

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Génie des matériaux

Par :

BERKATI Nadjim
BARBARI Mohamed

Thème

Etude numérique de la rupture ductile d'une tôle en aluminium

Soutenu le mercredi 03/07/2024 devant le jury composé de :

Dr. AMARI Djamel

Président

Dr. BECHEUR AbdAlhamid

Examineur

Dr. IDIR Abdelhek

Rapporteur

Année Universitaire 2023-2024

Remerciement

Remerciement

En premier lieu, nous remercions Allah, le Tout-Puissant, qui nous a donné le courage et nous a aidés à surmonter les obstacles rencontrés durant la réalisation de ce mémoire.

Notre amour et notre sincère gratitude vont à nos chers parents, sans qui nous n'aurions jamais atteint cette étape importante de notre vie.

Nous tenons également à remercier notre encadrant, le **Dr. IDIR Abdelhek**, pour la confiance qu'il nous a accordée en nous faisant la découverte de cette thématique. Nos remerciements vont aussi aux membres du jury, le **Dr. BECHUR AbdAlhamid** et le **Dr. AMARI Djamel**, pour l'honneur qu'ils nous font en examinant notre mémoire.

Un sincère remerciement à toute l'équipe du hall technologie pour avoir facilité l'accès au matériel disponible à l'université.

Nous adressons également un grand remerciement à notre promotion de master.

Enfin, nous n'oublions pas tous nos enseignants durant notre parcours de formation supérieure à l'université de Bejaia.

Dédicaces

Dédicaces

Mon Père,

Votre soutien inébranlable, votre compréhension et votre dignité m'inspirent profondément. Vos encouragements, votre confiance et votre amour m'ont donné la force et la motivation nécessaires pour atteindre ce moment. Votre présence à mes côtés est un cadeau précieux que je chéris. Merci d'être mon rocher et mon inspiration. Que Dieu vous préserve. Je vous aime plus que les mots ne peuvent l'exprimer.

Ma Mère,

Vous m'avez donné la vie, la tendresse et le courage de réussir. Rien de ce que je peux offrir ne pourra exprimer l'amour et la reconnaissance que je vous porte. Vous êtes pour moi la lumière qui guide mon chemin vers la réussite. C'est grâce à vous que j'ai pu accomplir ce succès. Je vous dédie ce modeste travail en témoignage de ma gratitude pour vos sacrifices et l'affection que vous m'avez toujours témoignée.

À mes Frères et Sœurs,

Vous occupez une place spéciale dans mon cœur. Vous avez toujours été là pour moi, avec votre soutien indéfectible et vos conseils avisés. Vos encouragements, votre camaraderie et votre amour fraternel ont été des piliers sur lesquels je me suis appuyé tout au long de ce parcours. Merci d'être les épaules solides sur lesquelles je peux toujours compter.

À mes chers amis,

Barache Mouloud, kheraz Aziz, Ziane Abdelaziz et Rabia larbi sans oublier les autres amis, je tenais à prendre un moment pour vous dire combien vous comptez pour moi. Votre présence dans ma vie est une source inépuisable de joie et de soutien. À travers les hauts et les bas, vous avez toujours été là, et pour cela, je vous en suis profondément reconnaissant.

Merci à vous tous.

BARBARI Mohamed

Dédicaces

Mon Père,

Votre soutien inébranlable, votre compréhension et votre dignité m'inspirent profondément. Vos encouragements, votre confiance et votre amour m'ont donné la force et la motivation nécessaires pour atteindre ce moment. Votre présence à mes côtés est un cadeau précieux que je chéris. Merci d'être mon rocher et mon inspiration. Que Dieu vous préserve. Je vous aime plus que les mots ne peuvent l'exprimer.

Ma Mère,

Vous m'avez donné la vie, la tendresse et le courage de réussir. Rien de ce que je peux offrir ne pourra exprimer l'amour et la reconnaissance que je vous porte. Vous êtes pour moi la lumière qui guide mon chemin vers la réussite. C'est grâce à vous que j'ai pu accomplir ce succès. Je vous dédie ce modeste travail en témoignage de ma gratitude pour vos sacrifices et l'affection que vous m'avez toujours témoignée.

À mon Frère et ma Sœur,

Vous occupez une place spéciale dans mon cœur. Vous avez toujours été là pour moi, avec votre soutien indéfectible et vos conseils avisés. Vos encouragements, votre camaraderie et votre amour fraternel ont été des piliers sur lesquels je me suis appuyé tout au long de ce parcours. Merci d'être les épaules solides sur lesquelles je peux toujours compter.

À mes chers amis,

Je tenais à prendre un moment pour vous dire combien vous comptez pour moi. Votre présence dans ma vie est une source inépuisable de joie et de soutien. À travers les hauts et les bas, vous avez toujours été là, et pour cela, je vous en suis profondément reconnaissant.

Merci à vous tous.

BERKATI Nadjim

Sommaire

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre I : Mécanique de la rupture contexte de l'étude et état de l'art | |
| I. Introduction à la mécanique de la Rupture : | 3 |
| I.1 Utilisation de la mécanique de la rupture en conception | 3 |
| I.2. Éléments Mécanique de la Rupture : | 4 |
| I.2.1. Mécanique de la Rupture linéaire : | 5 |
| I.2.2 Mécanique de la Rupture non linéaire : | 6 |
| I.3. Endommagement et Rupture des Matériaux : | 6 |
| I.3.1. Phénomènes d'endommagement : | 6 |
| I.3.2. Phénomènes de Rupture des Matériaux : | 6 |
| I.4. Mode de Rupture des Matériaux : | 8 |
| I.5 Aspects physique (microscopique) le la Rupture : | 9 |
| 1.5.1 Phénomènes de Propagation de fissures : | 9 |
| 1.5.2. Zones délimitant le voisinage de la pointe d'une fissure : | 10 |
| I.6. Description des Champs de Contrainte et de déplacements aux voisinages d'une fissure : | 11 |
| I.7 Critères de Rupture : | 14 |
| 1.7.1 Facteur d'intensité de Contrainte : | 15 |
| 1.7.2. Critère de taux de restitution d'énergie : | 16 |
| 1.7.3. Critère de J intégral : | 17 |
| Chapitre II : conception et création de modèle d'étude | |
| II.1. Introduction : | 20 |
| II.2. Définition du logiciel COMSOL Multiphysics: | 21 |
| II.3. Modélisation par éléments finis de la propagation des fissures : | 21 |
| II.3.1. Définition de méthode des éléments finis : | 21 |

Sommaire

| | |
|--|----|
| II.3.2. Modélisation : | 22 |
| II.4. Introductionsurlematériau d'étude: | 23 |
| II.5. Définition du modèle : | 23 |
| II.6. Chargement : | 25 |
| II.7. Maillage : | 25 |
| Chapitre III :Résultat et discussions | |
| III.1Résultats et discussions mode I pure : | 26 |
| III.1.1. Analyse comparative des contraintes de von Mises | 26 |
| III.1.2. Analyse comparative des facteurs d'intensité de J-intégrale | 28 |
| III.1.3. Taux de libération d'énergie en fonction de la longueur de la fissure | 31 |
| III.1.4. Interprétation de le taux de croissance de la fissure en fonction de la taille de la fissure | 32 |
| III.2Résultats et discussions mode mixte : | 33 |
| III.2.1. Analyse comparative des contraintes de von Mises | 33 |
| III.2.2. Analyse comparative des facteurs d'intensité de J-intégrale | 41 |
| III.2.3. L'intégrale J en fonction de la longueur de la fissure | 44 |

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I.1. Comparaison de l'approche classique (a) et de l'approche utilisant la MLR (b)

Figure.I.2. Rupture par corrosion

Figure I.3. Rupture d'un arbre par fatigue

FigureI.4. Rupture par fissuration

Figure I.5. Différents modes de rupture.....

Figure I.6. Simulation de propagation de fissure.....

Figure I.7. Description du milieu fissuré.....

Figure.I.8. Champ de contraintes au voisinage du bout de fissure.....

Figure I.9. Contour d'intégration.....

Chapitre II :

Figure II.1. Boite à fissure : les 8 éléments ont un sommet sur le fond de fissure.....

Figure II.2. Géométrie et chargement de la plaque

Figure II.3. Maillage appliqué dans la simulation.....

Chapitre III :

Figure III.1. La distribution des contraintes de von Mises dans une plaque présentant une fissure

Figure III.2. La distribution des contraintes de von Mises taille de fissure $X_a=10$ mm

Figure III.3. La distribution des contraintes de von Mises taille de fissure $X_a=15$ mm

Figure III.4. La distribution des contraintes de von Mises taille de fissure $X_a=20$ mm

Figure III.5. L'intégrale J autour d'une fissure en taille (10 mm)

Figure III.6. L'intégrale J autour d'une fissure en taille (15 mm)

Liste des figures

Figure III.7. L'intégrale J autour d'une fissure en taille (20 mm)

Figure III.8. Taux de libération d'énergie en fonction de la longueur de la fissure

Figure III.9. Le taux de croissance de la fissure en fonction de la taille de la fissure

Figure III.10. La distribution des contraintes de von Mises autour d'une fissure en taille ($X_a=10$) mm pour différents angles (45° , 60° , 70.5°).

Figure III.11. La concentration de contraintes d'une fissure en taille $X_a=10\text{mm}$ et $\beta=45^\circ$

Figure III.12. la concentration de contraintes d'une fissure en taille $X_a=10\text{mm}$ et $\beta=60^\circ$

Figure III.13. la concentration de contraintes d'une fissure en taille $X_a=10\text{mm}$ et $\beta=70.5^\circ$

Figure III.14. La distribution des contraintes de von Mises autour d'une fissure de 15 mm pour différents angles (45° , 60° , 70.5°).

Figure III.15. La concentration de contraintes d'une fissure en taille $X_a=15\text{mm}$ et $\beta=45^\circ$

Figure III.16. La concentration de contraintes d'une fissure en taille $X_a=15\text{mm}$ et $\beta=60^\circ$

Figure III.17. la concentration de contraintes d'une fissure en taille $X_a=15\text{mm}$ et $\beta=70.5^\circ$

Figure III.18. La concentration des contraintes de von Mises autour d'une fissure de 20 mm pour différents angles d'orientation (45° , 60° , 70.5°).

Figure III.19. la concentration de contraintes d'une fissure en taille $X_a=20\text{mm}$ et $\beta=45^\circ$

Figure III.20. la concentration de contraintes d'une fissure en taille $X_a=1.5\text{mm}$ et $\beta=60^\circ$

Figure III.21. la concentration de contraintes d'une fissure en taille $X_a=20\text{mm}$ et $\beta=70.5^\circ$

Figure III.22. l'intégrale J autour d'une fissure en taille (10 mm) pour différents angles (45° , 60° , 70.5°).

Figure III.23. L'intégrale J autour d'une fissure en taille (15 mm) pour différents angles (45° , 60° , 70.5°).

Figure III.24. L'intégrale J autour d'une fissure en taille (20 mm) pour différents angles (45° , 60° , 70.5°).

Figure III.25. J intégrale en fonction de la longueur de la fissure

Introduction générale

Introduction générale

La mécanique de la rupture : une discipline récente au service de la fiabilité des structures mécaniques apparue au 20ème siècle, elle s'est imposée comme un outil indispensable pour la conception d'ouvrages mécaniques sûrs. En effet, la présence de défauts tels que des fissures ou des cavités peut menacer la capacité de ces structures à supporter des charges.

Ces fissures, sources de discontinuités dans un matériau initialement homogène, engendrent des concentrations de contraintes critiques. Pour analyser ce phénomène, la science met à disposition des méthodes de calcul spécifiques prenant en compte ces défauts afin de garantir la sécurité des structures.

Parmi les approches utilisées pour modéliser la propagation des fissures, la mécanique linéaire de la rupture est la plus répandue. Dans ce cadre, plusieurs critères ont été développés pour prédire la contrainte critique et l'orientation de croissance des fissures, tels que le critère de contrainte tangentielle maximale ou le critère de densité minimale. L'approche basée sur la densité d'énergie de déformation s'est avérée particulièrement efficace pour évaluer le comportement statique et en fatigue des structures mécaniques.

Pour analyser le comportement mécanique des structures fissurées et déterminer les paramètres de rupture, différentes méthodes numériques sont employées. Parmi celles-ci, la méthode des éléments finis (MEF) est la plus courante et permet de traiter des problèmes concrets liés à la rupture. Cependant, elle présente certaines difficultés spécifiques, telles que la nécessité d'un maillage finement détaillé au niveau de la fissure ou le remaillage progressif à mesure de sa propagation.

Ce mémoire a pour objectif de simuler la propagation d'une fissure dans une éprouvette soumise à un chargement mixte en utilisant la méthode des éléments finis et la théorie de la densité d'énergie de déformation.

La structure de ce manuscrit est organisée comme suit :

Le premier chapitre du manuscrit examine l'état actuel de la mécanique de la rupture linéaire, en présentant divers critères de rupture et en mettant en lumière les méthodes numériques couramment utilisées dans ce domaine.

Introduction générale

Le deuxième chapitre de notre étude se concentre sur la description de la géométrie de l'éprouvette utilisée, ainsi que sur la simulation réalisée à l'aide de la méthode des éléments finis. Nous détaillons les étapes clés pour créer un modèle numérique en utilisant les principaux modules disponibles, en abordant à la fois le mode I et le mode mixte (I+II).

Dans le troisième chapitre, nous discuterons des résultats obtenus à partir de la simulation numérique.

Enfin, nous concluons ce manuscrit par une synthèse générale de notre travail au cours de la rédaction de ce mémoire.

Chapitre I :
Mécanique de la Rupture
Contexte de l'étude et État
de l'art

I. Introduction à la mécanique de la Rupture :

La mécanique de la rupture a été introduite par Griffith vers 1920. L'objectif de la mécanique de la rupture est de caractériser le comportement à la fissuration des structures à l'aide des paramètres quantifiables au sens de l'ingénieur, notamment le champ de contraintes, la taille de la fissure et la résistance à la fissuration du matériau. Les premiers développements théoriques d'analyse des champs de déplacements, déformations et contraintes au voisinage d'une fissure ont été entrepris par Westergaard vers 1940. L'extension de la discipline a été amorcée par Irwin vers 1960. Depuis cette date, le développement de la mécanique de la rupture s'étend aux problèmes non linéaires matériellement et géométriquement, aux problèmes de bifurcation des fissures en modes mixtes et plus récemment aux composites, aux techniques numériques de résolution et à l'état de l'art relatif au dimensionnement de diverses structures complexes [1-5].

La rupture par fissuration est la création d'une surface de discontinuité. Elle est le terme ultime d'un essai de traction et quelquefois la seule réaction à un essai de déformation. La mécanique des solides aborde les problèmes de calcul de structures où l'on parle d'un élément de volume dont les dimensions sont de 1 mm et de structure pour 10 à 10³ mm. Dans ce domaine, on traite du problème de la rupture par fissuration.

I.1 Utilisation de la mécanique de la rupture en conception

Deux approches sont utilisées pour le dimensionnement des structures. La première, la plus classique, repose sur la limite d'élasticité du matériau σ_E , alors que la seconde s'appuie sur le concept de ténacité K_C issu de la mécanique linéaire de la rupture (**MLR**).

Dans la première approche, on dimensionne les structures de manière à ce que les contraintes appliquées (σ) restent en dessous de la limite d'élasticité (σ_E). Pour pallier tout risque de rupture fragile, un coefficient de sécurité (a) est généralement introduit, assurant que σ est toujours inférieur à un certain seuil ($\sigma < a\sigma_E$ avec $a < 1$). Cette méthode, caractérisée par les deux paramètres σ et σ_E , ne prend pas en compte la présence potentielle de défauts, tels que des microfissures.

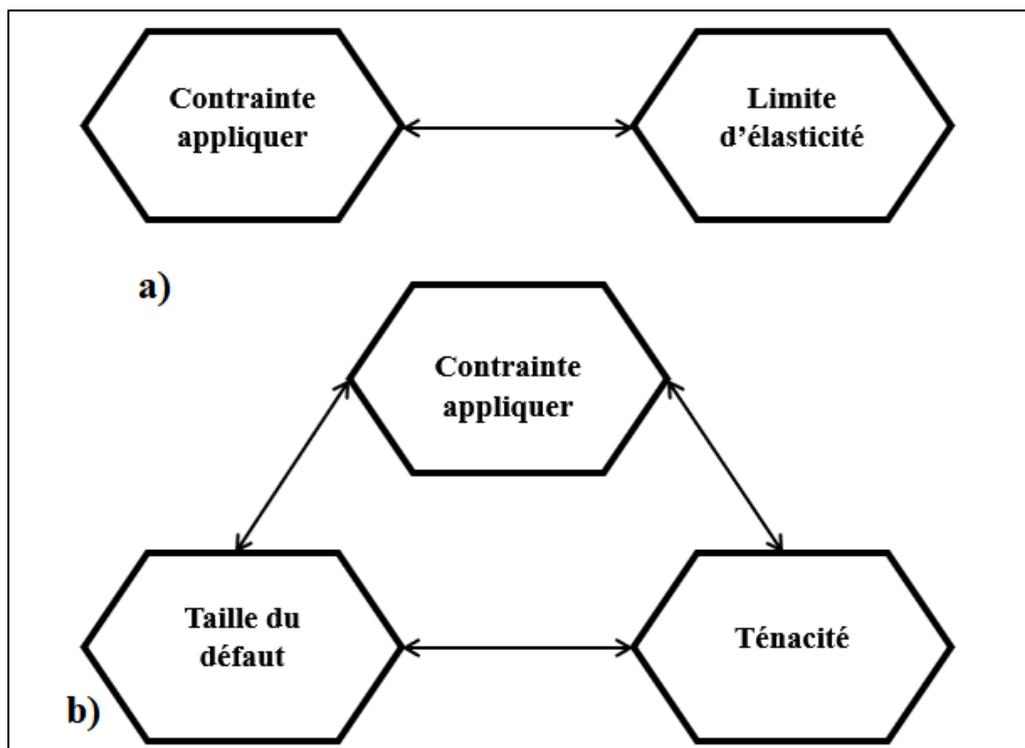


Figure I.1. Comparaison de l'approche classique (a) et de l'approche utilisant la MLR (b).

L'approche par la mécanique linéaire de la rupture se distingue par l'utilisation de trois variables : la contrainte appliquée (σ), la ténacité du matériau (K_Ic) - en lieu et place de la limite d'élasticité - et une nouvelle variable liée à la taille du défaut. Cette approche propose deux modes d'analyse : l'un basé sur un critère d'énergie et l'autre sur le concept d'intensité critique des contraintes. Ces deux approches peuvent donner des résultats équivalents sous certaines conditions. [1]

I.2. Éléments Mécanique de la Rupture :

Les "Éléments Mécanique de la Rupture" désignent l'étude fondamentale du comportement des matériaux fissurés et de leur résistance à la rupture. Ce domaine crucial de l'ingénierie vise à comprendre les mécanismes qui conduisent à la défaillance des structures et à développer des méthodes pour concevoir des structures plus sûres et plus fiables.

La mécanique de la rupture s'appuie sur des principes fondamentaux de la mécanique des solides, de la science des matériaux et de la physique mathématique pour analyser le comportement des matériaux fissurés. Elle s'intéresse à divers aspects, tels que :

Chapitre I Mécanique de la Rupture Contexte de l'étude et État de l'art

- **La nature et la propagation des fissures :** Les fissures, qui sont des discontinuités dans la structure d'un matériau, peuvent être initiées par divers facteurs tels que des défauts de fabrication, des contraintes mécaniques ou une corrosion. La mécanique de la rupture étudie comment ces fissures se propagent et comment elles affectent la résistance à la rupture du matériau.

- **Le comportement des matériaux fissurés :** Le comportement d'un matériau fissuré dépend de ses propriétés intrinsèques, telles que sa ductilité, sa ténacité et sa résistance à la traction. La mécanique de la rupture établit des relations entre ces propriétés et la résistance à la rupture du matériau.

- **L'influence des contraintes et de l'environnement :** Les contraintes appliquées à une structure et l'environnement dans lequel elle opère peuvent avoir un impact significatif sur son comportement à la rupture. La mécanique de la rupture prend en compte ces facteurs pour évaluer la résistance à la rupture dans des conditions réalistes.

Les "**Éléments Mécanique de la Rupture**" se divisent en deux branches principales :

I.2.1. Mécanique de la Rupture linéaire :

La mécanique linéaire de la rupture (MLR) est une méthode d'analyse simplifiée applicable aux matériaux qui se comportent de manière élastique linéaire, c'est-à-dire que leur déformation est proportionnelle à la contrainte appliquée, comme l'indique la loi de Hooke.

Cette approche reste valable dans certaines situations où une plasticité localisée se produit, à condition que la structure dans son ensemble conserve un comportement majoritairement élastique. Cette plasticité confinée peut se manifester autour de zones de concentration de contraintes, telles que des entailles ou des fissures.

Cependant, lorsque la plasticité s'étend de manière significative dans les environs de ces zones de concentration de contraintes, la MLR perd sa fiabilité. Même en introduisant des corrections complexes, les analyses basées sur l'hypothèse de plasticité confinée ne parviennent plus à prédire de manière précise le comportement du matériau et le risque de rupture.

Chapitre I Mécanique de la Rupture Contexte de l'étude et État de l'art

En résumé, la MLR est un outil utile pour analyser le comportement à la rupture des matériaux élastiques linéaires et des structures présentant une plasticité localisée limitée. Dans les cas où la plasticité devient importante, des méthodes d'analyse plus sophistiquées, prenant en compte la non-linéarité du comportement du matériau, s'avèrent nécessaires pour obtenir des prédictions fiables [2].

I.2.2 Mécanique de la Rupture non linéaire :

La mécanique de la rupture linéaire (MLR), bien qu'utile pour une analyse préliminaire, présente des limites lorsqu'il s'agit de prédire le comportement à la rupture des matériaux et des structures dans des situations complexes impliquant une plasticité étendue. C'est là qu'intervient la mécanique de la rupture non linéaire, un domaine d'analyse plus sophistiqué qui prend en compte les non-linéarités du comportement du matériau et de la structure pour offrir une évaluation plus précise de la résistance à la rupture [1].

I.3. Endommagement et Rupture des Matériaux :

L'endommagement et la rupture des matériaux sont des phénomènes fondamentaux qui affectent la performance, la fiabilité et la sécurité des structures et des composants dans divers domaines de l'ingénierie. Comprendre ces processus est crucial pour la conception, l'analyse et la maintenance de systèmes fiables et durables.

I.3.1. Phénomènes d'endommagement :

Le terme « **Endommagement** » englobe tous les processus irréversibles qui, en progressant, mèneront à la défaite totale du matériau [3].

Les matériaux, tout au long de leur vie, peuvent subir une multitude de dégradations qui affectent leurs propriétés mécaniques et leur performance. Ces dégradations, appelées endommagements, peuvent être causées par différents facteurs physiques, chimiques ou mécaniques et peuvent mener à la défaillance finale du matériau.

I.3.2. Phénomènes de Rupture des Matériaux :

La rupture des matériaux est un phénomène critique qui survient lorsqu'un matériau se sépare en deux ou plusieurs parties sous l'action de contraintes ou de déformations. Ce phénomène est d'une importance capitale en génie mécanique car il peut conduire à la défaillance de composants et de structures. Comprendre les mécanismes de rupture est crucial pour le développement de matériaux et de structures sûrs, fiables et durables [4].

I.3.2.1 Rupture par Corrosion :

La rupture par corrosion est un mode de défaillance critique qui survient lorsqu'un matériau se rompt en raison de l'interaction entre les contraintes mécaniques et la dégradation chimique par un environnement corrosif. C'est un phénomène courant dans de nombreuses applications d'ingénierie et peut entraîner des défaillances catastrophiques de structures et de composants [5].



Figure. I.2. Rupture par corrosion

I.3.2.2 Rupture par Fatigue :

La rupture par fatigue est un mode de défaillance courant dans les matériaux soumis à des charges cycliques répétées. Elle se produit en raison de l'initiation et de la propagation progressive de fissures sous l'effet de ces charges. Contrairement à la rupture fragile qui survient de façon brutale, la rupture par fatigue est un processus graduel qui peut se produire à des niveaux de contrainte inférieurs à la limite d'élasticité du matériau [6].



Figure. I.3. rupture d'un arbre par fatigue

I.3.2.3. Rupture par Fissuration :

La rupture par fissuration est un mode de rupture fragile des matériaux qui se produit lorsqu'une fissure préexistante dans le matériau se propage sous l'effet d'une contrainte appliquée. La fissure peut être microscopique et invisible à l'œil nu, ou elle peut être macroscopique et visible [7].

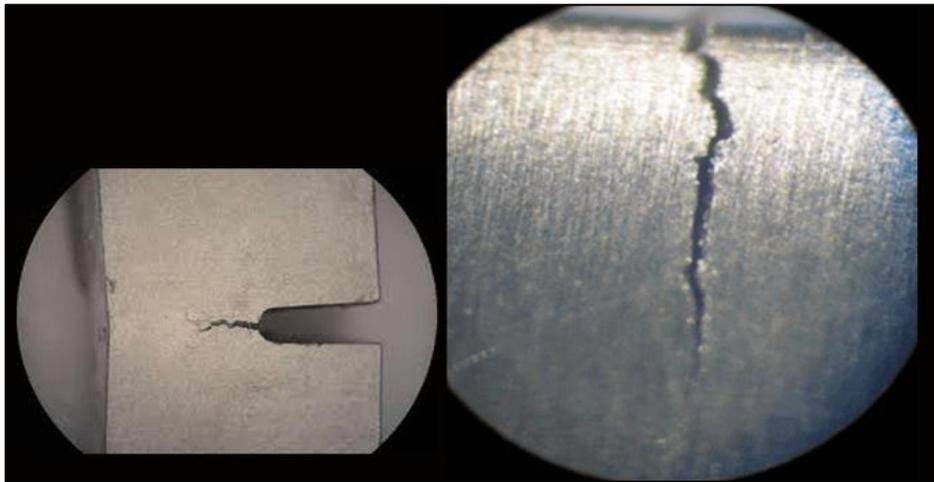


Figure. I.4. Rupture par fissuration

I.3.2.4. Fissure dans un milieu continu :

Une fissure dans un milieu continu est une discontinuité locale de la matière qui peut avoir des conséquences importantes sur le comportement mécanique du matériau. Les fissures peuvent être de tailles et de formes variées, et elles peuvent être causées par divers facteurs, tels que des défauts de fabrication, des dommages mécaniques ou de la corrosion [8].

I.4. Mode de Rupture des Matériaux :

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. I.10) 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 [9].

En théorie, les fissures sont planes et se propagent dans leur plan, il est ainsi possible de montrer que l'état général de propagation se limite à la superposition de trois modes :

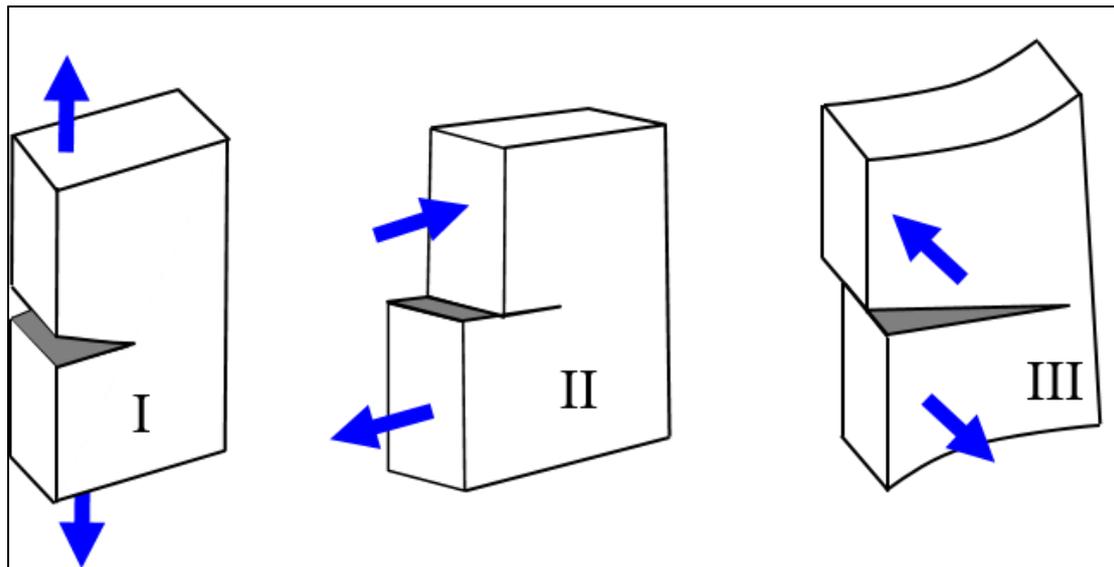


Figure. I.5. Différents modes de rupture.

- **Mode I d'ouverture** : Les surfaces de la fissure se déplacent perpendiculaire au plan de fissure.
- **Mode II de cisaillement plan** : les surfaces de la fissure se déplacent dans le plan de fissure et dans une direction perpendiculaire au front de fissure.
- **Mode III de cisaillement anti-plan** : les surfaces de la fissure se déplacent dans le plan de fissure et dans une direction parallèle au front de la fissure.

I.5 Aspects physique (microscopique) de la Rupture :

1.5.1 Phénomènes de Propagation de fissures :

Ce titre aborde la croissance progressive de fissures dans un matériau. La compréhension de ce phénomène est cruciale pour plusieurs domaines de l'ingénierie, car une fissure peut mener à la rupture finale d'une structure.

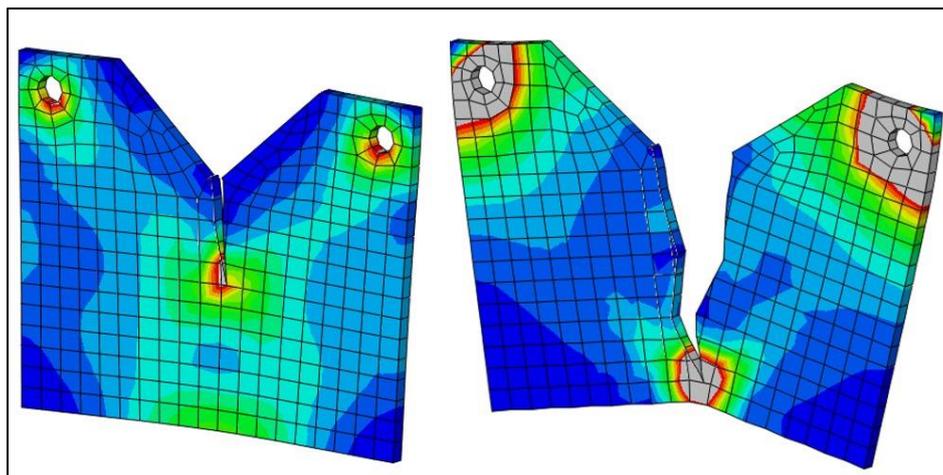


Figure I.6. Simulation de propagation de fissure

1.5.2. Zones délimitant le voisinage de la pointe d'une fissure :

L'analyse de la résistance statique d'un matériau fissuré révèle que la zone proche de la fissure subit un comportement particulier. La limite d'élasticité du matériau y est largement dépassée, conduisant à des déformations plastiques localisées inévitables. Pour les matériaux courants, on observe trois zones distinctes dans un milieu fissuré :

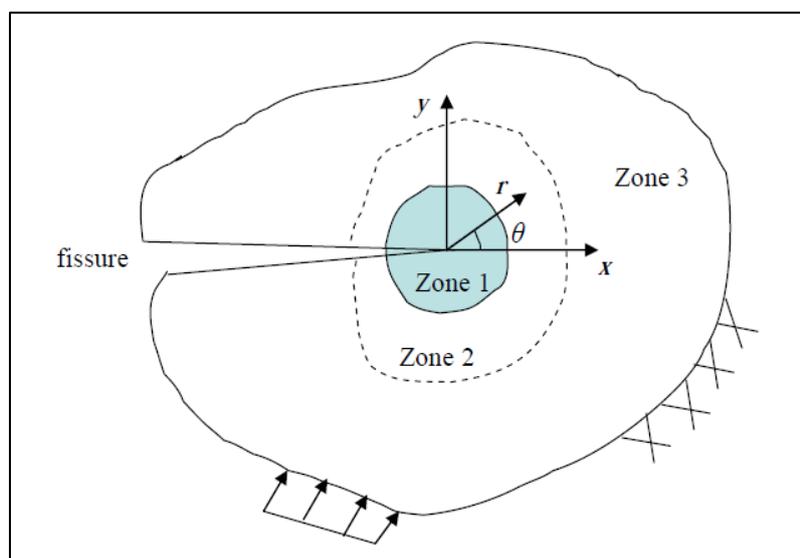


Figure. I.7. Description du milieu fissuré.

1.5.1.1 Zone 1 :

Elle se trouve à la pointe de fissure et dans le sillage laissé par la fissure au cours de sa propagation. L'étude de cette zone est très complexe à cause des contraintes importantes qui ont fortement endommagé le matériau. Elle est discontinue au sens de la mécanique des

Chapitre I Mécanique de la Rupture Contexte de l'étude et État de l'art

solides. La théorie classique de la mécanique de la rupture réduit cette zone à un point pour les problèmes plans et à une courbe pour les problèmes tridimensionnels.

1.5.1.2. Zone 2 :

Dans laquelle les champs de déplacements, déformations et contraintes sont continus et possèdent une formulation indépendante de la géométrie lointaine de la structure. On démontre que dans cette zone, les composantes de champ de contraintes sont infinies au voisinage du front de fissure ($r \rightarrow 0$). Plus exactement, la singularité est en $(1/\sqrt{r})$ en milieu élastique linéaire.

1.5.1.3. Zone 3 :

Cette zone se situe au-delà des deux précédentes, où les champs mécaniques lointains se raccordent avec le chargement et les conditions aux limites.

I.6. Description des Champs de Contrainte et de déplacements aux voisinages d'une fissure :

Les champs de contrainte et de déplacement proche du front de la fissure sont des paramètres nécessaires à connaître. Ces champs gouvernent le processus de la rupture qui a lieu à la pointe de la fissure. Pour cela nous allons faire une étude des contraintes et déplacements au voisinage de la pointe de fissure dans le cas des trois modes de rupture.

Ces contraintes ont été calculées par Westergaard à l'aide de la fonction d'Airy [10] et par Irwin à l'aide de la théorie de l'élasticité [11]. Elles sont exprimées par les relations (1.1) et (1.2), avec les notations de la figure 1.2.

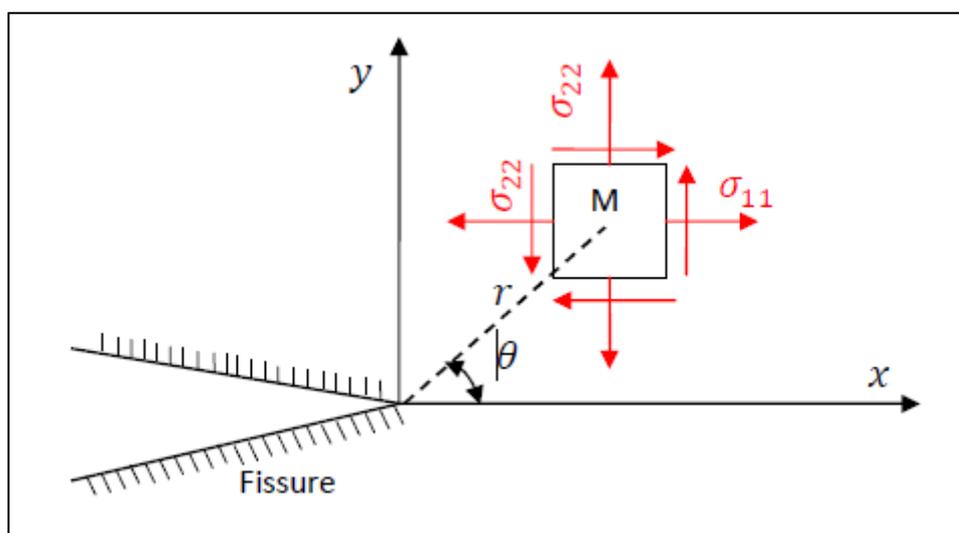


Figure. 1.8. Champ de contraintes au voisinage du bout de fissure

Chapitre I Mécanique de la Rupture Contexte de l'étude et État de l'art

La figure 1.2 schématise les contraintes sur un élément de volume centré sur un point M repéré par les coordonnées polaires r, θ par rapport à l'extrémité d'une fissure sollicitée en mode d'ouverture ou (mode I).

Les contraintes et déplacements au voisinage du front de fissure s'écrivent :

Mode I :

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

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

(I.1)

$$\sigma_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$$

Et

$$u_x = \frac{K_I}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left[(1 - 2\nu) + \sin^2 \frac{3\theta}{2} \right] \text{(I.2)}$$

$$u_y = \frac{K_I}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left[(1 - 2\nu) + \cos^2 \frac{3\theta}{2} \right]$$

La discontinuité ou saut de déplacement $[u_y]$ selon l'axe (oy) est :

$$[u_y] = u_y(r, \pi) - u_y(r, -\pi) = \frac{4K_I}{\mu} (1 - \nu) \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \text{(I.3)}$$

Mode II :

$$\sigma_{xx} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right]$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2}$$

(I.4)

$$\sigma_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right]$$

Et

$$u_x = \frac{K_{II}}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left[2(1 - \nu) + \cos^2 \frac{3\theta}{2} \right]$$

(I.5)

$$u_y = \frac{K_{II}}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left[-(1 - \nu) + \sin^2 \frac{3\theta}{2} \right]$$

La discontinuité ou saut de déplacement $[u_y]$ selon l'axe (ox) est :

$$[u_x] = u_x(r, \pi) - u_x(r, -\pi) = \frac{4K_{II}}{\mu} (1 - \nu) \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \quad (I.6)$$

Mode III :

$$\sigma_{xz} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2}$$

$$\sigma_{xz} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2}$$

(I.7)

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \sigma_{xy} = 0$$

Et

$$u_z = \frac{K_{III}}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2}$$

(I.8)

$$u_x = u_y = 0$$

La discontinuité ou saut de déplacement $[u_z]$ selon l'axe (oz) est :

$$[u_x] = u_x(r, \pi) - u_x(r, -\pi) = \frac{4K_{III}}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \quad (I.9)$$

Avec :

ν : coefficient de Poisson

μ : module de cisaillement, tel que : $\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$

Remarque : On remarque qu'à la pointe de la fissure (i.e. $r \rightarrow 0$), les contraintes sont singulières en $\sqrt{1/r}$ et que les déplacements d'ouverture tendent vers 0 comme \sqrt{r} .

Les facteurs K_I, K_{II} et K_{III} sont appelées les facteurs d'intensité de contraintes et sont exprimées en $MPa\sqrt{m}$. Ces paramètres dépendent uniquement des conditions de chargement et de géométrie.

I.7 Critères de Rupture :

Dans le domaine de l'ingénierie, les critères de rupture jouent un rôle crucial pour prédire la rupture d'un matériau soumis à des contraintes. Ces outils permettent d'estimer la charge maximale que le matériau peut supporter avant de se briser, qu'il s'agisse d'une rupture fragile ou ductile selon son mode de déformation.

La compréhension des critères de rupture est essentielle dans divers domaines, tels que la conception de structures, la mécanique des matériaux et l'analyse de la sécurité des composants. En effet, ils permettent aux ingénieurs d'évaluer la résistance des matériaux et de concevoir des structures capables de résister aux contraintes attendues sans se rompre.

Il existe plusieurs types de critères de rupture, chacun avec ses propres hypothèses et limitations. Le choix du critère approprié dépend de plusieurs facteurs, tels que le type de matériau, le mode de chargement, l'état de surface et l'environnement d'utilisation.

Parmi les critères les plus courants, on trouve le critère de contrainte maximale, le critère de déformation maximale et le critère d'énergie de rupture. Des critères basés sur la mécanique de la rupture prennent également en compte la présence de fissures dans le matériau pour prédire la propagation des fissures et la rupture finale.

L'application des critères de rupture implique l'analyse des contraintes et des déformations dans un matériau sous des charges données. Les résultats de l'analyse sont

ensuite comparés aux valeurs critiques définies par le critère choisi. Si les contraintes ou les déformations dépassent ces valeurs critiques, le matériau risque de se rompre.

Il est important de noter que les critères de rupture sont des modèles simplifiés et ne peuvent pas prédire avec une certitude absolue la rupture d'un matériau. Divers facteurs peuvent influencer le comportement de rupture réelle d'un matériau, tels que les défauts microstructuraux, les effets environnementaux et les interactions entre différents modes de rupture. Une analyse approfondie et des tests expérimentaux sont souvent nécessaires pour évaluer la fiabilité d'une structure ou d'un composant soumis à des contraintes critiques.

En conclusion, les critères de rupture constituent des outils précieux pour prédire la rupture des matériaux, mais ils doivent être utilisés avec prudence et en tenant compte de leurs limites. Une compréhension approfondie des mécanismes de rupture et des propriétés des matériaux est essentielle pour une analyse fiable de la sécurité des structures [12].

1.7.1 Facteur d'intensité de Contrainte :

Intuitivement, il apparaît naturel qu'une perturbation géométrique (fissure) crée, dans son environnement immédiat, une zone où les contraintes induites par les sollicitations extérieures seront modifiées, généralement augmentées. Le facteur multiplicatif local des contraintes que le défaut induit est appelé facteur de concentration de contraintes, noté K_σ , tel que [13] :

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{local}}{\sigma_{global}} \quad (I.10)$$

Où σ_{global} représente le niveau de contraintes en l'absence du défaut au point où il est localisé, ou, ce qui revient au même, hors des perturbations induites par celui-ci, et σ_{local} les contraintes maximales induites localement par la fissure.

Lorsque le rayon de la pointe de fissure tend vers zéro, les contraintes en tête de celle-ci deviennent singulières. La description de cette singularité de contraintes demande de résoudre les équations de l'élasticité en imposant des conditions aux limites correspondant à une coupure dans le plan, la surface de fissure.

Donc, ils peuvent être déterminés si l'on connaît les expressions des composantes non nulles des contraintes et des déplacements. Ces calculs peuvent être menés dans le cas analytique en utilisant la méthode de Westervald [14]. Dans les modèles numériques, il est

plus judicieux d'utiliser les discontinuités de déplacement $[u_i]$. Dans notre cas, nous optons pour le calcul utilisant les sauts de déplacement.

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} (\sigma_{yy} \sqrt{2\pi r}) = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{E}{8(1-\nu^2)} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} [u_y] \right) \quad (\text{I.11})$$

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} (\sigma_{xy} \sqrt{2\pi r}) = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{E}{8(1-\nu^2)} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} [u_x] \right)$$

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} (\sigma_{yz} \sqrt{2\pi r}) = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{E}{8(1-\nu)} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} [u_z] \right)$$

1.7.2. Critère de taux de restitution d'énergie :

Griffith a révolutionné l'approche des corps fissurés en les analysant sous l'angle énergétique. Il a introduit le concept de taux de restitution d'énergie, noté G , qui représente l'énergie requise pour propager la fissure d'une unité de longueur [15]. Ce taux correspond à la diminution de l'énergie potentielle totale W du matériau fissuré lors du passage d'une configuration initiale avec une longueur de fissure a à une configuration finale où la fissure s'allonge de da

$$G = - \frac{dW}{da} \quad (\text{I.12})$$

Où

$$W = W_e + W_{ext} \quad (\text{I.13})$$

Avec

W_{ext} : énergie potentielle des forces extérieures

$$W_E = \int_V W_e dV \quad \text{Énergie de déformation élastique}$$

$$W_E = \int_0^E \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad \text{Densité d'énergie de déformation élastique}$$

Pour une fissure en milieu bidimensionnel, d'épaisseur b , on écrit :

$$G = \frac{1}{b} \frac{dW}{\Delta a} \quad (\text{I.14})$$

Avec Δa , la variation de longueur de fissure.

En utilisant le champ des contraintes dans la zone singulière et la loi de comportement élastique linéaire, on peut relier G aux facteurs d'intensité de contraintes par :

$$G = \frac{(K_I^2 + K_{II}^2)}{E} + \frac{K_{III}^2}{2\mu} \quad (\text{I.15})$$

Avec $E' = E$ en contrainte plane

$E' = E/(1 - \nu^2)$ en déformation plane

G est une valeur négative parce que l'énergie potentielle diminue lors de l'accroissement de la fissure.

1.7.3. Critère de J intégral :

L'étude des intégrales de contour, dérivées de la loi de conservation de l'énergie, offre une approche alternative pour caractériser la singularité du champ de contraintes à proximité de la pointe des fissures. Dans le contexte de la mécanique de la rupture des milieux élastiques linéaires fissurés plans, Rice a introduit en 1968 une intégrale de contour spécifique [16], définie comme suit :

$$J = \int_{\Gamma} \left\{ W_e n_1 - \sigma_{ij} n_j \frac{\partial u_i}{\partial x_1} \right\} ds \quad (\text{I.16})$$

Où W_e est la densité d'énergie de déformation élastique, Γ est un contour ouvert entourant la pointe de la fissure. Celle-ci est supposée rectiligne suivant l'axe de la fissure. On note par \vec{n} la normale extérieure au contour, σ_{ij}, n_j la contrainte appliquée sur le contour et u_i le déplacement correspondant (voir figure 2.4).

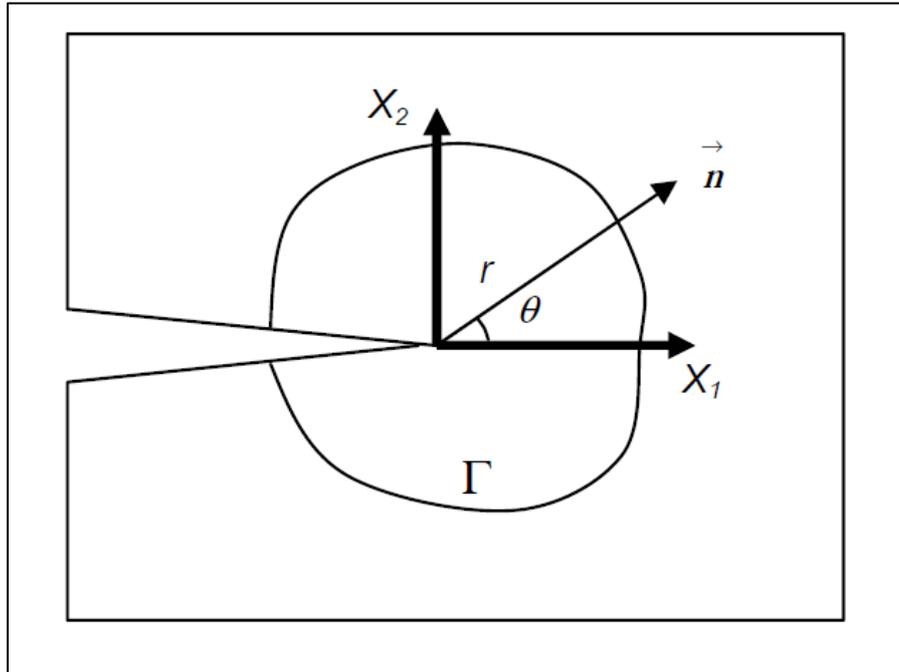


Figure I.9. Contour d'intégration

Rice a proposé une interprétation physique très intéressante de cette propriété. Il a suggéré que l'intégrale J représente la différence d'énergie potentielle (W) entre deux corps fissurés identiques, soumis aux mêmes charges, mais dont les longueurs de fissure diffèrent d'une longueur Δa . ce qui s'exprime par :

$$J = - \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{W(a+\Delta a) - W(a)}{\Delta a} = - \frac{dW}{\Delta a} \quad (\text{I.17})$$

En comparant l'intégrale J , introduite par Rice, au taux de restitution d'énergie G défini par Griffith, on peut établir une relation importante dans le cadre particulier des matériaux élastiques ou des corps subissant une déformation plastique minimale au niveau du fond de fissure, on a :

$$J = G = - \frac{dW}{\Delta a} \quad (\text{I.18})$$

Chapitre II :
Conception et création du
modèle de l'étude

II.1. Introduction :

La simulation numérique s'impose comme un outil indispensable dans de nombreux domaines, permettant de modéliser le comportement de systèmes complexes avec une précision remarquable. Que ce soit pour prédire le comportement de structures avant leur construction, analyser des phénomènes impossibles à observer expérimentalement, ou visualiser des écoulements fluides, la simulation numérique offre un aperçu sans précédent sur le fonctionnement du monde qui nous entoure.

Au cœur de cette technologie se trouve la création d'un modèle mathématique qui représente fidèlement le système étudié. Ce modèle est ensuite implémenté dans un programme informatique capable de le résoudre et de générer des résultats virtuels. L'analyse de ces résultats permet de comprendre le comportement du système et de prendre des décisions éclairées.

La simulation numérique s'avère particulièrement utile dans des domaines comme l'ingénierie, où elle permet de tester des conceptions avant leur réalisation, réduisant ainsi les coûts et les risques. Elle joue également un rôle crucial en physique, en chimie et en biologie, permettant de modéliser des phénomènes à l'échelle atomique et moléculaire.

Cependant, il est important de garder à l'esprit que la simulation numérique n'est qu'un outil, et que ses résultats doivent être interprétés avec prudence. La qualité de la simulation dépend de la précision du modèle mathématique et de la puissance de calcul disponible. Il est donc essentiel de valider les résultats par comparaison avec des données expérimentales.

La simulation numérique s'affirme comme un outil révolutionnaire, ouvrant de nouvelles perspectives dans de nombreux domaines scientifiques et techniques. Sa capacité à modéliser le réel avec une précision croissante nous permet de mieux comprendre le monde et de développer des solutions innovantes pour les défis de demain.

II.2. Définition du logiciel COMSOL Multiphysics:

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique par éléments finis qui permet de modéliser et d'analyser le comportement de systèmes physiques complexes. Il offre un environnement intégré pour la définition du modèle, la résolution et l'analyse des résultats.

Ce travail utilise la version 6.1 du logiciel, qui se distingue par sa puissance de calcul exceptionnelle, permettant ainsi l'analyse de structures complexes.

Une simulation avec COMSOL se déroule selon un schéma commun à la plupart des logiciels de ce type. Elle se décompose en trois étapes principales :

- Pré-traitement
- Calcul
- Post-traitement

L'étape de pré-traitement inclut la description géométrique et physique du domaine de travail, la détermination des conditions aux limites et la discrétisation du domaine sur un maillage. Lorsque le problème est complètement défini, l'étape du calcul est consacrée à la résolution numérique en utilisant les différents solveurs proposés par COMSOL Multiphysics. Finalement, le posttraitement permet de visualiser les résultats et d'exporter les données vers d'autres logiciels de traitement.

II.3. Modélisation par éléments finis de la propagation des fissures :

II.3.1. Définition de méthode des éléments finis :

En mécanique, la MEF est une technique de simulation numérique particulièrement adaptée aux problèmes de propagation de fissures. La fissure étant décrite explicitement par la géométrie, un maillage extrêmement fin doit être employé au voisinage de sa pointe pour prendre en compte les singularités locales [17].

Pour une meilleure représentation du champ singulier à proximité de la pointe de fissure, il est possible d'utiliser des éléments singuliers de type Barsoum [18].

Ces éléments, dotés de nœuds supplémentaires au quart de leurs côtés, permettent d'intégrer précisément la singularité élastique, conduisant ainsi à des résultats plus précis.

II.3.2. Modélisation :

Dans le cadre de la méthode des éléments finis (MEF), la modélisation des fissures exige une attention particulière à leur positionnement précis sur les interfaces entre les mailles, en garantissant que l'extrémité de la fissure coïncide avec un nœud du maillage. En mécanique de la rupture, la zone de concentration de contraintes à proximité de l'extrémité d'une fissure est théoriquement infinie. Bien que cette description puisse soulever des interrogations d'un point de vue physique, elle implique mathématiquement que le champ de déplacement présente une singularité à la base de la fissure.

Le taux de convergence d'une méthode numérique dépend intrinsèquement du degré des fonctions de forme employées et de la régularité de la solution exacte. Il est important de souligner que la présence de cette singularité empêche généralement la MEF d'atteindre son taux de convergence optimal.

Deux approches principales permettent de représenter cette singularité avec une précision accrue :

- **Raffinement du maillage autour de la base de la fissure :** Cette stratégie consiste à augmenter la densité des nœuds dans la zone de la singularité, permettant ainsi une meilleure approximation du champ de déplacement.
- **Utilisation d'un élément spécifique, tel que l'élément de Barsoum :** Cette approche consiste à construire une "boîte à fissure" composée d'un carré contenant huit éléments triangulaires, dont chacun a sa pointe située à la base de la fissure (voir **Figure II.1**).

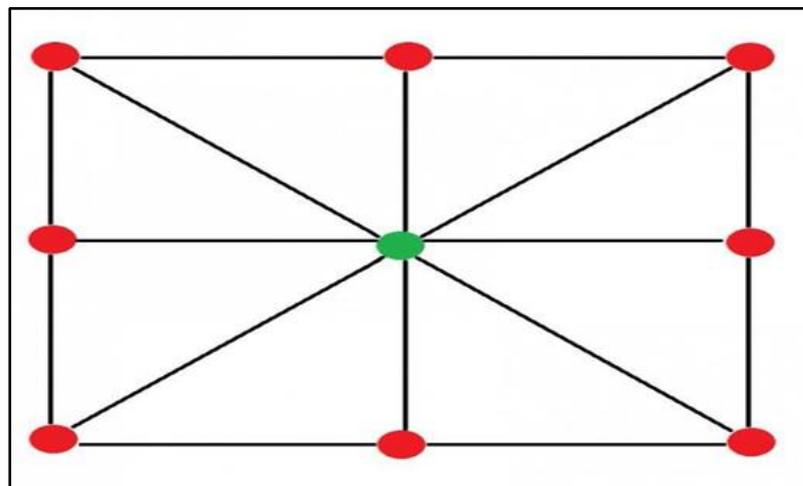


Figure II.1. Boîte à fissure: les 8 éléments ont un sommet sur le fond de fissure.

Pour ces triangles :

- Les fonctions de forme sont choisies pour capturer la singularité mathématiquement.
- L'intégration des équations de la MEF est réalisée numériquement en tenant compte de la singularité.

Le choix de l'approche la plus adaptée dépend de la complexité de la géométrie de la fissure et du niveau de précision requis.

La propagation des fissures dans le cadre de la MEF implique un processus itératif qui comprend les étapes suivantes :

1. Calcul du déplacement du domaine : Cette étape consiste à résoudre les équations de la MEF pour obtenir le champ de déplacement du domaine fissuré.
2. Calcul du taux de restitution d'énergie : Cette étape consiste à évaluer le taux de libération d'énergie de la fissure. Si ce taux dépasse l'énergie de cohésion du matériau, la propagation de la fissure est déclenchée.
3. Propagation de la fissure : Cette étape consiste à mettre à jour la géométrie du domaine en fonction de la propagation de la fissure. Cela implique généralement le remaillage de la zone concernée.
4. Répétition des étapes 1 à 3 : Ce processus est répété jusqu'à ce que la fissure ait atteint sa longueur finale ou que d'autres critères d'arrêt soient satisfaits.

Il est important de noter que le processus de remaillage peut être coûteux et complexe, en particulier pour les géométries fissurées complexes. Des techniques avancées de remaillage, telles que le remaillage adaptatif, peuvent être nécessaires pour assurer l'efficacité et la précision de la simulation.

II.4. Introduction sur le matériau d'étude :

Les propriétés intrinsèques de matériau utilisé sont comme suit :

$$E=65\text{GPa},$$

$$\nu = 0.31$$

II.5. Définition du modèle :

La conception de la géométrie pour notre modèle de l'étude consiste en une éprouvette en 2D conçue par le logiciel **COMSOL Multiphysics (6.1)**

Une plaque de largeur $w = 30 \text{ mm}$ et de hauteur $h = 130 \text{ mm}$ avec une épaisseur $T_h = 1.4 \text{ mm}$ présente une seule fissure de bord horizontale au milieu du bord vertical gauche. La longueur de la fissure varie de $X_a = 10 \text{ mm}$ à $X_a = 20 \text{ mm}$, voir (Figure II.2.). La plaque est soumise à une force de traction uniaxiale appliquée uniformément sur sa surface supérieure et inférieure.

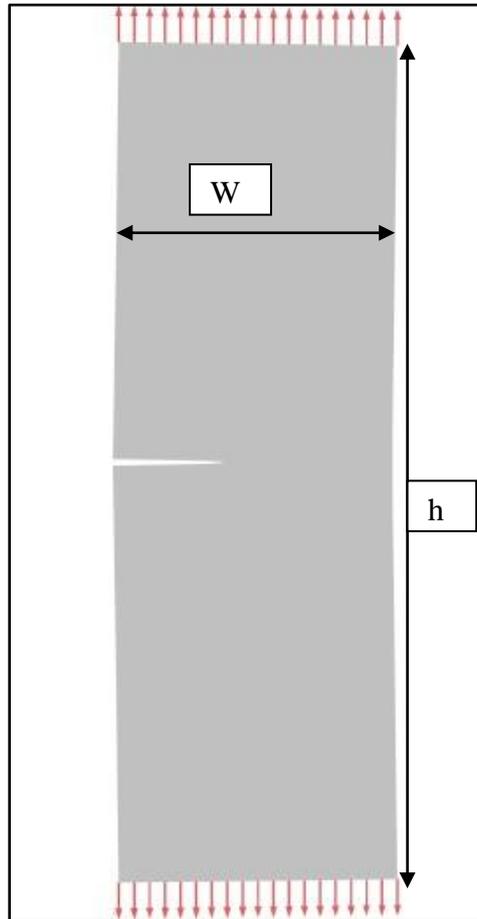


Figure II.2. Géométrie et chargement de la plaque

Cette recherche approfondie s'est attachée à analyser le comportement mécanique lié à la propagation des fissures dans une plaque soumise à des sollicitations mécaniques. L'objectif principal visait à élucider l'influence de deux paramètres clés sur ce phénomène : la taille initiale de la fissure, notée ' X_a ', et l'angle d'orientation de la fissure, représenté par le paramètre ' β '. Pour ce faire, deux modes de rupture distincts ont été considérés : le **mode I** pur et le **mode mixte (mode I + mode II)**.

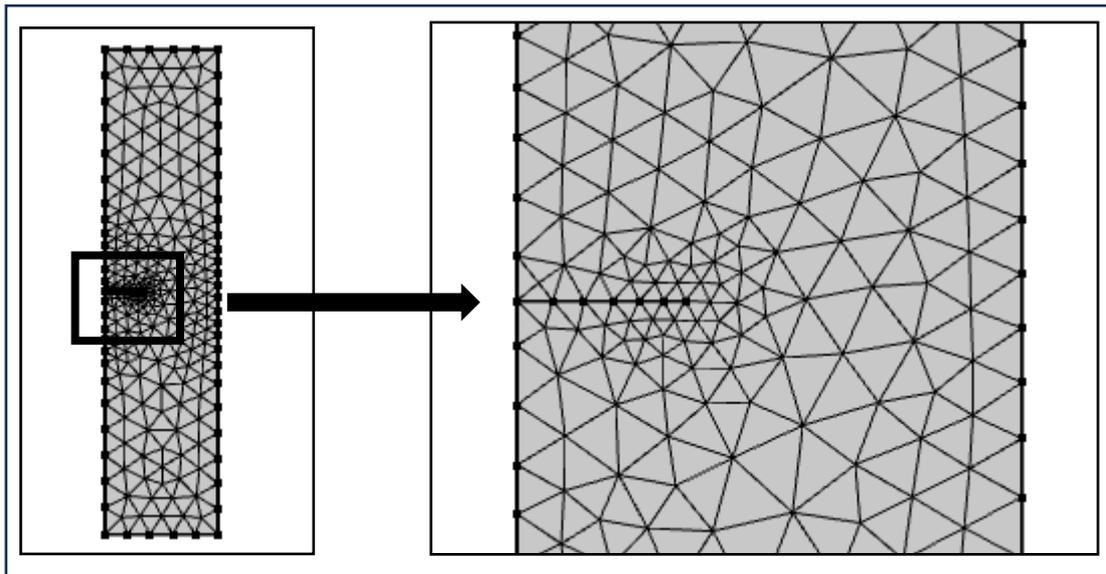
II.6. Chargement :

Les bords subissent une contrainte de traction, σ , de **20 MPa**.

II.7. Maillage :

L'impact de la déformation sur la singularité de la fissure s'avère tributaire de l'amplitude de la déformation appliquée. En présence de faibles déformations, la singularité de la fissure se limite à une zone restreinte adjacente à la source de la fissure. Cette observation met en exergue la nécessité d'une précision accrue lors des manipulations à proximité du point de fissure.

Pour cette simulation, nous avons appliqué un maillage avec des éléments triangulaire fin à proximité de la fissure et un maillage grossier pour la totalité de la géométrie restante comme montre la figure suivante.



FigureII.3. Maillage appliqué dans la simulation.

Chapitre III :

Résultats et discussions

III.1 Résultats et discussions mode I pure :

III.1.1. Analyse comparative des contraintes de von Mises

Analyse comparative des contraintes de von Mises autour d'entailles de différentes tailles

La **figure III.1** illustre la distribution des contraintes de von Mises dans une plaque présentant une fissure. Cette analyse met en lumière un phénomène crucial en mécanique des matériaux : la concentration des contraintes de von Mises.

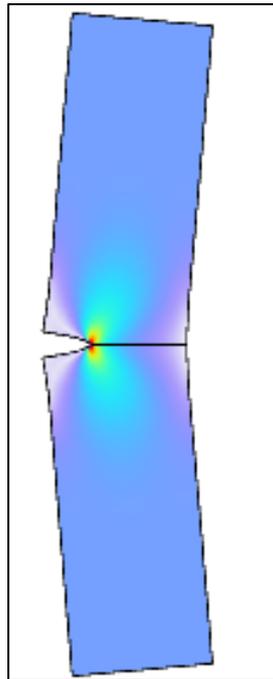


Figure III.1. La distribution des contraintes de von Mises dans une plaque présentant une fissure

La longueur de la fissure varie de $X_a = 10$ mm à $X_a = 20$ mm et pour $\beta=0$ (mode I pure).

Les trois figures (**III.2.** **III.3.** **III.4.**) illustrent la distribution de la contrainte de von Mises autour d'entailles de tailles différentes (10mm, 15 mm, et 20 mm). Chaque image montre comment la contrainte se répartit sur une surface soumise à une charge uniforme.

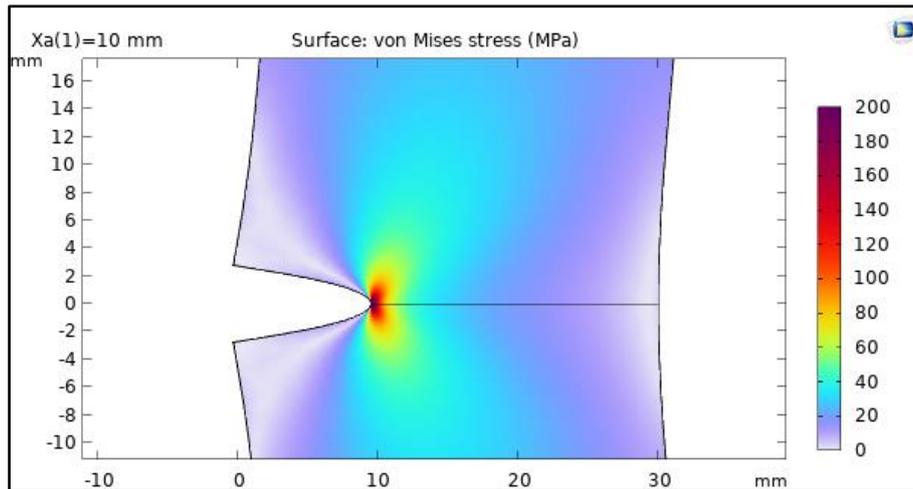


Figure III.2. La distribution des contraintes de von Mises taille de fissure $X_a=10$ mm

On observe dans cette figure une entaille de 10 mm de largeur. Les contraintes se concentrent surtout autour de l'extrémité de l'entaille, atteignant un maximum d'environ 200 MPa. Cependant, le gradient de contrainte est plutôt faible, ce qui signifie que les contraintes se répartissent de manière relativement uniforme autour de l'entaille. Cette configuration entraîne une concentration des contraintes moins importante, réduisant ainsi le risque de rupture dans cette zone.

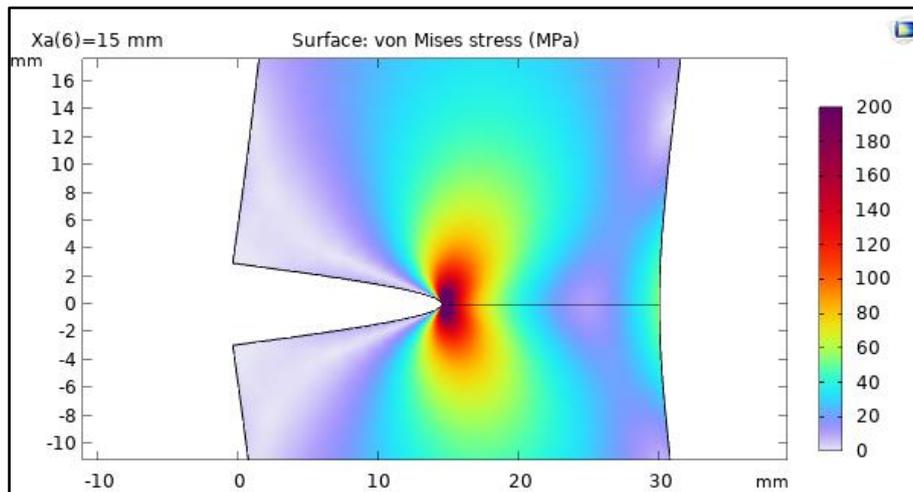


Figure III.3. La distribution des contraintes de von Mises taille de fissure $X_a=15$ mm

La Figure présente une analyse approfondie de la distribution des contraintes dans une pièce présentant une entaille de 1mm. On observe une concentration de contraintes significative au niveau de l'extrémité de l'entaille, matérialisée par une zone rouge vif. La valeur maximale de la contrainte atteint 160 MPa, ce qui représente une augmentation notable par rapport au cas de l'entaille de 10 mm. Cette concentration de contraintes s'accompagne

d'un gradient de contrainte prononcé, illustré par le changement rapide de couleur du rouge vers le bleu en s'éloignant de l'entaille.

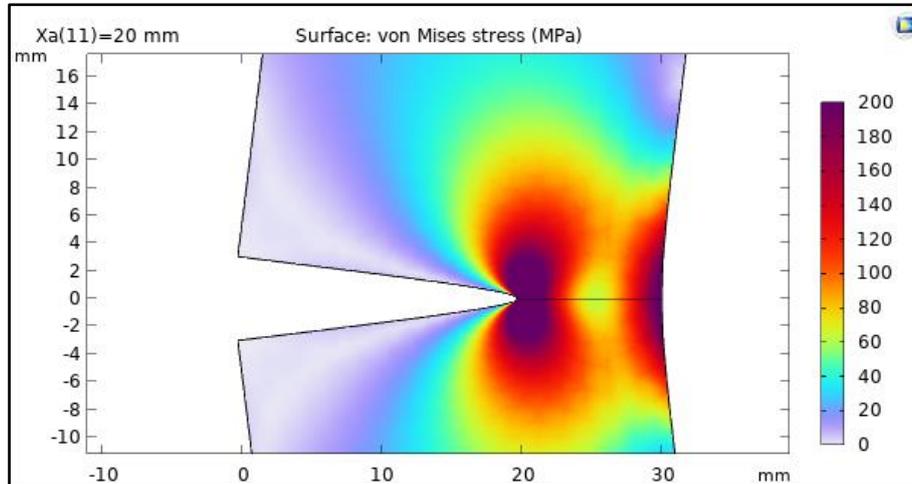


Figure III.4. La distribution des contraintes de von Mises taille de fissure $X_a=20\text{mm}$

On observe une entaille de 20 mm sur la pièce. La tension maximale autour de l'entaille est d'environ 180 MPa, ce qui est beaucoup plus élevé que dans les autres cas. De plus, la variation de la tension est très rapide à cet endroit, ce qui crée une concentration de contraintes importante.

Comparaison et Interprétation

Les figures présentées illustrent clairement l'impact de la dimension de l'entaille sur la répartition des contraintes de von Mises. Une entaille de taille réduite (10 mm) induit une distribution de contraintes plus homogène, minimisant la concentration et le risque de rupture locale. En revanche, l'augmentation de la dimension de l'entaille (15 mm et 20 mm) s'accompagne d'une concentration croissante des contraintes, avec des pics de contrainte plus élevés et des gradients de contrainte plus marqués. Cette observation suggère que des entailles plus larges présentent une plus grande susceptibilité à l'apparition de ruptures locales sous des charges comparables.

III.1.2. Analyse comparative des facteurs d'intensité de J-intégrale

Les trois figures (III.5. III.6. III.7.) montrent les contours de J-intégrale autour d'entailles de tailles différentes (10 mm, 15 mm, et 20 mm). La J-intégrale est une mesure de

la libération d'énergie élastique associée à la croissance de la fissure et est souvent utilisée pour évaluer la résistance à la fracture des matériaux.

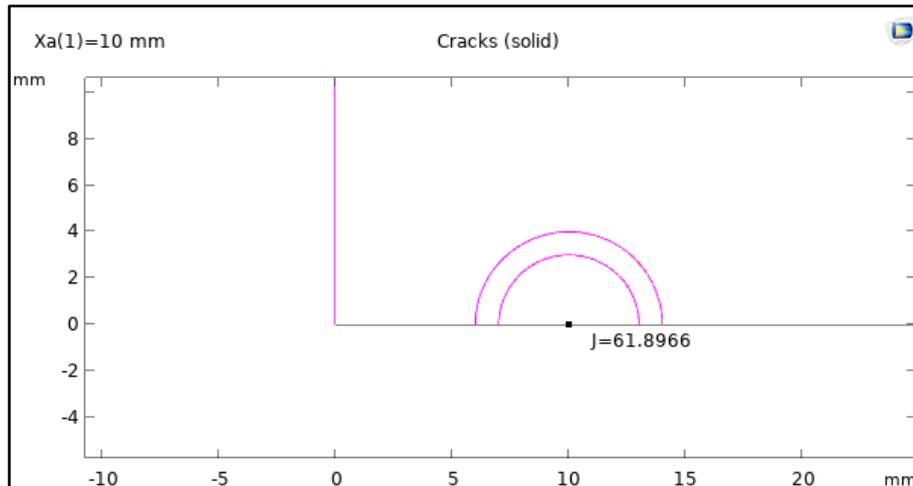


Figure III.5. L'intégrale J autour d'une fissure en taille (10 mm)

Cette figure présente une entaille de 10 mm de largeur et sa valeur associée de l'intégrale J, $J = 61,8966$. On observe une concentration de l'intégrale J autour de l'extrémité de l'entaille, comme le montrent les contours. Cependant, cette concentration est moins intense que dans les cas d'entailles plus larges.

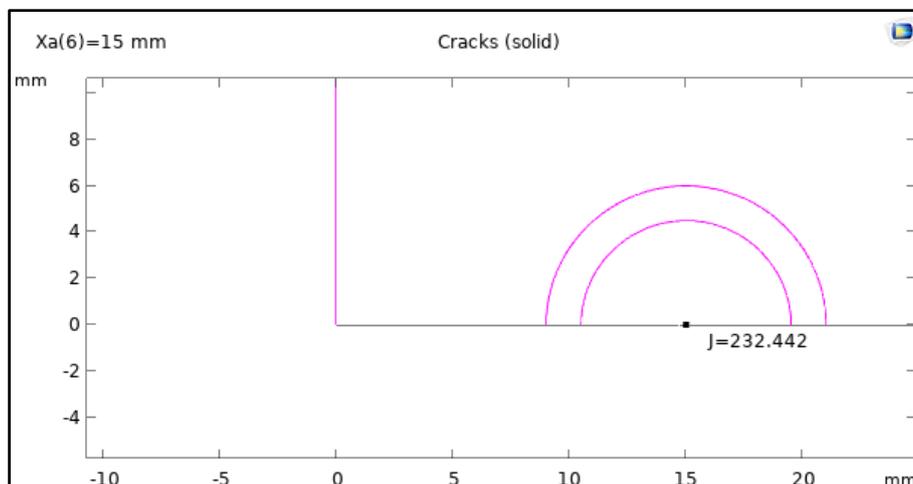


Figure III.6. L'intégrale J autour d'une fissure en taille (15 mm)

La deuxième figure représente une entaille de 15 mm. La valeur de la J-intégrale est $J = 232,442$. Les contours montrent une concentration plus prononcée de la J-intégrale autour de l'extrémité de l'entaille par rapport à l'entaille de 10 mm. L'augmentation de la taille de

l'entaille double presque la valeur de la J-intégrale, ce qui suggère une libération d'énergie élastique plus élevée et donc une résistance à la fracture réduite par rapport à l'entaille plus petite.

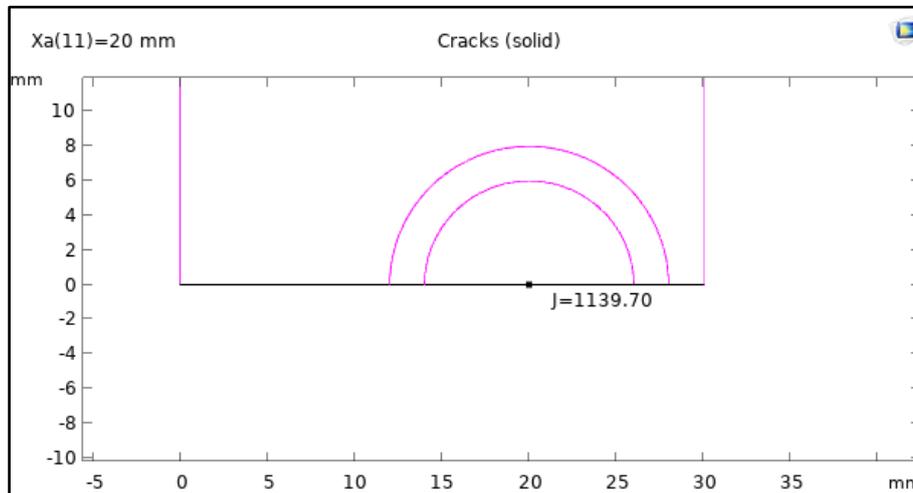


Figure III.7. L'intégrale J autour d'une fissure en taille (20 mm)

Dans figure (III.7.) On observe une entaille de 20mm. Parmi les trois configurations analysées, c'est pour cette dernière que la valeur de l'intégrale J est la plus élevée, atteignant 1139,70. La distribution de l'intégrale J montre une concentration importante autour de l'extrémité de l'entaille. Cette valeur élevée d'intégrale J indique une libération d'énergie élastique maximale, ce qui signifie que la résistance à la fracture est la plus faible pour cette taille d'entaille particulière.

Comparaison et interprétation :

L'impact de la taille de l'entaille sur la J-intégrale est clairement visible dans ces figures. Une entaille plus petite (10 mm) entraîne une libération d'énergie élastique moindre, indiquant une résistance à la fracture relativement plus élevée. À mesure que la taille de l'entaille augmente (15 mm et 20 mm), la valeur de la J-intégrale augmente également, avec des pics de J-intégrale de plus en plus élevés et des contours plus concentrés autour de l'entaille. Cela suggère que les entailles plus larges sont plus susceptibles de provoquer des défaillances par fracture sous des charges similaires en raison de la libération d'énergie élastique plus élevée.

III.1.3. Taux de libération d'énergie en fonction de la longueur de la fissure

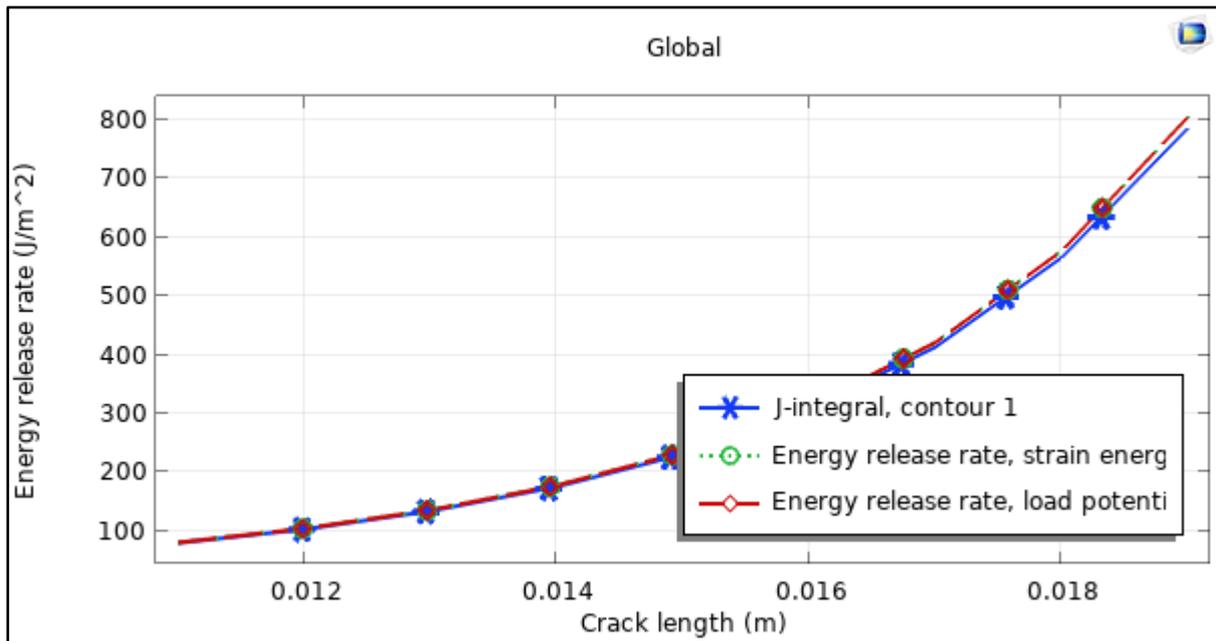


Figure III.8. Taux de libération d'énergie en fonction de la longueur de la fissure

La figure (III.8.) illustre la relation entre le taux de libération d'énergie et la longueur de la fissure. Trois méthodes de calcul sont comparées : la J-intégrale (contour 1), le taux de libération d'énergie basé sur l'énergie de déformation, et le taux de libération d'énergie calculé à partir du potentiel de charge.

➤ J-intégrale (Contour 1)

Représentée par des étoiles bleues, la courbe de la J-intégrale montre comment cette mesure évolue avec l'augmentation de la longueur de la fissure.

➤ Le taux de libération d'énergie basé sur l'énergie de déformation

La courbe verte en pointillés, représentée par des cercles, montre le taux de libération d'énergie calculé à partir de l'énergie de déformation.

➤ Le taux de libération d'énergie calculé à partir du potentiel de charge

Représentée par une ligne rouge continue

III.1.3.1. Comparaison des méthodes

Les trois courbes montrent une tendance linéaire similaire, suggérant que la taille de la fissure influence directement le taux de libération d'énergie, indépendamment de la méthode de calcul utilisée. Les valeurs obtenues par la J-intégrale, l'énergie de déformation, et le potentiel de charge sont très proches les unes des autres.

III.1.4. Interprétation du taux de croissance de la fissure en fonction de la taille de la fissure.

La figure (III.9.) montre la relation entre la taille de la fissure et le taux de croissance de la fissure par cycle (m/cycle)

La courbe montre une relation quasi-linéaire entre la longueur de la fissure et le taux de croissance de la fissure. À mesure que la longueur de la fissure augmente, le taux de croissance de la fissure augmente également de manière presque proportionnelle.

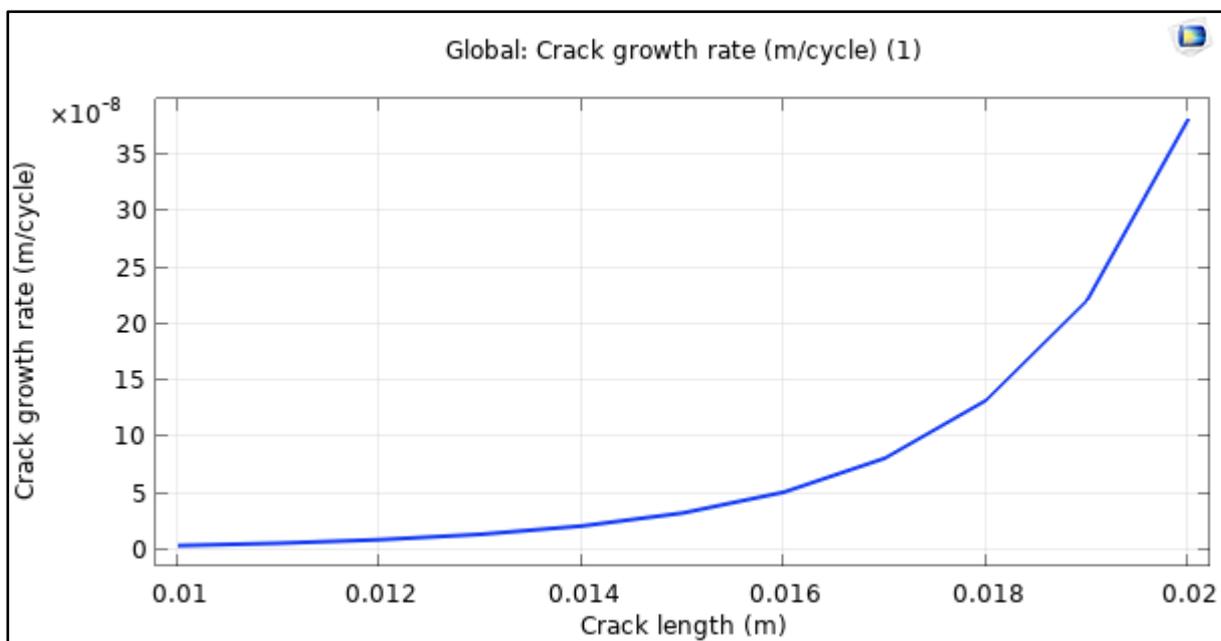


Figure III.9. Le taux de croissance de la fissure en fonction de la taille de la fissure

III.2 Résultats et discussions mode mixte :

III.2.1. Analyse comparative des contraintes de von Mises

III.2.1.1. Analyse comparative des contraintes de von Mises Pour $X_a=0.5\text{mm}$

La figure III.10 présentée montrent la distribution des contraintes de von Mises autour d'une fissure en taille ($X_a=10$) mm pour différents angles d'orientation de fissure (45° , 60° , 70.5°). Cette analyse permet de visualiser comment les contraintes se concentrent autour de l'extrémité de la fissure et comment elles varient en fonction de la taille et de l'angle de la fissure.

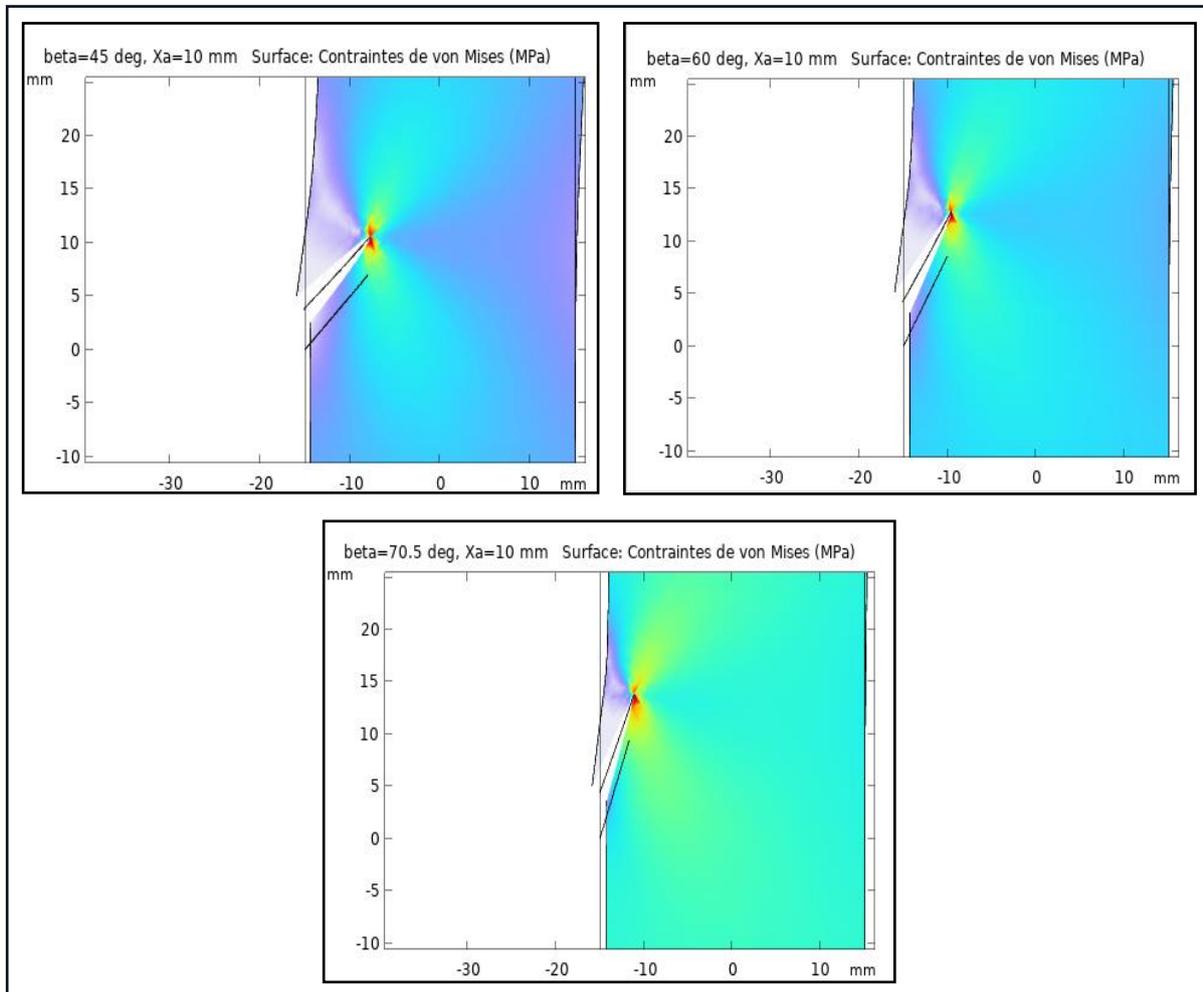


Figure III.10. La distribution des contraintes de von Mises autour d'une fissure en taille ($X_a=10$) mm pour différents angles (45° , 60° , 70.5°).

III.2.1.2. Analyse comparative des contraintes de von Mises Pour $\beta=45^\circ$

Pour une fissure de 10 mm à 45° , la concentration maximale des contraintes de von Mises est d'environ 140 MPa. La distribution des contraintes est symétrique par rapport à l'axe de la fissure, formant une zone en forme de "papillon" autour de l'extrémité de la fissure. Cette forte concentration de contraintes indique une zone critique pour la propagation de la fissure.

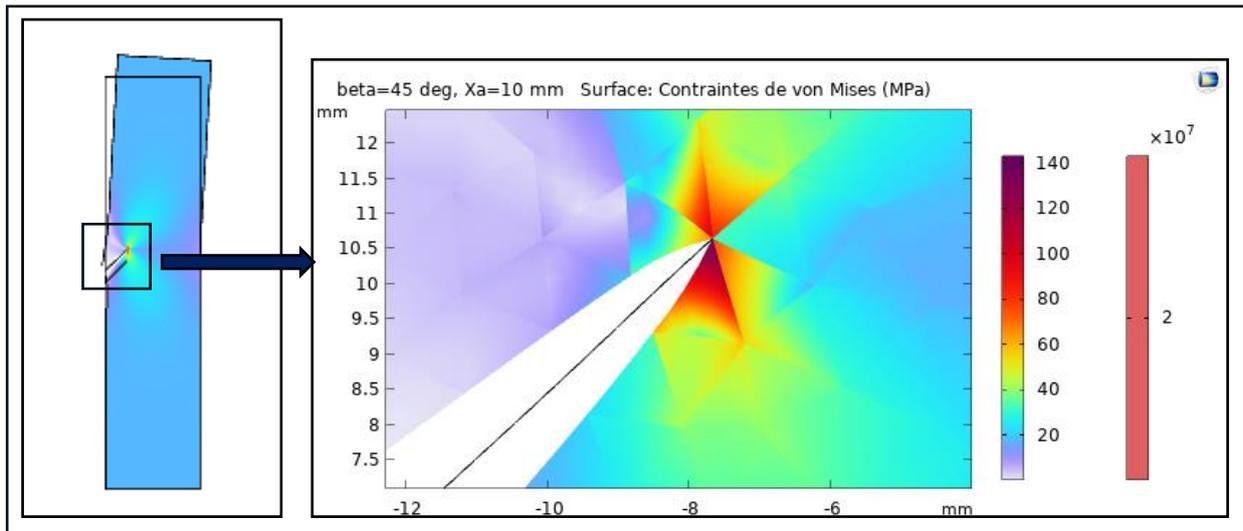


Figure III.11. La concentration de contraintes d'une fissure en taille $X_a=10\text{mm}$ et $\beta=45^\circ$

III.2.1.3. Analyse comparative des contraintes de von Mises Pour $\beta=60^\circ$

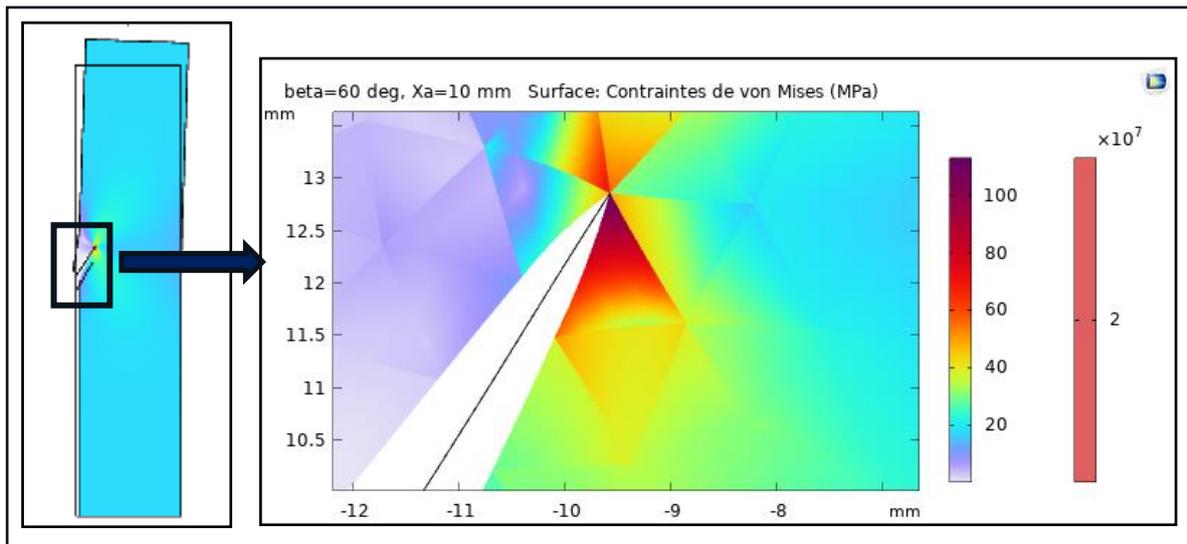


Figure III.12. la concentration de contraintes d'une fissure en taille $X_a=10\text{mm}$ et $\beta=60^\circ$

Pour cet angle, la distribution des contraintes est similaire à celle observée à 45° , mais la concentration maximale est légèrement inférieure, atteignant environ 100 MPa. Les zones de contrainte élevée s'étendent de manière similaire, indiquant que l'angle de 60° favorise une répartition des contraintes légèrement différente.

III.2.1.4. Analyse comparative des contraintes de von Mises Pour $\beta = 70.5^\circ$

Avec un angle de 70.5° , la concentration maximale des contraintes diminue encore à environ 80 MPa. La distribution des contraintes est plus dispersée, montrant que des angles plus grands réduisent les concentrations maximales de contrainte autour de la fissure.

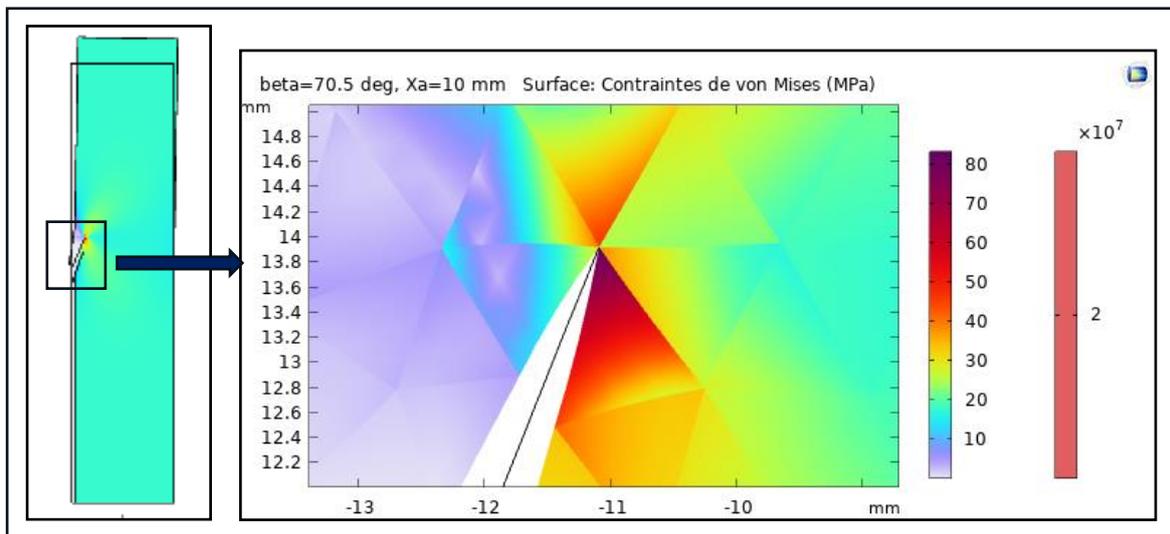


Figure III.13. la concentration de contraintes d'une fissure en taille $X_a=10\text{mm}$ et $\beta=70.5^\circ$

III.2.1.5. Analyse comparative des contraintes de von Mises Pour $X_a=15\text{mm}$

La figure (III.14.) montre la distribution des contraintes de von Mises autour d'une fissure de 15 mm pour différents angles d'orientation (45° , 60° , 70.5°). Cette analyse permet de visualiser la concentration des contraintes à l'extrémité de la fissure et de comprendre comment elles varient en fonction de la taille et de l'angle de la fissure.

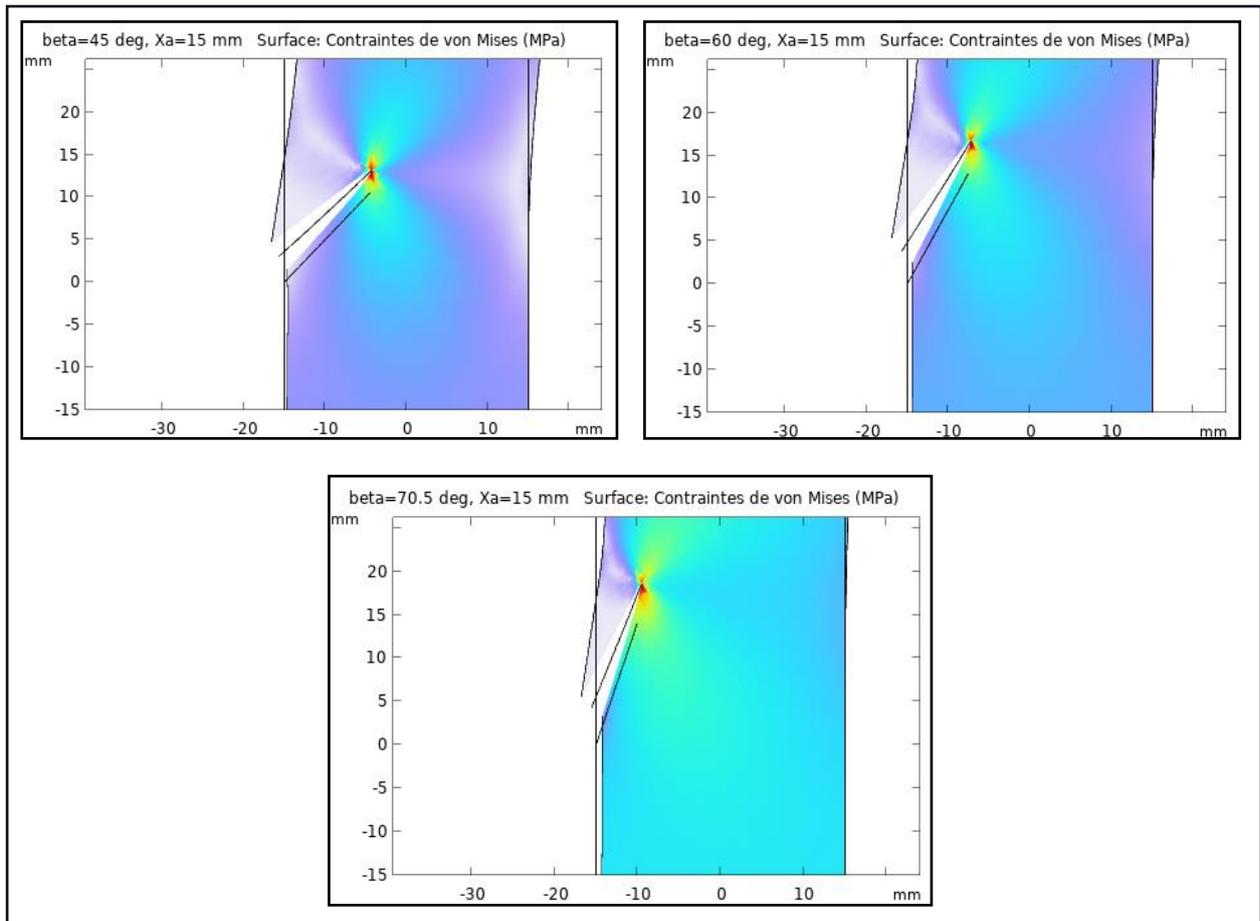


Figure III.14. La distribution des contraintes de von Mises autour d'une fissure de 15 mm pour différents angles (45° , 60° , 70.5°).

III.2.1.6. Analyse comparative des contraintes de von Mises Pour $\beta = 45^\circ$

Pour une fissure de 15 mm à 45° , la concentration des contraintes de von Mises atteint environ 200 MPa, montrant une augmentation significative par rapport à la fissure de 10 mm. La distribution des contraintes est similaire, mais avec des valeurs maximales beaucoup plus élevées, indiquant une zone de propagation de la fissure plus critique.

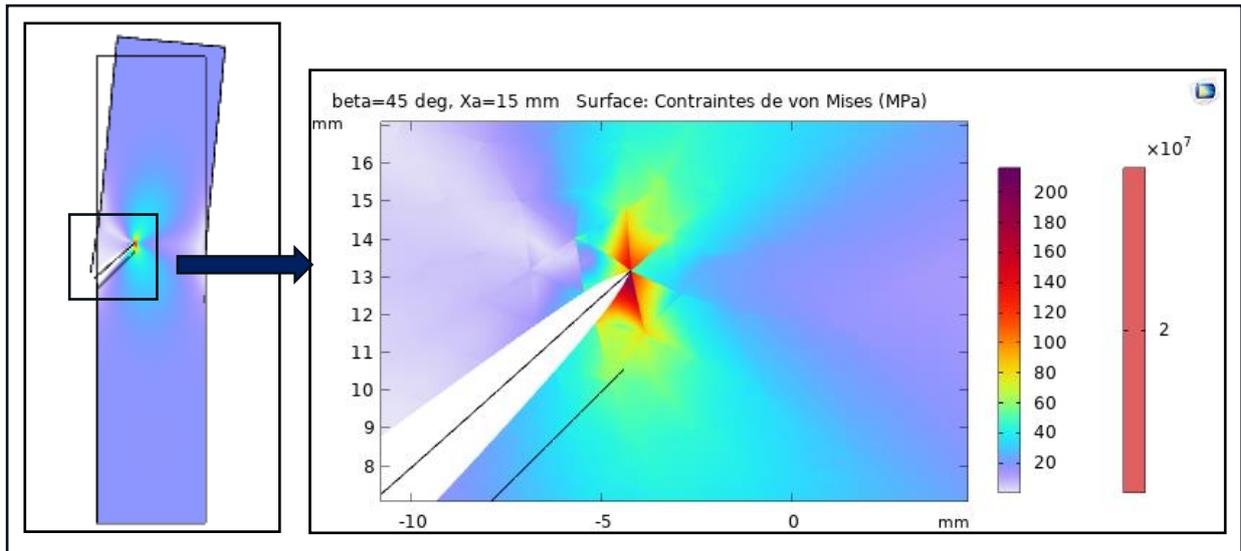


Figure III.15. La concentration de contraintes d'une fissure en taille $X_a=15\text{mm}$ et $\beta=45^\circ$

III.2.1.7. Analyse comparative des contraintes de von Mises Pour $\beta = 60^\circ$

À un angle de 60° , la concentration maximale des contraintes est d'environ 140 MPa. La répartition des contraintes est similaire à celle observée à 45° , mais avec une légère réduction des valeurs maximales.

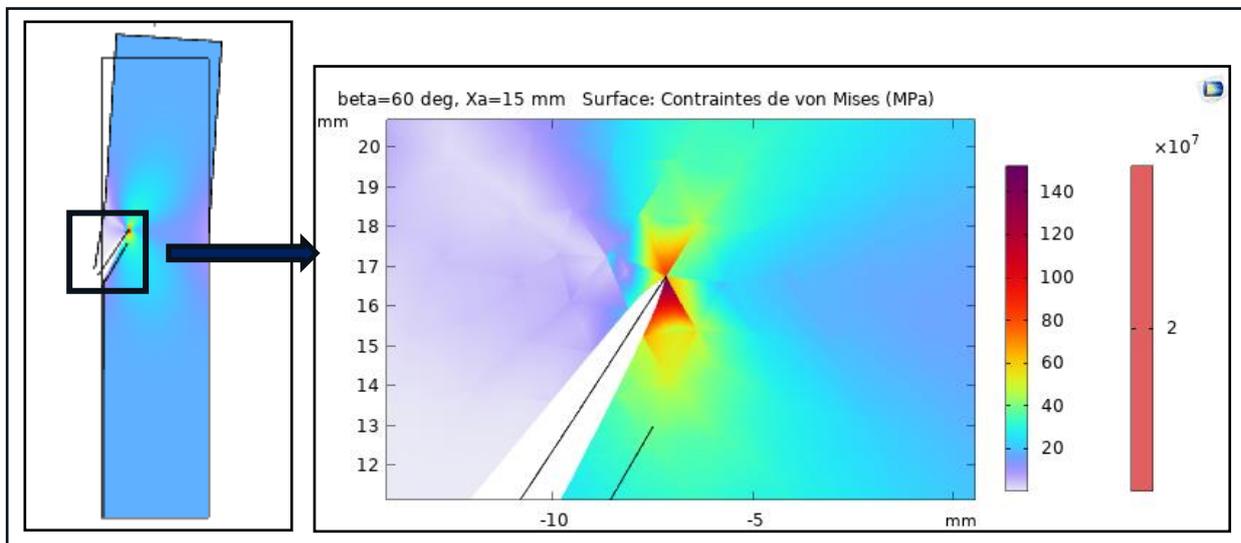


Figure III.16. La concentration de contraintes d'une fissure en taille $X_a=15\text{mm}$ et $\beta=60^\circ$

III.2.1.8. Analyse comparative des contraintes de von Mises Pour $\beta = 70.5^\circ$

Pour un angle de 70.5° , la concentration maximale des contraintes est d'environ 100 MPa, montrant une diminution plus marquée par rapport aux angles plus petits. La distribution des contraintes est plus large et moins intense.

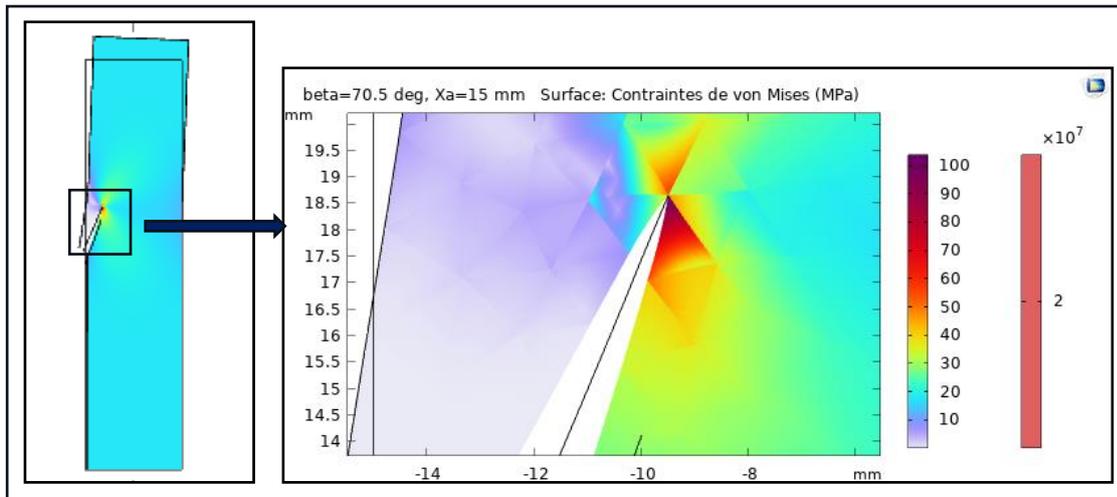


Figure III.17. la concentration de contraintes d'une fissure en taille $X_a=15\text{mm}$ et $\beta=70.5^\circ$

III.2.1.9. Analyse comparative des contraintes de von Mises Pour $X_a=20\text{ mm}$

La figure montre la concentration des contraintes de von Mises autour d'une fissure de 20 mm pour différents angles d'orientation (45° , 60° , 70.5°)

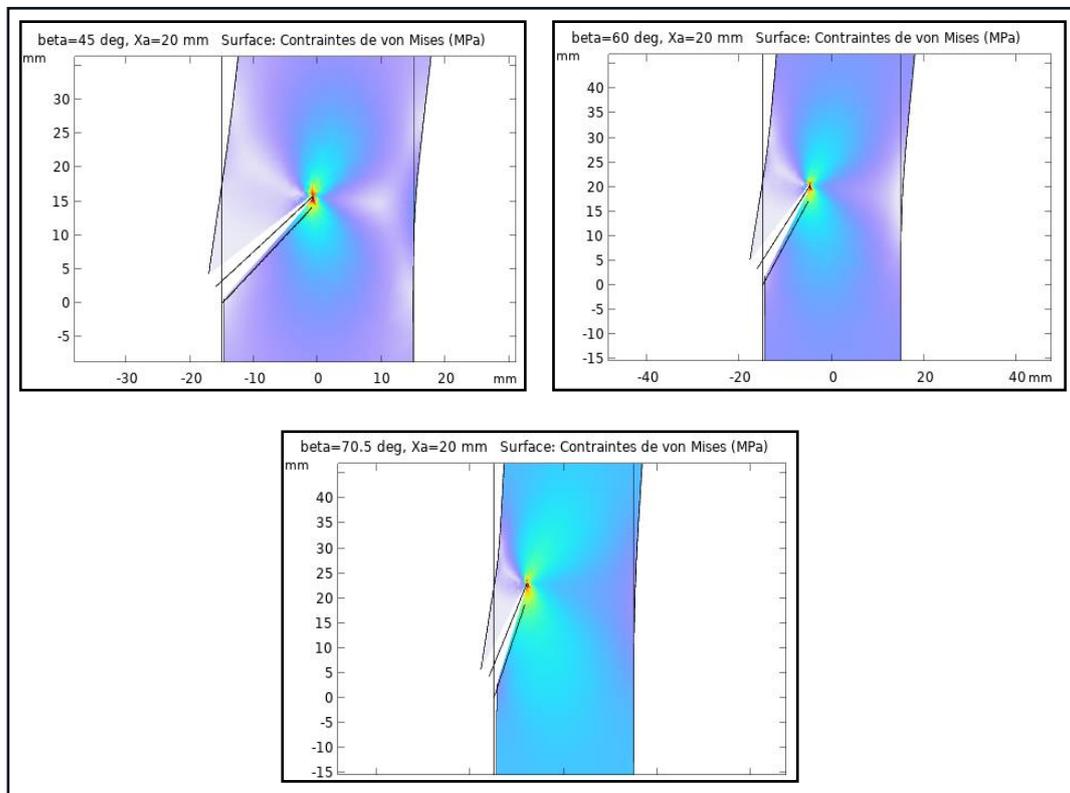


Figure III.18. La concentration des contraintes de von Mises autour d'une fissure de 20 mm pour différents angles d'orientation (45° , 60° , 70.5°).

III.2.1.10. Analyse comparative des contraintes de von Mises Pour Pour $\beta = 45^\circ$

Avec une fissure de 20 mm à 45° , la concentration des contraintes de von Mises atteint environ 300 MPa, indiquant une concentration extrêmement élevée et une zone très critique pour la propagation de la fissure.

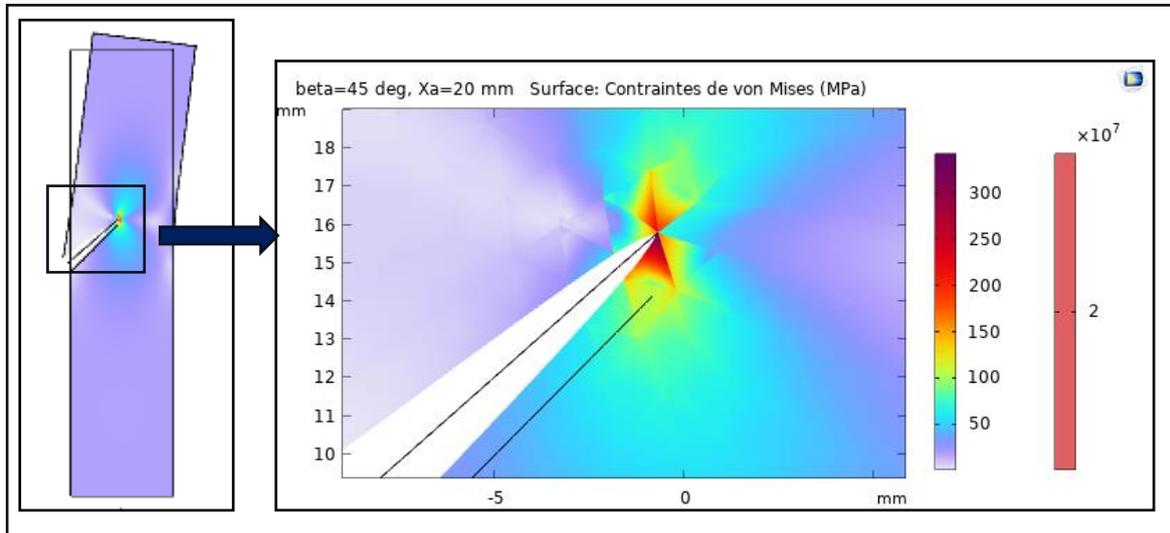


Figure III.19. la concentration de contraintes d'une fissure en taille $X_a=20\text{mm}$ et $\beta=45^\circ$

III.2.1.11. Analyse comparative des contraintes de von Mises Pour Pour $\beta = 60^\circ$

À cet angle, la concentration maximale des contraintes est d'environ 200 MPa. La répartition des contraintes est similaire à celle des fissures plus petites, mais avec des valeurs maximales plus élevées.

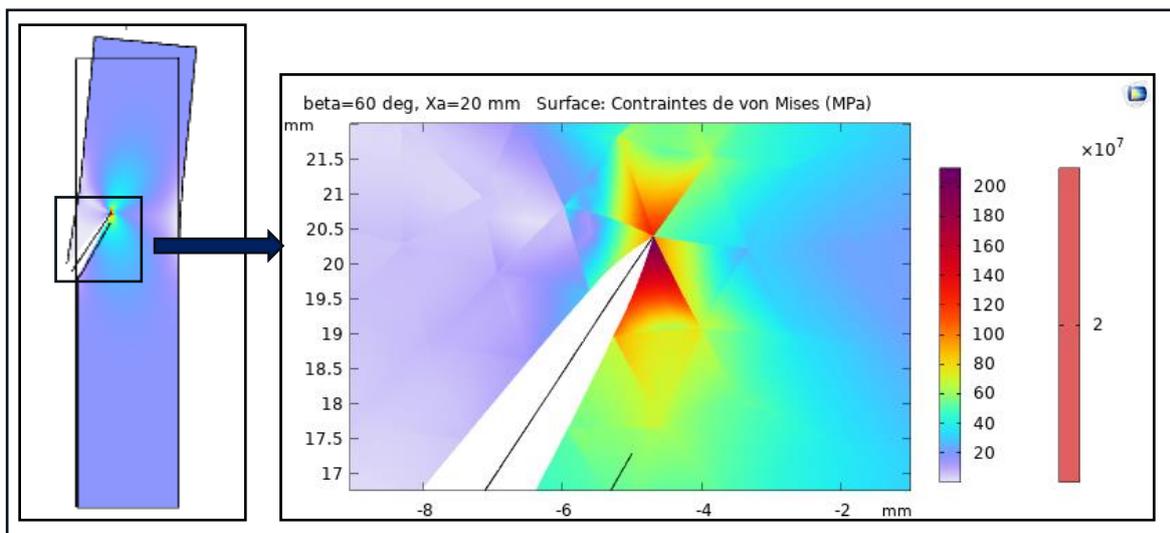


Figure III.20. la concentration de contraintes d'une fissure en taille $X_a=1.5\text{mm}$ et $\beta=60^\circ$

III.2.1.12. Analyse comparative des contraintes de von Mises Pour Pour $\beta = 70.5^\circ$

Pour un angle de 70.5° , la concentration maximale des contraintes est d'environ 120 MPa. La distribution des contraintes est plus large et moins intense, similaire à celle observée pour les fissures plus petites à cet angle.

En résumé, la taille de la fissure a un impact significatif sur la concentration des contraintes de von Mises, avec des fissures plus grandes montrant des concentrations de contraintes plus élevées. De plus, l'angle de la fissure influence la répartition des contraintes, avec des angles plus petits (45°) conduisant à des concentrations plus élevées, tandis que des angles plus grands (70.5°) dispersent davantage les contraintes. Cette analyse est cruciale pour comprendre les mécanismes de défaillance des matériaux et pour développer des stratégies de conception visant à améliorer la durabilité et la résistance des structures soumises à des charges mécaniques.

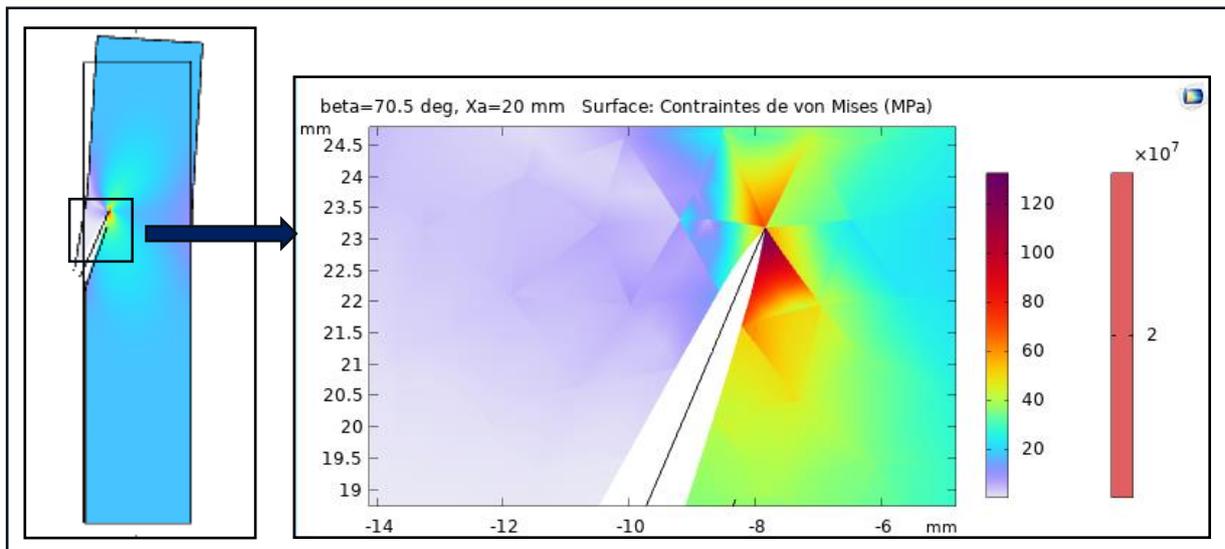


Figure III.21. la concentration de contraintes d'une fissure en taille $X_a=20\text{mm}$ et $\beta=70.5^\circ$

III.2.2. Analyse comparative des facteurs d'intensité de J-intégrale

La figure ci-dessus présente l'intégrale J autour d'une fissure en taille (10 mm) pour différents angles d'orientation de fissure (45° , 60° , 70.5°). L'intégrale J est une mesure critique de l'énergie libérée par unité de surface de fissure propagée, offrant une compréhension du comportement de propagation de la fissure dans un matériau.

Pour une fissure de 20 mm, nous observons que l'intégrale J augmente avec l'angle d'orientation. À 45° , J est de (182,104), à 60° , il diminue à (74,9820), et à $70,5^\circ$, il est encore plus bas à (J= 32,0937). Cela indique que la résistance à la propagation de la fissure est la plus faible à un angle de 45° et augmente avec l'angle.

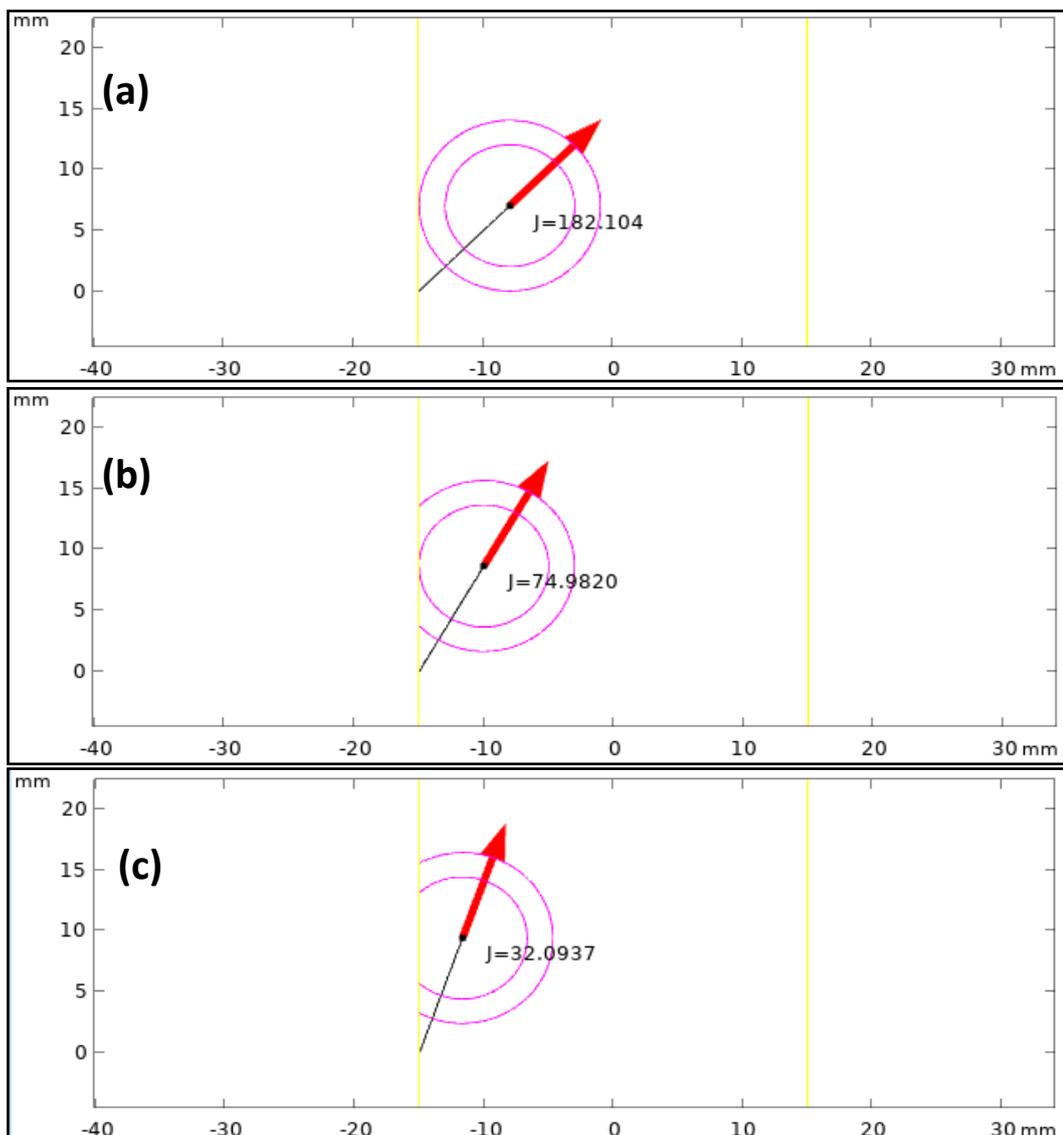


Figure III.22. l'intégrale J autour d'une fissure en taille (10 mm) pour différents angles (45° , 60° , 70.5°).

III.2.2.1. Analyse comparative des facteurs d'intensité de J-intégrale Pour $X_a= 15$ mm

La figure ci-dessus présentent l'intégrale J autour d'une fissure en taille (15 mm) pour différents angles d'orientation de fissure (45° , 60° , 70.5°).

Pour une fissure de 15 mm, l'intégrale J suit une tendance similaire. À 45° , J est de(460,246), à 60° , il est de (154,974), et à 70.5° , il est de(57,6574). L'intégrale J est plus élevée pour une fissure de 15 mm que pour une fissure de 10 mm, montrant une concentration de contraintes plus importante pour des fissures plus grandes.

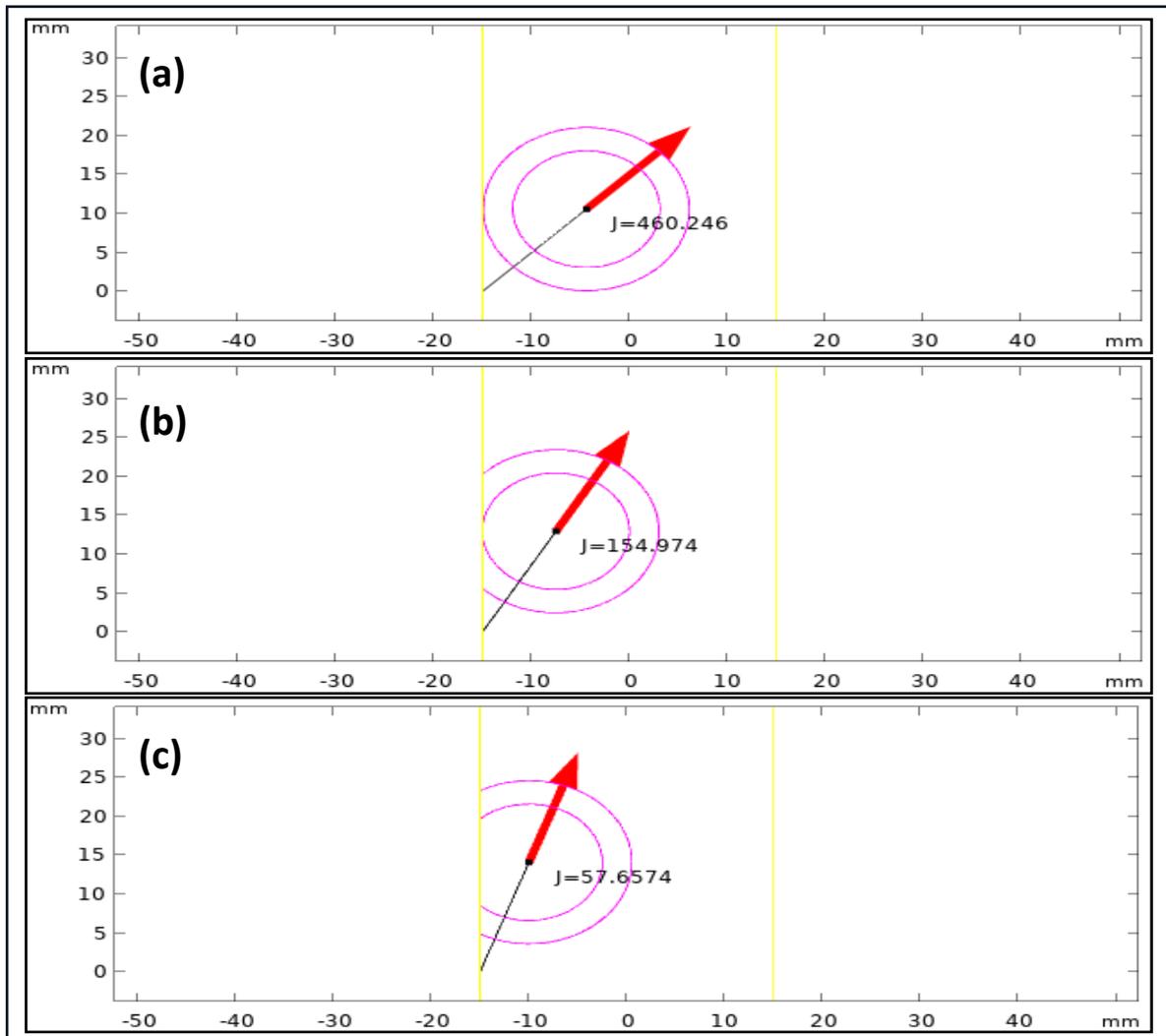


Figure III.23. L'intégrale J autour d'une fissure en taille (15 mm) pour différents angles (45° , 60° , 70.5°).

III.2.2.2. Analyse comparative des facteurs d'intensité de J-intégrale Pour $X_a=20$ mm

Les figures présentées montrent les vecteurs du facteur d'intensité de contrainte J pour une fissure en taille 20 mm à différents angles β .

Pour une fissure de 20 mm, les valeurs de l'intégrale J sont encore plus élevées. À 45° , J est de (1175,57), à 60° , il est de (301,395), et à $70,5^\circ$, il est de (94,4930).

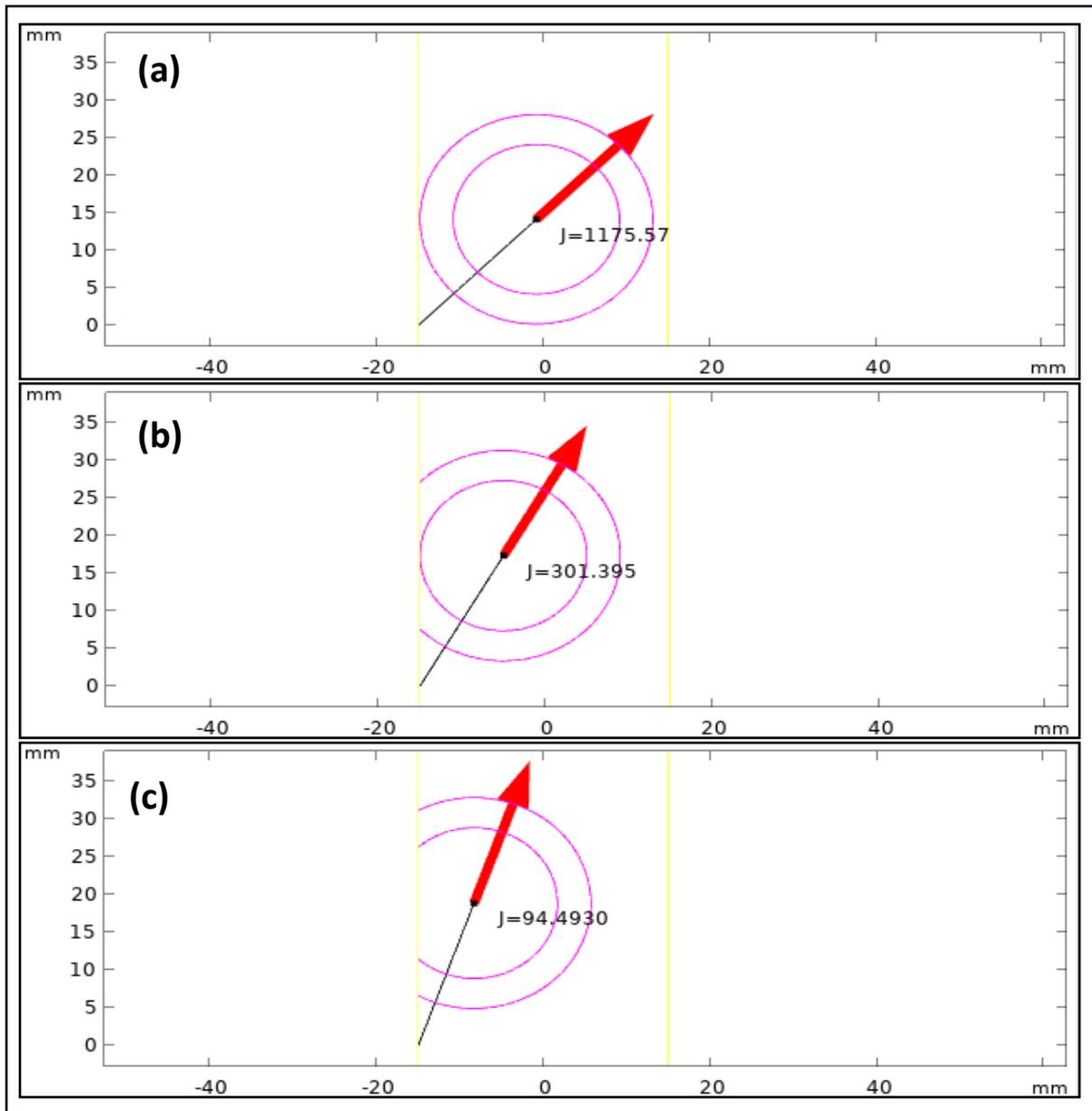


Figure III.24. L'intégrale J autour d'une fissure en taille (20 mm) pour différents angles (45° , 60° , 70.5°).

En résumé, les résultats montrent que l'intégrale J augmente avec la taille de la fissure. L'angle de 45° tend à présenter les valeurs les plus élevées de J, suggérant une plus grande probabilité de propagation de la fissure dans cette configuration. Les angles plus élevés (60° et 70.5°) montrent une diminution progressive de l'énergie disponible pour la propagation de la fissure, indiquant des configurations moins favorables à la propagation.

III.2.3. L'intégrale J en fonction de la longueur de la fissure

La courbe présentée montre l'évolution de l'intégrale en fonction de la taille de la fissure (en mm) pour trois angles différents : 45°, 60°, et 70.5°.

Pour un angle de 45°, l'intégrale J augmente rapidement, passant de 200 à environ 1200j/m² pour des tailles de fissure de 10 mm à 20 mm. Cette forte augmentation indique une concentration de contraintes très élevée à la pointe de la fissure, suggérant une propagation de fissure rapide et potentiellement dévastatrice.

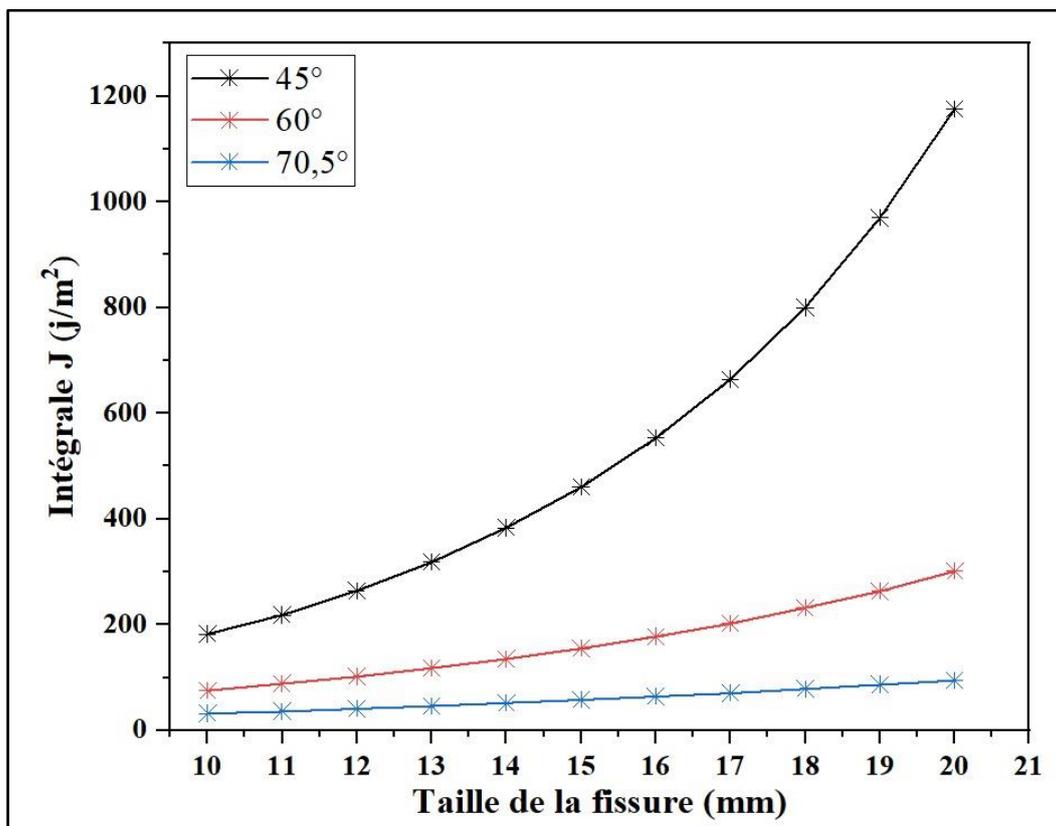


Figure III.25. J intégrale en fonction de la longueur de la fissure

À 60° , l'intégrale J augmente de manière plus modérée, passant de 100 à environ 350 j/m^2 . Cette augmentation moins prononcée suggère une propagation de fissure plus stable et contrôlée, indiquant une concentration de contraintes moins intense comparée à celle de 45° .

Pour un angle de 70.5° , l'augmentation de J intégrale est la plus faible, allant de 50 à environ 150 j/m^2 . Cela indique une propagation de fissure la plus stable et la moins agressive parmi les trois angles étudiés, avec la concentration de contraintes la plus faible.

Conclusion générale

Cocnclusion générale

La présence des défauts de surface dans les structures affaiblit leur résistance mécanique, sous l'effet des contraintes extérieures la propagation de ces fissures peuvent entrainer leur ruine, et être à l'origine des catastrophes graves. Afin d'éviter celle-ci, ingénieurs et scientifiques doivent donc être capable de prédire le comportement des structures entaillées, et d'en garantir l'intégrité.

À travers ce mémoire, nous avons étudié en mode mixte de rupture le comportement de l'éprouvette en Alliage Al 2.5% Mg sur la base des analyses numériques. Les nombreuses données présentées couvrent une gamme complète du mode I pur au mode II pur en passant par le critère de facteur d'intensité de contrainte, le taux de restitution d'énergie et du critère de J-intégral. Les résultats obtenus donnent une description des paramètres de rupture en fond d'entaille.

Les principaux résultats obtenus sont comme suite :

- L'augmentation de la taille initiale de la fissure droite (non inclinée) dans la simulation s'accompagne d'une concentration croissante des contraintes et montre que les entailles plus larges sont plus susceptibles de provoquer des défaillances par fracture sous des charges similaires en raison de la libération d'énergie élastique plus élevée
- L'étude montre qu'é mesure que la fissure initiale augment une propagation de fissure augment.
- La compatirons des trois critères du taux de restitution d'énergie et de J-Intégral sont en bonne adéquation qui sont justifier par la superposition complètes de la distribution des données.
- L'influence de l'inclinaison de la fissure initiale a été étudiée et les résultats ont montrés que plus l'angle de la fissure est petit, plus la concentration des contraintes est élevée, tandis que des angles plus grands dispersent davantage les contraintes.
- Les courbe de J-intégrales pour les différentes tailles et degrés d'inclinaison de la fissure initiale ont montré que les angles plus élevés montrent une diminution

progressive de l'énergie disponible pour la propagation de la fissure, indiquant des configurations moins favorables à la propagation.

Résumé:

Les risques liés à la propagation de fissures sous impact sont encore très difficiles à estimer. La détermination de critères de rupture dynamique uniquement à partir de résultats expérimentaux reste délicate. Ainsi la première étape pour valider des lois de propagation de fissures sous impact passe par le développement d'outils de simulation numérique. Notre objectif est donc de d'étudier l'initiation, la propagation de fissures dans les matériaux ductiles cas de l'alliage d'aluminium 2.5%Mg.

Dans notre étude, nous avons ainsi mis en évidence l'influences de la taille et de l'angle d'inclinaison de la fissure initial sur la propagation de la pointe d'un défaut "Fissure". L'étude a été validée par trois différents critères à savoir le critère du taux de restitution d'énergie, le critère de facteur d'intensité de contrainte et le critère de J-Intégral.

Mots clés. Al-2.5%Mg, Fissure, Eléments finis, J-Intégral, Taux de restitution d'énergie, Facteur de concentration de contraintes.

Abstract:

The risks associated with crack propagation under impact are still very difficult to estimate. Determining dynamic failure criteria from experimental results alone remains a tricky business. The first step in validating impact crack propagation laws is therefore to develop numerical simulation tools. Our aim is therefore to study crack initiation and propagation in ductile materials, in the case of the 2.5%Mg aluminum alloy.

In our study, we highlighted the influence of initial crack size and inclination angle on crack tip propagation. The study was validated by three different criteria, namely the energy restitution rate criterion, the stress intensity factor criterion and the J-Integral criterion.

Key words: Al-2.5%Mg, crack, finite elements, J-Integral, energy release rate, stress intensity factor.

ملخص:

يصعب للغاية تقدير المخاطر المرتبطة بانتشار الشقوق تحت التأثير. يظل تحديد معايير الفشل الديناميكي استناداً إلى نتائج التجارب فقط عملية معقدة. لذلك، تُعد الخطوة الأولى في التحقق من صحة قوانين انتشار الشقوق تحت التأثير هي تطوير أدوات المحاكاة الرقمية. وبالتالي، هدفنا هو دراسة بدء وانتشار الشقوق في المواد القابلة للطرق، مع التركيز على سبيكة الألومنيوم التي تحتوي على 2.5% مغنيسيوم.

في دراستنا، قمنا بتسليط الضوء على تأثير حجم الشق الأولي وزاوية الميل على انتشار طرف الشق. تم التحقق من صحة الدراسة باستخدام ثلاثة معايير مختلفة، وهي معيار معدل إطلاق الطاقة، ومعيار عامل شدة الإجهاد، ومعيار J-Integral. الكلمات المفتاحية: Al-2.5%Mg، شق، عناصر منتهية، تكامل J، معدل إطلاق الطاقة، عامل شدة الإجهاد.

Références bibliographique

Références bibliographiques :

- [1]. Abderrahim ZEGHLOUL. Concepts Fondamentaux de la Mécanique de la Rupture. Cours de Master. Université Lorraine. France. 2016-2017.
- [2]. ANDERSON, Ted L. et ANDERSON, Ted L. Mécanique de la rupture : fondamentaux et applications. Presse CRC, 2005, pp15-46
- [3]. POLVORA, JP, DRUBAY, B., PIQUES, R., et al. Croissance de fissures de fatigue par fluage sur des éprouvettes CT25 dans un acier inoxydable 316L (N) à 650°C. 1997.
- [4]. CALLISTER, William D., RETHWISCH, David G., BLICBLAU, Aaron et al. Science et génie des matériaux : une introduction . New York : John Wiley& fils, 2007.
- [5]. MOOSBRUGGER, C. Corrosion : principes fondamentaux, tests et protection . Parc des Matériaux : ASM international, 2003.
- [6]. CALLISTER, William D., RETHWISCH, David G., BLICBLAU, Aaron et al. Science et génie des matériaux : une introduction . New York : John Wiley& fils, 2007.
- [7]. KENDALL, David P. Une méthode simple basée sur la mécanique de la rupture pour prédire la durée de vie en fatigue des cylindres à paroi épaisse. 1986.
- [8]. KAWAI, Nobuaki, TSURUI, Kenji, MORIGUCHI, Kairi et al. Evolution des dommages dans le verre SiO₂ soumis à un impact à hypervitesse. ProcediaIngénierie , 2013, vol. 58, p. 702-708.
- [9]. SOUMAHORO, Zoumana. Etude du couplage thermomécanique dans la propagation dynamique de fissure. 2005. Thèse de doctorat. Ecole Polytechnique X.
- [10]. PÉREZ, Nestor. Mécanique de la rupture élastique linéaire . Springer États-Unis, 2004.
- [11]. BARTHÉLÉMY, Bernard. Notions pratiques de mécanique de la rupture. 1980.
- [12]. SOCRATE, S., BOYCE, MC, et LAZZERI, Andrea. Un modèle micromécanique pour le faïencage multiple dans le polystyrène choc. Mécanique des matériaux , 2001, vol. 33, n° 3, p. 155-175.
- [13]. LEMAIGNAN, Clément, et al. La rupture des matériaux. EDP sciences, 2003.
- [14]. LEBLOND, Jean-Baptiste et GERMAIN, Paul. Mécanique de la rupture fragile et ductile. Hermès science publications, 2003.
- [15]. Griffith A.A. The phenomena of rupture and flow in solids. Phil. Trans. Roy. Soc. of London, 1920, A221, pp 163-197
- [16]. Rice J.R. A pathindependentintegral and the approximateanalysis of strain concentrations by notches and cracks. Journal of Application Mechanics, 1968, pp 379-386

Références bibliographiques

[17]. Roshdy S Barsoum. Application of quadratic isoparametric finite elements in linear fracture mechanics. *International Journal of Fracture*, 10(4) :603–605, 1974.

[18]. Thomas elguedj, simulation numérique de la propagation de fissure en fatigue par la méthode des éléments finis étendus : prise en compte de la plasticité et du contact-frottement. Thèse doctorat. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. 2006.