la charge sur la bobine et donc son impédance. Ensuite, ces courants de Foucault peuvent être détectés soit avec un deuxième capteur sensible au champ magnétique du récepteur, soit en mesurant les variations du courant circulant dans la bobine d'excitation primaire.

Des variations de la conductivité électrique ou de la perméabilité magnétique de l'objet à tester, ou la présence de défauts, entraîneront une modification du courant de Foucault et une modification correspondante de la phase et de l'amplitude du courant mesuré. Le mécanisme décrit représente la base de l'inspection par courants de Foucault [6].

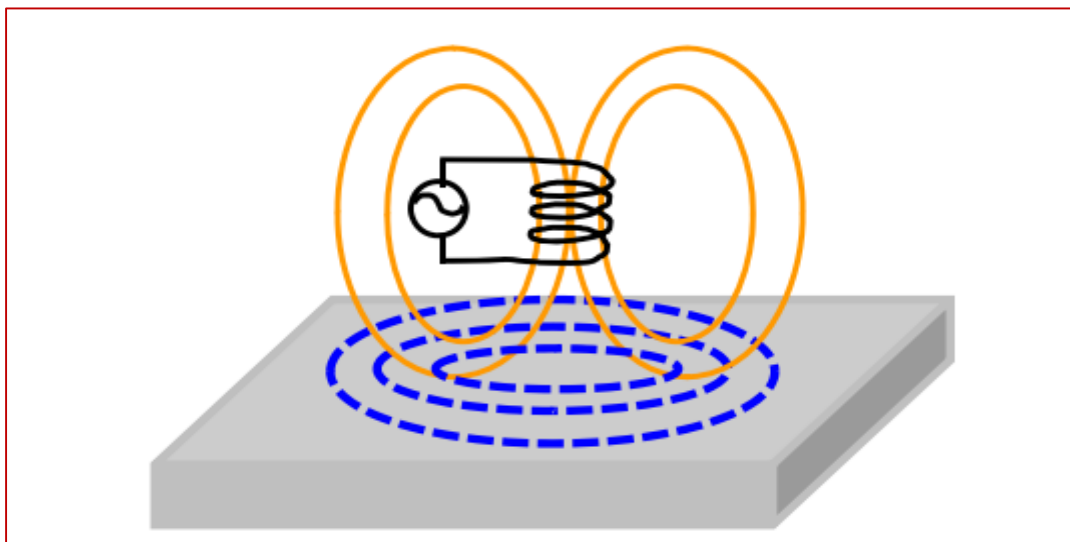


Figure I.10 : Courants de Foucault [6].

Cette méthode peut détecter de très petites fissures dans ou près de la surface du matériau, également en présence de géométries complexes (en choisissant la sonde la plus adéquate) avec une préparation minimale de la surface. Il est également utile pour effectuer des mesures de conductivité électrique et d'épaisseur de revêtement. Cependant, il existe plusieurs limites à l'utilisation de l'inspection par courants de Foucault. Comme principal inconvénient, la technique est susceptible de nombreux effets qui peuvent compromettre sa réponse. Les principaux facteurs à considérer pour évaluer les mesures par courants de Foucault sont :

- **Conductivité électrique du matériau** : elle a un effet très direct sur le flux de courants de Foucault ; plus la conductivité du matériau est élevée, plus le flux de courants de Foucault est important à proximité de la surface.
- **Perméabilité magnétique du matériau** : indique l'aptitude d'un matériau à se magnétiser.
- **Géométrie** : des facteurs géométriques, tels que la courbure, les bords, les rainures, etc., affectent la réponse des courants de Foucault. Ceci doit être pris en compte lors du choix de la sonde de test.
- **Proximité / décollage** : la distance entre la bobine et le matériau est très préoccupante car plus une bobine de sonde est proche de la surface, plus l'effet sur cette bobine sera important. Cela a deux conséquences principales : un signal de « décollage » lorsque la sonde est déplacée sur et hors de la surface et une réduction de la sensibilité lorsque la distance entre la bobine et la surface augmente [6].

I.5.1.6. Test ultrasonique :

L'UT est basé sur le principe qu'une onde ultrasonore, de fréquence supérieure à 20 kHz (au-dessus de la portée auditive humaine), se modifie en traversant un matériau. Lorsque les ondes ultrasonores sont introduites dans un matériau homogène, elles se déplacent en ligne droite et à vitesse constante jusqu'à rencontrer une discontinuité. Ensuite, les ondes subissent une réduction d'amplitude et une réflexion aux interfaces entre des parties d'impédance acoustique différente. L'élément actif de la plupart des transducteurs utilisés est une céramique piézoélectrique, qui peut être façonnée d'une manière particulière pour produire différents modes d'onde. Selon le support et sa géométrie, les ondes ultrasonores peuvent se propager selon des modes spécifiques ; les plus utilisés pour CND sont les modes dits en vrac, qui peuvent être de deux types :

- **Longitudinal** : le mouvement des particules est parallèle à la direction de propagation, c'est-à-dire que l'onde se comporte comme une compression et une relaxation consécutive le long de leur trajectoire.
- **Transversal** : le mouvement des particules est orthogonal à la direction de propagation. Ces modes sont caractérisés par leur vitesse de propagation spécifique, qui dépend des propriétés physiques du matériau.

L'UT ne donne des informations que depuis / à l'intérieur des limites du faisceau sonore lorsqu'il se propage dans le matériau testé. Les opérateurs doivent faire preuve d'une grande prudence lorsqu'ils font des inférences sur la nature du matériau d'essai en dehors des limites du faisceau sonore. L'état du matériau peut varier considérablement et les résultats peuvent ne

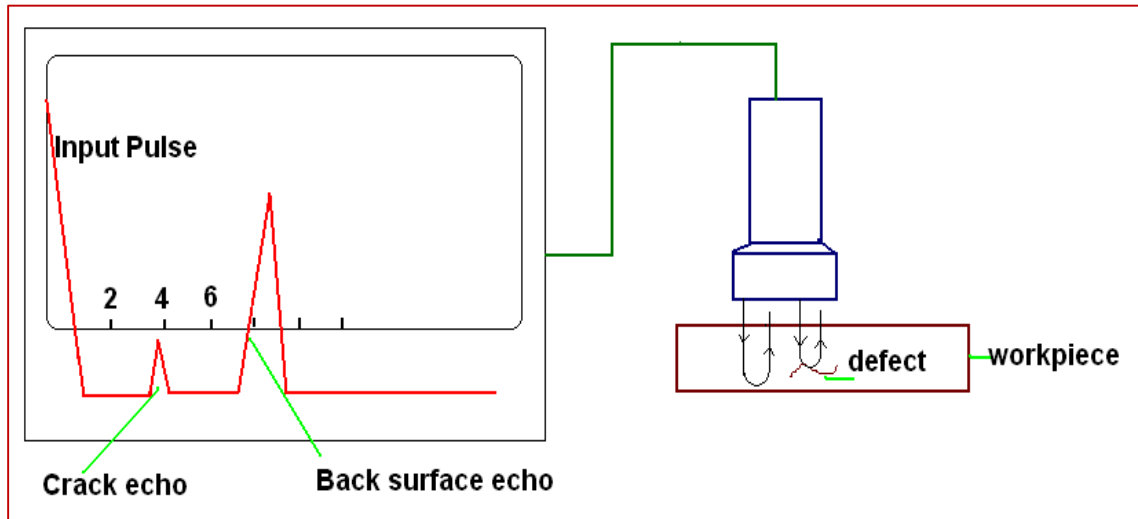


Figure I.11 : Test ultrasonique [6].

pas être fiables si les opérateurs ne font pas preuve d'un bon jugement. Les opérateurs doivent être familiarisés avec l'utilisation du couplant ultrasonique, qui est nécessaire entre le transducteur et la surface du matériau. Des capacités de test doivent être développées pour utiliser et appliquer des coupants de manière fiable afin d'éliminer les variations d'épaisseur de couplant, qui peuvent provoquer des erreurs et des données inexacts. L'étalonnage et les tests doivent être effectués dans des conditions de couplage similaires, avec la quantité minimale de couplant et une pression constante sur le transducteur [6].

I.5.2. LES TECHNIQUES DE REPARATION DES STRUCTURES FISSUREES :

I.5.2.1. Méthode de perçage d'un trou :

Le perçage d'un trou à l'extrémité d'une fissure permet un arrêt temporaire ou permanent de la propagation de la fissure. Cette méthode est basée sur la modification géométrique du fond de fissure. Elle est effectuée dans le but d'augmenter le rayon en fond de fissure ce qui entraîne une réduction du facteur local de concentration de contrainte K_t [7]. Dans le domaine élastique,

les contraintes et les déformations locales peuvent être obtenues à partir du facteur de concentration de contraintes K_t défini par

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_N} = \frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_N}$$

σ_{max} et ε_{max} sont les contraintes et les déformations locales

σ_N et ε_N sont les contraintes et les déformations nominales.

Les concentrations de contraintes dues aux discontinuités géométriques réduisent les résistances statiques et cycliques des structures. La figure 12 montre la présence des zones de concentration de contraintes dans des pièces entaillées. Si on considère une pièce non entaillée soumise à des efforts de traction, pour un chargement uniforme, les lignes de chargement sont parallèles et uniformément espacées les unes des autres (figure I.12 a). Dans le cas d'une pièce entaillée, les lignes de chargement doivent contourner le défaut. Au fond de l'entaille, les lignes sont plus rapprochées dans une surface moindre (figure I.12 b), ceci conduit à une augmentation de la contrainte dans cette zone : c'est le phénomène de concentration des contraintes locales.

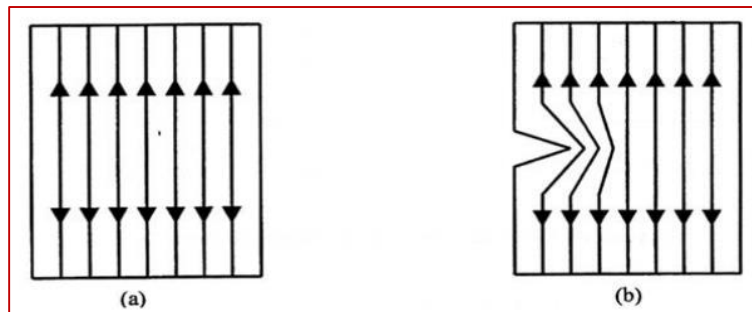


Figure I.12 : Schéma des lignes de chargement [7].

Depuis plusieurs décennies, le perçage en fond de fissure de fatigue est utilisé comme méthode de réparation dans le domaine de l'aérospatiale (figure I.13). Le perçage à l'extrémité de la fissure augmente le rayon au front de fissure ce qui a pour conséquence la réduction de la contrainte maximale (singularité). Cette opération stoppe la fissure pendant un certain nombre de cycles. Le nombre de cycles de réamorçage N_a est le nombre de cycles gagnés sur la durée de vie par rapport à une structure non réparée. 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.

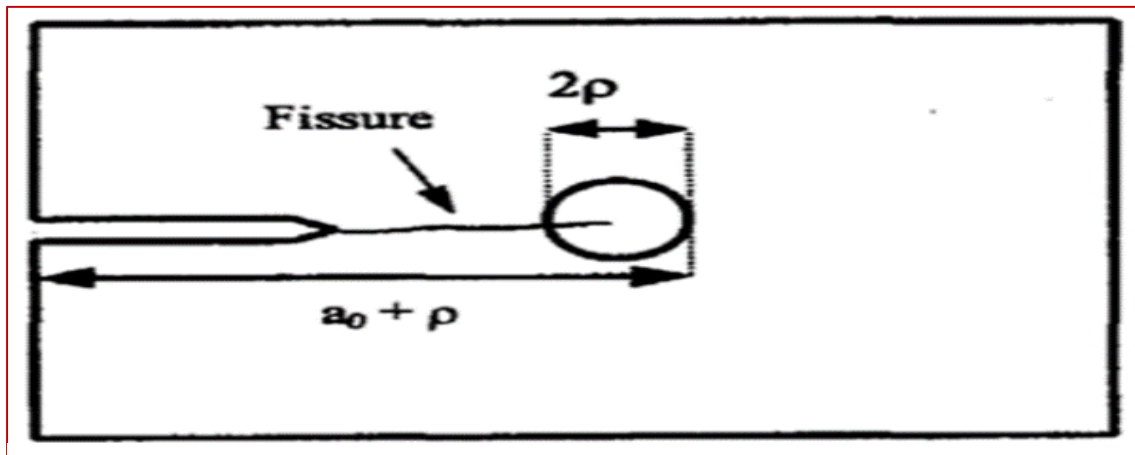


Figure I.13 : Schéma du perçage au fond de la fissure [7].

a_0 : longueur initiale de la fissure de fatigue.

$a_0 + \rho$: longueur de fissure après le perçage.

I.5.2.2. Méthode d'infiltration :

Le principe de cette méthode est basé sur l'introduction d'objets étrangers dans une fissure pour la promotion de la fermeture prématurée des fissures et donc un retard de propagation de la fissure. L'Azote pressurisé est utile pour forcer les matériaux utilisés à fermer les fissures [8]. La résine époxy a été choisie comme constituant prédominant des matériaux de fermeture en raison d'une bonne adhérence pour l'amélioration de l'étirage de fermeture avec moins de mise à l'échelle des surfaces de fissures sous des actions répétées des charges transmises entre les surfaces de fissure. Le matériau de fermeture de la base de résine époxy contribue au retard de fissuration induit par l'infiltration et la résine époxy renforcée au carbure de silicium présente un meilleur retardement de l'efficacité avec une plus grande dureté.

Plusieurs chercheurs travaillent sur les paramètres qui influencent sur l'efficacité de la méthode d'infiltration pour réparer les structures fissurées, Parmi ces paramètres on cite :

- le type de résine,
- la taille des particules de la poudre,
- la densité des particules de la poudre utilisée
- la charge d'infiltration.

I.5.2.3. Méthode de la surcharge :

La propagation de la fissure sous charge cyclique constante voit un retard significatif lorsqu'une surcharge est appliquée [9]. L'augmentation du nombre de cycles (retard) concerne l'amplitude [10] [11] ainsi que le nombre de pics de surcharge [12] [13]. Le retard de propagation de la fissure s'explique principalement par la zone plastique générée au fond de la fissure. Plus la zone plastique est large, plus la période de retardement qui dure jusqu'à ce que la fissure se propage à l'extérieur est longue [12]. La plasticité joue un rôle important dans l'affaiblissement du fond de fissure, entraînant progressivement le champ de contraintes à un niveau limité dicté, entre autres, par les conditions de contrainte ou de déformation plane. La zone plastique autour du fond de fissure est plus grande dans l'état de contrainte plane (structure mince, près des surfaces externes des structures épaisses) que dans l'état de contrainte plane provoquée par des fissures émanant de structures épaisses.

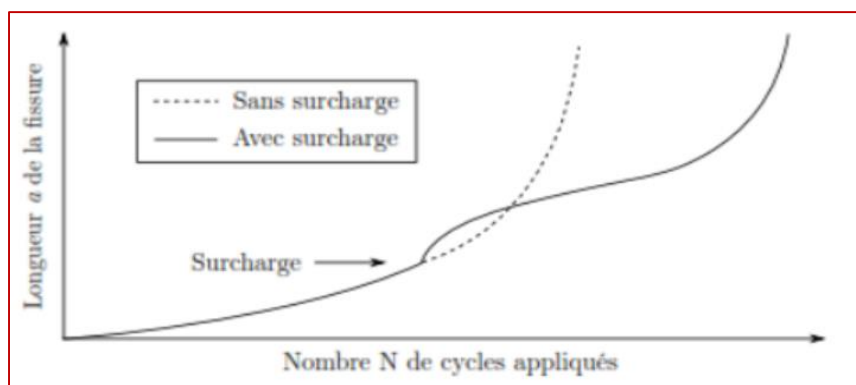


Figure I.14 : Evolution de la longueur de la fissure en fonction du nombre de cycles après une surcharge [14].

I.5.2.4. L’empreinte de billes :

Dans le cas des fissures débouchantes de part et d’autre du composant, il est possible de réaliser des empreintes de billes de type Brinell de part et d’autre du fond de la fissure. Cette technique a pour but d’introduire localement des contraintes résiduelles de compression qui s’opposent à l’ouverture de fissure et diminuent de fait la force motrice de propagation.

Rijk et autres [14] ont utilisé une bille en acier de 8 mm de diamètre pour ralentir la propagation de la fissure sur une pièce d’aluminium 2024 d’épaisseur 2mm. La bille est pressée en fond de fissure ($a_0 = 10$ mm) par une force de 700 Kgf (6860 N). L’empreinte obtenue atteint un diamètre de 2.8 mm. Le tableau 3 fournit les résultats obtenus par cette méthode en termes de gain durée de vie et donne le nombre de cycles pour propager la fissure jusqu’à une longueur finale de 80mm. $a_0 = 10$ à $a_f = 80$ mm [15].

		Sans empreintes		Avec empreintes	
$\sigma_a = 6.5$ Kgf/mm ²	Eprouvette	19d	19e	19b	21g
	N (Kcycles)	8.61	8.15	516.8	> 528.5
$\sigma_a = 5.0$ Kgf/mm ²	Eprouvette	19a	16d	21d	19f
	N (Kcycles)	20.86	22.19	> 1460	> 2918

Tableau I.1: Durée de vie en fatigue N en kilocycles pour la propagation de la fissure [15].

I.5.2.5. Techniques de meulage :

Cette technique de réparation est basée sur le principe d’élimination des fissures par enlèvement de matière (figure I.15). 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 (une meule). 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. Ce qui nécessite une vérification par les calculs de la tenue mécanique de telles structures après réparation.

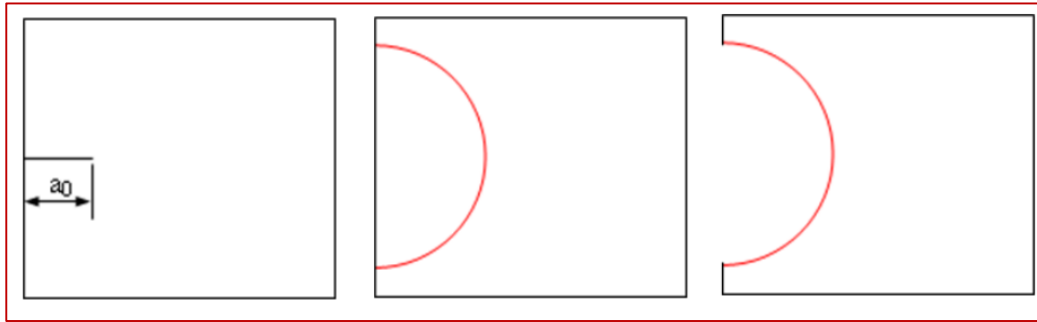


Figure I.15 : Schéma de principe du meulage [16].

Elle est souvent recommandée dans le cas des réparations des fissures dans des structures épaisses (appareils à pression, rails, ...) [16,17, 18,19]. Elle est aussi utilisée comme technique de parachèvement dans le cas des joints soudés en vue de permettre l'extension de leur durée de vie.

I.5.2.6. *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-3 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 [20].

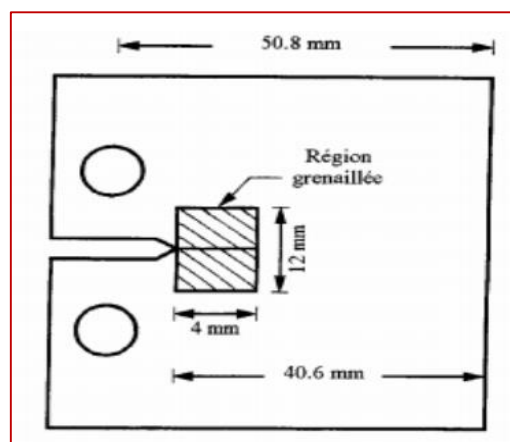


Figure I.16 : Exemple d'utilisation de la technique de grenailage [20].

I.5.2.7. Réparation par collage de patchs composite :

Dans le secteur du transport aérien, on cherche un moyen de réduire la masse globale de l'avion avec une rigidité et une résistance élevée, ce qui permet de réduire les coûts d'exploitation. Ceci est éventuellement réalisé en utilisant des matériaux composites [21]. Les composites offrent plusieurs autres avantages par rapport aux matériaux conventionnels. Ils comprennent une résistance améliorée, une rigidité, une densité faible, une résistance à la fatigue et aux chocs, une conductivité thermique, une résistance à la corrosion, etc. Dans la structure des avions, de nombreuses applications composites sont apparues. Même si les coûts des matériaux composites peuvent être plus élevés, la réduction du nombre de pièces d'un assemblage et les économies de coûts de carburant les rendent plus rentables. Les composites sont largement utilisés dans les avions militaires et commerciaux [21]. Dans les applications réelles, tous les composants mécaniques sont soumis à diverses charges statiques et fluctuantes dures. Il existe un risque de défaillance de ces composants structurels en alliages d'aluminium légers. Comme ces structures sont susceptibles à des dommages pendant leur durée de vie, pour améliorer leur intégrité structurelle, la réparation par des patchs collés sera préférée.

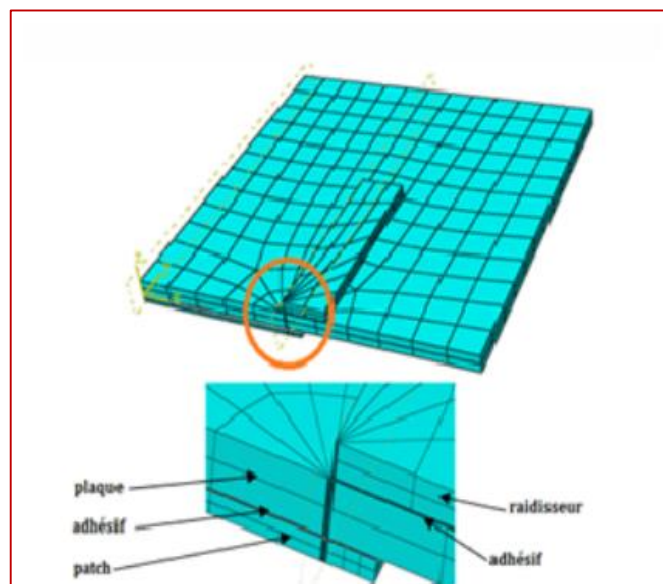


Figure I.17: Maillage de la plaque réparée avec raidisseur et patch sur la face opposée [22].

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les dommages aux aérostructures peuvent avoir des conséquences graves sur la sécurité des vols. Les causes de ces dommages varient des facteurs environnementaux et de l'erreur humaine aux impacts et aux collisions. Par conséquent, des protocoles de maintenance stricts doivent être en place pour détecter et réparer les dommages en temps opportun afin d'assurer la fiabilité et la sécurité de l'aéronef. Les techniques modernes de surveillance et de diagnostic sont également des outils précieux pour prévenir les dommages structurels aux aéronefs et minimiser les risques pour l'équipage et le passager total.

Références bibliographiques :

- [1] Y. Ledru « Étude de la porosité dans les matériaux composites stratifiés aéronautiques »
14 décembre 2009
- [2] Mayhieu HAUTIER, "Analyse des réparations des matériaux composites : mise en œuvre d'un procédé par infiltration et étude du comportement mécanique", thèses de doctorat
Université Toulouse III - Paul Sabatier, 3-12-2010
- [3] R. El Guerjouma, J.C. Baboux, D. Ducret, N. Godin, P. Guy, S. Huguet, Y. Jayet, T. Monnier, « Non-destructive evaluation of damage and failure of fibre reinforced polymer composites using ultrasonic waves and acoustic emission, Advanced engineering materials », vol.3, 2001, pp.601-608.
- [4] P-E Bourban, « Endommagement, rupture et corrosion des composites thermodurcissables de mats de fibres de verre », thèse N° 1148 (1993),
- [5] Jean-Marie Bertholot ; "Matériaux composites, 11-08191.
- [6] MEOLA 2017: infrared thermography to impact damaging of composite materials
- [7] A. BAUS, H.P. LIEURADE, G. SANZ et M. TRUCHON. Etude de l'amorçage des fissures de fatigue sur des éprouvettes en acier à très haute résistance possédant des défauts de formes, et de dimensions différentes, Revue de Métallurgie ; 565- 584, Octobre1977
- [8] P.S. SONG, S. HWANG, C.S. SHIN, Effect of artificial closure materials on crack growth retardation, Engineering Fracture Mechanical; 60(1): 47–58, 1998.15.
- [9] Schijve J, Rijk D, Broek J. Technical Report NLR-TN M. Amsterdam, National Aero and Astronautical Research Institute. 1961. Haag J, Reguly A, Strohaecker T. Effect overloads on fatigue crack growth of high strength steel wires. Materials & Design. 2013; 52:190-5.
- [10] Rice R, Stephens R. Overload effects on subcritical crack growth in austenitic manganese steel. Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing: ASTM International; 1973
- [11] Vargas L, Stephens R. Subcritical crack growth under intermittent overloading in cold rolled steel. ICF3, Munich (Germany) .2013

- [12] Sadananda K, Vasudevan A, Holtz R, Lee E. Analysis of overload effects and related phenomena. *International Journal of Fatigue*. 1999; 21: S233-S46
- [13] Lang M. A model for fatigue crack growth, part I: phenomenology. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2000; 23:587-602
- [14] Yamauchi, A., Miyahara, H., Makabe, C., & Miyazaki, T. (2012). Acceleration of fatigue crack growth after overload in carbon steel. *International Journal of Modern Physics*, 6, 239–244
- [15] P.de RIJK ET A.A.M. OTTER. Empirical investigation on some methods for stopping the growth of fatigue cracks, National Aerospace Laboratory, NLR TR 70021 L,1969.
- [16] H. WU, N. BENSEDDIQ, A. IMAD. Fracture toughness prediction of a valve body: Numerical analysis. *Engineering Failure Analysis*, In Press, 2009.
- [17] J. E. RODRIGUEZ-SANCHEZ, W. D. DOVER, F. P. BRENNAN. Application of short repairs for fatigue life extension. *International Journal of Fatigue*. v. 26, Issue 4, Pages 413-420, 2004.
- [18] K.J. KIRKHOPE, R. BELL, L. CARON, R.I. BASU, K.T.MA. Weld detail fatigue life improvement techniques. Part 1: review. *Marine Structures*. v. 12, Issue 6, p. 447-474, 1999.
- [19] J. L. DESIR, Examples of repair welding of heavy machinery subject to breakage due to low frequency alternating stresses. *Engineering Failure Analysis*, v. 8, Issue 5, p. 423-437, 2001.
- [20] B. Bachir Bouiadjra, M. Belhouari, B. Serier. Computation of the stress intensity factors for repaired cracks with bonded composite patch in mode I and mixed mode. *Composite Structures*, Volume 56, Issue 4, June 2002, Pages 401-406
- [21] Baker, "joining and repair of aircraft composite structure» in *composite Engineering Handbook*, 1997
- [22] F. Hamida, S. Mokadem, K. Malika, O. Wahid, and M. Kouider, "Effet de la réparation par patch des structures aéronautiques raidies," 2014

Chapitre II

Mécanique de la rupture

II.1. Introduction

La mécanique de la rupture a pour objet essentiel l'étude des fissures durant le chargement et de prévoir leur évolution jusqu'à la rupture de la structure. En fonction du chargement et du matériau considérés, si le milieu est globalement plastique ou viscoplastique, l'étude est du ressort de la mécanique non linéaire de la rupture, ou encore de l'approche locale, dans laquelle il est fait une description aussi précise que possible de l'état de contrainte et de déformation en pointe de fissure à l'aide de modèles de comportement non linéaire. Si au contraire la plasticité est absente ou reste confinée, les théories qui permettent de traiter le problème considèrent le matériau comme élastique partout : c'est la mécanique linéaire de la rupture (MLR), qui va être considérée dans cette partie. En effet la (MLR) considère les matériaux parfaitement élastiques, homogènes et isotropes. Elle permet de caractériser le comportement d'un matériau vis-à-vis d'une sollicitation, en présence d'une fissure. D'autre part, elle est une étude consistant à la définition des critères de rupture en déterminant les relations entre les paramètres du matériau et les sollicitations extérieures nécessaires pour amorcer puis propager une fissure. Le rappel qui va suivre résume deux approches permettant d'élaborer des critères de rupture, le premier de Griffith basé sur une approche énergétique, et le second d'Irwin basé sur les contraintes présentes en front de fissure [23].

II.2. Objectif de la mécanique de la rupture :

Les processus de fabrication, de traitement, d'usinage et de formage des matériaux peuvent introduire des défauts dans un composant mécanique fini. Découlant du processus de fabrication, des défauts intérieurs et de surface se retrouvent dans toutes les structures métalliques. Tous ces défauts ne sont pas instables dans les conditions de service. La mécanique de la rupture est l'analyse des défauts pour découvrir ceux qui sont sûrs (c'est-à-dire qui ne se développent pas) et ceux qui sont susceptibles de se propager sous forme de fissures et ainsi de provoquer la défaillance de la structure défectueuse. Malgré ces défauts inhérents, il est possible d'obtenir, grâce à l'analyse de la tolérance aux dommages, le fonctionnement sûr d'une structure. La mécanique de la rupture en tant que sujet d'étude critique existe à peine depuis un siècle et est donc relativement nouvelle [24].

La mécanique de la rupture devrait tenter de fournir des réponses quantitatives aux questions suivantes :

1/Quelle est la résistance du composant en fonction de la taille de la fissure ? Quelle taille de fissure peut être tolérée sous charge de service, c'est-à-dire quelle est la taille de fissure maximale autorisée ?

2/Combien de temps faut-il pour qu'une fissure se développe d'une certaine taille initiale, par exemple la taille de fissure minimale détectable, à la taille de fissure maximale autorisée ?

3/Quelle est la durée de vie d'une structure lorsqu'une certaine taille de défaut préexistant (par exemple un défaut de fabrication) est supposée exister ?

4/Pendant la période disponible pour la détection des fissures, à quelle fréquence la structure doit-elle être inspectée pour les fissures ? [25].

II.3. Aperçu historique sur la mécanique de la rupture :

Eviter la rupture n'est pas en soi une idée nouvelle. Les concepteurs des structures de l'Égypte des pharaons (pyramides) ou ceux de l'empire romain nous ont laissé des édifices que l'on peut encore contempler ce qui prouve bien qu'ils avaient le souci d'éviter la ruine des structures. Les matériaux utilisés avant la révolution industrielle étaient cependant limités pour l'essentiel au bois de construction, à la pierre ou à la brique et au mortier. La brique et le mortier sont relativement fragiles lorsqu'on les utilise en traction ; les structures anciennes qui ont résisté au temps, étaient chargées en compression (pyramides, ponts romains...) et de façon générale toutes les structures de l'époque qui précède la révolution industrielle étaient conçues pour des chargements en compression. Il a fallu attendre la révolution industrielle au début du 19^e siècle, avec l'utilisation de l'acier dont les propriétés mécaniques permettaient de concevoir des structures pouvant résister à des charges de traction. La comparaison des anciens ponts romains avec les ponts modernes de structure métallique montre bien que les premiers étaient chargés en compression alors que les seconds le sont plutôt en traction. L'utilisation de nouveaux matériaux ductiles (acier et autres alliages métalliques) pour des chargements en traction conduisit cependant à quelques problèmes ; des ruptures se produisaient parfois pour des niveaux de charges bien inférieurs à la limite d'élasticité ; on a dans un premier temps essayé d'éviter ces risques de ruptures en sur dimensionnant les structures, mais la nécessité d'alléger de plus en plus les structures et de réduire les coûts conduisit au développement des recherches sur la mécanique de la rupture.

Les premiers essais de rupture ont été menés par Léonard de Vinci bien avant la révolution industrielle, qui a montré que la résistance à la traction de fils de fer variait inversement avec leur longueur. Ces résultats suggéraient que les défauts contenus dans le matériau contrôlaient sa résistance ; plus le volume est important (fil de fer long) plus la probabilité de présence de fissure par exemple est importante. Cette interprétation qualitative fût précisée plus tard en 1920 par Griffith qui établit une relation directe entre la taille du défaut et la contrainte de rupture. S'appuyant sur les travaux d'inglis, Griffith appliqua l'analyse des contraintes autour d'un trou elliptique à la propagation instable d'une fissure ; il formule ainsi à partir du premier principe de la thermodynamique, une théorie de la rupture. Selon cette théorie, un défaut devient instable et conduit à la rupture lorsque la variation d'énergie liée à une propagation du défaut atteint l'énergie spécifique du matériau. Cette théorie prédit correctement la relation entre la contrainte de rupture et la taille du défaut dans les matériaux fragiles. Dans les matériaux ductiles et notamment les alliages métalliques, l'avancée d'un défaut s'accompagne d'une importante dissipation d'énergie due à la plastification qui se développe à l'extrémité d'une fissure et la théorie de Griffith qui ne considère que l'énergie de création de surface ne puisse en rendre compte. Il a fallu attendre les travaux d'Irwin en 1948 qui proposa une modification de la théorie de Griffith en incluant justement dans le bilan énergétique, l'énergie due à la plastification, pour que l'approche de Griffith soit applicable aux matériaux ductiles.

La mécanique de la rupture passa du stade de curiosité scientifique à celui d'une discipline scientifique largement utilisée dans l'ingénierie de la construction, après ce qui arriva aux bateaux de la liberté lors de la deuxième guerre mondiale. Le principe de conception de ces bateaux avec une coque entièrement soudée constituait un grand succès jusqu'au jour où un de ces navires se fissa en deux parties entre la Sibérie et l'Alaska dans une mer très froide. Une dizaine d'autres navires sur les 2700 en service, subira ensuite le même sort. Les analyses des causes de rupture montraient que celles-ci étaient dues à la combinaison de trois paramètres :

Les joints de soudures contenaient des fissures.

- La plupart de ces fissures qui conduisaient à la rupture, se développaient à partir de zones de forte concentration de contrainte,
- L'acier de construction utilisé pour ces bateaux, qui convenait pour les assemblages par rivetage où il n'y avait pas de risque qu'une fissure traverse toute la coque, avait une faible ténacité.

Dès l'instant où la cause des ruptures était clairement identifiée, des plaques en acier de meilleure ténacité furent rivetées près des zones de forte concentration des contraintes pour arrêter la propagation des fissures. On développa ensuite des aciers de forte ténacité et on améliora le procédé de soudage ; c'est dans ces années après-guerre qu'un groupe de chercheurs dirigé par Irwin étudia en détail le problème de la rupture au laboratoire national de recherche de la marine américaine. Irwin considéra que les outils fondamentaux pour étudier la rupture existaient et proposa en 1948, une extension de l'approche de Griffith aux matériaux ductiles en y incluant le terme de dissipation d'énergie due à l'écoulement plastique près des extrémités d'une fissure. Il développa ensuite en 1956 le concept de taux de restitution d'énergie à partir toujours de la théorie de Griffith mais sous une forme facilement exploitable par les concepteurs de structures. En 1957, s'appuyant sur les travaux de Westergaard qui analysa les champs de déplacements et de contraintes élastiques près de l'extrémité d'une fissure sous chargement donné, Irwin montra que les déplacements et les contraintes au voisinage de l'extrémité d'une fissure peuvent être décrits à l'aide d'un paramètre unique qui était relié au taux de restitution d'énergie ; ce paramètre issu de la mécanique linéaire de la rupture, est le facteur d'intensité des contraintes .

Les nouveaux concepts de la mécanique de la rupture furent ensuite utilisés pour montrer que la plupart des ruptures dans les fuselages d'avions étaient dues à des fissures de fatigue qui atteignaient une taille critique. Ces fissures prenaient naissance près des hublots dans les coins qui constituent des zones de forte concentration des contraintes. Les ruptures qui se produisaient dans les essieux d'engins roulants ou encore dans les rotors des turbines à vapeur furent aussi expliquées grâce à l'application de ces nouveaux concepts. Le concept de FIC fut également utilisé par Paris pour décrire la propagation des fissures de fatigue et progressivement les courbes de propagation des fissures de fatigue proposées par ces auteurs remplacèrent les courbes d'endurance pour une meilleure prédiction des durées de vie des structures. La période entre 1960 et 1980 vit une intensification des recherches sur la rupture avec deux écoles qui s'affrontaient. D'une part les tenants de l'approche utilisant la mécanique linéaire de la rupture et ceux qui s'intéressaient essentiellement à la plastification qui se développe à l'extrémité d'une fissure. La mécanique linéaire de la rupture cesse d'être valable lorsqu'une plastification importante précède la rupture. Pour tenir compte de l'effet de cette plastification sur les champs de contraintes et de déplacements à l'extrémité d'une fissure, plusieurs auteurs (Irwin, Dugdale et Barenblatt ...) proposèrent ce qu'on appelle une correction de zone plastique ; la taille de la

fissure est alors augmentée de cette zone plastique pour retrouver les champs de contraintes élastiques décrits par le FIC.

Wells, un des représentants de la deuxième école, proposa en 1961 le déplacement à fond de fissure - ou CTOD « Crack Tip Opening Displacement » - comme paramètre alternatif à la mécanique linéaire de la rupture ou plus précisément au concept de FIC, lorsque la plastification devient importante comme c'est le cas dans les matériaux très ductiles. Plus tard, Hutchinson, Rice et Rosengren (HRR) développèrent un nouveau paramètre appelé intégrale J pour mieux décrire la répartition des contraintes dans les zones plastifiées (champ HRR). Begley et Landes caractérisèrent la ténacité à l'aide du paramètre J et développèrent une procédure standard pour l'utilisation de cette intégrale dans des cas pratiques.

Les récents développements de la mécanique de la rupture montrent que si les recherches se sont cristallisées sur l'effet de la plastification dans la période entre 1960 et 1980, on s'intéresse actuellement plus aux comportements viscoplastique et/ou viscoélastique. Les premiers se rencontrent à température élevée lorsque les phénomènes de fluage deviennent importants alors que les seconds caractérisent les matériaux polymères de plus en plus utilisés dans l'industrie. L'apparition des nouveaux matériaux composites nécessita également l'utilisation des concepts de la mécanique linéaire de la rupture pour décrire leur comportement. Plus récemment encore, de nouvelles approches tentent de relier le comportement local à l'échelle microscopique au comportement global lors de la rupture d'un matériau. Ces approches micro-macro deviennent parfois nécessaires lorsqu'on atteint les limites d'utilisation des autres approches plus classiques [26].

II.4. Modes de la rupture :

Une fissure est définie comme la surface Σ séparant localement un solide en deux parties. Le champ des déplacements est alors discontinu à travers cette surface et les trois composantes vectorielles de cette discontinuité forment les trois modes de rupture

(Figure II.1)

Le mode I pour une ouverture et le mode II pour un glissement plan (dans un cas tridimensionnel), le mode III pour un glissement anti-plan. Le cas réel est une superposition de ces modes, on parle alors de mode mixte [27].

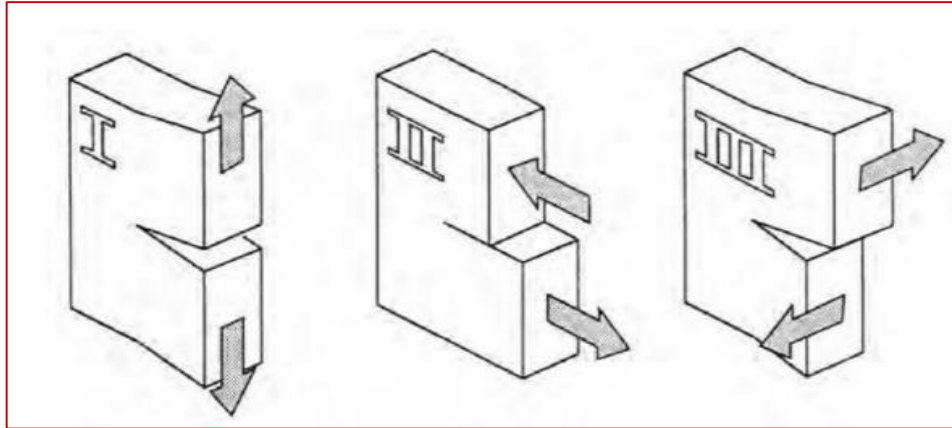


Figure II.1: Les trois modes de rupture [27].

II.4.1. FACTEUR D'INTENSITE 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 [28].

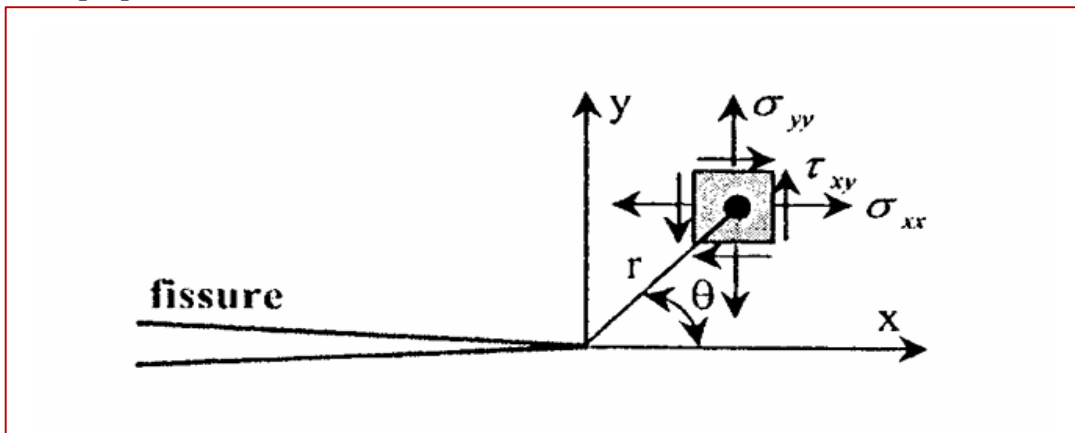


Figure II.2: Détermination des axes (x, y) et des coordonnées (r, θ) au voisinage de l'extrémité d'une fissure [28].

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f(\theta) + \underbrace{\dots + \dots +}_{\text{Négligeable}}$$

K_I : représente le facteur d'intensité de contraintes en mode I définis par Irwin

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

Y : représente un coefficient de forme c'est une fonction géométrique de l'éprouvette et de la longueur de fissure il est donne pour les principales pièces par des table dans le cas de la flexion trois points :

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

II.5. Concept d'intégrale J :

L'Intégral-J peut être défini comme étant une ligne intégrale autour de l'extrémité une fissure, invariant pour tout chemin utilisé puisqu'il commence dans la face inférieure et se termine dans la face supérieure de la fissure, comme le montre la (figure II.3), représentée par les flèches dans le sens antihoraire [29].

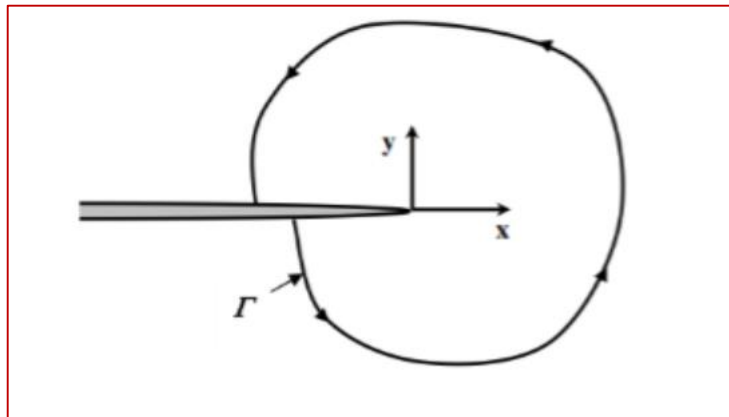


Figure II.3 : Contour arbitraire autour de l'extrémité d'une fissure [29].

Intégral-J est défini par rapport à un axe de coordonnées qui a son origine dans le fond d'une fissure, comme le montre la fig. de sorte que l'expression de J est donnée par l'expression :

$$J = \int_{\Gamma} \left(w \cdot dy - t \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \cdot ds \right)$$

Où Γ est un contour d'intégration entourant l'extrémité de la fissure (fig.4), dans l'élément de longueur sur Γ, T_i et u les composantes du vecteur contrainte et du vecteur déplacement en un point de Γ. La densité d'énergie de déformation w est définie quant à elle par :

$$w = \int_0^{\epsilon} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}$$

Où σ_{ij} et ϵ_{ij} sont les composantes des tenseurs de contraintes et de déformations au point courant sur le contour Γ [29].

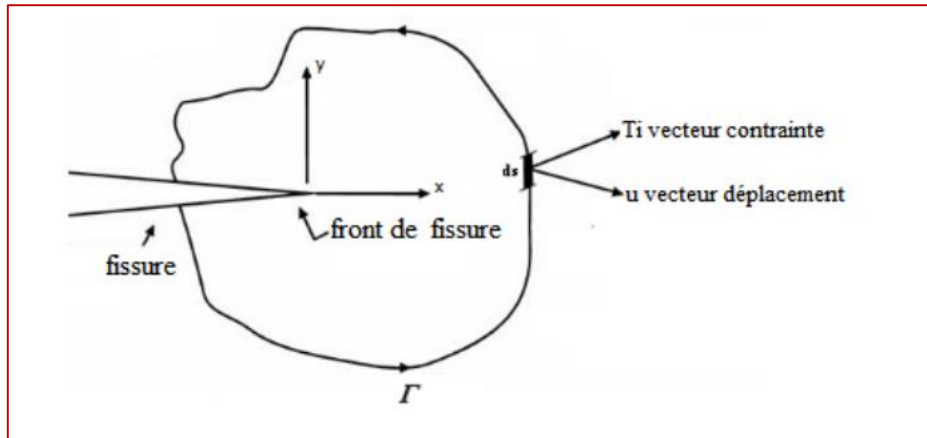


Figure II.4 : Contour " Γ " montrant les composantes d'Intégral-J [29].

II.5.1. INTEGRALE J A LES PROPRIETES SUIVANTS :

- Intégral $J = J_1 + J_2 + J_3 + J_4 = 0$, pour tout chemin Γ fermé qui ne contient pas ou se termine dans une fissure, où J_1 est représenté par le chemin Γ_1 , J_2 représenté par le chemin Γ_2 , J_3 représenté par le chemin Γ_3 et J_4 représenté par le chemin Γ_4 , (Fig.5)
- La valeur de J est indépendante du chemin autour de la fissure, lorsqu'elle implique une fissure.
- $J = -\frac{\partial E_p}{\partial A}$ donc Intégrale $-J$ est le taux de restitution d'énergie potentielle, de sorte qu'il peut être utilisé pour étendre le concept du taux de décharge élastique au cas élasto-plastique.
- Intégral- J ne dépend pas de la façon d'effectuer l'analyse de la ténacité près de l'extrémité de la fissure, ceci est dû au fait qu'en effectuant une analyse de la ténacité dans les régions les plus éloignées du fond d'une fissure, la même valeur d'Intégral- J était obtenue dans les régions proches de l'extrémité de la fissure.

De l'avant-dernière note de propriété l'Intégral- J est numériquement égal au taux de restitution dans la MLR, il est donc également lié au facteur d'intensité de la tension [29].

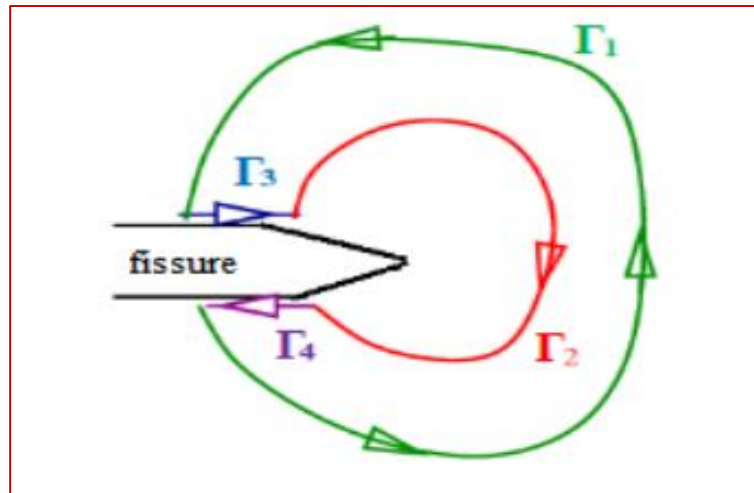


Figure II.5 : Contour " Γ " fermé, avec $\rho \rightarrow 0$ [29].

II.6. Types de fissuration :

Le mécanisme de rupture par fissuration peut intervenir selon deux types de fissuration :

II.6.1. LA FISSURATION BRUTALE :

Pour les solides, ou pour les matériaux à très haute résistance, les contraintes de travail sont très élevées, une énergie potentielle considérable est ainsi créée ; La présence de petites fissures peut alors conduire à une rupture brutale qui souvent ne s'accompagne pas de déformations plastiques macroscopiques par suite de la très faible ductilité.

II.6.2. LA FISSURATION SUCCESSIVE :

Il s'agit ici, d'une succession de mécanismes (fragile ductile) qui, sous contraintes répétées, entraîne la fissuration successive, appelée la rupture par fatigue. Les facteurs qui influencent le comportement à la rupture par fissuration des matériaux sont de deux natures : métallurgique et mécanique. Les facteurs mécaniques concernent l'état de déplacements, déformations et contraintes, ainsi que les conditions d'environnement tel que la température ou le taux d'humidité relative [30].

II.7. Formation des fissures :

Lorsqu'un indenteur Vickers est appliqué à la surface d'alliage D'aluminium avec une charge suffisamment élevée (selon le matériau), il se crée des fissures. Des observations au cours de l'indentation de matériau transparent ont montré que la configuration finale de ces fissures est achevée lorsque l'indenteur est déchargé. Cela montre que la force motrice de fissuration lors de l'indentation est due aux contraintes résiduelles créées par la zone de déformation plastique formée autour de l'empreinte d'indentation. L'initiation et le développement des fissures sur du verre sont décrits par B. Lawn et M. Swan [31] à travers les

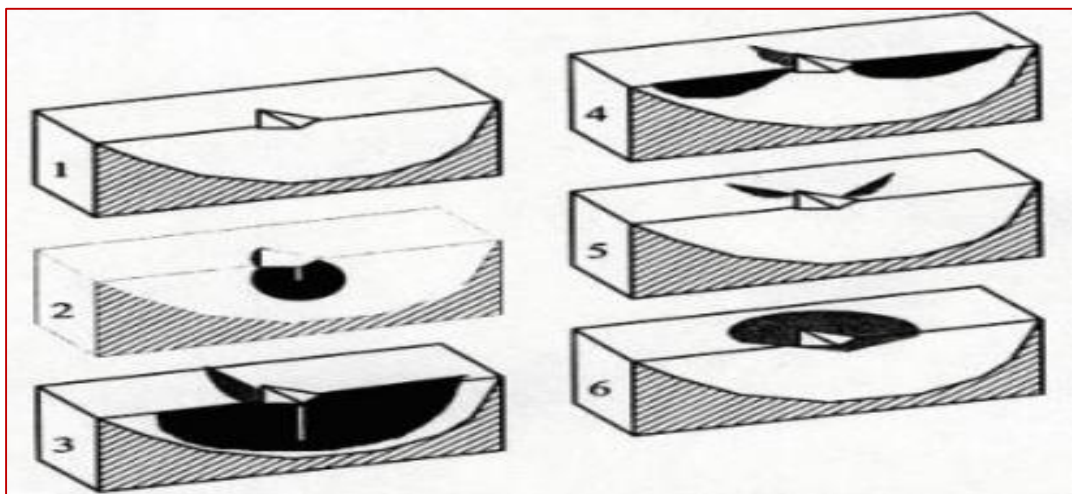


Figure II.6 : Schématisation de la séquence de formation de fissures sous l'action d'un indenteur Vickers

- 1) Empreinte du diamant Vickers (2) fissure médiane (3) fissure half-penny (4) fissure radiale primaire (5) fissure radiale secondaire (6) fissure latérale [23].

séquences suivantes :

1. En début du chargement, l'indenteur produit autour du point de contact une zone de déformation qui augmente avec la charge. C'est l'empreinte du diamant Vickers. La pression moyenne P_0 sur l'élément de surface reste constante.
2. Au cours du chargement, une fissure dite fissure médiane se produit sous la zone de déformation et croît jusqu'à former un cercle à mesure que la charge augmente mais n'apparaît pas à la surface de l'éprouvette [31]. Elle s'initie aux défauts se trouvant à la
3. Limite de la zone de déformation et se développe sous l'effet du champ de contraintes résultant du chargement élastique de l'indenteur sur la surface de l'éprouvette.

4. Lors du déchargement, la fissure médiane grandit, s'étale vers l'extérieur et apparaît en surface. Elle prend ainsi un autre profil et peut devenir soit une fissure dite du type half-penny au déchargement complet.
5. Une fissure du type radial dite fissure radiale (ou fissure du type Palmqvist). Elle prend naissance aux défauts qui se trouvent près de la surface à la limite de la zone de déformation. Elle évolue de part et d'autre de celle-ci jusqu'à apparaître en surface, sous l'action des contraintes résiduelles, au déchargement complet. Si la fissure radiale se trouve dans le plan des diagonales de l'empreinte du diamant, elle est dite fissure radiale primaire sinon c'est une fissure radiale secondaire. Les fissures radiales forment en principe un couple de fissures perpendiculaires.
6. Aux charges d'indentation élevées, une fissure latérale se forme au déchargement, sous la zone de déformation et se développe presque parallèlement à la surface [31]. Elle est responsable du phénomène d'écaillage. D'une façon générale l'amorçage des fissures a lieu aux endroits de fortes concentrations de contraintes, c'est-à-dire aux arêtes du diamant Vickers et semble avoir deux aspects : les conditions de propagation d'un défaut préexistant pendant le chargement [32], d'une part, et l'existence d'un seuil de charge pour l'apparition d'un type de fissures, d'autre part. Lorsqu'un indenteur Vickers est appliqué à la surface d'un matériau céramique avec une charge suffisamment élevée (selon le matériau), il se crée un système de trois types de fissures [33-34].

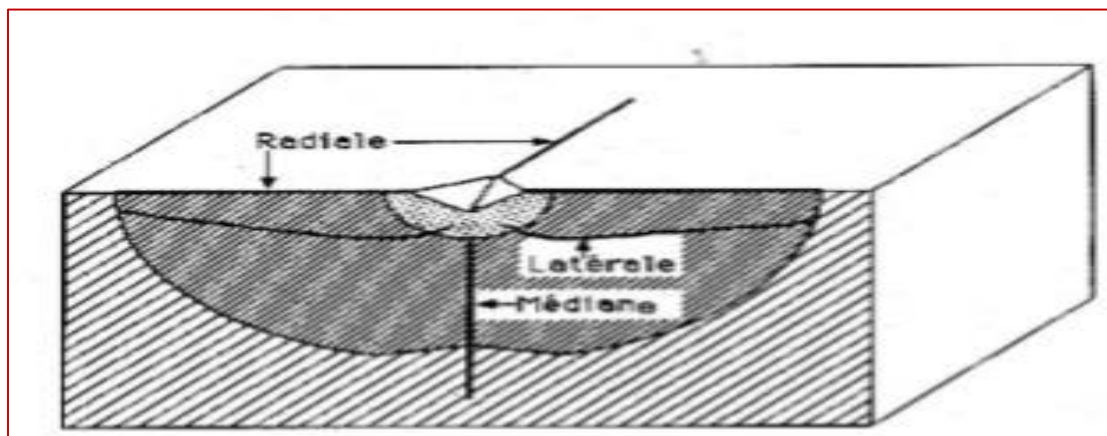


Figure II.7 : Les différents types des fissures [35].

- a. **Fissure médiane** : elle s'étend en profondeur pendant le chargement sous l'action d'un champ élastique.

- b. **Fissure radiale** : elle s'étend en surface à partir des angles de l'indenteur et se développe sous l'action des contraintes résiduelles.
- c. **Fissure latérale** : elle provient également de l'action des contraintes résiduelles. Ces fissures se développent presque parallèlement à la surface et sont responsables de l'écaillage de l'échantillon.

II.8. Energie de rupture :

II.8.1. THEORIE DE GRIFFITH (PARAMETRE G) :

L'approche énergétique de la mécanique de la rupture a été découverte par un Griffith en 1920, dans un milieu solide élastique linéaire (avec la limite élastique conventionnelle à 0,2 % Re égale à la résistance à la rupture R_r), contenant une fissure de surface A et soumis à un champ de forces F_e , la progression de la fissure est stable tant que l'énergie libérée par l'extension de cette fissure est absorbée par la création de nouvelles surfaces [36].

Si nous supposons que les forces extérieures F_e dérivent d'un potentiel V, un accroissement virtuel δA d'aire fissurée libère une énergie $G \delta A$ telle que :

$$\delta P = -G \delta A$$

Et

$$P = G + V = W - T_e$$

Avec :

P : énergie potentielle totale de la structure fissurée,

W : énergie de déformation élastique,

T_e : travail des forces extérieures,

G : paramètre qui peut s'exprimer en J/m² ou en N/m, correspondant à une énergie libérée par unité de surface, parfois appelée force d'extension de la fissure.

Il existe un seuil critique G_c au-delà duquel une extension de la fissure libère plus d'énergie qu'elle n'en absorbe, et la fissure est instable pour G tel que : $G \delta A > G_c \delta A$

II.8.2. APPLICATION A UN CAS SIMPLE :

La figure suivante représente une éprouvette d'épaisseur constante e , contenant une fissure de longueur a , soumise à une force constante F dont le point d'application se déplace suivant une loi linéaire : $z=C(a)F$ avec : $C(a)$ compliance

À un accroissement virtuel δa de la fissure, correspond :

$\delta W = \delta\left(\frac{1}{2} Fz\right)$: Variation de l'énergie de déformation élastique.

$\delta T_e = \delta(Fz) = F\delta z$ travail de la force extérieure.

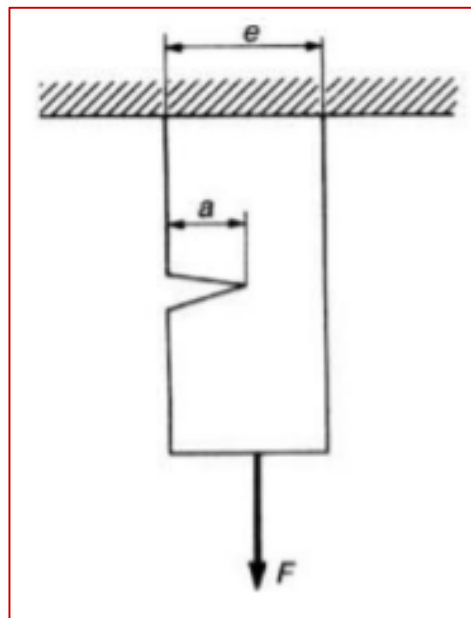


Figure II.8 : Eprouvette d'essai [36].

II.9. Relation entre G et K :

Le facteur d'intensité de contraintes K est relié au facteur G (et ce quel que soit le mode I, II, III) par les relations :

$$G = \frac{k^2}{E} (1 - \nu^2) \text{ en déformations planes (DP)}$$

$$G = \frac{k^2}{E} \text{ en contraintes planes (CP)}$$

Avec :

E : module d'Young du matériau,

ν : coefficient de Poisson du matériau [36].

II.10. Endommagement et rupture :

II.10.1. *MODES DE CHARGEMENT :*

On distingue plusieurs modes de chargement des structures :

On distingue plusieurs modes de chargement des structures :

- (i) Chargement monotone
- (ii) Chargement cyclique
- (iii) Chargement constant.

Chaque mode de chargement correspond à un mode de ruine particulier. Chargement monotone : Dans ce cas le chargement croit de façon continue. Le chargement peut consister en un déplacement imposé ou une charge imposée. Dans le cas linéaire (élasticité) les deux cas sont similaires. Dans le cas d'un comportement plastique, il existe une charge limite que la structure ne peut pas dépasser. Dans le cas d'un chargement en force, il y a rupture brutale par instabilité plastique (Figure II.9). Il peut s'agir, par exemple, du cas d'un réservoir dont on augmente la pression.

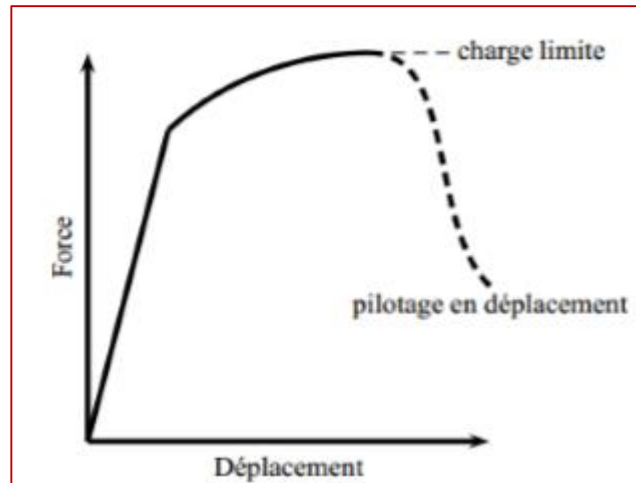


Figure II.9 : Charge limite et mode de pilotage du chargement [37].

- a) **Chargement cyclique** : La charge ou le déplacement varie de façon cyclique au cours du temps. La rupture est différée ; elle n'interviendra qu'au bout d'un nombre de cycles dépendant de la sévérité de la charge (Figure II.10). On parle de fatigue. Des nombreuses structures sont sollicitées en fatigue : moteurs, pneus, ailes d'avions, hélices de bateau etc.

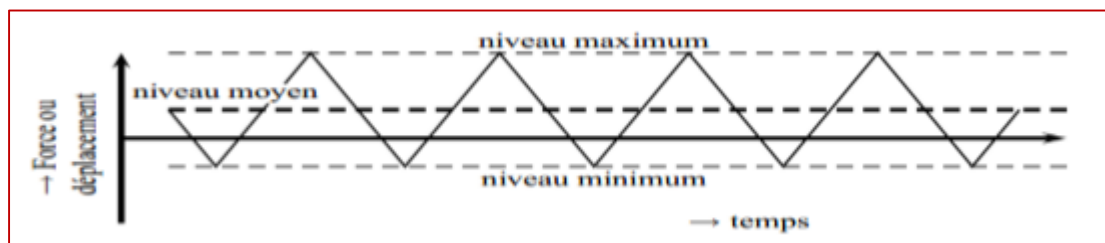


Figure II.10 : Chargement cyclique [38].

- b) **Chargement constant** : Dans ce cas une charge constante est appliquée sur une structure généralement à haute température (c'est à dire pour $T/T_f > 0.5$). Dans ce cas la structure flue. On se trouve également dans un cas de rupture différée
- c) **Chargements complexes** : Dans certains cas, le chargement peut être plus complexe que dans les cas précédents. Une structure à haute température peut voir son niveau de charge varier au cours du temps. On parle alors d'interaction fatigue-fluage. Une structure en fatigue dans laquelle se propage lentement une fissure peut subir une surcharge qui entraîne la rupture en charge limite.

II.10.2. CLASSES DE MATERIAUX VIS-A-VIS LA RUPTURE :

Pour un essai sous chargement monotone d'une éprouvette de traction simple, on peut distinguer différents types de mode de rupture (Figure II.10) :

Rupture élastique–fragile : Le comportement global est linéaire élastique et la rupture intervient de façon brutale (i.e. sans signes précurseurs). Les déformations avec rupture sont généralement faibles (< 1%). Les matériaux ayant ce type de comportement sont les céramiques massives, les verres.

Rupture quasi–fragile : Le comportement global est non linéaire. Des décharges partielles indiquent une forte perte de rigidité qui indique une micro–fissuration du matériau. Cette micro–fissuration est la cause essentielle de la non-linéarité globale. Les matériaux ayant ce type de comportement sont :

Les composites en particulier les composites céramique–céramique,

Les bétons On observe ce comportement en compression. En traction les bétons ont généralement une rupture élastique–fragile. Les nouveaux bétons renforcés ont également une rupture quasi–fragile en traction.

Rupture plastique– fragile : Le matériau plastifie mais rompt brutalement pour des déformations relativement faibles. C'est le cas des métaux de type cubique centré ou hexagonal lorsque la température est suffisamment faible.

Rupture ductile Le matériau plastifie et rompt progressivement. Une fissure stable peut s'amorcer au sein de la matière. L'endommagement peut être diffus et relativement important. Les métaux cubiques à faces centrées ont ce comportement. Les métaux de type cubique centré sont ductiles pour une température suffisamment élevée.

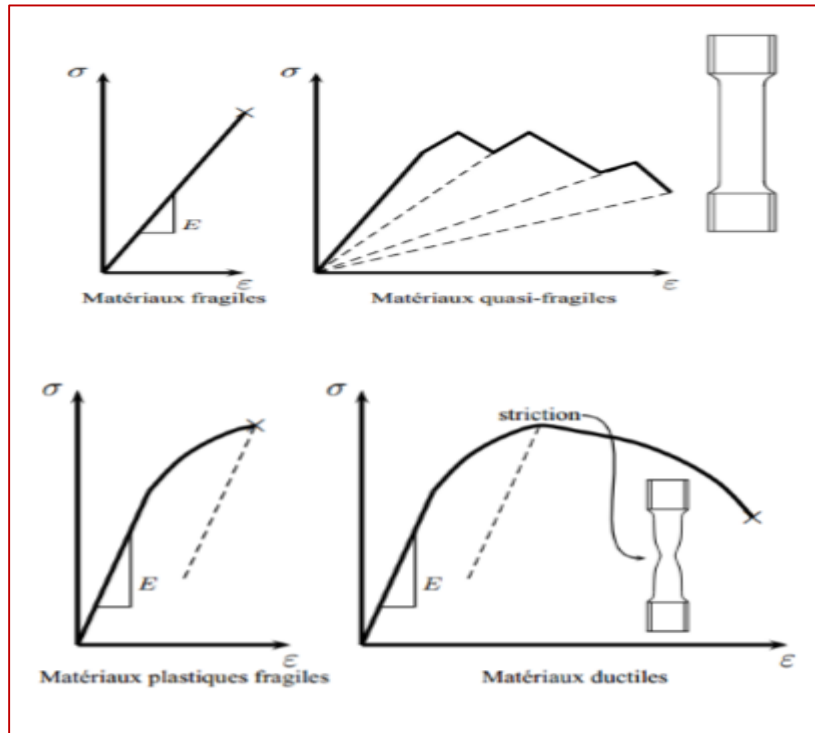


Figure II.11 : Classes de matériaux vis-à-vis de la rupture en sollicitation monotone [37].

II.11. Conclusion :

La mécanique de rupture est un domaine clé de l'ingénierie des matériaux qui explore comment les matériaux réagissent face à des charges importantes. Les critères de rupture sont définis en considérant les propriétés physiques du matériau et les contraintes externes appliquées. Grâce à la mécanique de rupture, il est possible de prédire la manière dont un matériau se brisera, ce qui permet d'assurer la sécurité des structures et des équipements. Les avancées récentes dans ce domaine ont permis de concevoir des matériaux plus solides et plus durables, ce qui a un impact direct sur la sécurité et la qualité de vie des gens. En somme, la mécanique de rupture est un aspect crucial de l'ingénierie des matériaux qui continue d'évoluer pour améliorer la sécurité et la fiabilité des structures et des équipements.

Références bibliographiques :

[23] Bouras.S étude par émission acoustique de l'indentation hertzienne et de l'indentation vickers sur une vitrocéramique sur des alumines. Thèse doctorat Isal (1993) pp 186

[24] DAVID B. (1982). Elementary engineering fracture mechanics. USA. Martinus nijhoff publishers.

[25] DAVID B. (1982). The Practical Use of Fracture Mechanics. London. Kluwer Academic Publishers.

[26] Mr Ahmed BENHAMOUDA, mémoire magistère-thème étude du comportement des fissures dans les tubes sous pression interne 2010.

[27] SaïdHariri, MansourAfzali&HaïdarJaffal «

NOCIVITEDESDEFAUTSETPROPAGATION DE FISSURES DANS LES

QUIPEMENTS SOUS PRESSION ». Ecole des mines de Douai2007

[28] Baker, A., and Jones, R. Bonded repair of aircraft structures. Martinus Nijhoff Publishers, 1988.

[29] BESSEGHIER El hadj. Contribution à l'étude de fatigue des structures endommagées et réparées : analyse et optimisation. (MUSTAPHA Stambouli, 2019).

[30] Shixiang Ma. Propagation de fissure en mode mixte dans un milieu élasto-plastique avec prise en compte des contraintes résiduelles. Mechanics. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2005. French

[31] Lawn bor and swain, m.v: « micro fracture beneath point indentation in brittle solid » J. mater sci, 1979, vol 10, N: 1, p113-122

[32] LAWN, B.R., EVANS, E.G. A model of crack indentation Elastic-Plastic Indentation Solids. J. Mater., Sci., 1977, Vol. 12, p. 2195-2199.

[33] LANKFORD, and J., D.L. The Crack indentation in ceramic material subject to elastic-plastic indentation. J. Mater., Sci., 1979, Vol. 14, p. 1662-1668.

[34] LANKFORD, J., Threshold Microfracture during Elastic/Plastic Indentation of Ceramics: J. Mater. Sci., 1981, Vol. 16, p. 1177-1182.

[35] LIANG, K : « Contribution à l'étude des mécanismes de fissuration des matériaux céramiques de type oxyde ». Thèse. Sci : Institut National des sciences appliquées de Lyon (1990), p 206

[36] Jean-Luc E. Mécanique de la rupture. Technique de l'ingénieur. Traité de génie mécanique. B 5060-2-9. <https://www.techniques-ingenieur.fr/>

[37] J. BESSON « ENDOMMAGEMENT ET RUPTURE » p 189-191.

[38] J. BESSON « Matériaux' pour l'ingénieur » p 190

Chapitre III

Modélisation numérique de la réparation des fissures par
patch composite

III.1. Introduction

Le secteur industriel doit faire face au remplacement de structures ou de composantes qui présentent des signes de bris, de fissures ou d'anomalies diverses. Les contraintes de sécurité conduisant à une utilisation de l'ouvrage dans de bonnes conditions de fiabilité, maîtrisées le plus longtemps possible, des inspections sont régulièrement programmées pour détecter les défauts ou avaries. Les composants aéronautiques sont sollicités mécaniquement lors de leur utilisation, ce qui entraîne des états de contraintes souvent multiaxiaux et d'amplitudes variables, qui conduisent à des phénomènes d'endommagement par fatigue. Une autre approche pour réparer ces structures est de les renforcer préventivement avant que des fissures n'apparaissent. Ce renforcement de la structure par le patch composite retarde l'apparition de ces fissures.

L'utilisation de patches composites pour réparer les structures endommagées est largement utilisée aujourd'hui, en particulier dans l'industrie aérospatiale [39,40]. Cependant, les recherches sur le renforcement préventif sont encore rares. Ainsi, l'apport bénéfique du renfort composite patch est d'optimiser son fonctionnement en termes de durée de vie de la structure.

C'est dans ce contexte que notre étude implique l'analyse numérique de la réparation par patch composite de structures métalliques fissurées au moyen d'une méthode d'éléments finis tridimensionnels. Une approche de mécanique de rupture localement linéaire basée sur des facteurs d'intensité de contrainte est utilisée pour décrire le comportement des fissures de réparation et de contrainte en mode ouvert.

III.2. Présentation du logiciel ABAQUS/CAE

ABAQUS/CAE est un code informatique qui utilise des techniques d'éléments finis (M.E.F) pour résoudre des problèmes dans divers domaines. Dans ce cadre, il propose un système complet qui intègre non seulement la fonctionnalité du calcul lui-même, mais aussi celle des

Chapitre III Modélisation numérique de la réparation des fissures par patch composite

résultats (post-traitement). ABAQUS/CAETM est un programme qui traite des problèmes élastiques linéaires, des problèmes non linéaires, des problèmes thermiques, etc. dans les domaines statique et dynamique.

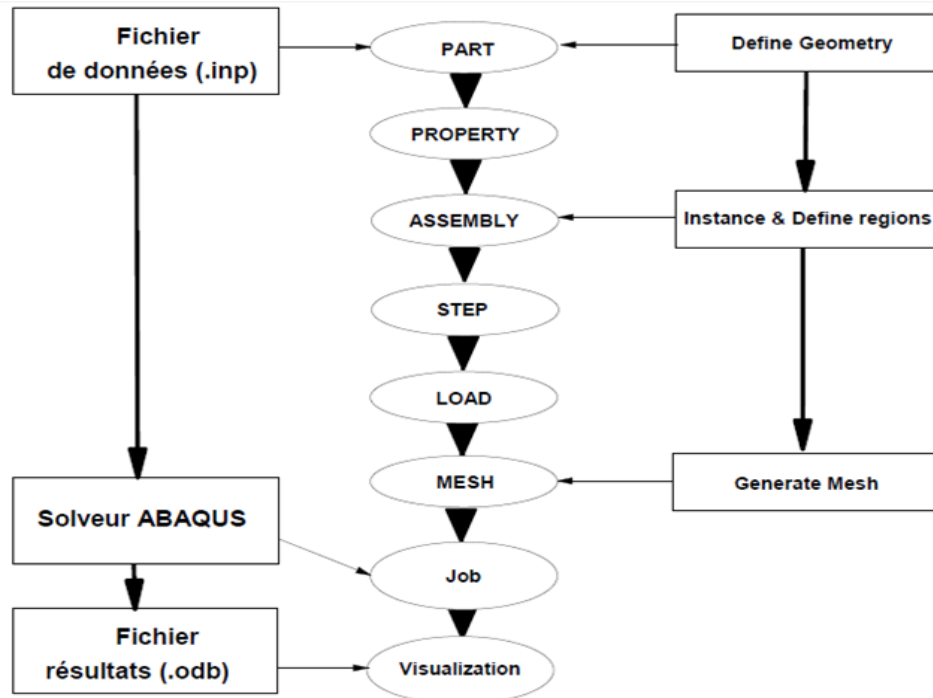


Figure III. 1: Etapes à suivre pour la programmation [41].

Comme le montre la (Figure III.1), ABAQUS/CAE est divisé en unités fonctionnelles appelées modules. Chaque module contient des outils spécifiques à une partie de la tâche de modélisation.

III.2.1. LE MODULE PART

Le module Pièces nous permet de créer tous les objets géométriques dans le cadre du modèle en les dessinant dans ABAQUS CAE ou en les importants depuis un logiciel de dessin.

Dans notre cas il s'agit de la conception de la plaque fissure, de l'adhésif et du patch.

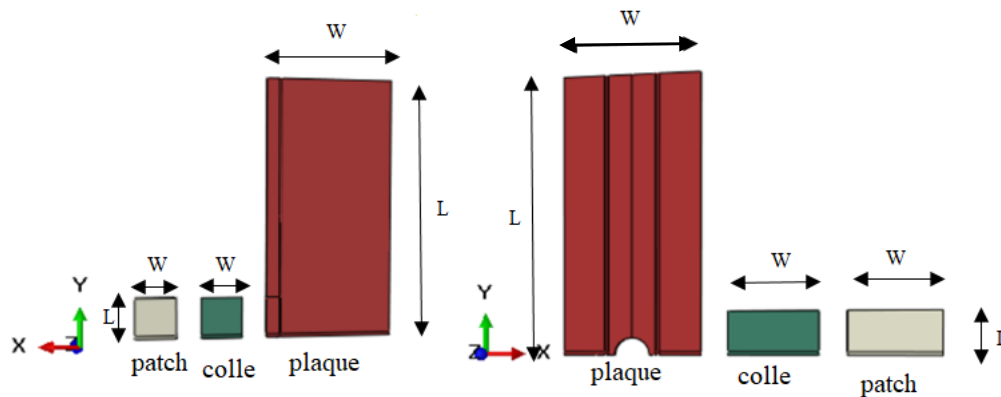


Figure III. 2 : géométrie de composent.

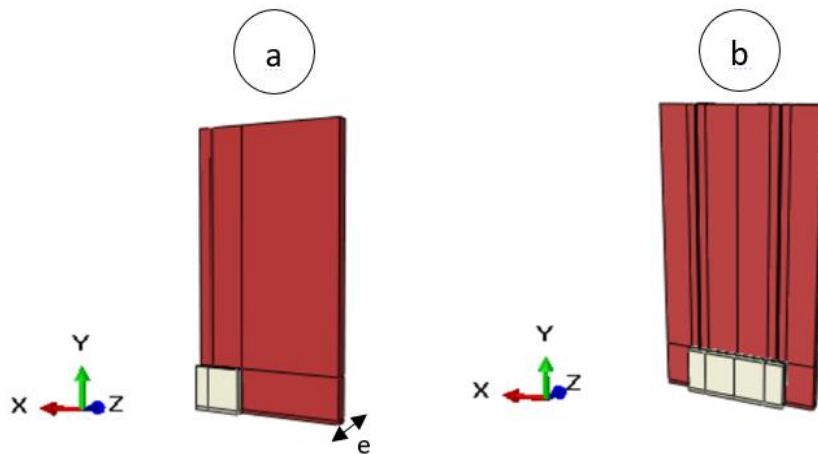


Figure III. 3 : Modèle géométrique étudié, (a) : fissure en coin, (b) : fissure a l'entaille.

III.2.2. LE MODULE PROPERTY

Le module de propriétés nous permet de définir les propriétés des différents composants. Les propriétés mécaniques de la plaque et l'adhésif du patch sont indiquées sur le tableau suivant ;

Propriété	La plaque AL 2024T3	L'adhésif FM37	Patch composite BORON EPOXY
E1(GPA)	72	2.21	200
E2(GPA)			25
E3(GPA)			25
G12(GPA)			7.2
G13(GPA)			5.5
G23(GPA)			5.5
ν_{12}	0.3	0.43	0.21
ν_{13}			0.21
ν_{23}			0.21

Tableau III.1: Propriétés des matériaux [42].

III.2.3. LE MODULE ASSEMBLY

Le module d'assemblage va nous permettre d'assembler différents objets géométriques créés dans le même repère

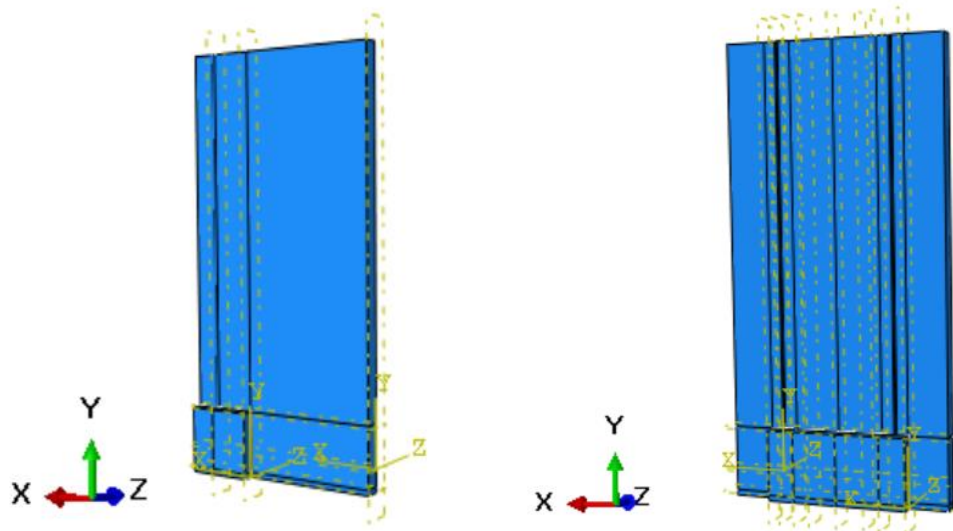


Figure III. 4 : Assemblage des plaques.

III.2.4. LE MODULE STEP

Ce module permet de définir toutes les étapes de post-traitement, créant des forces ou des contraintes actives à un instant donné.

Dans notre étude le step : statice 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 activer.

III.2.5. LE MODULE INTERRACTION

Le module d'interaction peut spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et région du modèle, la proximité ou le contact entre les points ne suffit pas.

Dans ce module on va déclarer une interaction entre le plaque/adhésif et adhésif/patch, aussi configure notre fissure dans la plaque fissure

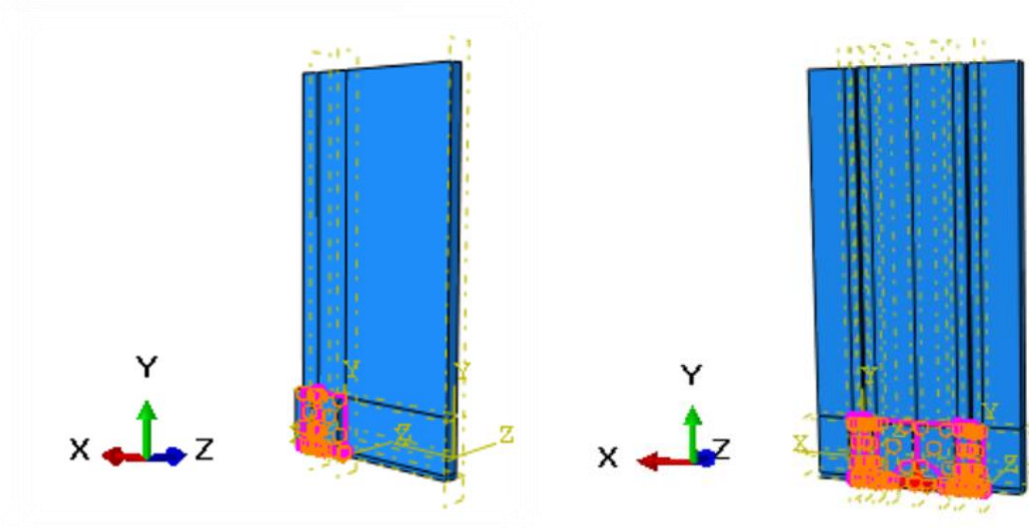


Figure III. 5 : Déclaration des interactions.

III.2.6. LE MODULE LOAD

Le chargement du module nous permettra de déterminer toutes les conditions aux limites telles que la pression, l'encastrement selon différents axes. Dans cette étude, est présente l'étude de plaque soumise à une pression de 100 bar et les côtés du plan (x, z) sont encastres selon l'axe Y et un moment de 1bar et les côtés du plan (x, z) sont encastres selon l'axe Y

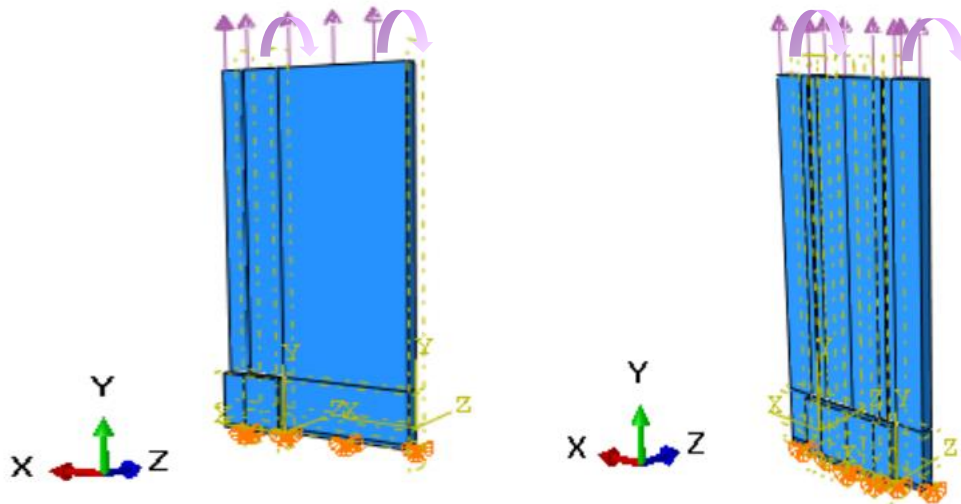


Figure III. 6 : déclaration des conditions aux limites.

III.2.7. LE MODULE MESH

Le module de maillage va nous permettre de générer un maillage éléments finis sur le composant

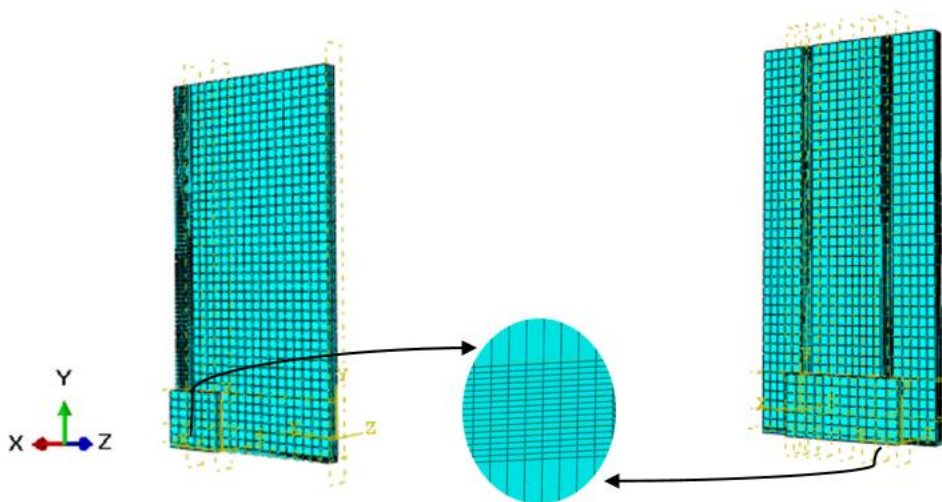


Figure III. 7 : Maillage des structures.

III.2.8. MODULE JOBS

Une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été effectuées, le modèle doit être analysé à l'aide du module Job. ABAQUS effectuera ensuite tous les calculs nécessaires et tracera les résultats dans le fichier .inp

III.2.9. MODULE VISUALISATION

Comme son nom l'indique, ce module permet de visualiser le modèle et les résultats obtenus, concentrations de contraintes et déformations.

III.3. Modèle géométrique étudié

Le modèle géométrique de la plaque réparé par patch en composite est représenté sur la figure 5. La plaque en Aluminium 2024T3 est caractérisée par une longueur $L_{\text{plaque}}=80\text{mm}$, est le largeur $W_{\text{plaque}}=39\text{mm}$, est une épaisseur de $e_{\text{plaque}}=3\text{mm}$. Cette plaque contient une fissure répare un composite BORON EPOXY de dimension $L_{\text{patch}}=12,5\text{mm}$ et $W_{\text{patch}}=12,5\text{mm}$ et $e_{\text{patch}}=2\text{mm}$ pour le fissure de coin. $L_{\text{patch}}=25\text{mm}$ et $W_{\text{patch}}=12,5\text{mm}$, $e_{\text{patch}}=2\text{mm}$ pour le fissure en entaille.

L'adhésif utilisé est de type FM37 de dimension $L_{\text{adhésif}}=12.5\text{mm}$ et $W_{\text{adhésif}}=12.5\text{mm}$ et $e_{\text{adhésif}}=0.2\text{mm}$ pour le fissure de coin. $L_{\text{adhésif}}=25\text{mm}$ et $W_{\text{adhésif}}=25\text{mm}$ et $e_{\text{adhésif}}=0.2\text{mm}$ pour le fissure en entaille. La plaque soumise à une pression de 100MPa et un moment de 1MPa.mm.

Le maillage utilisé est représenté par la figure 8. La forme carrée 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 précisons que le maillage est de type quadratique à 20 nœuds (hexaèdres).

Un collage parfait est créé entre la plaque et l'adhésif ainsi que l'adhésif et le patch. Le nombre total d'élément de la structure (a) étant de 18180 c'est-à-dire 18096 éléments pour la plaque, 42 éléments pour l'adhésif et 42 éléments pour le patch, la structure (b) étant de 53390 c'est-à-dire 53222 éléments pour la plaque, 84 éléments pour l'adhésif et 84 éléments pour le patch. La taille des éléments au voisinage de la fissure est de 0,05mm.

III.4. Résultat et analyses

III.4.1. PARTIE I : PLAQUE FISSURÉE SANS REPARATION :

III.4.1.1. 1^{er} Modèle :

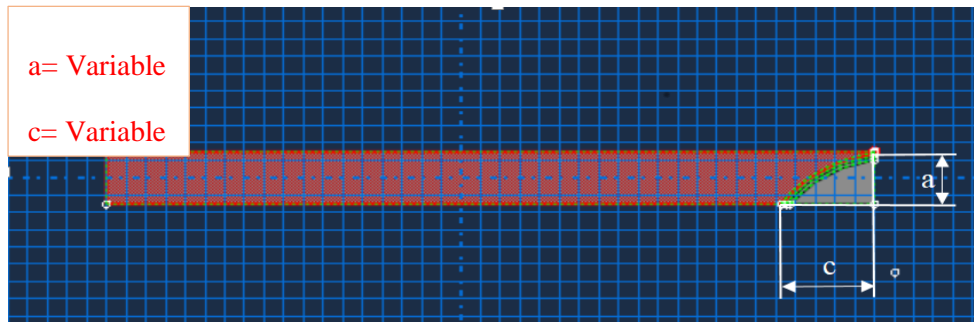


Figure III. 8: Modèle géométrique de la plaque fissurée.

• **Chargement de traction**

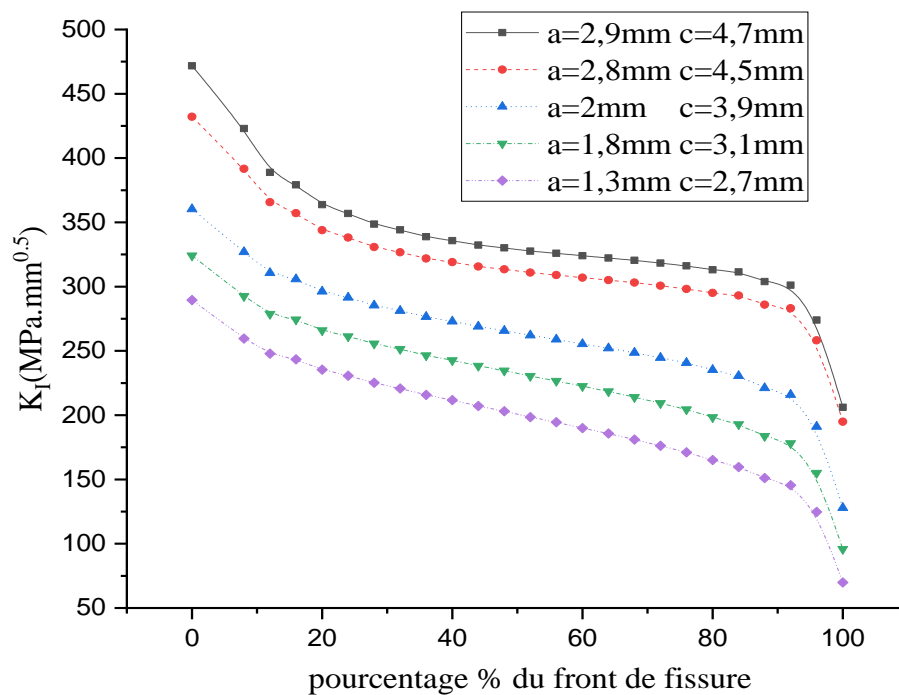


Figure III. 9: Variation du facteur d'intensité de contraintes K_I à chaque état en fonction de pourcentage du front de fissure pour différentes tailles de la fissure quart-elliptique

Figure III. 9 représente la variation du facteur d'intensité de contraintes K_I en fonction de l'état d'avancement du front de fissure pour une plaque soumise à un essai de traction et présentant une fissure débouchantes quart-elliptique situé au coin. Les résultats numériques sont obtenus pour différentes tailles de fissures de longueur c et de profondeur a . Quelle que soit la taille de la fissure, on constate que la forme des courbes du facteur d'intensité de contraintes en mode I sont semblables et que la valeur la plus significative du facteur d'intensité de contraintes K_I se trouve sur le côté de chargement et elle diminue progressivement jusqu'à une valeur minimale sur le côté libre de la plaque. Egalement, on note que le facteur d'intensité de contraintes K_I décroît avec la diminution de la taille de la fissure.

- **Chargement mixte (traction + moment)**

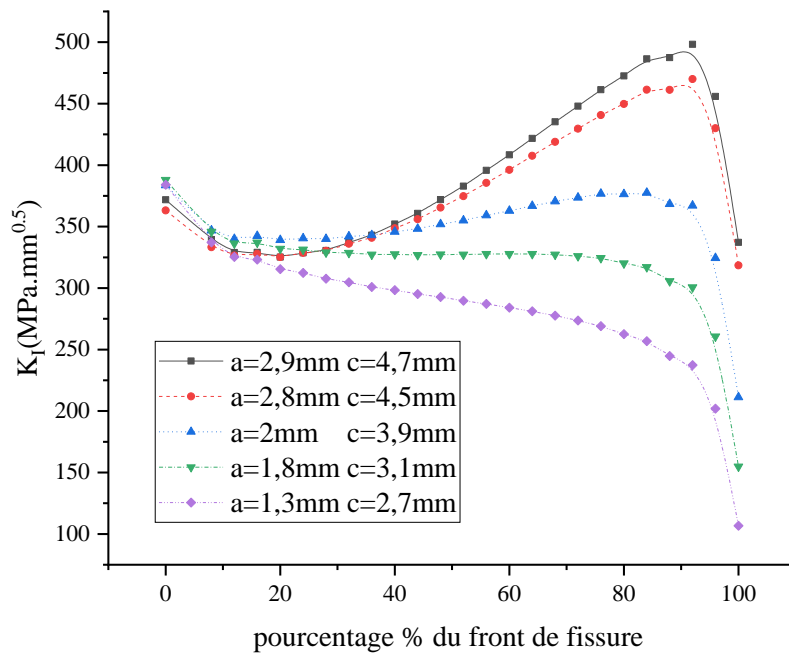


Figure III.10: Variation de du facteur d'intensité de contraintes K_I à chaque état en fonction de pourcentage du front de fissure pour différentes tailles de la fissure quart-elliptique.

Figure III. 10 représente la variation du facteur d'intensité de contraintes K_I en fonction de l'état d'avancement du front de fissure pour une plaque soumise simultanément à un essai de traction et à un moment fléchissant. Les résultats obtenus numériquement montrent que le

facteur d'intensité de contraintes K_I croit avec l'accroissement de la taille de fissure sur le côté de chargement, cependant, il est pratiquement constant sur le côté libre et ceci quelle que soit la taille de la fissure.

III.4.1.2. 2^{ème} Modèle :

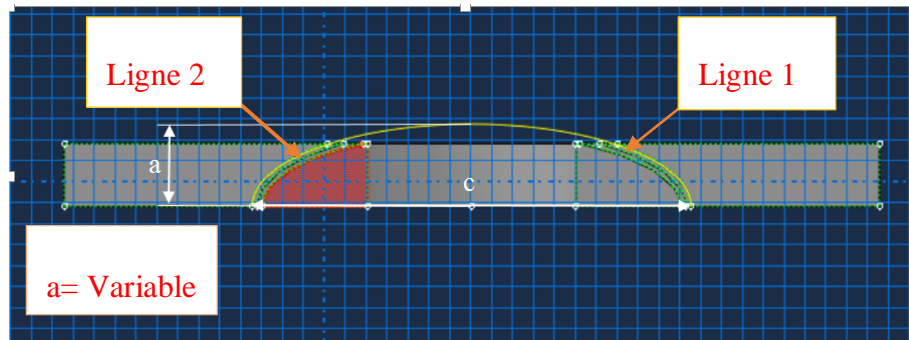


Figure III.11: Représentation graphique du modèle géométrique étudié.

- **Chargement de traction**

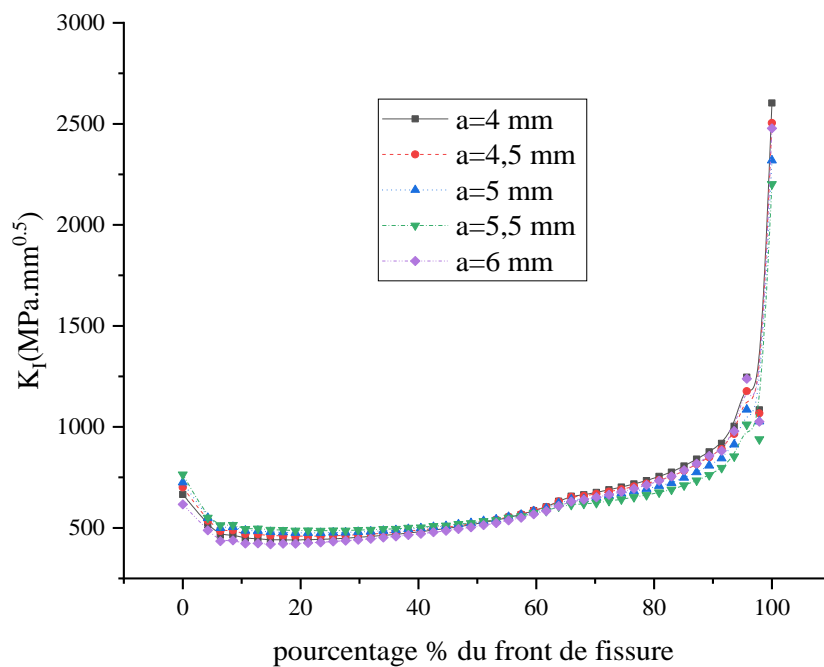


Figure III.12: Variation du facteur d'intensité de contraintes K_I en fonction du pourcentage du front de fissure et pour différentes valeurs de la profondeur a de la fissure.

Figure III. 12 représente la variation du facteur d'intensité de contraintes K_I en fonction de la profondeur a de la fissure en gardant le demi-grand axe de la fissure constant. La plaque soumise à un essai de traction, contient un trou de diamètre $\phi = 10$ mm situé à son centre et présente deux fissures centrales quart-elliptiques situées aux extrémités du trou. On observe que les courbes du facteur d'intensité de contraintes sont pratiquement confondues pour les cinq profondeurs de la fissure et une variation brusque au fond d'entaille dont l'intensité est inversement proportionnelle au demi-petit axe a .

- **Chargement mixte (traction + moment)**

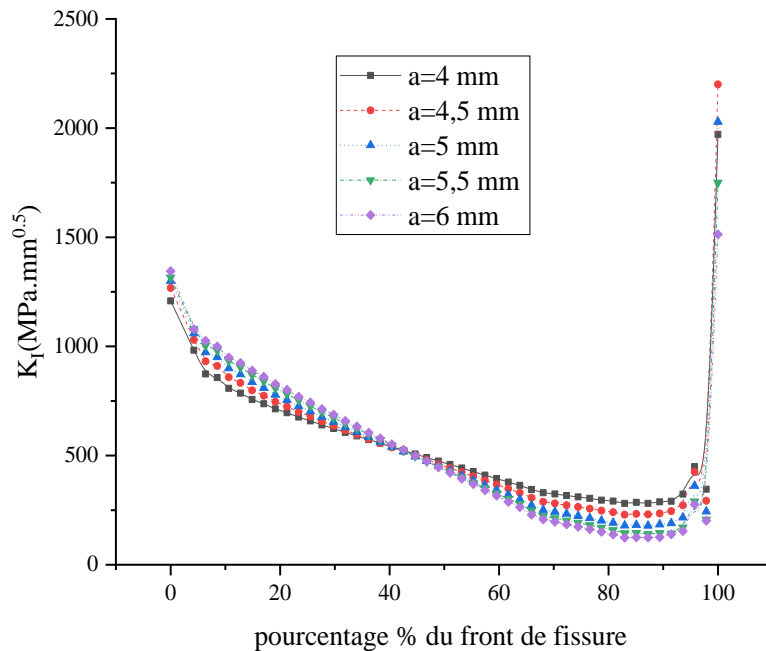


Figure III.13: Variation de du facteur d'intensité de contraintes K_I en pourcentage du front de fissure et pour différente valeur de la profondeur a de la fissure.

Figure III. 13 représente la variation du facteur d'intensité de contraintes K_I en fonction de la profondeur a de la fissure en gardant le demi-grand axe de la fissure constant. La plaque est soumise à un essai de traction et un moment de flexion, elle présente deux fissures centrales quart-elliptiques situées aux extrémités du trou. On observe que les courbes du facteur d'intensité de contraintes sont pratiquement confondues pour les cinq profondeurs de la fissure et une variation brusque au fond d'entaille dont l'intensité est inversement proportionnelle au

demi-petit axe a. Le niveau du facteur d'intensité de contraintes du au chargement combiné traction et flexion, est plus élevé que celui de la figure 12.

III.4.1.3. 3^{ieme} Modèle :

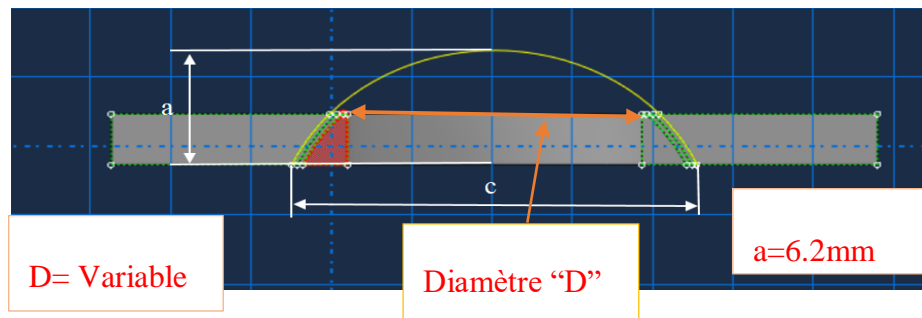


Figure III.14: Représentation graphique du modèle géométrique étudié.

- **Chargement de traction**

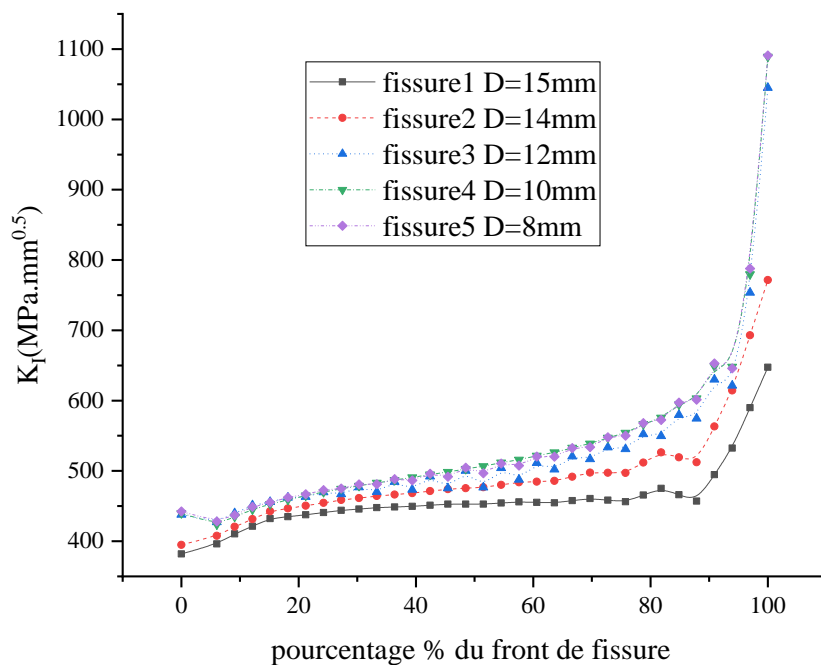


Figure III.15: Variation de facteur d'intensité de contrainte K_I en pourcentage du front de fissure et pour différente valeur du diamètre d de l'entaille.

Figure III. 15 représente la variation du facteur d'intensité de contraintes K_I en fonction du diamètre de l'entaille pour deux fissures centrales quart-elliptiques identiques qui sont initiées au fond de l'entaille. La plaque présentant une entaille centrale de diamètre variable, a été analysée numériquement pour une fissure de dimensions invariables. La plaque est soumise à un essai de tension, en présence de deux fissures émanant de l'entaille. On observe que quel que soit le diamètre du trou de la plaque le facteur d'intensité de contraintes tend vers une valeur asymptotique lorsque le front de fissure est loin de la ligne du chargement. Le facteur d'intensité de contraintes augmente brusquement lorsque le front de fissure se trouve au voisinage du fond d'entaille.

• **Chargement mixte (traction + moment)**

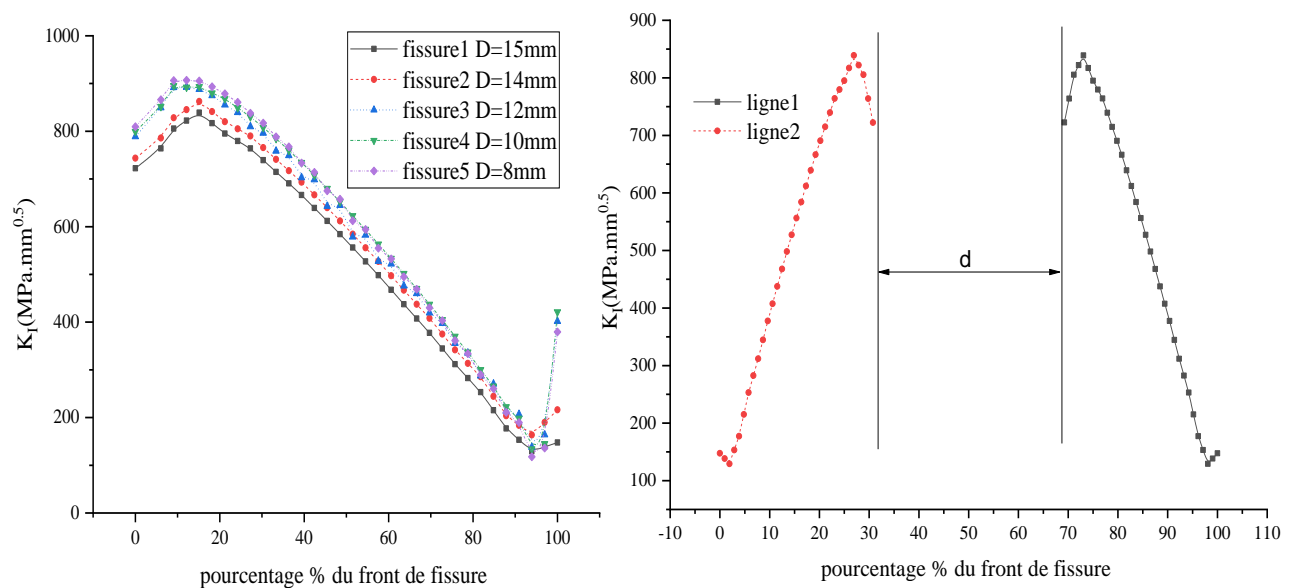


Figure III.16: Variation de facteur d'intensité de contrainte K_I en pourcentage du front de fissure et pour différente valeur du diamètre d de l'entaille.

Figure III. 16 représente la variation du facteur d'intensité de contraintes K_I en fonction du diamètre de l'entaille pour deux fissures centrales quart-elliptiques identiques qui sont initiées au fond de l'entaille. La plaque présentant une entaille centrale de diamètre variable, a été analysée numériquement pour une fissure de dimensions constantes. La plaque est soumise à un essai de tension et de flexion, en présence de deux fissures émanant de l'entaille. On observe que quel que soit le diamètre du trou de la plaque le facteur d'intensité de contraintes tend vers

Chapitre III Modélisation numérique de la réparation des fissures par patch composite

une valeur asymptotique lorsque le front de fissure est loin de la ligne du chargement. Le facteur d'intensité de contraintes augmente brusquement lorsque le front de fissure se trouve au voisinage du fond d'entaille.

III.4.1.4. 4^{ème} Modèle :

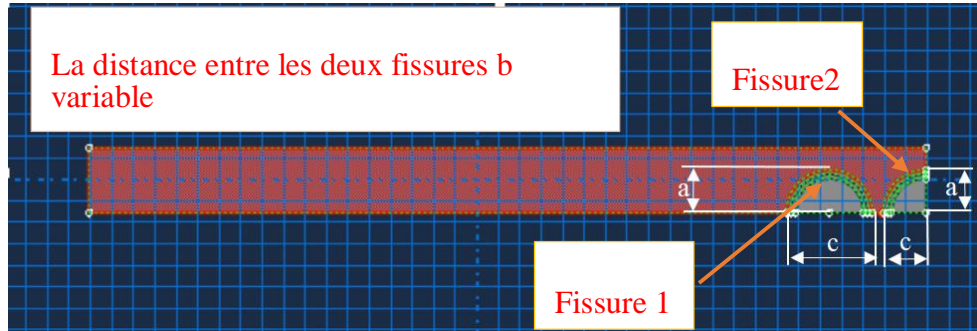


Figure III.17: Représentation graphique du modèle géométrique étudié.

- ✚ Fissure 1 (demi-cercle)
 - Chargement de traction

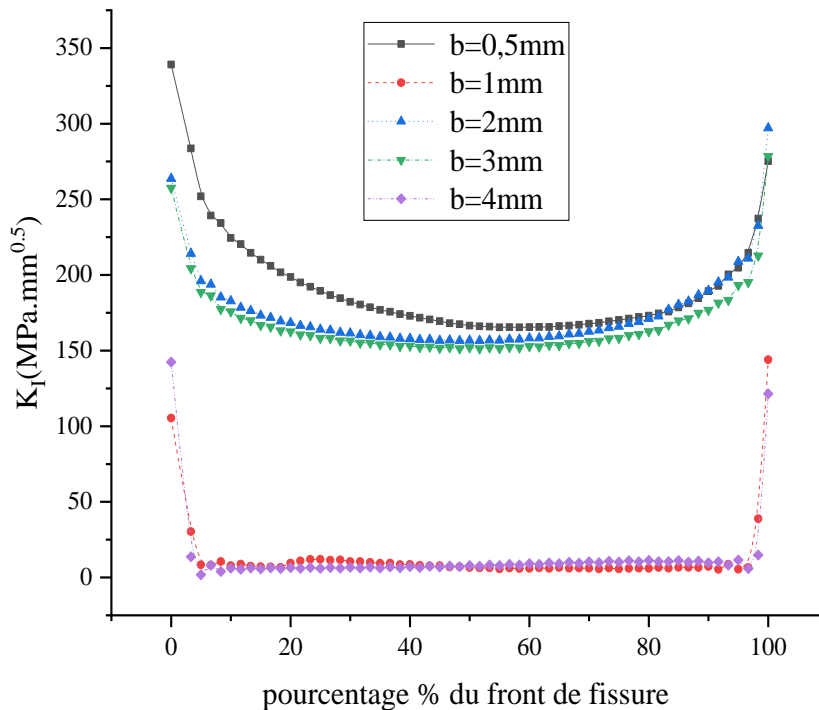


Figure III. 18: Variation de facteur d'intensité de contrainte K_I en fonction de pourcentage du front de fissure à différentes valeurs de la distance entre les deux fissures.

Figure III. 18 représente la variation du facteur d'intensité de contraintes K_I en fonction de la distance séparant deux fissures, la première fissure a une forme semi-circulaire et celle de la seconde fissure est un quart elliptique située au coin de la plaque. Le graphe de cette figure montre l'interaction entre deux fissures de taille différente, effectivement, au fur et à mesure que les deux fissures s'approchent, le facteur d'intensité de contrainte augmente et atteint une valeur maximale aux extrémités du front de fissure.

• **Chargement mixte (Traction + Moment)**

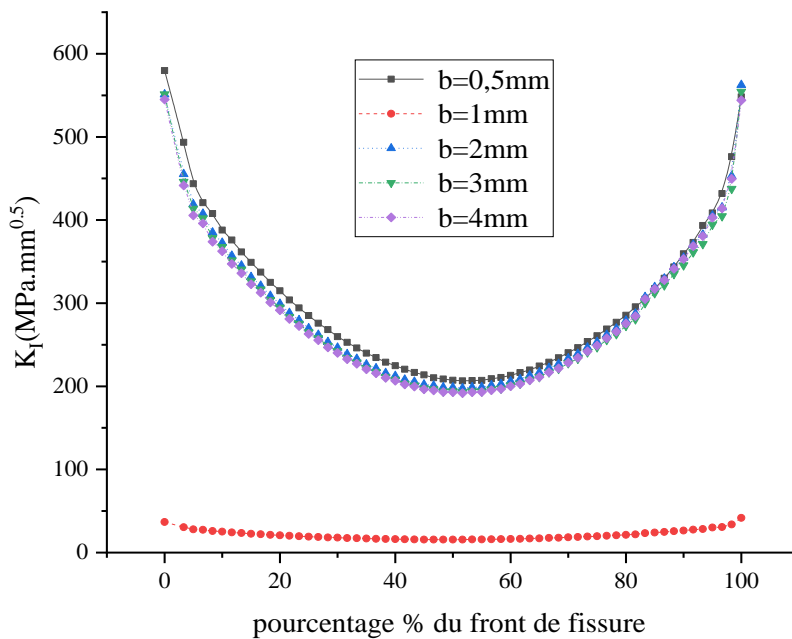


Figure III. 19: Variation de facteur d'intensité de contrainte K_I en fonction de pourcentage du front de fissure à différentes valeurs de la distance entre les deux fissures.

Figure III. 19 représente la variation du facteur d'intensité de contraintes K_I en fonction de la distance séparant deux fissures, la première fissure a une forme semi-circulaire et celle de la seconde fissure est un quart elliptique situé au coin de la plaque. Cette dernière sollicitée en tension et en flexion. On constate que les courbes du facteur d'intensité de contraintes sont presque confondues pour les quatre valeurs de la distance b séparant les deux fissures. Le facteur d'intensité de contrainte atteint une valeur maximale aux extrémités du front de fissure.

✚ Fissure 2 (en coin)

- **Chargement de traction**

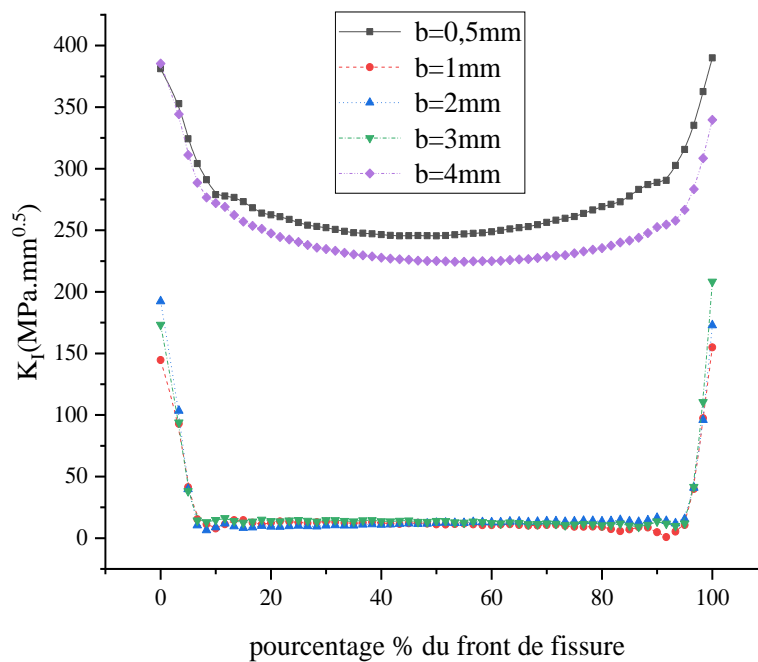


Figure III. 20: Variation de facteur d'intensité de contrainte K_I en fonction de pourcentage du front de fissure à différentes valeurs de la distance entre les deux fissures.

Figure III. 20 représente la variation du facteur d'intensité de contraintes K_I en fonction de la distance séparant deux fissures, la première fissure a une forme quart elliptique et celle de la seconde fissure est semi-circulaire située au coin de la plaque. Le graphe de cette figure montre l'interaction entre deux fissures de taille différente, effectivement, au fur et à mesure que les deux fissures s'approchent, le facteur d'intensité de contrainte augmente et atteint une valeur maximale aux extrémités du front de fissure. Le facteur d'intensité de contrainte décroît lorsque les deux fissures sont éloignées.

- **Chargement Mixte (Traction + Moment)**

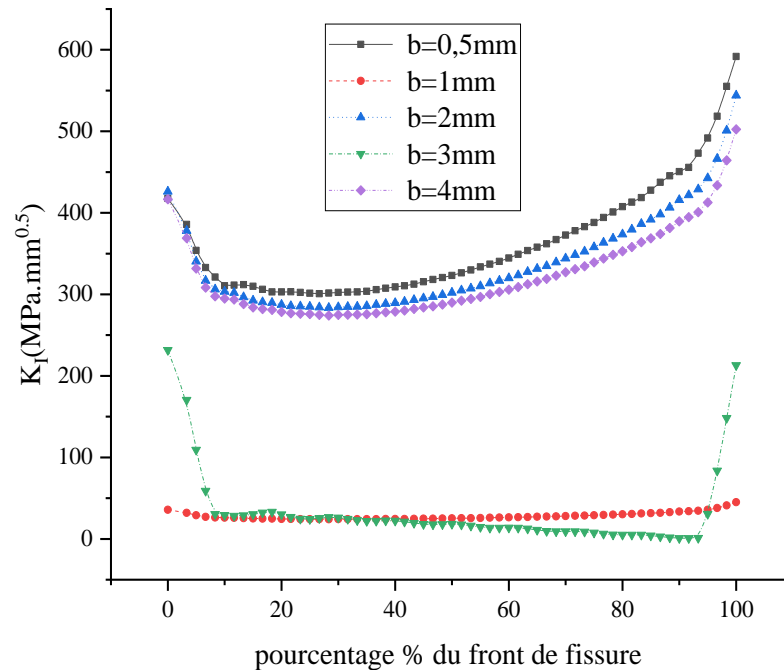


Figure III. 21: Variation de facteur d'intensité de contrainte K_I en fonction de pourcentage du front de fissure à différents valeurs de la distance entre les deux fissures.

Figure III. 21 représente la variation du facteur d'intensité de contraintes K_I en fonction de la distance séparant deux fissures. La plaque sollicitée en tension et en flexion. On constate que les courbes du facteur d'intensité de contraintes sont presque confondues pour les trois valeurs de la distance b séparant les deux fissures (0.5; 2 et 4). Le facteur d'intensité de contrainte atteint une valeur maximale aux extrémités du front de fissure.

III.4.2. PARTIE II: PLAQUE FISSUREE ET REPAREE PAR PATCH :

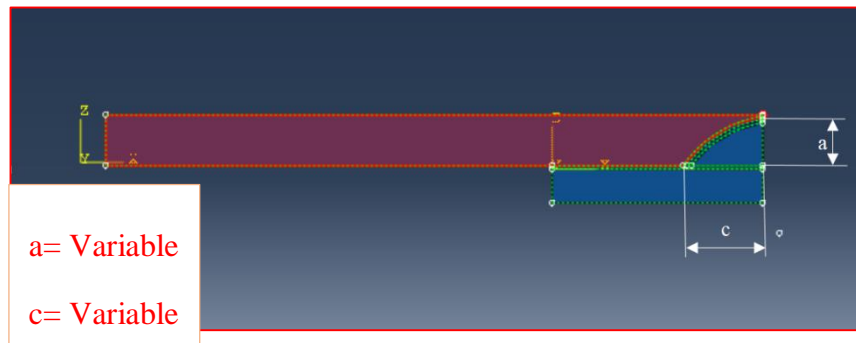
III.4.2.1. 1^{er} Modèle :

Figure III. 22: Représentation graphique du modèle géométrique étudié.

Les patches composites sont largement utilisés pour réparer les structures métalliques endommagées par fatigue. Ces patches permettent de retarder la propagation des fissures et par conséquent d'augmenter la durée de vie des structures ainsi réparées. Les réparations structurelles visent à rétablir les propriétés mécaniques des structures endommagées. Par mesure de sécurité, le principe de ces réparations consiste pour les matériaux composites, à retirer la zone endommagée. D'autres travaux de recherche ont été menés sur l'optimisation de la forme du patch composite, qui contribue au mieux à l'arrêt de la propagation de la fissure.

• **Chargement mixte (traction + moment)**

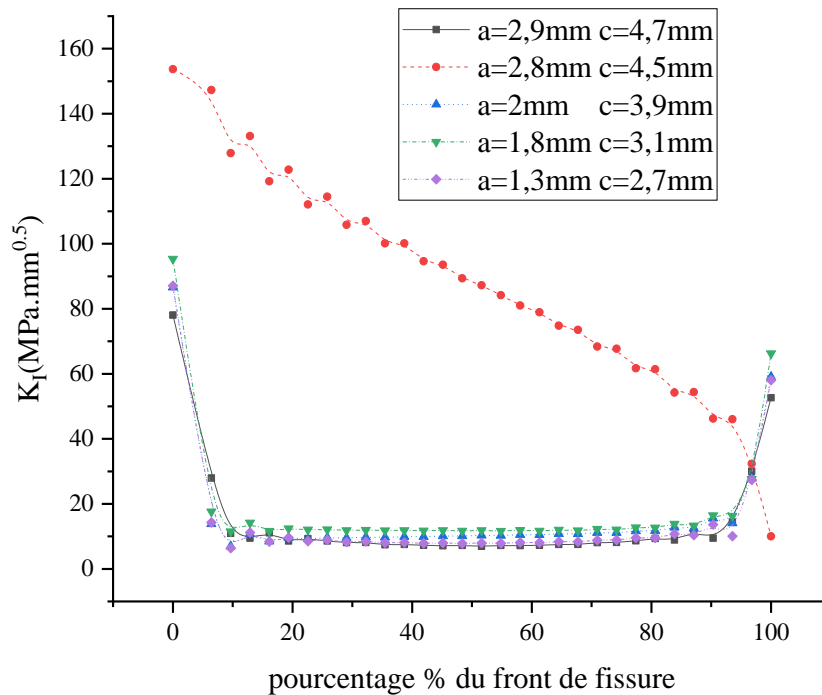


Figure III. 23: Variation de facteur d'intensité de contrainte K_I en fonction de pourcentage du front de fissure et à chaque avancement de la fissure.

Figure III. 23 représente la variation du facteur d'intensité de contraintes K_I en fonction de l'état d'avancement du front de fissure pour une plaque soumise simultanément à un essai de traction et à un moment fléchissant. Comparativement aux résultats obtenus précédemment sans la présence du patch de réparation, on remarque que quelle que soit la taille de la fissure le facteur d'intensité de contraintes est réduit aux extrémités du front de fissure avec un taux de 60 % et il est pratiquement nul au front de la fissure, ce qui signifie que la fissure n'avance pas.

III.4.2.2. 2^{ieme} Modèle :

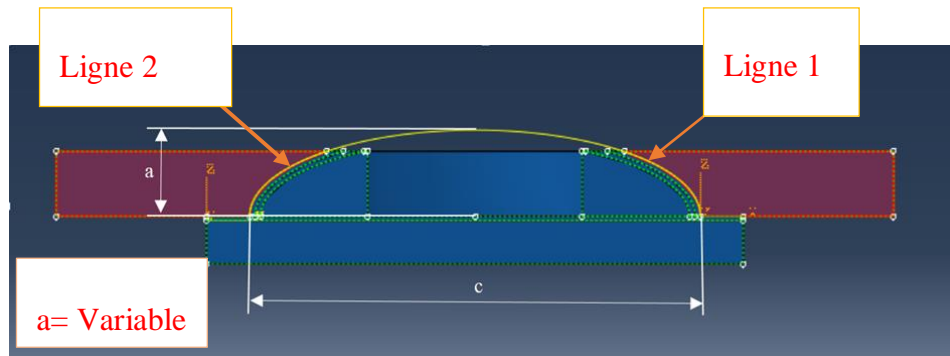


Figure III.24: Représentation graphique du modèle géométrique étudié.

- **Chargement mixte (traction + moment)**

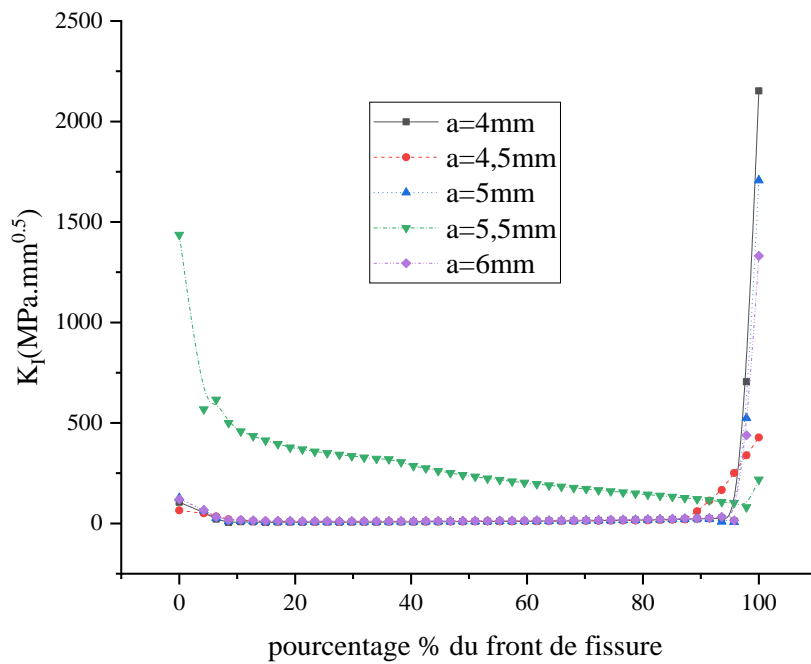


Figure III. 25: Variation de facteur d'intensité de contrainte K_I en fonction de pourcentage du front de fissure et pour différentes valeurs de la profondeur a de la fissure.

Figure III. 25 représente la variation du facteur d'intensité de contraintes K_I en fonction de la profondeur a de la fissure en gardant le demi-grand axe de la fissure constant. La plaque est soumise à un essai de traction et un moment de flexion, elle présente deux fissures centrales quart-elliptiques situées aux extrémités du trou. On remarque qu'une réduction importante de 100 % du facteur d'intensité de contraintes K_I en front de fissure et elle est de 10 % à l'extrémité du front de fissure au voisinage du fond d'entaille. L'utilisation du patch permet de retarder la propagation de la fissure.

III.4.2.3. 3^{ème} Modèle :

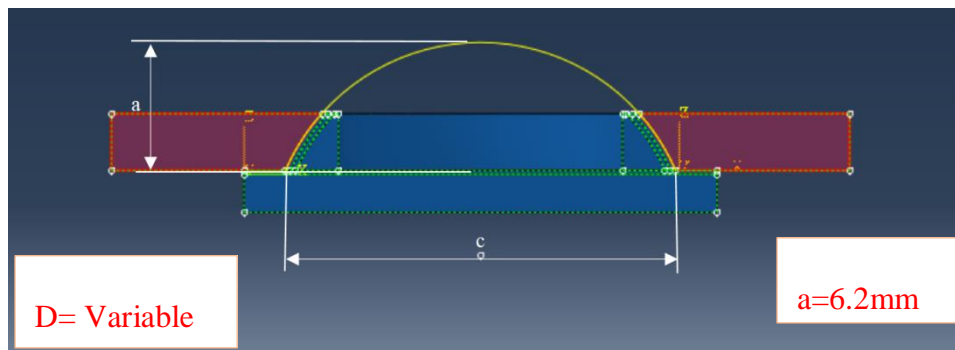


Figure III. 26: Représentation graphique du modèle géométrique étudié.

- **Chargement mixte (traction + moment)**

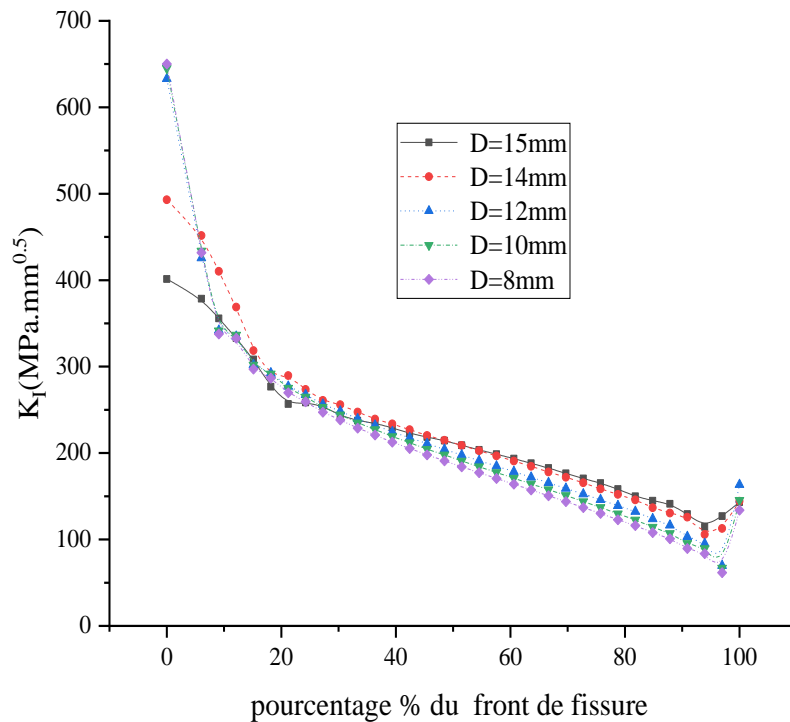


Figure III. 27: Variation de facteur d'intensité de contrainte K_I le en pourcentage du front de fissure et pour différents diamètres de l'entaille circulaire.

Figure III. 27 représente la variation du facteur d'intensité de contraintes K_I en fonction du diamètre de l'entaille pour deux fissures centrales quart-elliptiques identiques qui sont initiées au fond de l'entaille. La plaque présentant une entaille centrale de diamètre variable, a été analysée numériquement pour la même taille de la fissure. La plaque est soumise à un essai de tension et de flexion, en présence de deux fissures émanant de l'entaille. On observe que quel que soit le diamètre du trou de la plaque le facteur d'intensité de contraintes maximale est réduit de 40 % pour une structure réparée par patch. Loin de la ligne du chargement le FIC en mode I tend vers une valeur asymptotique qui est réduite de 75 % en présence du patch.

Références bibliographique:

[39] 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.

[40] Baker, A., and Jones, R. Bonded repair of aircraft structures. Martinus Nijhoff Publishers, 1988.

[41] J.M. Duell a, J.M. Wilson a, M.R. Kessler b,* Analysis of a carbon composite overwrap pipeline repair system Jr. International: Pressure Vessels and Piping 85 (2008) 782–788

[42] <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.52.20>

Conclusion générale

Dans la présente étude, une simulation numérique par la méthode des éléments finis des réparations par patch composite des structures entaillée et fissurée a été étudiée. Ces patches permettent de retarder la propagation des fissures et par conséquent d'augmenter la durée de vie des structures ainsi réparées. Les réparations structurelles visent à rétablir les propriétés mécaniques des structures endommagées. Les principaux avantages de l'association d'un adhésif avec l'entaille sont :

- Pour un chargement de traction : quelle que soit la taille de la fissure, on constate que la forme des courbes du facteur d'intensité de contraintes en mode I sont semblables.
- le facteur d'intensité de contraintes KI croît avec l'accroissement de la taille de fissure sur le côté de chargement mixte.
- les courbes du facteur d'intensité de contraintes sont pratiquement confondues pour les cinq profondeurs de la fissure.
- Une plaque présente une entaille centrale de diamètre variable, quel que soit le diamètre du trou de la plaque le facteur d'intensité de contraintes tend vers une valeur asymptotique lorsque le front de fissure est loin de la ligne du chargement.
- En présence de deux fissures émanant de l'entaille. On observe que quel que soit le diamètre du trou de la plaque le facteur d'intensité de contraintes tend vers une valeur asymptotique lorsque le front de fissure est loin de la ligne du chargement mixte (traction + moment).
- Pour les deux fissures de taille différente, on constate que les deux fissures s'approchent, le facteur d'intensité de contrainte augmente et atteint une valeur maximale aux extrémités du front de fissure.
- Comparativement aux résultats obtenus précédemment sans la présence du patch de réparation, on remarque que quelle que soit la taille de la fissure le facteur d'intensité de contraintes est réduit aux extrémités du front de fissure.