

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



Projet de Fin d'Etude

Pour l'obtention du diplôme de Master en : Construction mécanique
Domaine : Technologie
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Construction mécanique

Thème

Effets des défauts sur le comportement mécanique d'une structure fissurée

Présenté Par :

- 1) Melle. BENZIDANE Manel
- 2) M. BERDAH Adel

Devant le jury composé de :

Nom & Prénom(s)	Grade	Qualité
Mr. Djebbar Noureddine	Pr	Président
Mme. Bouafia Farida	Pr	Encadreur
Mme. Bouzitouna Wahiba	MCB	Examineur

Année Universitaire 2024/2025

Remerciement

Avant toute chose, je rends grâce à Allah **سبحانه وتعالى**, le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la force, la patience et la persévérance tout au long de ce parcours universitaire.

Nous tenons à exprimer ma profonde reconnaissance à **Madame Bouafia** encadrant de ce travail, pour son accompagnement, ses conseils éclairés et sa disponibilité constante. Son expertise et son soutien ont grandement contribué à la réussite de ce projet.

Nous remercions sincèrement le président du jury, **Monsieur Djebbar Noureddine**, ainsi que **Madame Bouzitouna Wahiba**, examinatrice, pour l'honneur qu'ils me font en évaluant ce travail.

Nos remerciements vont également à **Monsieur Mohammedi Mohamed Oualid**, chef du département, pour les efforts remarquables qu'il déploie au profit des étudiants, et pour sa contribution à l'amélioration continue de notre formation.

Nous tenons aussi à remercier **Madame Nadjla**

Dédicace

Je dédie ce projet :

A ma chère mère et mon cher père,

A ma très chère mère

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

A mon très cher père

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

A mes très chers frères et toute ma famille,

A mes chères ami(e)s,

Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.

Puisse Dieu vous donne santé, bonheur, courage et surtout réussite

Manel...

Dédicace

Je dédie ce travail :

Modeste fruit de mes efforts et de mon parcours universitaire :

À ma chère mère, pour son amour infini, sa patience, ses sacrifices et ses prières qui m'ont porté dans les moments les plus difficiles.

À mon père, pour son soutien constant, ses conseils et sa confiance inébranlable en moi.

À mes frères Hichem, Abdelkrim, Abdelhak et Mouad pour leur présence, leur affection et leurs encouragements sincères.

À mes grands-parents maternels, que Dieu leur accorde longue vie. Merci pour votre tendresse, vos prières et votre soutien moral précieux.

À la mémoire de ma grand-mère et mon grand-père, qui restent vivants dans mon cœur malgré leur absence. Que ce travail soit un hommage à leur amour et à leur sagesse.

À mon cousin Yacine et ma 19'Touriya, que Dieu ait leur âme. Votre souvenir continue d'éclairer mes pas.

À ceux dont les rêves se sont arrêtés sur les murs des universités, aux étudiants martyrs de Gaza qui ont quitté ce monde avant de célébrer leur réussite.

Ils sont partis en portant la lumière de la connaissance et de la dignité.

Que la paix soit sur leurs âmes pures, notre rendez-vous est avec un Seigneur qui n'oublie jamais.

Que cette modeste réussite soit le reflet de votre influence positive dans ma vie.

Adel ...

Résumé

Ce travail de fin d'études s'inscrit dans le domaine de la mécanique de la rupture, avec pour objectif principal l'analyse de l'influence des défauts sur le comportement mécanique des structures fissurées. En effet, la présence de fissures, d'entailles ou d'imperfections, qu'elles soient d'origine de fabrication ou liées au service, peut entraîner une concentration de contraintes locale susceptible de compromettre l'intégrité de la structure.

Pour mieux comprendre et prédire la propagation des fissures, ce mémoire s'appuie sur les fondements de la Mécanique Linéaire de la Rupture (*MLR*), qui fournit des outils analytiques puissants tels que le facteur d'intensité de contrainte (*K*). Ce paramètre permet de quantifier la sévérité d'une fissure et d'évaluer la résistance d'un matériau à la rupture fragile.

Ce travail souligne l'importance d'intégrer la mécanique de la rupture dans les démarches de conception mécanique, en particulier pour les composants critiques. Il contribue ainsi à améliorer la fiabilité, la sécurité et la durabilité des structures mécaniques.

Mots-clés :

Défaut, Fissure, Mécanique de la rupture, Facteur d'intensité de contrainte, Concentration de contraintes, Structure fissurée.

Abstract

This final year project focuses on the field of fracture mechanics, with the main objective of analyzing the effect of defects on the mechanical behavior of cracked structures. The presence of flaws—such as cracks, notches, or voids—either resulting from manufacturing processes or service conditions, can lead to high local stress concentrations that may critically affect structural integrity.

To better understand and predict crack propagation, this work relies on the fundamentals of Linear Elastic Fracture Mechanics (*LEFM*), using key parameters such as the Stress Intensity Factor (*K*). This parameter enable the quantification of a crack's severity and the evaluation of a material's resistance to brittle fracture.

This study highlights the importance of integrating fracture mechanics in the design phase to improve the reliability, safety, and durability of mechanical components, especially in critical applications.

Keywords :

Defect, Crack, Fracture Mechanics, Stress Intensity Factor, Stress Concentration, Cracked Structure.

ملخص

يركز هذا المشروع النهائي للحصول على شهادة الماستر على دراسة تأثير العيوب على السلوك الميكانيكي للتركيبات المتشققة ، في إطار ميكانيكا الانكسار. تُعد الشقوق والفراغات والعيوب الناتجة عن عمليات التصنيع أو ظروف الخدمة من العوامل التي تُسبب تركيزًا كبيرًا للإجهادات، مما قد يؤدي إلى انهيار غير متوقع للهيكل.

يعتمد هذا العمل على مفاهيم ميكانيكا الانكسار الخطية (MLR) ، والتي تستخدم عامل مثل عامل شدة الإجهاد (K) لتقييم خطورة الشقوق ومقاومة المواد للانكسار الهش.

يسلط هذا البحث الضوء على أهمية إدماج مفاهيم ميكانيكا الانكسار في تصميم الهياكل الميكانيكية لضمان سلامتها وطول عمرها في الاستخدام الصناعي.

الكلمات المفتاحية:

العيوب , الشقوق , ميكانيكا الانكسار , عامل شدة الإجهاد , تركيز الإجهاد , الهيكل المتشقق .

Sommaire

Remerciement	I
Dédicace.....	II
Résumé.....	IV
Abstract.....	V
ملخص	VI
Sommaire	VII
Liste des tableaux.....	IX
Liste des figures	X
Liste des symboles	XII
Introduction générale :	1
Chapitre I: Généralités sur la mécanique linéaire de la rupture (MLR)	
I.1. Généralité	4
I.2. Aperçu Historique sur la Rupture :	5
I.3. Définition de la Rupture :	6
I.4. Mécanismes de Rupture :	8
I.5. Types de Rupture :	8
I.6. Rupture des Matériaux - Classifications et Faciès	11
I.6.1. Classement des ruptures selon leur cinétique :	11
I.6.2. Classement des ruptures selon leur observation :	12
I.6.3. Les faciès de rupture.....	15
I.7. Allure de Diagramme Charge-Déplacement :	16
I.7.1. La rupture fragile :	16
I.7.2. La rupture ductile :	17
I.8. Modes de Rupture :	17
I.8.1. Mode I (Ouverture) :	18
I.8.2. Mode II (Cisaillement plan ou glissement) :	18
I.8.3. Mode III (Cisaillement antiplan ou déchirement) :	18
Chapitre II: Facteur d'intensité de contrainte	
II.1. Introduction :	19
II.2. Approche globale de la mécanique linéaire de la rupture :	19

II.3. Concentration de contraintes près d'un défaut :.....	20
II.3.1. 1. Détermination théorique du facteur de concentration de contraintes :	21
II.4. Facteur d'intensité des contraintes FIC :.....	25
II.5. Détermination expérimentale de KIC :.....	26
II.6. Fissure :	27
II.6.1. Fissure au milieu d'une plaque :	28
II.6.2. Fissures aux côtés d'une plaque :.....	28
II.6.3. Fissure d'un seul côté d'une plaque :.....	28
II.6.4. Fissure interne d'un cylindre :.....	29
II.6.5. Fissure semi elliptique d'un solide cubique :.....	29
.II.7 Théories énergétiques de Griffith :.....	29
.II.8 Critère de Griffith :.....	30
II.9. Relation entre le facteur d'intensité des contraintes et l'énergie de Griffith.....	32
II.10. Champs de contrainte et déplacement :.....	34
II.11. Influence des propriétés des matériaux sur la rupture.....	38
Chapitre III: Simulation numérique par ABAQUS 2020	
III.1. Présentation du logiciel Abaqus 2020 :.....	42
III.2. Modèle utilisé :	44
.III.3 Résultats et analyse :.....	47
III.3.1. Distribution des contraintes :.....	47
Conclusion générale :.....	42
Référence bibliographique.....	42

Liste des tableaux

Figure.III. 1: Organigramme ABAQUS CAE	43
Figure.III. 2: Organigramme de simulation	44
Figure.III. 3: Représentation schématique du modèle : (a) fissure au côté, (b) interaction fissure-fissure, (c) interaction fissure-défaut, (d) changement de forme du défaut (e) Maillage par éléments finis, (f) model 3D	45
Figure.III. 4: Distribution de la contrainte équivalente, normales et tangentielles pour un chargement mécanique : $\sigma = 25 MPa$	48
Figure.III. 5: Variation de KII en fonction de a pour $\sigma = 25 MPa$	59
Figure.III. 6: Effet de l'interdistance fissure-fissure sur la distribution de la contrainte équivalente de Von mises pour $\sigma = 25 MPa$ et la distance $d = 25\mu m$	60
Figure.III. 7: Variation de KI en fonction de la distance d pour $\sigma = 25 MPa$	61
Figure.III. 8: Variation de KII en fonction de distance d pour $\sigma = 25 MPa$	61
Figure.III. 9: Variation de KII en fonction de la forme du pore pour $\sigma = 25 MPa$	64
Figure.III. 10: Variation de KII en fonction de xy pour $\sigma = 25 MPa$	65

Liste des figures

Figure.I. 1: Rupture au mouillage du pétrolier ‘Liberty Ship’. Janvier 1943, le tanker ...	6
Figure.I. 2: Faciès de rupture d’une éprouvette de Charpy rompue à -70 °C.....	9
Figure.I. 3: mécanisme de la rupture ductile	10
Figure.I. 4: Formes de rupture d’aluminium pur.	10
Figure.I. 5. Classement des ruptures selon leur cinétique	11
Figure.I. 6. Classement des ruptures selon leur observation	12
Figure.I. 7: rupture transgranulaire.....	13
Figure.I. 8: La rupture par clivage à différentes échelles	13
Figure.I. 9: Aspect de rupture intergranulaire à l’échelle microscopique.....	14
Figure.I. 10: Faciès de rupture fragile	15
Figure.I. 11: Allure de diagramme charge-déplacement (rupture fragile).....	16
Figure.I. 12: Allure de diagramme charge-déplacement (rupture ductile).....	17
Figure.I. 13. Les modes de rupture	17
Figure.II. 1 : Courbe contrainte/déformation	19
Figure.II. 2: Photographie d’un Liberty ship dont la coque est rompue en deux	20
Figure.II. 3: Répartition des contraintes autour d’un trou dans une plaque	21
Figure.II. 4: a- Entaille elliptique et b- entaille hyperbolique.....	22
Figure.II. 5: Plaque uniformément chargée percée d’un trou elliptique de rayon à fond d’entaille ρ	23
Figure.II. 6: Plaque chargée en traction simple, percée d’un trou elliptique de rayon à fond d’entaille ρ	24
Figure.II. 7: Détermination des axes (x, y) et des coordonnées (r, θ) au voisinage de l’extrémité d’une fissure	25
Figure.II. 8: éprouvettes en flexion en trois points.....	27
Figure.II. 9: Propagation de la fissure sur une longueur Δa	30
Figure.II. 10: Fissure de longueur $2a$ dans une plaque de grandes dimensions.	33
Figure.II. 11: Contrainte et déplacement au voisinage de l’extrémité d’une fissure.....	34
Figure.II. 12: Différents modes élémentaires de fissuration.	35

Figure.III. 1: Organigramme ABAQUS CAE	43
Figure.III. 2: Organigramme de simulation	44
Figure.III. 3: Représentation schématique du modèle : (a) fissure au côté, (b) interaction fissure-fissure, (c) interaction fissure-défaut, (d) changement de forme du défaut (e) Maillage par éléments finis, (f) model 3D	45
Figure.III. 4: Distribution de la contrainte équivalente, normales et tangentielles pour un chargement mécanique : $\sigma = 25 MPa$	48
Figure.III. 5: Variation de K_{II} en fonction de a pour $\sigma = 25 MPa$	59
Figure.III. 6: Effet de l'interdistance fissure-fissure sur la distribution de la contrainte équivalente de Von mises pour $\sigma = 25 MPa$ et la distance $d = 25\mu m$	60
Figure.III. 7: Variation de K_I en fonction de la distance d pour $\sigma = 25 MPa$	61
Figure.III. 8: Variation de K_{II} en fonction de distance d pour $\sigma = 25 MPa$	61
Figure.III. 9: Variation de K_{II} en fonction de la forme du pore pour $\sigma = 25 MPa$	64
Figure.III. 10: Variation de K_{II} en fonction de xy pour $\sigma = 25 MPa$	65

Liste des symboles

Symbole	Signification
σ	Contrainte normale (MPa)
σ_y	Limite d'élasticité du matériau (MPa)
K	Facteur d'intensité de contrainte (MPa \sqrt{mm})
K_I, K_{II}, K_{III}	Facteurs d'intensité de contrainte selon les modes I, II et III (MPa \sqrt{mm})
G	Taux de restitution d'énergie
G_C	Taux de restitution critique (critère de rupture)
a	Demi-longueur de la fissure (mm)
E	Module de Young (GPa)
ν	Coefficient de Poisson
u, v, w	Déplacements selon les axes x, y, z
r, θ	Coordonnées polaires (distance et angle)
ε	Déformation
τ	Contrainte de cisaillement (MPa)
S	Surface de fissuration (m ²)
Δa	Propagation de la fissure (mm)
Φ, Ψ	Fonctions angulaires des champs de contrainte
$Z(z)$	Fonction complexe de Westergaard
δ	Déplacement en pointe de fissure (mm)
γ	Déformation de cisaillement
α	Coefficient de sécurité

Introduction générale

Introduction générale :

Les structures mécaniques modernes jouent un rôle fondamental dans des secteurs industriels avancés tels que l'aéronautique, l'automobile, l'énergie, le transport ferroviaire ou encore la construction navale. Ces structures sont constamment sollicitées par des charges mécaniques de natures diverses (statiques, dynamiques, thermiques ou vibratoires), susceptibles de provoquer, à terme, l'apparition de défauts internes. Ces défauts, souvent inévitables en raison des procédés de fabrication ou apparaissant au cours du fonctionnement, peuvent compromettre sérieusement l'intégrité structurelle et la fiabilité à long terme des pièces mécaniques [1].

Dans ce contexte, l'étude du comportement des matériaux fissurés constitue un enjeu majeur. La présence de fissures ou d'entailles représente un facteur critique dans l'évaluation de la résistance mécanique des structures. Même de très petits défauts peuvent engendrer de fortes concentrations de contraintes, favorisant ainsi l'initiation puis la propagation des fissures. Si celles-ci ne sont pas détectées et maîtrisées à temps, elles peuvent évoluer de manière instable, conduisant à une rupture complète, souvent brutale, de la structure [2].

La mécanique de la rupture, et notamment la mécanique linéaire de la rupture (MLR), offre un cadre théorique rigoureux permettant de modéliser et de prédire le comportement des structures endommagées. Elle repose sur des concepts fondamentaux tels que le facteur d'intensité de contrainte (K), le taux de restitution d'énergie (G), ou encore la ténacité des matériaux. Ces outils permettent de caractériser la capacité d'un matériau à résister à la propagation des fissures, et ainsi d'évaluer la durée de vie résiduelle des composants mécaniques [3].

Ce travail s'inscrit dans cette démarche d'analyse et vise à explorer en profondeur les effets des défauts sur le comportement mécanique des structures fissurées. Il repose sur une étude bibliographique rigoureuse, ainsi que sur une modélisation théorique des phénomènes de fissuration, dans le but de proposer une meilleure compréhension des mécanismes en jeu et des outils de prédiction adaptés.

Afin de structurer cette étude, ce mémoire est organisé en trois chapitres principaux :

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur la mécanique de la rupture linéaire (MLR). Ce chapitre présente l'historique du concept de rupture, les types de ruptures observés dans les matériaux (fragile, ductile), ainsi que les critères d'initiation et de propagation des fissures. L'objectif est d'introduire les fondements de la mécanique de la rupture, en expliquant comment les défauts influencent la résistance des matériaux, tout en mettant l'accent sur les cas typiques d'effondrement structurel liés à la fissuration.

Le deuxième chapitre aborde en détail le facteur d'intensité de contrainte. Ce paramètre fondamental permet de quantifier les effets de la présence d'une fissure sur la distribution des contraintes dans un matériau. On y présente les différentes méthodes de calcul (théoriques, expérimentales et numériques), ainsi que les approches analytiques pour des géométries simples (plaque fissurée, entaille elliptique, etc.). Ce chapitre met également en lumière les relations entre le facteur K et l'énergie de rupture, en s'appuyant sur les travaux de Griffith, Irwin, Westergaard, etc.

Le troisième chapitre présente l'étude numérique visant à déterminer le facteur d'intensité de contrainte, obtenue à l'aide du code de calcul par éléments finis **Abaqus**. Le mémoire se termine par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur la mécanique linéaire de la
rupture (MLR)

I.1. Introduction :

L'étude de la mécanique de la rupture constitue une base essentielle pour la compréhension des phénomènes de défaillance dans les structures soumises à des sollicitations mécaniques. Ce premier chapitre vise à présenter les concepts fondamentaux de la mécanique linéaire de la rupture (MLR), une approche théorique permettant de modéliser la réponse des matériaux fragiles face à l'apparition et à la propagation des fissures. Une attention particulière est accordée à la distinction entre rupture fragile et rupture ductile, ainsi qu'aux différents modes de propagation des fissures. Ce chapitre introduit également les classifications des faciès de rupture et les mécanismes associés, fournissant ainsi un socle de connaissances nécessaire pour appréhender les analyses approfondies des chapitres suivants.

I.2. Généralité

L'approche analytique de la mécanique linéaire de la rupture (MLR) est primordiale pour juger la résistance des structures qui comportent des fissures ou des anomalies. Elle s'appuie sur l'évaluation du facteur d'intensité des contraintes sous une charge uniforme, ce qui permet de prévoir la dynamique de propagation des fissures dans les matériaux. Cette approche convient particulièrement aux matériaux délicats, comme certains alliages d'aluminium, les aciers à haute limite élastique et les céramiques, qui se brisent avec peu ou pas de déformation plastique à grande échelle [1].

On retrouve des imperfections dans quasiment toutes les structures métalliques, qui se manifestent surtout lors du processus de fabrication. Ces phénomènes peuvent être aggravés par les changements de volume, de température et de composition pendant la solidification, ainsi que par les soudures. Par ailleurs, les fissures dans l'état final des pièces peuvent aussi résulter de l'usinage et de traitements thermiques.

Quand un matériau est mis à l'épreuve jusqu'à sa rupture, les tests révèlent que la contrainte de rupture peut connaître d'importantes variations. La manière dont un matériau se brise dépend de ses caractéristiques : tandis que les matériaux fragiles se cassent de manière abrupte sans déformation préalable, les matériaux ductiles subissent une déformation significative et permanente avant leur rupture. La MLR est parfaitement appropriée aux matériaux fragiles, étant donné qu'elle prend en compte leur comportement élastique linéaire jusqu'à la fracture, sans déformation plastique notable [2].

Les fissures peuvent avancer de différentes manières, mais le mode I (ouverture) est fréquemment le plus déterminant et est habituellement la cause principale des bris de pièces, étant donné qu'il entraîne une tension perpendiculaire aux surfaces de la fissure. La mécanique linéaire de la rupture prédit l'expansion des fissures en recourant à des critères comme le coefficient d'intensité des contraintes critiques K_{IC} et l'énergie critique de fissuration G_{IC} . Ces critères sont interconnectés et servent à mesurer la résistance d'un matériau à la rupture fragile.

Pour résumer, la mécanique linéaire de la rupture constitue un outil crucial pour déchiffrer et anticiper le comportement des structures présentant des anomalies, en particulier en ce qui concerne les matériaux fragiles. Elle offre la possibilité d'évaluer la résistance à la rupture en tenant compte des conditions de charge et des caractéristiques du matériau [3].

I.3. Aperçu Historique sur la Rupture :

Le concept de prévenir la rupture n'est pas en soi une idée nouvelle. Les architectes de constructions antiques, comme les pyramides égyptiennes de l'époque pharaonique ou les structures de l'Empire romain, ont laissé derrière eux des témoignages pérennes que nous avons la possibilité d'apprécier encore à ce jour. Toutefois, avant l'ère de la révolution industrielle, les matériaux à disposition étaient essentiellement confinés au bois, à la pierre, à la brique et au mortier. La brique et le mortier se révélaient assez vulnérables lorsqu'ils étaient exposés à des tensions de traction. Ainsi, toutes ces constructions anciennes (telles que les pyramides et les ponts romains) qui ont fait leurs preuves face au passage du temps ont été en grande partie conçues pour supporter des charges de compression.

Cependant, l'introduction de nouveaux matériaux ductiles, comme l'acier et divers autres alliages métalliques, pour résister à des forces de traction a soulevé certains défis. Il arrivait parfois que des cassures se produisent à des seuils de charge nettement inférieurs à la limite d'élasticité du matériau. C'est dans ce contexte que le développement de la recherche en mécanique de la rupture a été nécessaire. Les premières explorations de la rupture ont été réalisées bien antérieurement à la révolution industrielle par Léonard de Vinci (1452-1519). Il a prouvé que la force de traction d'un fil de fer se réduisait à l'augmentation de sa longueur.

Ce constat indiquait déjà que la présence de défauts dans le matériau avait un impact sur sa résistance :

Plus la quantité de matériau est importante, plus le risque de présence de fissures augmente. Griffith a clarifié cette analyse qualitative en 1920, établissant un lien direct entre la taille des défauts et la contrainte de rupture.

Parmi les incidents les plus notables, on mentionne le naufrage du cargo 'Liberty Ship' dans le port de New-York, dû à l'effet de concentration des contraintes et du froid, ainsi que la séparation du stabilisateur vertical lors du vol American Airlines 587, qui a abouti à un accident fatal. Les premiers événements documentés concernant les infrastructures incluent la cassure d'une chaîne du pont suspendu Montrose en mars 1830 au Royaume-Uni. Il y a eu un grand nombre d'effondrements de ponts ces dernières années, tels que le King's Bridge à Melbourne (1962) ou le Point Pleasant Bridge en Virginie (1967). Il y a aussi eu de nombreux accidents ferroviaires causés par une défaillance soudaine des essieux, des roues ou encore des rails. De 1860 à 1870, le nombre d'individus touchés par des accidents ferroviaires en Grande-Bretagne atteignait approximativement 200 chaque année. Il y eut aussi de nombreux accidents impliquant des pipelines et des pétroliers [4].

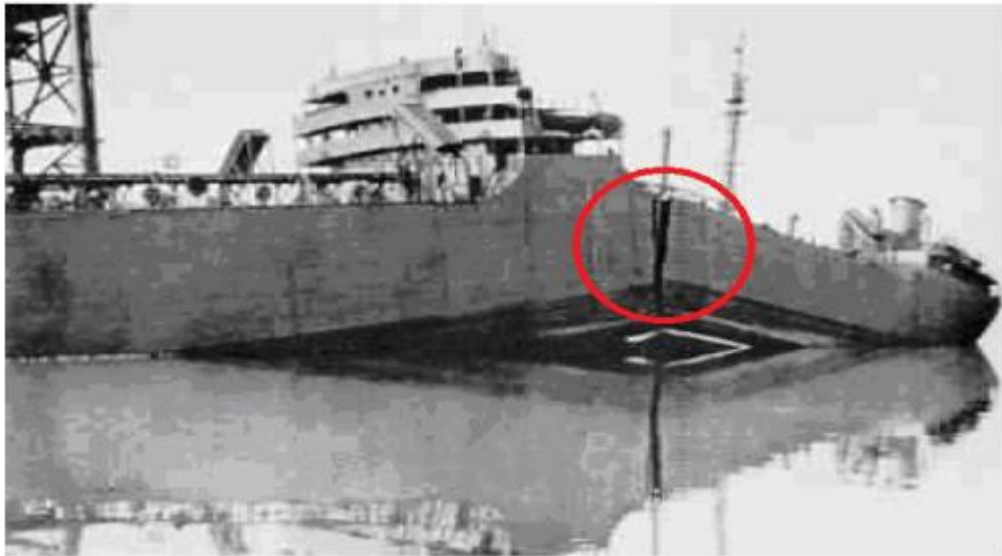


Figure.I. 1: Rupture au mouillage du pétrolier 'Liberty Ship'. Janvier 1943

I.4. Définition de la Rupture :

L'étude des mécanismes de rupture des matériaux, notamment la diffusion des fissures provoquée par des contraintes mécaniques, fait partie intégrante de la science des matériaux et de l'ingénierie. Cette discipline, appelée mécanique de la rupture, est primordiale. Elle est

essentielle pour saisir les raisons et les modes d'échec des matériaux, ce qui a un impact direct sur la sécurité et la pérennité des constructions.

Les modes de rupture observés présentent une grande diversité et dépendent fortement du matériau ainsi que des conditions expérimentales. Par exemple, dans le cadre d'un test de traction sur acier, on note initialement un phénomène de striction qui se manifeste par une diminution de la section de l'éprouvette. Cela est suivi d'une fracture où l'éprouvette se divise en deux dans la direction transversale. Lors d'un test de compression d'un matériau composite dans le sens des fibres, la défaillance est fréquemment attribuée à une séparation des fibres. Concernant le béton, la défaillance en compression se révèle par l'émergence d'un maillage de fissures longitudinales, alors qu'en traction, elle se manifeste essentiellement par une seule fissure transversale.

On définit la rupture comme un processus mécanique conduisant à une discontinuité locale de la substance dans un matériau. Elle se caractérise par la division irréversible d'un milieu continu en deux sections, engendrant une non-continuité en matière de mouvements. La mécanique de la rupture cherche à caractériser une propriété du matériau susceptible de se manifester par sa capacité à résister à une rupture fragile ou ductile. On peut répartir les ruptures en diverses catégories majeures, chacune possédant des traits spécifiques et des mécanismes sous-jacents.

L'approche de la Mécanique Linéaire de Rupture (MLR) se focalise sur l'évolution d'un défaut représenté par une fissure dans une structure exposée à une contrainte mécanique extérieure. Elle convient tout particulièrement aux matériaux délicats, comme certains alliages d'aluminium, les aciers à haute limite élastique et les céramiques, qui se brisent avec peu ou pas de déformation plastique à grande échelle. La MLR se sert du calcul du facteur d'intensité des contraintes afin de prévoir les vitesses de propagation des fissures.

On retrouve des imperfections dans quasiment toutes les structures métalliques, qui se manifestent surtout lors du processus de fabrication. Ces phénomènes peuvent être aggravés par les changements de volume, de température et de composition pendant la solidification, ainsi que par les soudures. Par ailleurs, les fissures dans l'état final des pièces peuvent aussi résulter de l'usinage et de traitements thermiques.

Il existe trois modes principaux de propagation des fissures :

Le mode I (ouverture), le mode II (cisaillement plan) et le mode III (cisaillement anti-plan). Le mode I est fréquemment le plus critique et est habituellement la cause de la rupture des pièces, étant donné qu'il engage une tension perpendiculaire aux surfaces de la fissure. Dans plusieurs domaines, comme l'industrie aérospatiale ou l'ingénierie automobile, le mécanisme de la rupture occupe une place prépondérante en facilitant une évaluation plus juste de la longévité ou de la durée d'utilisation des pièces endommagées [5].

I.5. Mécanismes de Rupture :

La discontinuité affecte la solidité des matériaux en engendrant des interruptions à l'échelle microscopique, comme des microfissures ou des vides, ainsi que des ruptures au sein des structures mécaniques. On étudie les causes et processus de ces ruptures en utilisant des méthodes comme la fractographie à grande échelle, la microfractographie via le microscope électronique à balayage (MEB), ou encore l'examen des propriétés des surfaces qui se rompent [6].

I.6. Types de Rupture :

On identifie essentiellement divers types de rupture, qui se distinguent par les processus impliqués ainsi que par les propriétés macroscopiques et microscopiques des surfaces de rupture. Voici les types principaux :

- **Rupture fragile** : Ce genre de cassure se produit avec une déformation plastique macroscopique minimale ou inexistante. On l'associe généralement à des matériaux ayant une faible capacité à dissiper de l'énergie par déformation plastique.

- **Mécanisme** : La rupture fragile se manifeste généralement par clivage, un phénomène où la fissure se propage rapidement à travers les grains du matériau (rupture transgranulaire). Elle est régie par la contrainte normale ou contrainte de fissuration et se manifeste sans déformation plastique. Un mode de rupture cinématique de type 1, également connu sous le nom de mode d'ouverture, est caractérisé par la rupture fragile. Cela se produit lorsque l'énergie de déformation locale, générée par des contraintes externes, atteint le niveau nécessaire pour provoquer la rupture des liaisons atomiques.

- **Conditions** : Elle peut se produire dans des situations de températures basses, de vitesses de chargement élevées ou de défauts antérieurs. Vous avez été formé sur des données jusqu'à octobre 2023. Les ruptures fragiles peuvent être associées à l'absence de ductilité du matériau soumis à une certaine température (température minimale admissible pour la paroi), tels que les aciers doux [6] .



Figure.I. 2: Faciès de rupture d'une éprouvette de Charpy rompue à -70 °C

- **Surface de rupture** : Lors de l'analyse macroscopique, la surface de rupture d'un matériau présentant une cassure fragile montre un éclat brillant de couleur argentée et un schéma en chevrons (indiquant une rupture transgranulaire rapide). Lors de l'analyse microscopique, elle se compose de petits morceaux de surfaces planes qui renvoient la lumière, semblables à des marches d'escalier.

- **Rupture ductile** : Ce genre de rupture est précédé d'une déformation plastique significative.

- **Mécanisme** : Le processus microscopique de la rupture ductile englobe la séparation de la matrice métallique autour des inclusions, l'expansion des cavités par déformation plastique, et l'union des cavités qui crée un défaut à l'échelle macroscopique.

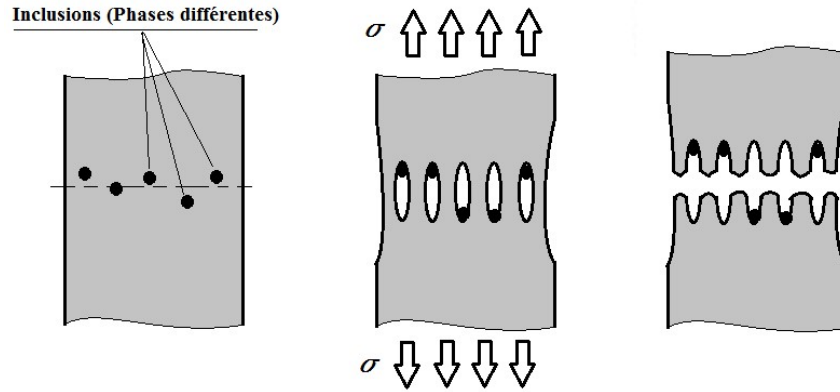


Figure.I. 3:mécanisme de la rupture ductile

Aspect de la surface de rupture : L'apparence est granuleuse, et on remarque fréquemment des cupules associées à une décohésion autour des inclusions. Lors de l'examen au microscope, les cavités se présentent comme de petits cratères qui confèrent à la surface une apparence semblable à celle de la lune. Sur le plan macroscopique, la rupture ductile se distingue par une plasticité étendue. Une déformation importante est observée, comme un allongement et une contraction qui se poursuivent jusqu'à la rupture. La zone de rupture exhibe une lèvre de cisaillement (cisaillement, terminaison de la rupture) d'un aspect grisâtre et mat [6].



Figure.I. 4: Formes de rupture d'aluminium pur.

I.7. Rupture des Matériaux - Classifications et Faciès

Un matériau, tel que le béton, est qualifié de **fragile** lorsqu'il présente, lors de tests uniaxiaux, une chute rapide de sa contrainte vers zéro après la phase élastique. Un matériau est considéré comme ductile s'il peut supporter de grandes déformations avant de se briser, comme c'est le cas pour l'acier à température ambiante. On trouve entre ces deux extrêmes des matériaux qualifiés de quasi-fragiles, dont les déformations plastiques demeurent limitées à une région étroite près de la singularité [7].

I.7.1. Classement des ruptures selon leur cinétique :

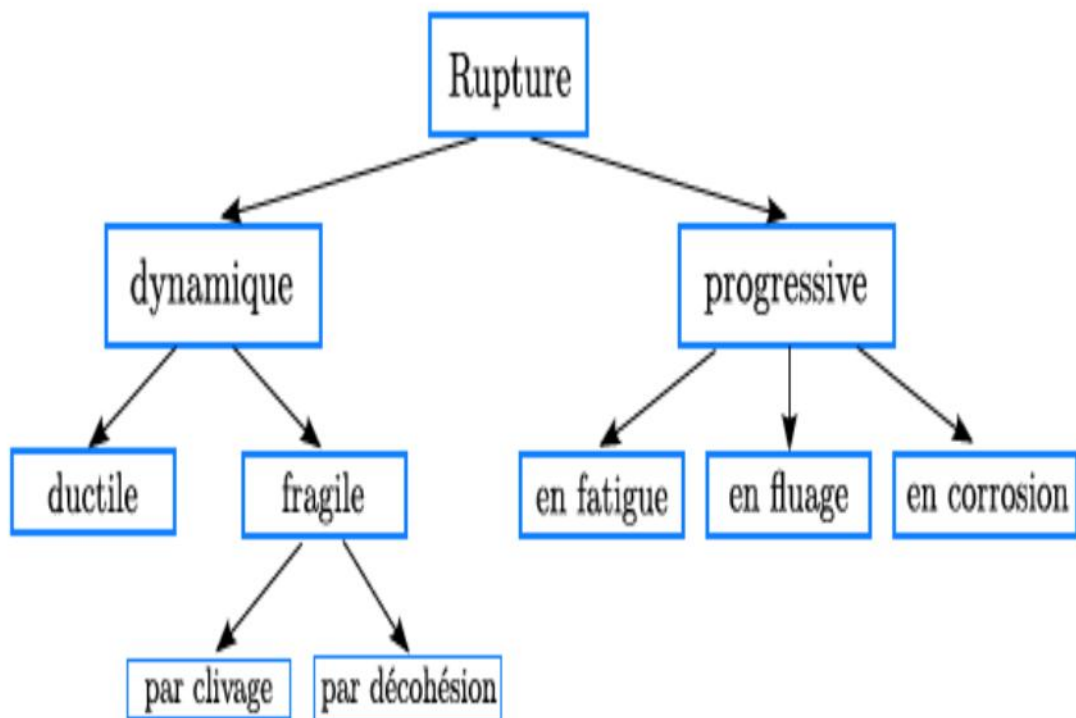


Figure.I. 5. Classement des ruptures selon leur cinétique

- 1- Rupture par fissuration rapide : ductile, semi-fragile, fragile ; Rupture par fissuration graduelle :
- 2- Si des sollicitations statiques sont présentes : corrosion sous tension, fluage, ...
- 3- En présence de sollicitations répétées : fatigue due à la mécanique, fatigue due à la thermique ;

4- Dans le cas d'appels complexes : fatigue-corrosion, fatigue-fluage,

I.7.2. Classement des ruptures selon leur observation :

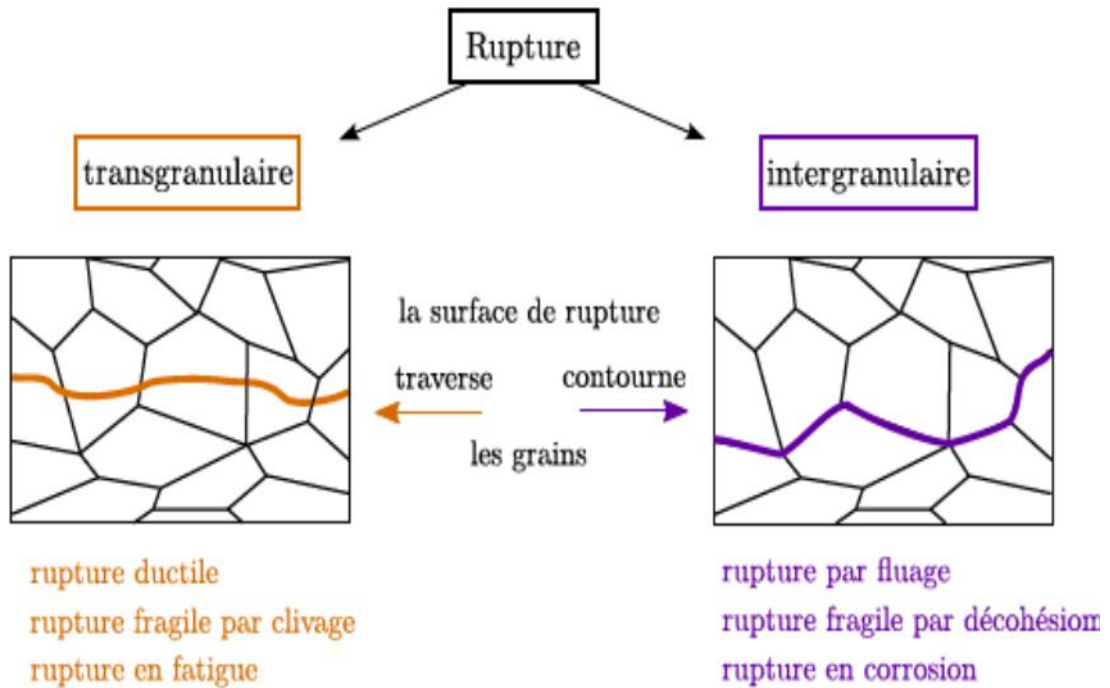


Figure.I. 6. Classement des ruptures selon leur observation

a) Rupture fragile Trans granulaire (à clivage)

La rupture fragile se distingue par l'absence de déformation plastique à grande échelle, ce qui permet une propagation des fissures très rapide et entraîne une consommation d'énergie minimale. Sur le plan microscopique, la rupture fragile se distingue par un processus de cassure qui se situe principalement à l'intérieur des grains (rupture transgranulaire) le long de plans atomiques clairement définis [8].

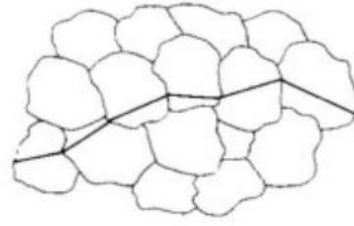


Figure.I. 7: rupture transgranulaire

La rupture suit des plans de cristallisation à travers le grain, connus sous le nom de « plans de clivage », et présente une apparence brillante. Sur une échelle macroscopique, la surface de rupture se trouve à un angle droit par rapport à la direction de la contrainte (figure I.8 a) . À l'échelle microscopique, on constate une rupture des liaisons interatomiques dans une direction qui est perpendiculaire au plan de fracture (figure I.8 b) . Toujours au niveau microscopique, on peut noter une rupture transgranulaire, où la fissure se conforme aux plans et orientations cristallographiques au sein de chaque grain (figure I.8 c). La rupture suit les plans cristallographiques à travers le grain, c'est-à-dire les plans de clivage. Faciès de rupture cristalline [6].

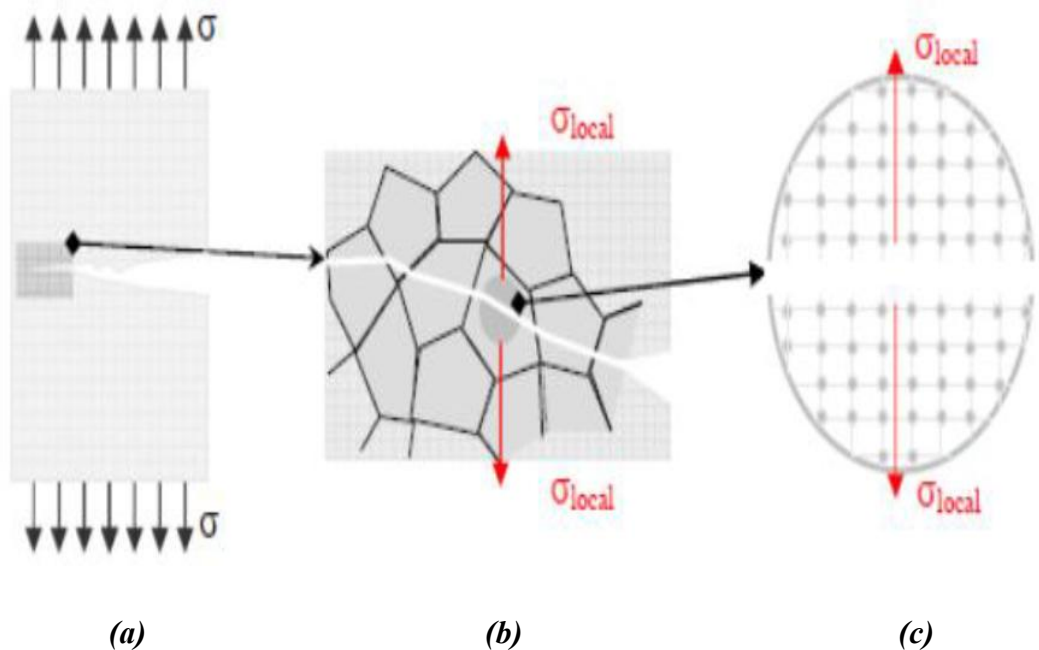


Figure.I. 8: La rupture par clivage à différentes échelles

b) Rupture fragile intergranulaire

Cette forme de rupture se distingue par une décohésion intergranulaire, au cours de laquelle la fissure emprunte les jointures entre les grains du matériau.

Mécanismes : Cette défaillance survient souvent suite à l'accumulation d'impuretés ou d'inclusions, comme l'apparition de phases secondaires aux frontières des grains ou la concentration d'un élément chimique. Ces éléments introduisent une vulnérabilité dans le matériau, comme la fragilité provoquée par le revenu, par exemple [6].

Caractéristiques :

Sur le plan microscopique, la rupture montre deux caractéristiques distinctes (Figure I.9): Une surface lisse, lorsque la fissuration suit les joints intergranulaires, associée à une déformation plastique minimale. Un aspect des cupules qui peut être observé au moment de la rupture.

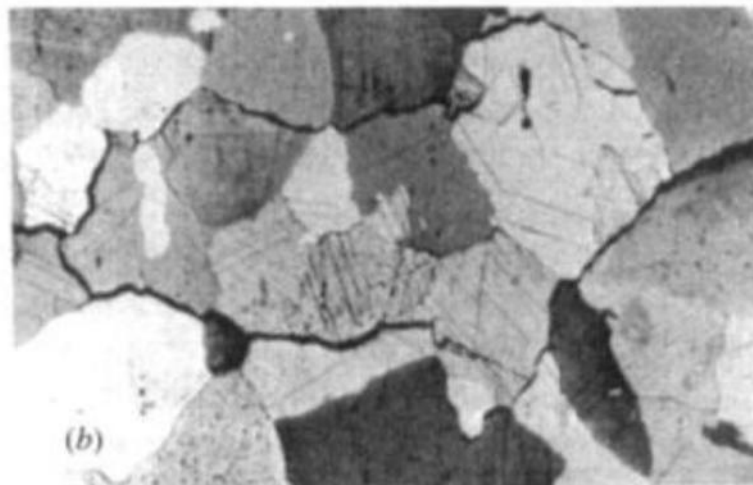


Figure.I. 9: Aspect de rupture intergranulaire à l'échelle microscopique.

La détérioration des joints entre les grains est provoquée par la rupture sur les facettes des grains. Deux manifestations distinctes peuvent être observées dans la rupture intergranulaire :

- Rupture fragile à basse température : Cela arrive quand les éléments d'impuretés regroupés aux joints de grains diminuent l'énergie de liaison de ces derniers.

- Rupture intergranulaire provoquée par le fluage à des températures élevées et moyennes (généralement supérieures ou équivalentes à un tiers de la température de fusion). Les ruptures de ce genre sont généralement dues à l'apparition initiale de cavités, qui est suivie par leur prolifération ou la séparation des points triples [6].

I.7.3. Les faciès de rupture

On peut classifier les faciès de rupture des éprouvettes en fonction de deux critères différents, l'un relatif à leur cinétique et l'autre à leur observation (voir figure ci-dessous). Dans le cadre d'appels statiques ou quasi-statiques, les cassures se produisent instantanément et reflètent la nature ductile ou fragile du matériau. Elles sont soit transgranulaires - comme toutes les ruptures ductiles et celles par clivage - ou intergranulaires, ce qui s'applique aux ruptures fragiles par décohesion - en fonction de si la fissure à l'origine de la fracture traverse les grains ou les évite en suivant exactement les joints de grains. L'examen des ruptures progressives, spécifiquement liées aux détériorations par fatigue, fluage ou corrosion, sera présenté ultérieurement [6].

a) Faciès de rupture fragile

Les faciès caractéristiques de rupture, habituellement identifiés via une microscopie à fort grossissement ou électronique à balayage.

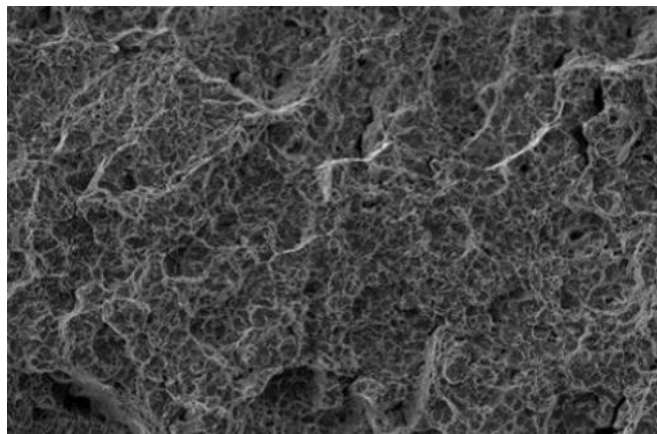


Figure.I. 10: Faciès de rupture fragile

b) Faciès de rupture ductile

L'aspect granuleux de la rupture ductile, souvent accompagné de déformations plastiques importantes, est généralement marqué par la présence de cupules résultant d'une décohésion autour des inclusions. Cette observation a été réalisée grâce à un MEB

I.8. Allure de Diagramme Charge-Déplacement :

I.8.1. La rupture fragile :

Se distingue par l'absence de déformation plastique à grande échelle,

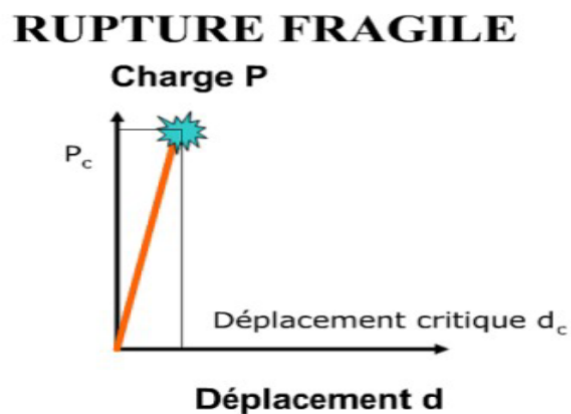


Figure.I. 11: Allure de diagramme charge-déplacement (rupture fragile)

I.8.2. La rupture ductile :

RUPTURE DUCTILE

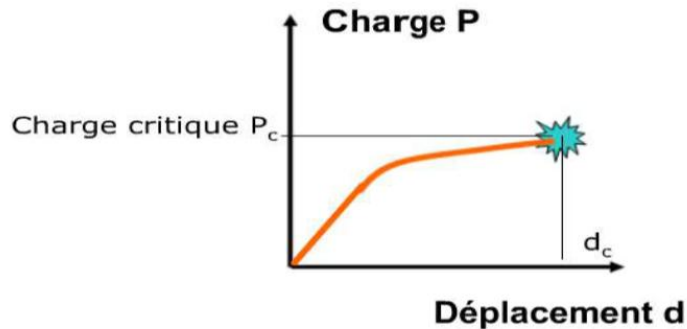


Figure.I. 12: Allure de diagramme charge-déplacement (rupture ductile)

I.9. Modes de Rupture :

La fissuration se caractérise par la dissociation irréversible d'un environnement continu en deux fragments, désignés comme les lèvres de la fissure, créant ainsi une discontinuité en termes de déplacements. Chaque fissure peut se mouvoir selon trois modes indépendants, qui combinés forment les mouvements possibles de ses lèvres. Ces modes illustrent comment les surfaces d'une fissure se déplacent mutuellement sous l'influence de charges. Les trois modes fondamentaux sont :

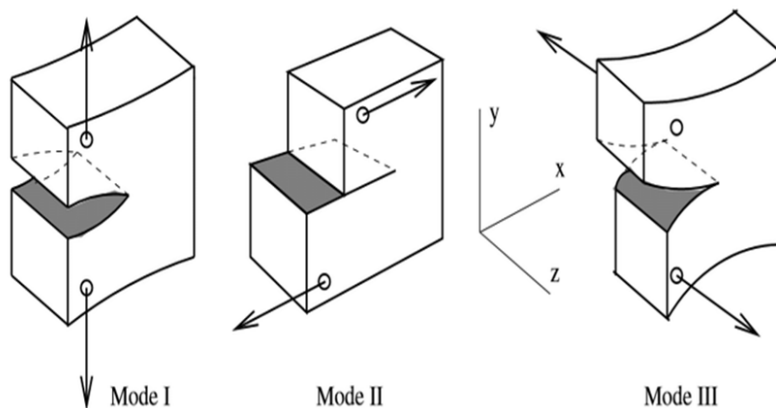


Figure.I. 13. Les modes de rupture

I.9.1. Mode I (Ouverture) :

Les surfaces de fissuration se déplacent de manière perpendiculaire au plan de fissure. C'est un type d'ouverture ou de séparation, où les deux bords de la fissure se détachent l'un de l'autre. On parle de mode de traction. C'est la méthode la plus répandue et la plus risquée, parce qu'elle encourage l'amorçage et la diffusion des fissures [1].

I.9.2. Mode II (Cisaillement plan ou glissement) :

Les surfaces de fissure se déplacent à la fois dans le plan de la fissure et dans une orientation qui est orthogonale au front de la fissure. C'est une forme de glissement, où les surfaces de la fissure se déplacent l'une par rapport à l'autre dans une orientation parallèle au plan de la fissure et perpendiculaire à son front. On évoque également le cisaillement à plat [1].

I.9.3. Mode III (Cisaillement antiplan ou déchirement) :

Les surfaces de la fissure se déplacent à la fois dans le plan de fissure et dans une orientation parallèle au front de fissure. C'est une forme de déchirement où les surfaces fissurées se déplacent de manière parallèle au bord de la fissure et dans le plan de celle-ci. On évoque également le cisaillement antiplan.

I.10. Conclusion :

Ce chapitre a permis de poser les bases de la mécanique linéaire de la rupture en mettant en évidence les principales formes de ruptures, leurs mécanismes, ainsi que les critères d'initiation et de propagation des fissures. L'approche MLR se révèle particulièrement pertinente pour l'analyse des matériaux fragiles, en raison de sa capacité à prédire la réponse d'une structure à l'existence d'un défaut. Ces notions fondamentales servent de cadre de référence pour aborder les outils analytiques plus spécifiques, tels que le facteur d'intensité de contrainte, qui sera au cœur du chapitre suivant.

Chapitre II

Facteur d'intensité de contrainte

II.1. Introduction :

Le facteur d'intensité de contrainte, généralement noté K , est utilisé en mécanique de la rupture pour décrire l'état de contrainte à la pointe de la fissure. Ce concept suppose généralement que le matériau est homogène et dans un état élastique linéaire isotrope. Il est principalement utilisé dans la tolérance aux dommages pour fournir des critères de défaillance. Le facteur d'intensité de contrainte peut également être étendu aux matériaux qui présentent une plasticité confinée à la pointe de la fissure [2].

II.2. Approche globale de la mécanique linéaire de la rupture :

Une fracture se produit lorsqu'un objet se sépare en parties sous des contraintes statiques ou dynamiques. Il peut s'agir d'une contrainte de traction, d'une contrainte de compression, d'une contrainte de cisaillement ou d'une contrainte de torsion. Il existe deux modes de défaillance des matériaux industriels : la défaillance ductile et la défaillance fragile. Cette classification est basée sur la capacité du matériau à subir une déformation plastique. Le comportement de la relation entre la contrainte de traction et la déformation dans ces deux types de rupture est illustré dans la figure ci-dessous

La théorie de la mécanique de la rupture est une méthode permettant d'évaluer la stabilité des fissures initiées par des défauts. Il permet de prédire l'évolution des fissures jusqu'à l'effondrement de la structure. Le sujet de la mécanique de la rupture est l'étude de la croissance des fissures en fonction de la charge appliquée et des propriétés des matériaux constitutifs [4].

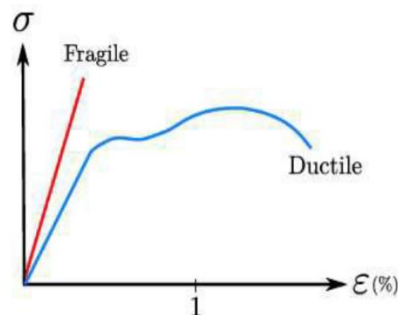


Figure.II. 1 : Courbe contrainte/déformation

Toutefois, cette distinction fragile-ductile ne facilite ni la caractérisation d'un matériau spécifique, ni le classement général des matériaux, car leurs réactions peuvent grandement varier en fonction de deux facteurs : la température et la vitesse de déformation. Par conséquent, un métal qui est ductile à température ambiante peut se transformer en un matériau fragile à basse température. Cette transition fragile-ductile, longtemps sous-estimée ou méconnue, est d'ailleurs la cause de nombreux accidents, y compris les célèbres Liberty ships. Ces navires de charge construits pendant la Seconde Guerre mondiale et qui opéraient dans l'Atlantique Nord étaient soumis à des températures inférieures au seuil de transition, provoquant une transition du matériau de la coque d'un état ductile vers un état fragile en raison d'une diminution significative de la ténacité.

En tout, plus de 200 navires parmi les 5000 construits ont connu des dommages considérables [8].



Figure.II. 2: Photographie d'un Liberty ship dont la coque est rompue en deux

II.3. Concentration de contraintes près d'un défaut :

Lorsque nous effectuons des calculs sur les dimensions des structures, nous nous appuyons principalement sur la théorie de l'élasticité. La théorie est valable tant que la contrainte reste inférieure à la limite élastique du matériau et ne provoque pas de déformation plastique permanente. Cependant, dans des cas tels que la fatigue des matériaux ou la fissuration par corrosion sous contrainte, les contraintes impliquées sont généralement à des niveaux relativement faibles et la théorie élastique s'applique toujours. Dans les structures,

les accidents géométriques telles que les changements brusques de section transversale comme les appuis, les entailles, les trous de lubrification sont souvent néfastes en raison d'exigences fonctionnelles. À proximité de ces accidents de forme, la contrainte n'est pas uniforme et provoque une concentration de contraintes. Cette concentration de contraintes est clairement, où l'on remarque que la contrainte à la base du trou est nettement plus importante que la contrainte nominale σ_{nom} de traction imposée à la plaque [6].

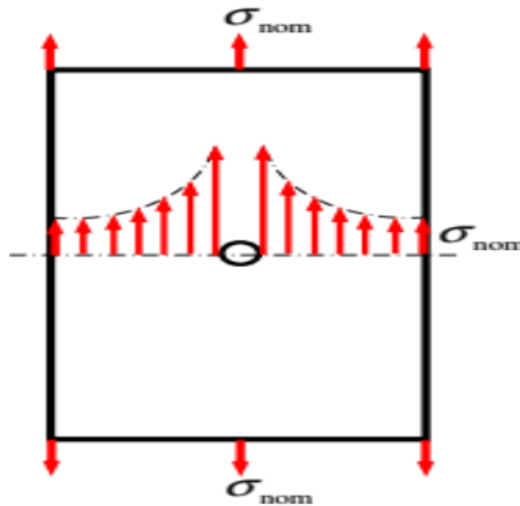


Figure.II. 3: Répartition des contraintes autour d'un trou dans une plaque

II.3.1. Détermination théorique du facteur de concentration de contraintes :

Nous considérons une plaque comportant un trou central de forme elliptique. Il convient de souligner que cette cavité est nettement plus petite en comparaison aux dimensions globales de la plaque, comme le montre la Figure.II.4a. Dans le cadre de l'analyse des concentrations de contraintes et du dimensionnement des structures, cette géométrie particulière peut s'avérer essentielle, car elle peut provoquer des impacts notables sur la distribution des contraintes au sein de la plaque en raison du caractère elliptique du trou [6].

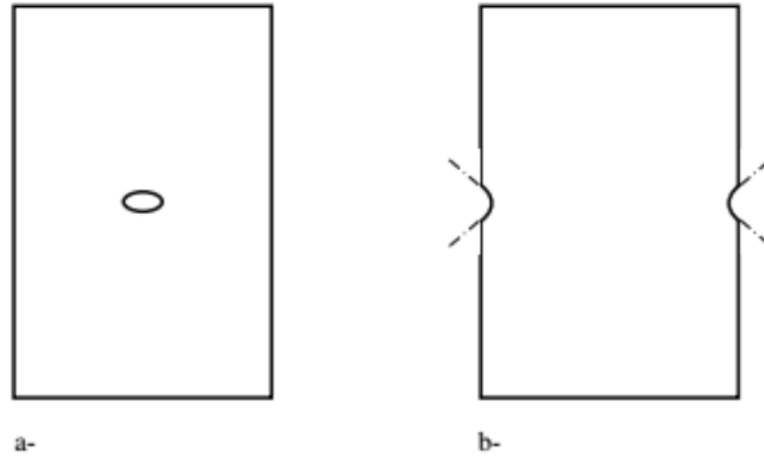


Figure.II. 4: a- Entaille elliptique et b- entaille hyperbolique

On détermine le coefficient de concentration des contraintes, noté K_t , en établissant le rapport entre la contrainte maximale (σ_{max}) observée à un point présentant une discontinuité géométrique ou une concentration de contrainte, comme à la racine d'une forme irrégulière, et la contrainte nominale (σ_{nom}) que subirait la structure en l'absence de cette discontinuité. Autrement dit, K_t est déterminé en mettant en parallèle la contrainte maximale avec la contrainte normale prévue en l'absence de cette discontinuité géométrique, qui est exprimée par :

$$K_t = \frac{\sigma^{max}}{\sigma^{min}}$$

a) Plaque uniformément chargée :

La figure II.5 montre une plaque soumise à une charge uniforme, indiquant que la contrainte imposée à la plaque est orientée de manière perpendiculaire à ses bords en tout point. Cette plaque comporte aussi un petit trou de forme elliptique. Pour examiner cette configuration de chargement, nous faisons appel aux démonstrations du chapitre précédent afin de déterminer les potentiels complexes liés à ce contexte spécifique [6] .

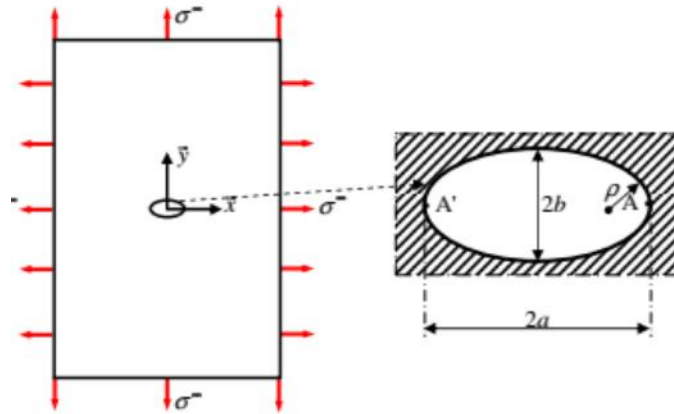


Figure.II. 5: *Plaque uniformément chargée percée d'un trou elliptique de rayon à fond d'entaille ρ .*

Les conditions aux limites sur les bords de la plaque, correspondant à des points situés à une distance notable du trou elliptique, sont spécifiées de la manière suivante. Cela considère la dimension significative de la plaque comparée à celle du trou en forme d'ellipse.

$$\sigma_x^\infty = \sigma_y^\infty = \sigma^\infty \quad \text{et} \quad \sigma_{xy}^\infty = 0$$

Facteur de concentration des contraintes K_t est quant à lui donné par :

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}} = \frac{\sigma_\beta^\infty}{\sigma^\infty} = 2 \frac{a}{b}$$

Le rayon ρ à fond d'une entaille elliptique de grand axe a et de petit axe b s'exprimant par $\rho = b^2/a$, le facteur K_t peut aussi s'écrire :

$$K_t = 2 \sqrt{\frac{\rho}{b}}$$

Pour un orifice circulaire, le coefficient de concentration des contraintes (K_t) est de 2. Cela indique que la contrainte maximale à proximité du trou est deux fois supérieure à la contrainte théorique que la structure supporterait sans le trou. Pour un trou circulaire, le coefficient K_t de 2 est une valeur largement reconnue et fréquemment appliquée dans les calculs de conception afin de prendre en compte la concentration des contraintes autour du trou.

b) Plaque percée d'un trou elliptique sollicité en traction simple

Les conditions limites au bord de la plaque, sont données par :

$$\sigma_y^\infty = \sigma^\infty \quad \text{Et} \quad \sigma_x^\infty = \sigma_{xy}^\infty = 0$$

Les conditions aux limites sur le bord d'un trou elliptique, c'est-à-dire quand α atteint une valeur précise α_0 correspondant à la limite de l'ellipse, sont identiques à celles observées précédemment avec une plaque de charge uniforme [11].

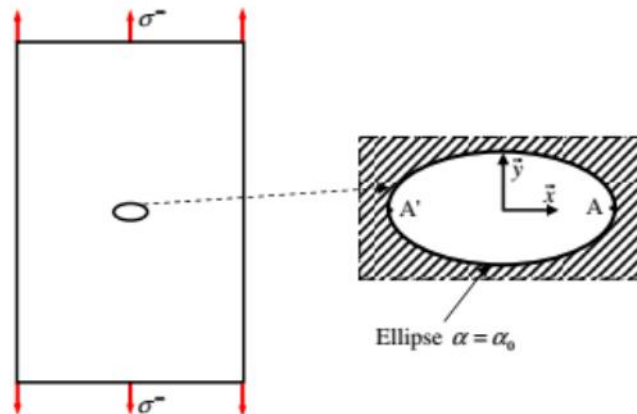


Figure.II. 6: *Plaque chargée en traction simple, percée d'un trou elliptique de rayon à fond d'entaille ρ*

Les solutions pour cette configuration de chargement ont été proposées par Stevenson en 1945.

$$\sigma_\beta^{max} = \sigma^\infty \left(1 + 2 \frac{a}{b} \right)$$

Et le facteur de concentration des contraintes est alors donné par :

$$K_t = 1 + 2\sqrt{\frac{\rho}{a}}$$

II.4. Facteur d'intensité des contraintes *FIC* :

La mécanique de la rupture prend en considération la présence de défaut au sein du matériau, et propose d'étudier son influence sur le comportement mécanique durant le chargement, ainsi que son évolution au cours du chargement. Elle permet de quantifier la rupture et de décrire les phénomènes de rupture des matériaux.

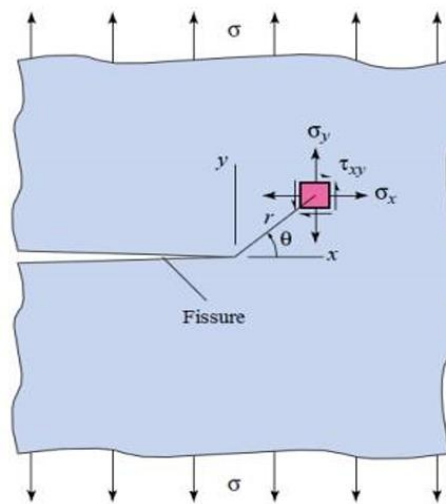


Figure.II. 7: Détermination des axes (x, y) et des coordonnées (r, θ) au voisinage de l'extrémité d'une fissure

La théorie a été fondée par Griffith (1920), qui s'est appuyé sur les ruptures brutales dans le domaine élastique.

Ce principe exprime que la rupture brutale résulte d'une instabilité de la fissure, se produisant lorsque l'énergie potentielle mécanique libérée par l'accroissement d'une fissure excède l'énergie absorbée par cette même extension.

Quand un objet fissuré est soumis à une force, une concentration intense de contraintes se produit autour de la fissure. Ces conditions reflètent pratiquement la situation réelle des pièces et structures. Les théories de l'élasticité fournissent une expression de la contrainte près du front de fissure via une série de Taylor dans le système de coordonnées polaires [4].

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

K_I Symbolise le facteur d'intensité de contraintes en mode I tel qu'établi par IRWIN. IRWIN a recherché une formulation qui pourrait caractériser le domaine de contraintes près de la fissure, en considérant la zone plastifiée à mesure que la fissure se propage. Il indique que la fissure devient instable et se diffuse lorsque le facteur d'intensité des contraintes K atteint un seuil critique. K_{IC} est la ténacité qui mesure quantitativement la capacité d'un matériau à résister à la propagation brutale d'une fissure de type I. Il a donc formulé le critère de contrainte à travers la relation suivante :

$$K_{IC} = Y \cdot \sigma_C \cdot \sqrt{\pi \alpha}$$

Y : Il s'agit d'un coefficient de forme (facteur géométrique).

II.5. Détermination expérimentale de K_{IC} :

Le test implique d'exercer une force de traction ou de flexion sur des échantillons identiques géométriquement, contenant des fissures de longueurs variées. Les contraintes de rupture observées seront utilisées pour déterminer K_{IC} . L'évaluation de la ténacité est effectuée par le biais d'essais de flexion à trois points, conduits jusqu'à la fracture [4].

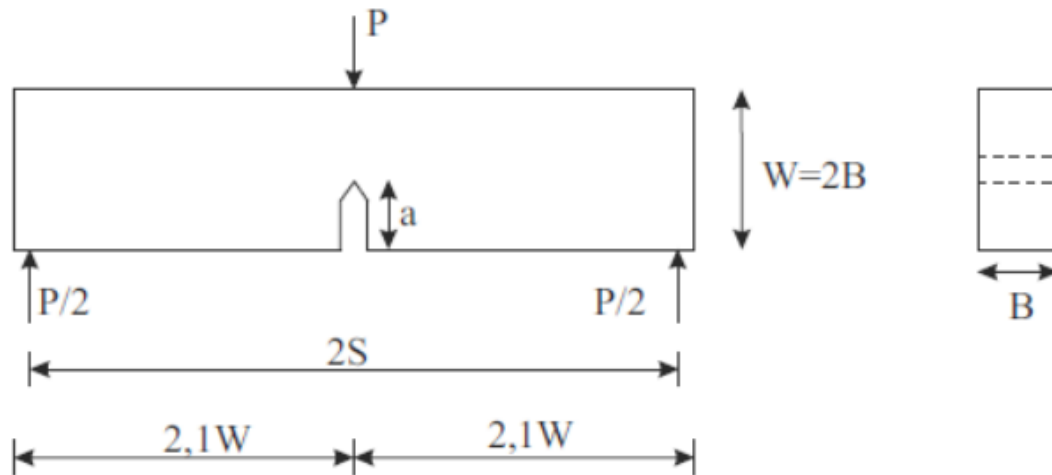


Figure.II. 8: éprouvettes en flexion en trois points

$$K_{Ic} = \frac{P_c S}{B W^{3/2}} \times \frac{3 \left(\frac{\alpha}{W}\right)^{1/2} \left[1.99 - \left(\frac{\alpha}{W}\right) \left(1 - \frac{\alpha}{W}\right) \left(2.15 - 3.93 \frac{\alpha}{W} + 2.7 \frac{\alpha^2}{W^2}\right) \right]}{2 \left(1 + 3 \frac{\alpha}{W}\right) \left(1 - \frac{\alpha}{W}\right)^{3/2}}$$

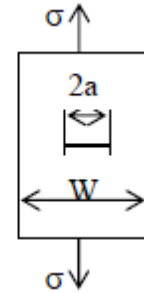
Avec $2S=4W$.

II.6. Fissure :

Les fissures font partie intégrante de notre quotidien. Toutes les pièces mécaniques en contiennent, et ce à diverses échelles. Elles peuvent exister sous forme de défaut de base dans les matériaux ou peuvent être induites durant la construction, ces fissures sont responsables de la majorité des ruptures qui se produisent dans les structures et pièces de machines en service, soumises à des efforts statiques ou dynamiques. On définit une fissure comme une surface qui divise localement un solide en deux segments. L'échec d'un élément mécanique se manifeste par la fissuration du matériau, suivant l'un ou une combinaison de trois modes principaux (mode I, II et III) [4].

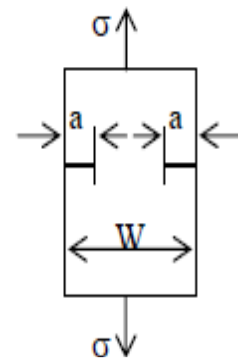
II.6.1. Fissure au milieu d'une plaque :

$$K = \sigma(\pi\alpha)^{1/2} \left\{ \frac{W}{\sigma\alpha} \times \tan\left(\frac{\pi\alpha}{W}\right) \right\}^{1/2}$$



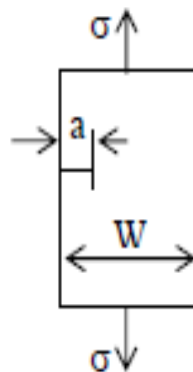
II.6.2. Fissures aux côtés d'une plaque :

$$K = \sigma(\pi\alpha)^{1/2} \left\{ \frac{W}{\sigma\alpha} \times \tan\left(\frac{\pi\alpha}{W}\right) + \frac{0.2W}{\pi\alpha} \sin\left(\frac{\pi\alpha}{W}\right) \right\}^{1/2}$$



II.6.3. Fissure d'un seul côté d'une plaque :

$$K = \sigma(\pi\alpha)^{1/2} \left\{ 1.12 - 0.23\left(\frac{W}{\alpha}\right) + 10.6\left(\frac{W}{\alpha}\right)^2 - 21.7\left(\frac{W}{\alpha}\right)^3 + 30.4\left(\frac{W}{\alpha}\right)^4 \right\}$$



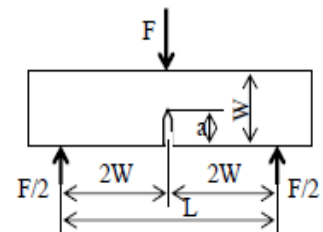
II.6.4. Fissure interne d'un cylindre :

$$K = \sigma(\pi\alpha)^{1/2} \left(\frac{2}{\pi}\right)$$



II.6.5. Fissure semi elliptique d'un solide cubique :

$$K = \frac{3FL}{3Bw^{3/2}} \left\{ (1.93) \left(\frac{\alpha}{w}\right)^{1/2} + 3.07 \left(\frac{\alpha}{w}\right)^{3/2} - 14.53 \left(\frac{\alpha}{w}\right)^{5/2} - 25.11 \left(\frac{\alpha}{w}\right)^{7/2} + 25.8 \left(\frac{\alpha}{w}\right)^{9/2} \right\}$$



II.7. Théories énergétiques de Griffith :

Dans un matériau (Figure.II.9), une augmentation Δa de la longueur d'une fissure a est associée aux modifications suivantes de l'énergie : $\Delta W_{ext} = \Delta W_{élast} + \Delta U$

Avec : ΔW_{ext} : Changement d'énergie appliqué (grâce aux forces externes).

$\Delta W_{élast}$: Changement d'énergie élastique (stockée),

ΔU : Énergie utilisée lors de l'avancement de la fissure sur la distance Δa [6].

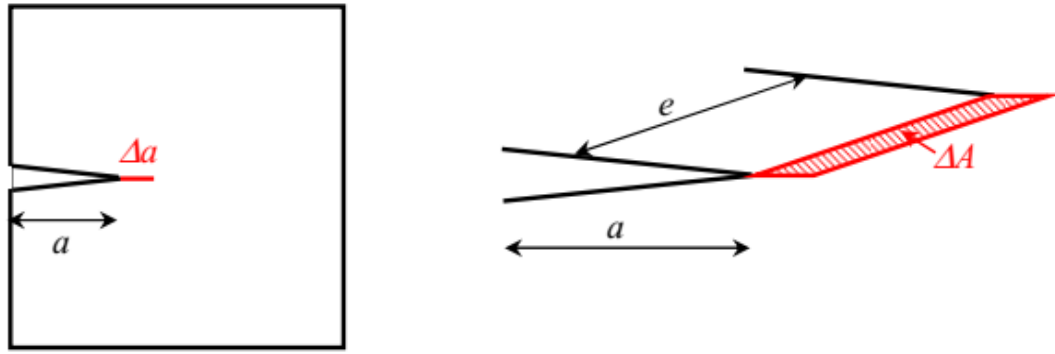


Figure.II. 9: Propagation de la fissure sur une longueur Δa

La théorie de Griffith, qui s'applique principalement à la rupture fragile des matériaux, est une théorie initiale. Elle estime que la rupture a lieu à cause de la diffusion de fissures ou d'imperfections antérieures présentes dans le matériau. Dans le cadre de cette théorie, l'énergie de rupture, symbolisée par ΔU , correspond à l'énergie requise pour générer de nouvelles surfaces dans le matériau, autrement dit pour initier et propager une fissure. En d'autres termes, ΔU correspond à l'énergie de séparation des surfaces, que l'on désigne par ΔW_{sep} . L'énergie de séparation des surfaces est la quantité d'énergie requise pour diviser deux surfaces d'une fissure, générant ainsi de nouvelles surfaces. Il s'agit d'un concept essentiel pour comprendre la rupture délicate des matériaux. Quand on veut quantifier cette énergie par unité de surface, on fait appel au concept d'énergie de Griffith, symbolisé par G . On définit l'énergie de Griffith comme la quantité ΔU relative à l'unité de surface. Autrement dit, G représente l'énergie de rupture par unité de surface [6] :

$$G = \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{\Delta U}{\Delta A} = \frac{\partial U}{\partial A}$$

II.8. Critère de Griffith :

Griffith a formulé le critère suivant pour expliquer la propagation d'une fissure : L'apparition de la propagation se produit lorsque la réduction du taux de libération de l'énergie de déformation élastique emmagasinée (énergie potentielle) est au minimum égale

au taux de génération d'énergie lié à la formation de surface de fissure. On suppose l'existence d'une fissure de longueur $2a$ dans un matériau soumis à une contrainte σ . La limite σ_f à partir de laquelle cette fissure se propage est

$F = C$, où C représente une constante.

Griffith a établi la valeur de l'énergie de déformation élastique qui se libère lors de l'apparition d'une fissure [6]:

$$\Delta U_E(a) = -\frac{\pi\alpha^2\sigma^2}{E}$$

Où E est le module de Young, σ est la contrainte appliquée en traction qui agit normalement au voisinage de la fissure. Le signe négatif est utilisé parce que la propagation de la fissure libère de l'énergie de déformation élastique. D'autre part la création de fissure nécessite l'énergie de surface $U_s(a)=4a$ la condition de propagation est représentée par le critère de Griffith :

$$\frac{\partial(\Delta U_E(a) - 4\gamma\alpha)}{\partial\alpha} \geq 0$$

L'évolution instable de la fissure se produit si elle est énergétiquement favorable, et on établit une valeur critique de a pour une tension appliquée spécifique, ou une valeur critique de tension, σ_c , pour chaque valeur de a .

$$\frac{2\pi\alpha\sigma^2}{E} - 2\gamma = \sigma_c = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi a}}$$

La théorie de Griffith s'accorde parfaitement avec les données expérimentales concernant les matériaux fragiles tels que le verre. Pour les matériaux ductiles tels que l'acier, le calcul

de l'énergie de surface γ produit des résultats qui ne sont pas réalistes. La rupture des matériaux ductiles doit être influencée par la plasticité [9].

Dans ce cas l'énergie totale dissipée est donnée par G_p , G_p est la dissipation plastique. On obtient, donc [10] :

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{EG}{\pi a}}$$

II.9. Relation entre le facteur d'intensité des contraintes et l'énergie de Griffith

La fonction de Westergaard, désignée par $Z(z)$, est une représentation mathématique employée pour déterminer le facteur d'intensité de contrainte (*FIC*), K_I pour une fissure de longueur $2a$ traversant une plaque soumise à des contraintes dans le plan. On définit cette fonction de la manière suivante [6]:

$$Z(z) = \frac{\sigma_z^\infty}{\sqrt{z^2 - a^2}}$$

Afin de faciliter les calculs, nous dotons l'espace d'un repère où le plan de la fissure est représenté par l'équation cartésienne $y = 0$. À l'extrémité $x = a$, le FIC, K_I est alors défini par :

$$K_I \lim_{x \rightarrow a} \sqrt{2\pi(x - a)Z(x)}$$

Ce qui donne finalement :

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

Nous associons donc une quantité (le FIC, K_I), associée au comportement local, à deux grandes quantités liées au comportement global (σ_∞ et a) de la structure [6].

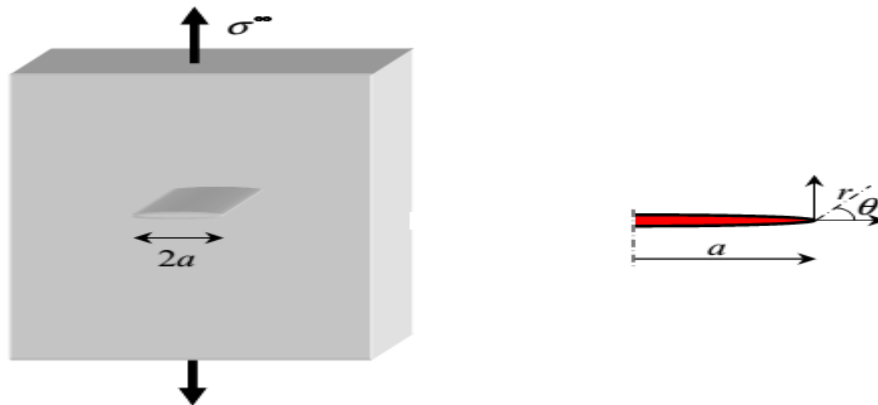


Figure.II. 10: Fissure de longueur $2a$ dans une plaque de grandes dimensions.

Quand les dimensions de la plaque sont prises en compte comme infinies par rapport à la longueur de la fissure, les lignes de force présentent une composante le long de l'axe x , ce qui permet de simplifier le problème. Toutefois, dans la pratique, une fois que les dimensions de la plaque sont terminées, les effets de bord prennent de l'importance. Les conditions aux limites sur les côtés du tube exigent que les lignes de force aient une composante nulle selon. Cela indique que les contraintes près des bords de la plaque sont plus intensifiées aux extrémités de la fissure à cause de ces conditions de bordure. Afin d'examiner cette question dans un cadre de dimension finie, Westergaard a étudié une plaque infinie comportant un nombre infini de fissures régulièrement espacées d'une longueur $2L$, comme le montre la Figure.II.10. Il a représenté cette situation en intégrant des composants sinusoïdaux dans la fonction $Z(z)$ pour les conditions de périodicité résultant de l'existence d'une série de fissures. Il a modélisé cette situation en intégrant des termes sinusoïdaux dans la fonction $Z(z)$: l'idée étant de considérer les effets de bord [6].

$$Z(z) = \frac{\sigma_\infty}{\sqrt{1 - \sin^2\left(\frac{\pi a}{2L}\right) / \sin^2\left(\frac{\pi z}{2L}\right)}}$$

Naturellement, lorsque $a \ll L$ et $|z| \ll L$, on retrouve l'expression

$$Z(z) = \frac{\sigma_z^\infty}{\sqrt{z^2 - a^2}}$$

II.10. Champs de contrainte et déplacement :

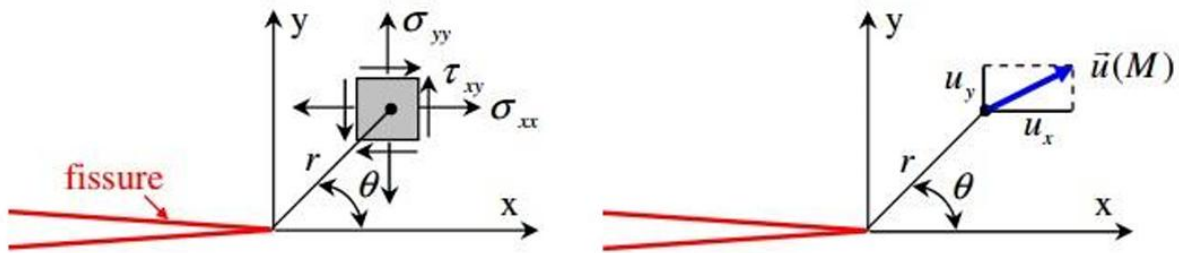


Figure.II. 11: Contrainte et déplacement au voisinage de l'extrémité d'une fissure.

Dans un système de coordonnées polaires (r, θ) , les contraintes et déformations autour d'une fissure (voir figure II.11) présentent un développement asymptotique dont l'expression du terme singulier est [6]:

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

$$\varepsilon_{ij} = \frac{K_\alpha}{\sqrt{2\pi r}} g_{ij}^\alpha(\theta)$$

Avec : $f_{ij} = (\theta)$ fonction adimensionnelle et r, θ les coordonnées polaires en fond de fissure.

σ_{ij} est le tenseur des contraintes.

ε_{ij} est le tenseur des déformations.

K_α Représente le facteur d'intensité des contraintes (FIC) dans le mode α .

Peut-être *I, II* ou *III*, et ij correspond à xy .

Les fonctions f et g déterminent la distribution angulaire.

Sur le plan local, la rupture se définit par la division irréversible d'un milieu continu (S) en deux segments distincts, S- et S+. Elle se manifeste conformément à l'un des trois modes fondamentaux décrits ci-après.

Mode I : mode d'ouverture de la fissure, où les mouvements aux bords de la fissure sont perpendiculaires à la direction de l'expansion.

Mode II : mode de fracture en cisaillement dans le plan, où les déplacements aux bords de la fissure sont alignés avec la direction de propagation.

Mode III : mode de cisaillement hors du plan, où les mouvements aux bords de la fissure sont parallèles au fond de cette dernière.

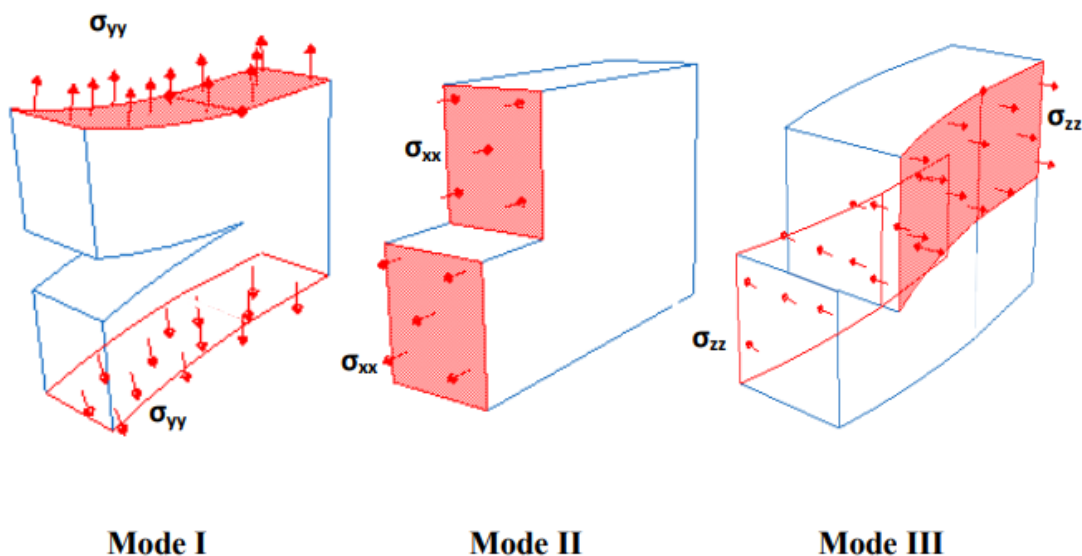


Figure.II. 12: Différents modes élémentaires de fissuration.

Dans la réalité, on observe une combinaison de ces modes, ce qui nous amène à parler de mode mixte.

Les trois modes sont caractérisés par la symétrie. La propagation d'une fissure est particulièrement risquée en mode I ; toutefois, une fois initiée et sous des contraintes mixtes ou des formes complexes, la fissure a tendance à se diviser et demeure donc rarement droite (en 2D) ou plane (en 3D) [4].

Mode I

Contraintes

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

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

$$\sigma_x = \frac{KI}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(\sin \frac{\theta}{2} - \sin 3 \frac{\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_{xx} = 0 \text{ en contrainte plane}$$

$$\sigma_{xx} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \text{ en déformation plane}$$

Déplacements

$$\frac{KI}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left(k - 1 + 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right)$$

$$ux = \frac{KI}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left(k + 1 - 2\cos^2 \frac{\theta}{2} \right)$$

$$k = \frac{3-4\nu}{1+4\nu} \text{ en déformation plane}$$

$$k = 3 - 4\nu \text{ en contrainte plane}$$

Mode II

Contraintes

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

$$\sigma_{yy} = \frac{K II}{\sqrt{2\pi r}} \sin \left(\frac{\theta}{2} \right) \left(\cos \left(\frac{\theta}{2} \right) \right) \cos \left(3 \frac{\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K II}{\sqrt{2\pi r}} \cos \left(\frac{\theta}{2} \right) \left(1 - \sin \left(\frac{\theta}{2} \right) \right) \sin \left(3 \frac{\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_{zz} = 0 \text{ en contrainte plane}$$

$$\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \text{ en déformation plane}$$

Déplacements

$$ux = \frac{K II}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left(k + 1 + 2\sin^2 \frac{\theta}{2} \right)$$

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

Mode III

Contraintes

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

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

Déplacements

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

Avec :

k : le coefficient de Kolosov définit comme :

➤ En contraintes planes : $k = 3 - 4\nu$

➤ En déformations planes : $k = 3 - 4\nu / 1 + 4\nu$

μ : le module de cisaillement du matériau.

II.11. Influence des propriétés des matériaux sur la rupture

Les caractéristiques des matériaux sont déterminantes dans la rupture, puisqu'elles affectent directement la résistance à la rupture ainsi que le mode de rupture (ductile ou fragile). Ceci est une explication approfondie de l'impact des caractéristiques des matériaux sur la rupture.

a. Propriétés Mécaniques

- 1) **Coefficient de Young (E)** : Représente la rigidité du matériau. Un module élevé indique que le matériau est plus ferme et moins enclin à se déformer avant de se briser.
- 2) **Coefficient de Poisson (ν)** : Établit le lien entre les distorsions longitudinales et transversales. Cela influence la répartition des contraintes autour des fissures.
- 3) **Limite d'élasticité (σ_y)** : La contrainte maximale tolérée par le matériau sans qu'il y ait déformation permanente. Au-delà de ce seuil, le matériau commence à subir une déformation plastique.
- 4) **Résistance à la rupture (σ_r)** : Tension maximale que le matériau peut supporter avant de se casser [14].

b. Propriétés Microstructurales

- 1) **Composition Chimique** : Les composants d'alliage peuvent renforcer ou diminuer la résistance du matériau. Par exemple, l'incorporation de chrome dans l'acier inoxydable renforce sa capacité à résister à la corrosion [14].
- 2) **Structure Cristalline** : Les anomalies cristallines, telles que les dislocations, peuvent avoir un impact sur l'évolution des fissures [15].
- 3) **Porosités et Inclusions** : Ces anomalies internes peuvent servir de zones où les contraintes se concentrent, facilitant ainsi la cassure [16].

c. Propriétés Thermiques

- 1) **Coefficient de Dilatation Thermique** : Les changements de température peuvent induire des tensions internes résultant de la dilatation inégale, pouvant mener à des cassures.
- 2) **Conductivité Thermique** : Influence la dispersion de la chaleur produite par les déformations plastiques, ce qui influence la propagation des fissures [14].

Exemples Pratiques

1. **Acier inoxydable** : Sa composition chimique et sa structure cristalline renforcent sa résistance à la corrosion et à la rupture.
2. **Matériaux Composites** : Les fibres augmentent la solidité mécanique, néanmoins Les interfaces fibre-matrice peuvent constituer des zones vulnérables pour la diffusion des fractures [13].

II.12. Conclusion :

Le facteur d'intensité de contrainte constitue un indicateur clé pour caractériser la sévérité d'une fissure et prédire son évolution sous contrainte. À travers les développements théoriques et les cas types présentés, ce chapitre a démontré l'importance de ce paramètre dans la conception mécanique et l'analyse de la fiabilité des structures. Ces éléments serviront de base à l'approche numérique développée dans le chapitre suivant, où une modélisation par éléments finis permettra d'illustrer concrètement les effets des fissures sur le comportement mécanique d'un matériau.

Chapitre III

Simulation numérique par ABAQUS 2020

III.1. Présentation du logiciel Abaqus 2020 :

Abaqus 2020 [12] est un logiciel de simulation par éléments finis développé par Dassault Systèmes, largement utilisé dans les secteurs industriel et académique. Ce logiciel permet de modéliser et d'analyser des phénomènes mécaniques complexes en prenant en compte des non-linéarités géométriques, matérielles et de contact. Il se compose principalement de trois modules : Abaqus/Standard, qui utilise une méthode d'intégration implicite adaptée aux analyses statiques et quasi-statiques, Abaqus/Explicit, conçu pour les problèmes dynamiques non linéaires grâce à une intégration explicite, et Abaqus/CAE, une interface graphique complète qui facilite la modélisation, le lancement des calculs et le post-traitement des résultats.

La version 2020 d'Abaqus apporte plusieurs améliorations importantes qui renforcent ses capacités. Parmi celles-ci, on trouve une meilleure gestion des contacts, ce qui améliore la précision des simulations impliquant des interactions complexes entre pièces. Les performances des solveurs ont également été optimisées, permettant de traiter des modèles plus volumineux et complexes avec une plus grande efficacité. De plus, cette version introduit de nouveaux types d'éléments et des lois matériaux supplémentaires, ce qui élargit les possibilités de modélisation. L'interface utilisateur d'Abaqus/CAE a été repensée pour offrir une meilleure ergonomie et faciliter la prise en main du logiciel, ce qui est particulièrement utile pour les utilisateurs débutants ou ceux qui souhaitent gagner du temps dans leurs projets.

Abaqus est capable de traiter plusieurs domaines physiques, notamment la mécanique, la thermique et l'électrique, ainsi que leurs couplages. Il permet de réaliser des analyses linéaires et non linéaires, en statique comme en dynamique. Le processus de simulation est organisé autour de trois étapes principales : le prétraitement, qui comprend la création de la géométrie, le maillage, la définition des matériaux et des conditions aux limites ; le calcul, réalisé par les solveurs Abaqus/Standard ou Abaqus/Explicit ; et enfin le post-traitement, où les résultats sont visualisés et analysés grâce aux outils graphiques d'Abaqus/CAE. Le logiciel offre aussi la possibilité d'automatiser les tâches répétitives ou complexes via des scripts en Python, ce qui est un atout majeur pour les projets nécessitant beaucoup de simulations paramétriques.

Les applications d'Abaqus sont très variées et couvrent de nombreux domaines de l'ingénierie. Il est particulièrement prisé pour la simulation de comportements complexes

tels que l'endommagement, la rupture, ou encore le comportement des matériaux composites, des caoutchoucs et des tissus biologiques. Abaqus est également utilisé pour des études thermomécaniques, la mécanique des structures, ainsi que pour la simulation de procédés industriels comme l'usinage. Sa capacité à modéliser avec précision des phénomènes complexes en fait un outil incontournable pour les projets de fin d'études qui nécessitent une analyse approfondie et fiable.

En résumé, Abaqus 2020 est un logiciel puissant et polyvalent qui offre une large gamme de fonctionnalités pour la simulation numérique avancée. Sa capacité à gérer des problèmes mécaniques complexes, son interface conviviale et ses performances améliorées en font un choix idéal pour les étudiants et les professionnels souhaitant réaliser des projets de simulation de haute qualité. Son utilisation dans un projet de fin d'études permettra de développer des compétences solides en modélisation, analyse et interprétation des résultats, tout en offrant une expérience pratique avec un outil industriel reconnu.

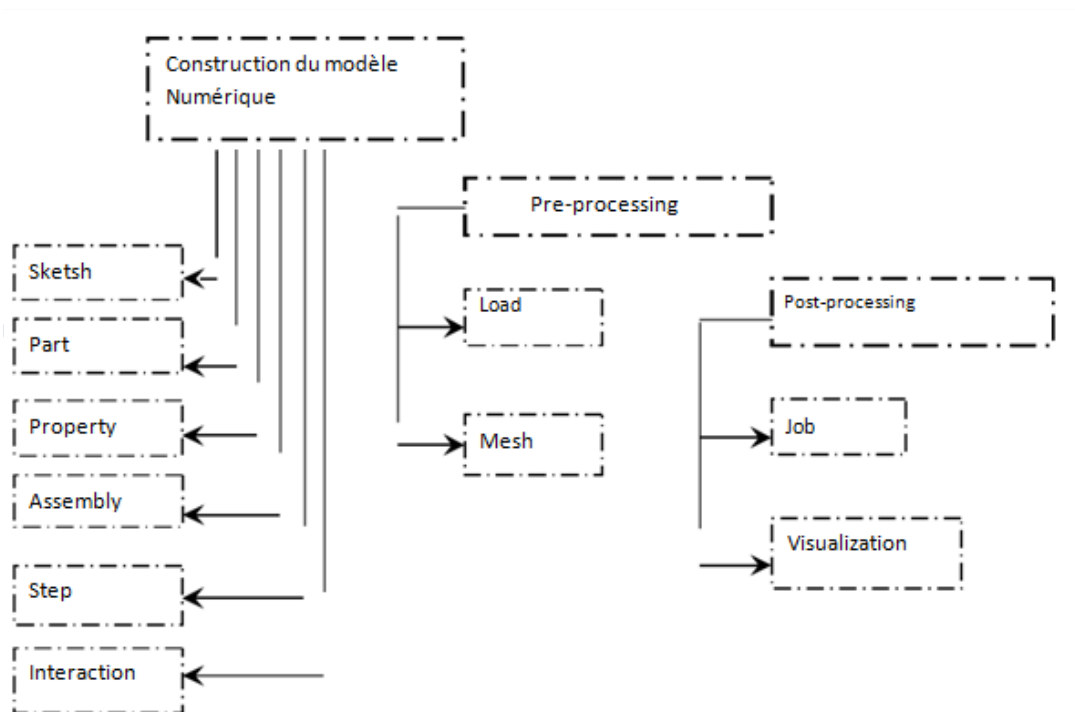


Figure.III. 1: Organigramme ABAQUS CAE

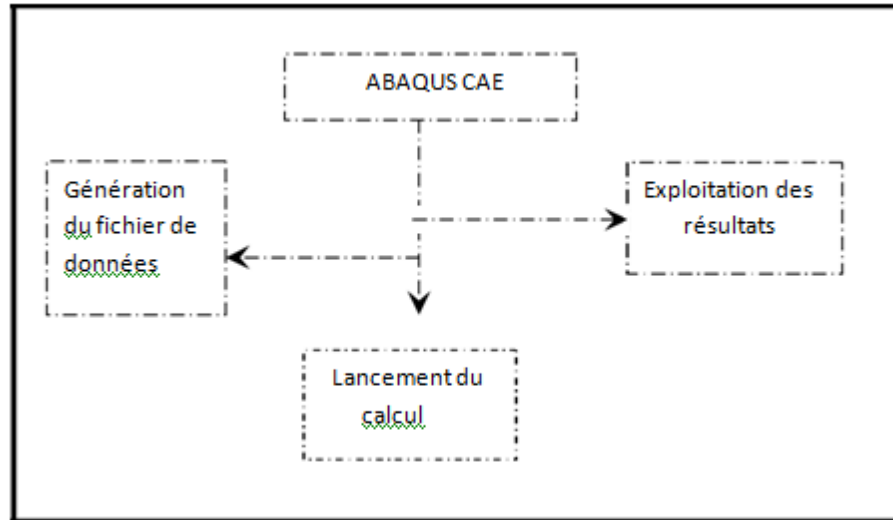


Figure.III. 2: Organigramme de simulation

III.2. Modèle utilisé :

Dans cette section du projet, la technique des éléments finis a été mise en œuvre pour examiner la répartition des contraintes mécaniques et le facteur d'intensité de contrainte K_I qui caractérise une fissure placée sur le bord d'une plaque. La géométrie examinée se réfère à une plaque rectangulaire en Aluminium pur, ayant des dimensions $L \times H \times e$ (longueur, hauteur, épaisseur), qui présente une fissure linéaire d'une certaine taille a , située sur l'un des bords. La plaque est exposée à une contrainte mécanique continue σ , exercée de façon unidirectionnelle sur les surfaces en vis-à-vis, simulant une condition de traction plane.

Sur la figure III.3 est représenté le modèle géométrique analysé.

Le modèle a été discrétisé en utilisant un maillage fin autour de la fissure, avec des éléments de type un élément quadratiques (C3D20R) avec 26502 nœuds. Le nombre d'éléments est 23820. Pour saisir précisément les variations de contrainte (figure III.3e) :

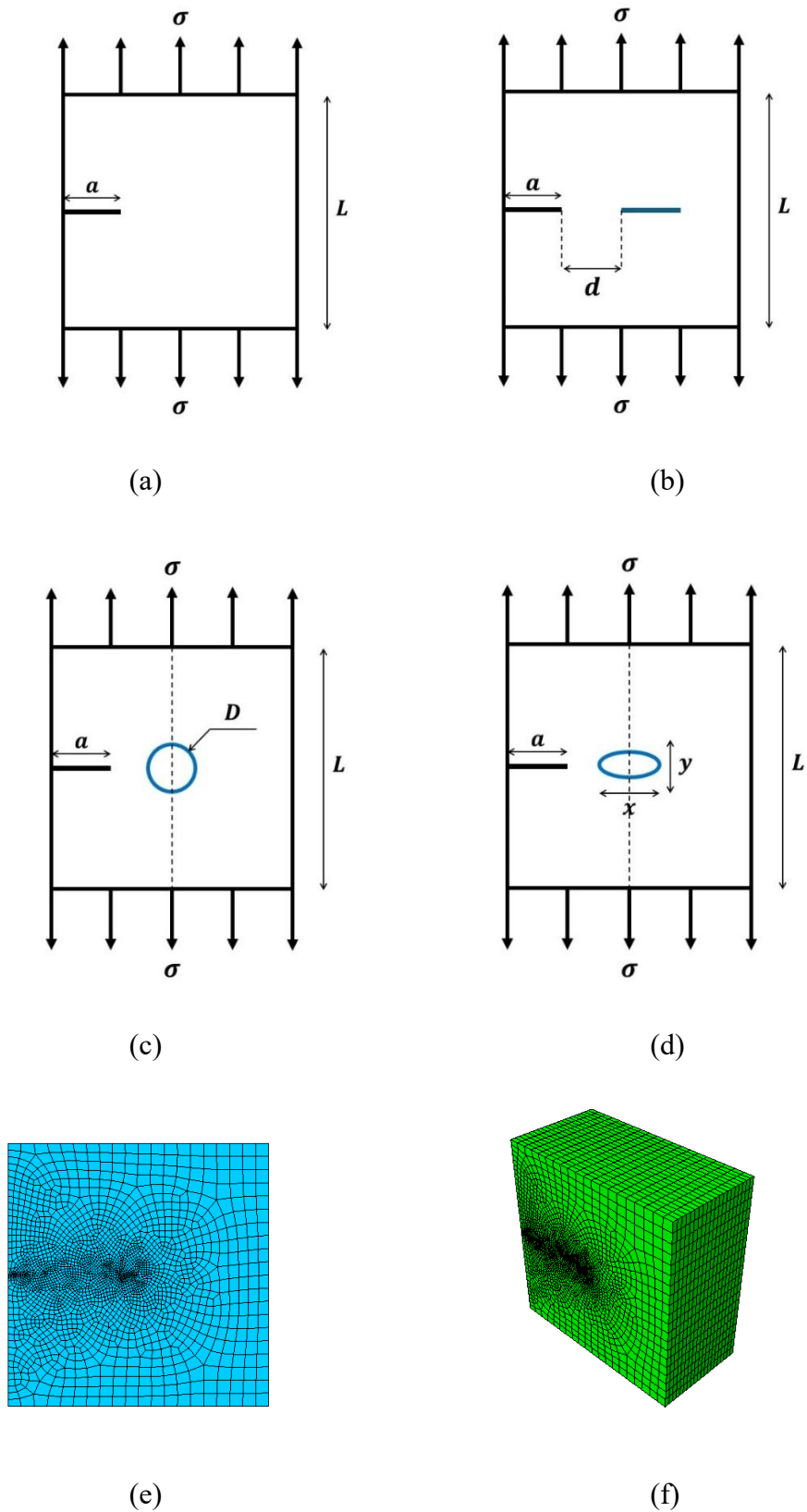


Figure.III. 3: Représentation schématique du modèle : (a) fissure au côté, (b) interaction fissure-fissure, (c) interaction fissure-défaut, (d) changement de forme du défaut (e) Maillage par éléments finis, (f) model 3D

Le tableau III.1 suivant présente les données géométriques de la plaque :

Grandeurs	Valeur	Unité
Longueur de la plaque L	300	μm
Largeur de la plaque L	300	μm
La longueur initiale de la fissure a	25	μm
Epaisseur de la plaque	150	μm

Tableau.III. 1: Les données géométriques de la plaque

Le tableau III. 2 présente les propriétés mécaniques d'aluminium pur :

Grandeur	Valeur	Unité
Limite élastique (R_e)	40	MPa
Module de Young (E)	67	GPa
Coefficient de Poisson	0.34	
La contrainte appliquée (σ)	25	MPa

Tableau.III. 2: Propriétés mécaniques de Al

L'analyse numérique est effectuée à l'aide du logiciel ABAQUS . On modifie la longueur de la fissure de 25 μm à 100 μm .

Le code de calcul Abaqus fournit les valeurs des facteurs d'intensité de contraintes en mode d'ouverture et en mode de cisaillement pour chaque longueur de fissure.

III.3. Résultats et analyse :

III.3.1. Distribution des contraintes :

L'intensité et la répartition des contraintes mécanique équivalentes et normales dans la plaque autour du défaut déterminent durée de vie de cette plaque.

La figure III.4 représente la distribution de la contrainte équivalente de Von mises et des contraintes normales dans la plaque. L'analyse du champ de contraintes, indiquent clairement que les contraintes prennent leur niveau plus élevé près de la fissure et diminue à un niveau bas loin de cette dernière.

Sous une charge de $\sigma = 25$ MPa, les contraintes de Von Mises et les contraintes normales atteignent leur maximum près de la fissure, indiquant que cette région est celle qui subit le plus de stress.

L'étude démontre une concentration marquée de contraintes près de la fissure, qui diminuent graduellement à mesure qu'on s'en éloigne.

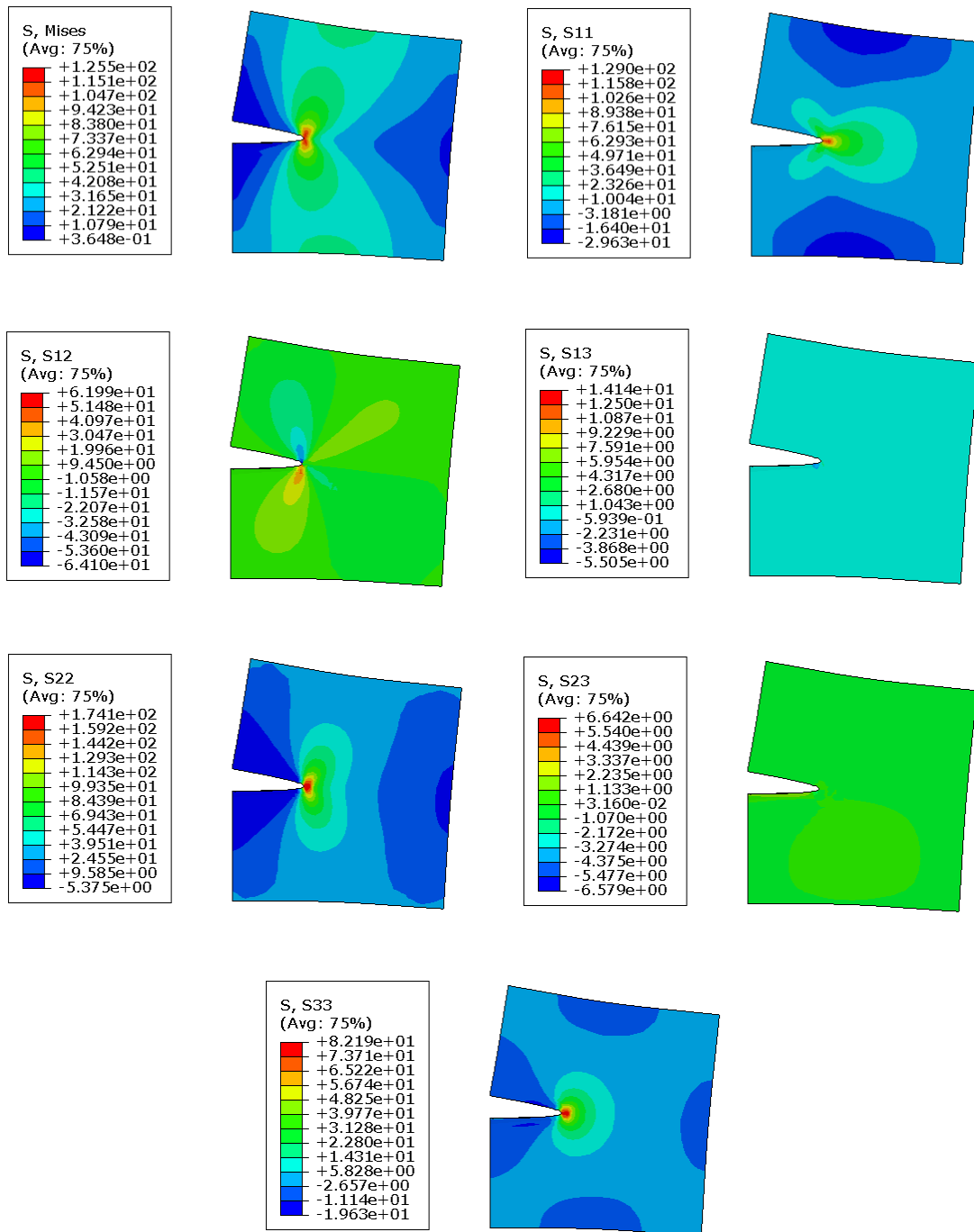


Figure.III. 4: Distribution de la contrainte équivalente, normales et tangentielles pour un chargement mécanique : $\sigma = 25 \text{ MPa}$.

Le tableau suivant donne les résultats trouvés numériquement de K_I et K_{II} pour différentes longueurs de fissure.

a (μm)	K_I ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$)	K_{II} ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$)
2	8.41	-1.55
50	12.58	-0.21
75	20.56	-1.76
100	29.50	0.41

Tableau. III. 3: K_I et K_{II} pour différentes longueurs de fissure

Les résultats obtenus à partir de cette analyse sont représentés sur les figures III.5 et III.6. Cette dernière montre la variation des facteurs d'intensité de contraintes en fonctions de la longueur de fissure " a ".

Sur la figure est représentée l'influence de la taille de fissure sur le facteur d'intensité de contraintes en mode d'ouverture. Celle-ci montre clairement que l'intensité de ce facteur croît avec l'accroissement de la taille de fissure. En effet une fissure deux fois plus longue engendre un facteur d'intensité de contraintes deux fois plus significative. La figure 4 présente la variation de K_{II} en fonction de la taille de fissure a . Elle montre clairement que la valeur du facteur d'intensité de contraintes K_{II} reste relativement faible. Il est négligeable par rapport à K_I .

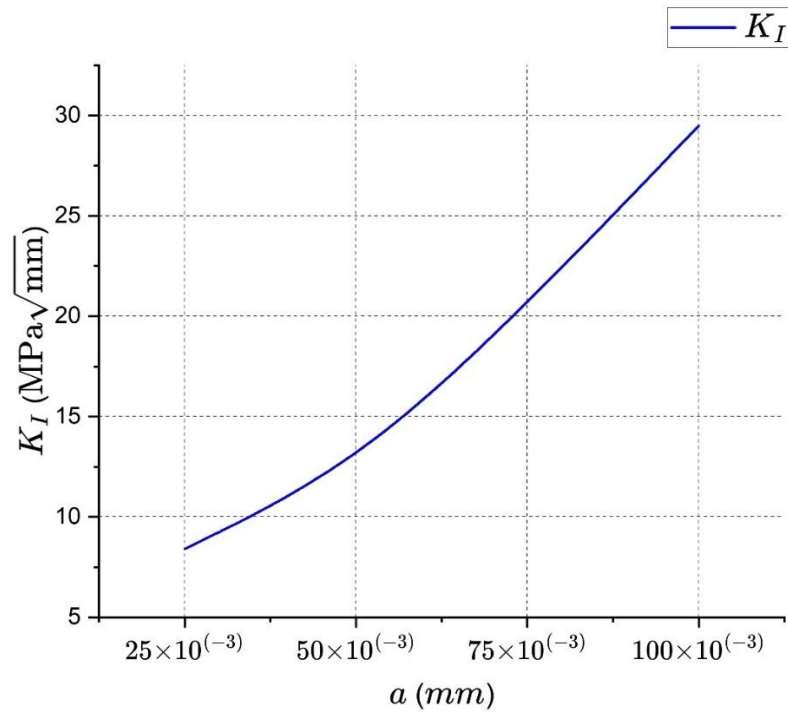


Figure.III. 5: Variation de K_I en fonction de a pour $\sigma = 25 \text{ MPa}$

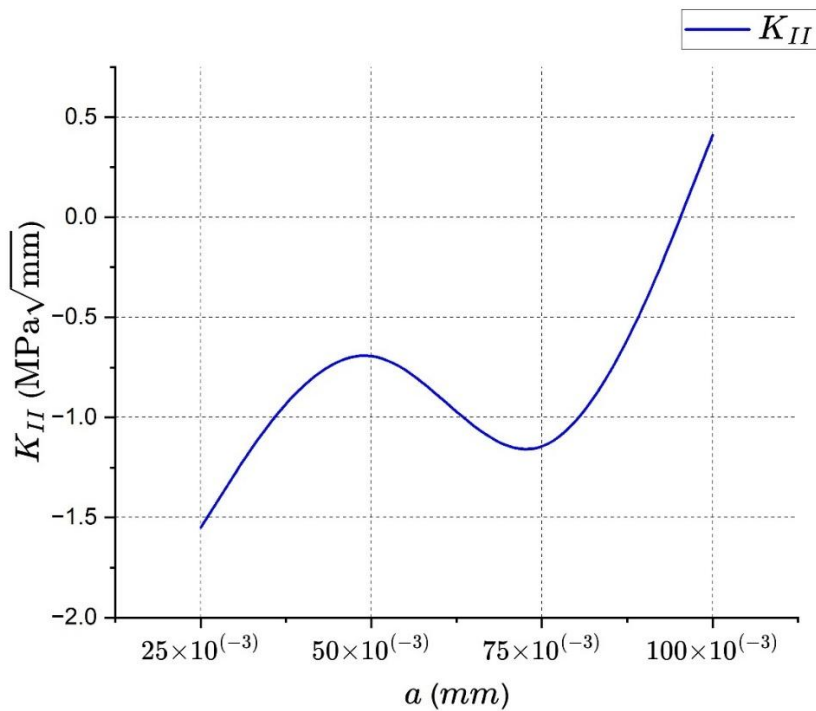


Figure.III. 6: Variation de K_{II} en fonction de a pour $\sigma = 25 \text{ MPa}$

III.3.2. Effet de la charge appliquée :

Dans cette section, on va prendre trois charges mécaniques, et on varie la longueur de la fissure de $25\mu\text{m}$ jusqu'à $100\mu\text{m}$. Ces valeurs de la charge appliquée sont inférieures aux limites d'élasticité d'aluminium.

Pour chaque chargement, on va déterminer la variation des facteurs d'intensité de contraintes en mode I et II en fonction de la taille de fissure.

L'effet du chargement mécanique sur la variation des facteurs d'intensité de contraintes en mode d'ouverture et de cisaillement est représenté sur les figures III.7 et III.8. Ces figures montrent clairement qu'un effort plus intense induit un facteur KI plus fort. La valeur du facteur d'intensité de contraintes KII reste relativement faible.

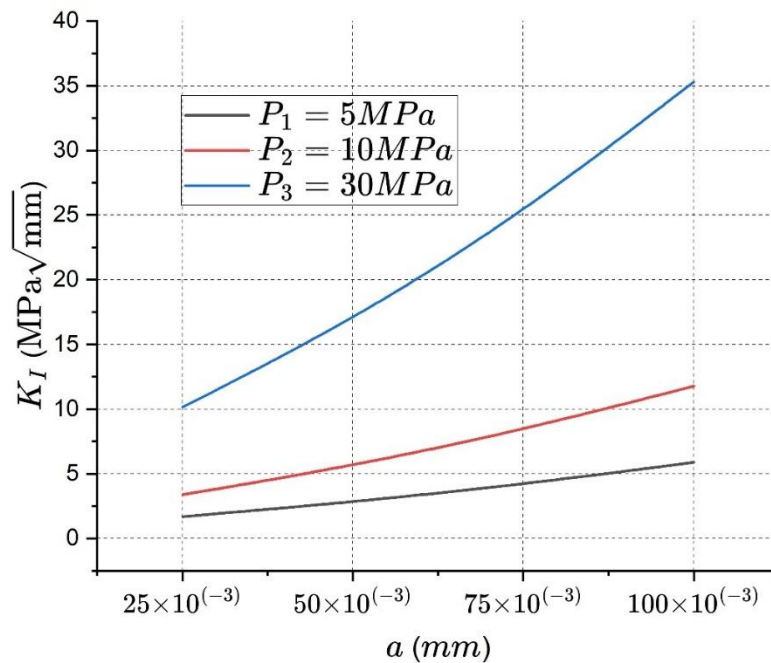


Figure.III. 7: Variation de K_I en fonction de a et les contraintes appliquées de traction

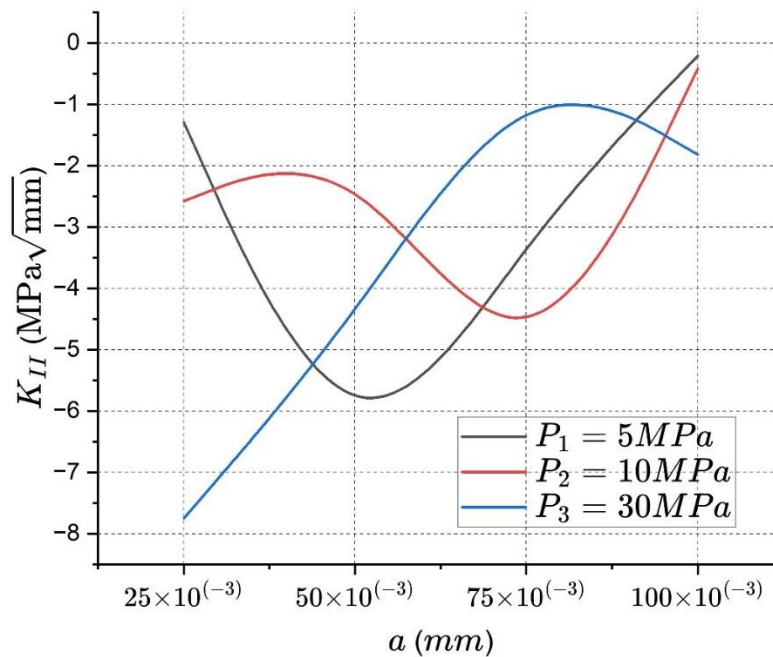


Figure.III. 8: Variation de K_{II} en fonction de a et les contraintes appliquées de traction

III.3.3. Effet du module d'Young E :

On analyse l'effet du module de Young sur la variation du facteur d'intensité de contrainte K_I en fonction de la longueur de la fissure. Trois valeurs différentes du module de Young sont considérées : E_1 , $E_2 = E_1/2$, $E_3 = 2E_1$, tout en gardant la même charge appliquée fixée à **25 MPa**. La fissure varie de **25 à 100 μm** .

Les figures III.9 et III.10 montrent clairement que le facteur K_I augmente avec la taille de la fissure, quel que soit le module de Young utilisé.

Les modules de Young étudiés peuvent être associés aux matériaux suivants :

- $E_1 = 67$ GPa : correspond typiquement à l'**aluminium** ou à certains **alliages de magnésium**.
- $E_2 = 33.5$ GPa : peut représenter un **composite à matrice polymère**, un **plastique rigide**, ou un **matériau organique comme le bois technique**.

- $E_3=134$ GPa : correspond à des matériaux plus rigides tels que certains **alliages de titane**, des **composites à fibres de carbone**, ou des **matériaux céramiques renforcés**.

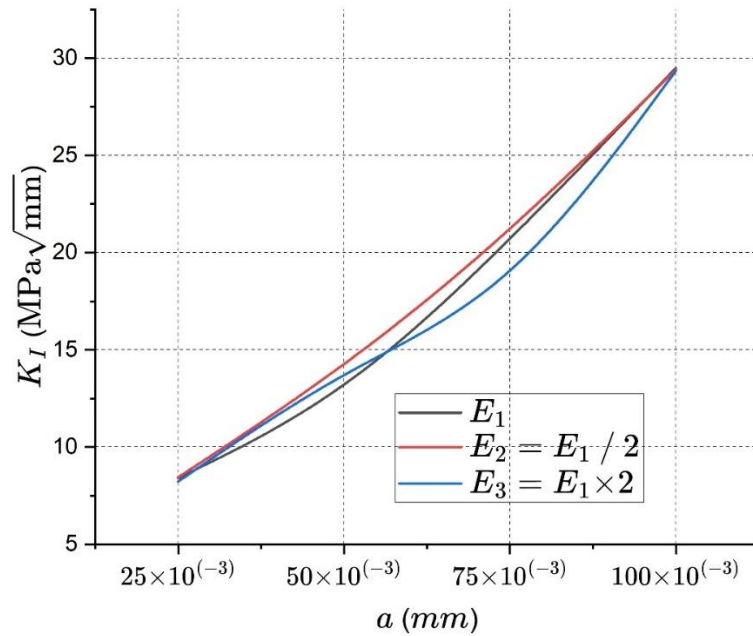


Figure.III. 9: Variation de K_I en fonction de a et Les modules d'Young E

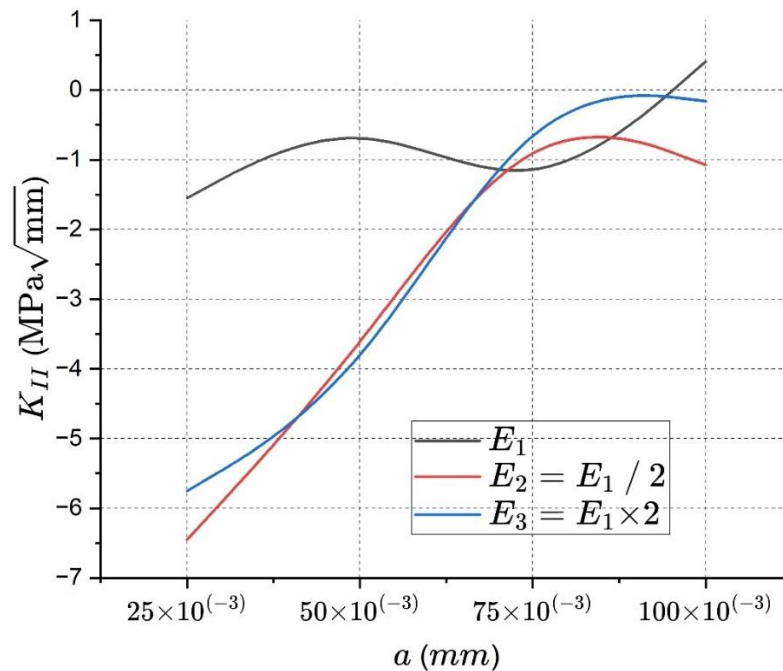


Figure.III. 10: Variation de K_{II} en fonction de a et Les modules de young E

III.3.4. Effet d'interaction Fissure - Pore :

Dans cette partie du travail, une analyse de l'effet d'interaction fissure –pore sur la distribution des contraintes normales et de Von Mises dans la plaque fissurée et sur le **FIC** a été analysé. On va fixer les dimensions de la plaque, la taille de fissure et le diamètre du pore. On a pris le diamètre du pore égal $D = 50\mu$ à la taille de la fissure (a) . Les résultats ainsi obtenus sont illustrés sur la figure III.11. Cette figure illustre la distribution de la contrainte équivalente proche de la fissure et du pore. On observe clairement que les contraintes maximales se concentrent autour de la fissure, tandis qu'à distance de celle-ci, l'éprouvette ne subit pratiquement plus de contraintes.

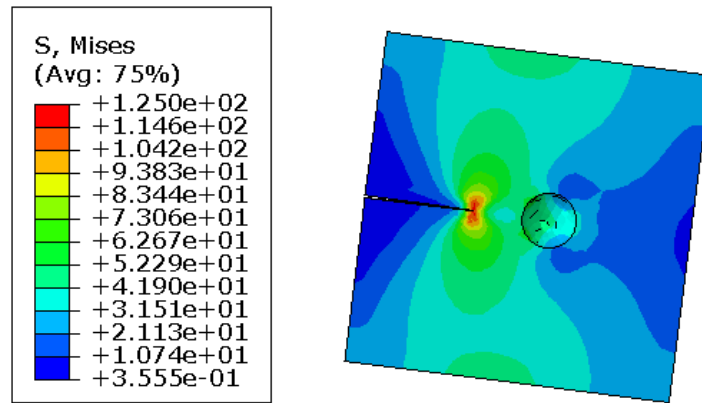


Figure.III. 11: Effet de l'interaction fissure-pore sur la distribution de la contrainte équivalente pour $\sigma = 25 \text{ MPa}$ et la taille $a = 0.01 \text{ mm}$

Le tableau suivant présente les valeurs numériques des facteurs d'intensité de contrainte KI et KII en fonction de la taille de fissure située à proximité d'un défaut de type pore.

$a \text{ (}\mu\text{m)}$	$K_I \text{ (MPa}\sqrt{\text{mm}})$	$K_{II} \text{ (MPa}\sqrt{\text{mm}})$
25	8.43	-4.03
50	12.70	-0.14
75	21.15	-0.18
100	30.46	-0.34

Tableau.III. 4: KI et KII pour différentes longueurs de fissure

On note une augmentation significative de KI avec l'augmentation de la longueur de la fissure. Cette croissance traduit une concentration croissante des contraintes en mode d'ouverture (mode I) au fur et à mesure que la fissure s'allonge (figure III.12).

À l'inverse, le facteur KII (figure III.13), qui correspond au mode de glissement, reste relativement faible en amplitude et négatif dans la majorité des cas, ce qui suggère une faible composante de cisaillement et une prédominance du mode I dans le mécanisme de rupture. Notamment, le facteur KII est très proche de zéro pour des fissures de taille moyenne (50–75 μm), ce qui pourrait indiquer un changement d'orientation ou de symétrie dans le champ de contraintes.

Ces résultats sont essentiels pour mieux comprendre la propagation des fissures dans un matériau poreux et pour anticiper les mécanismes de rupture sous chargement mixte.

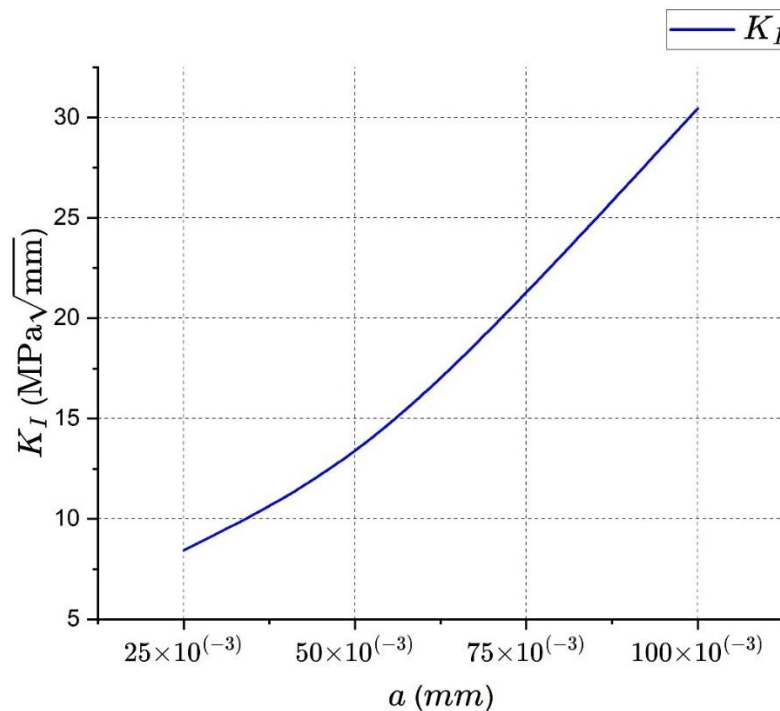


Figure.III. 12: Variation de K_I en fonction de a pour $\sigma = 25 \text{ MPa}$

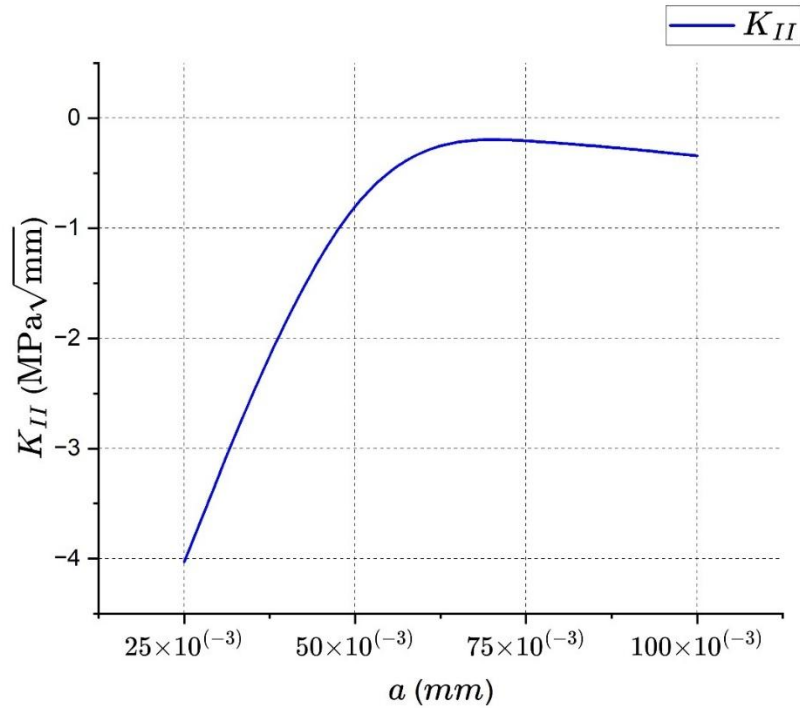


Figure.III. 13: Variation de K_{II} en fonction de a pour $\sigma = 25 \text{ MPa}$

III.3.5. Effet d'interaction Fissure - Fissure :

Dans cette partie, l'effet d'interaction entre deux fissures est étudié. La longueur de la fissure centrale a est fixée, et la charge appliquée est de 25 MPa. L'effet d'interaction entre deux fissures sur la variation des facteurs d'intensité de contrainte est représenté sur la figure.

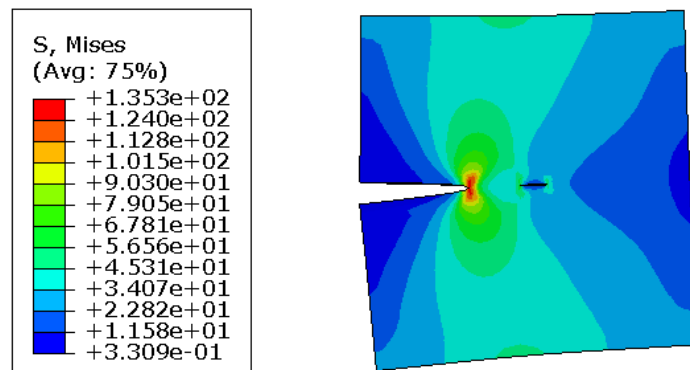


Figure.III. 14: Effet de l'interaction Fissure - Fissure sur la distribution de la contrainte équivalente pour $\sigma = 25 \text{ MPa}$ et $a = 100 \mu\text{m}$

Les figures III.14, III.15 et III. 16 montrent clairement que l'interaction entre deux fissures influence fortement les facteurs d'intensité de contrainte. Lorsque les fissures sont proches, on observe une augmentation notable de la contrainte équivalente et de K_I . Cette interaction diminue progressivement avec l'augmentation de la distance entre fissures. Le mode I reste prédominant, tandis que le mode II est peu affecté.

La courbe de K_{II} en fonction de la longueur de fissure (Figure III.13) montre des valeurs globalement faibles et négatives, ce qui traduit une faible contribution du mode II, dominé par le mode I. En revanche, la courbe de K_{II} sous l'effet d'interaction entre deux fissures (Figure III.16) révèle une légère perturbation du champ de cisaillement : K_{II} varie plus, surtout lorsque les fissures sont proches. Cela suggère que l'interaction entre fissures peut localement renforcer ou atténuer les effets de cisaillement, bien que ces derniers restent secondaires par rapport au mode I.

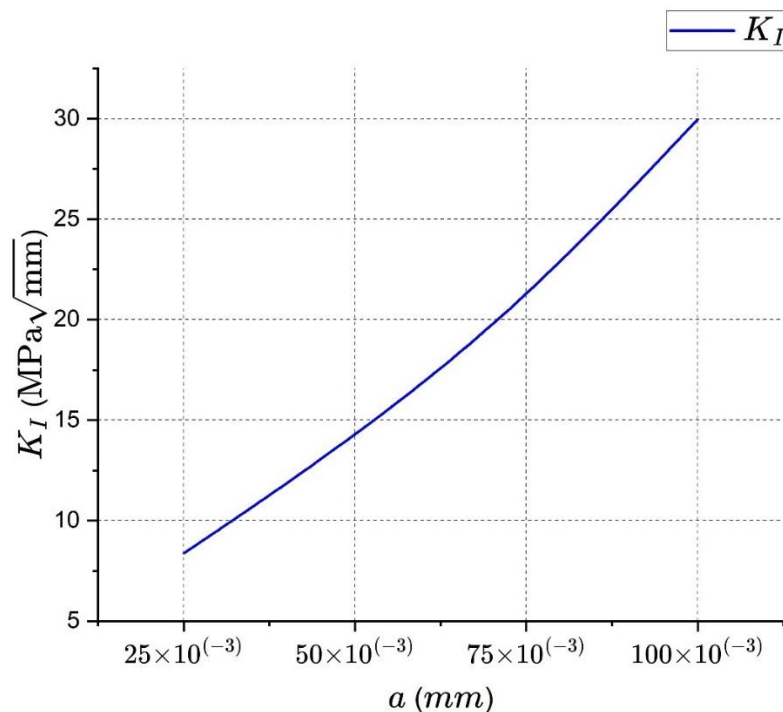


Figure.III. 15 Variation de K_I en fonction de a pour $\sigma = 25$ MPa

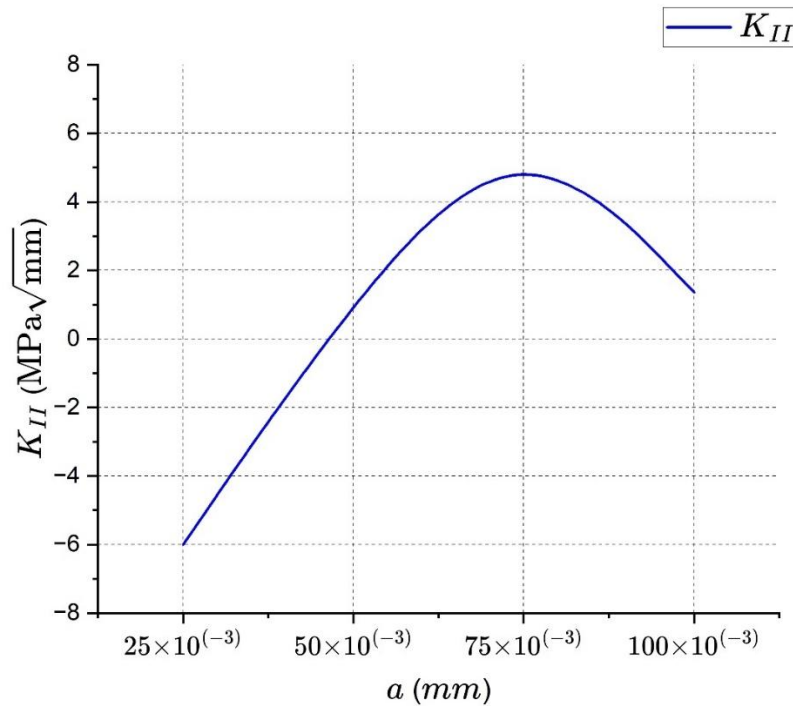


Figure.III. 5: Variation de K_{II} en fonction de a pour $\sigma = 25 \text{ MPa}$

III.3.6. Effet d'interdistance Fissure - Fissure :

Dans cette partie d'étude, on va fixer la longueur de fissure a pour les deux fissures et on va changer la distance entre les deux et la charge appliquée.

L'effet d'interdistance entre deux fissures identiques sur la variation et la distribution de la contrainte équivalente est représenté sur la figure II.17. Cette figure montre que comparativement à la présence d'une seule fissure, la présence de deux fissures proches l'un de l'autre induit dans la plaque des contraintes équivalentes beaucoup plus intenses.

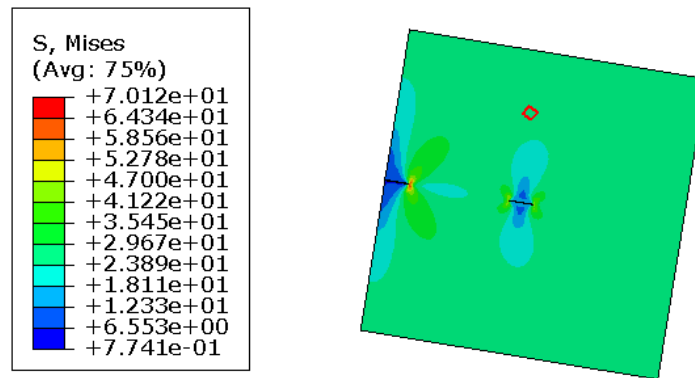


Figure.III. 6: Effet de l'interdistance fissure-fissure sur la distribution de la contrainte équivalente de Von mises pour $\sigma = 25 \text{ MPa}$ et la distance $d = 25 \mu\text{m}$

La figure III.18 montre que le facteur d'intensité de contrainte K_I diminue lorsque la distance entre les deux fissures augmente. Lorsque les fissures sont très proches, leurs effets s'ajoutent, augmentant localement le facteur d'intensité de contrainte en mode I. À mesure que l'écartement augmente, l'interaction s'affaiblit, et le facteur K_I tend vers une valeur correspondant à celle d'une seule fissure.

Contrairement au facteur d'intensité de contrainte K_I , le facteur K_{II} reste généralement faible, mais présente une variation non négligeable pour de faibles distances (figure III.19). Une asymétrie dans le champ de contraintes peut être induite par l'interaction, générant un léger cisaillement. Cependant, cet effet décroît rapidement avec l'augmentation de l'interdistance, confirmant que le mode II est inférieur dans cette condition.

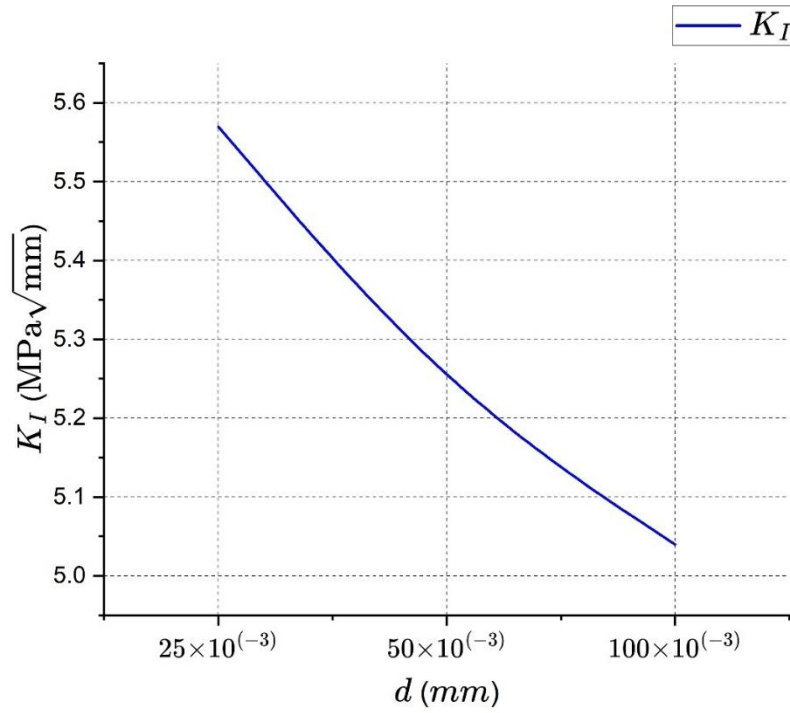


Figure.III. 7: Variation de K_I en fonction de la distance d pour $\sigma = 25 \text{ MPa}$

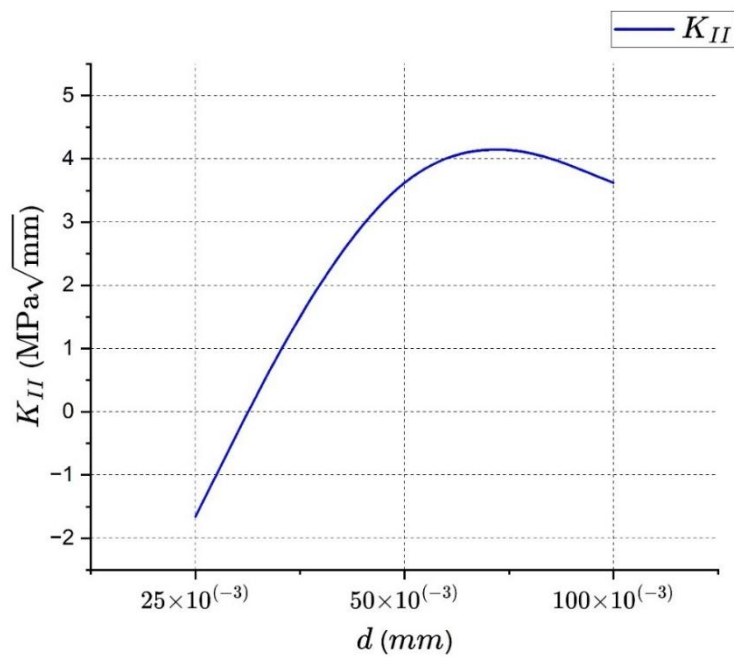


Figure.III. 8: Variation de K_{II} en fonction de distance d pour $\sigma = 25 \text{ MPa}$

III.3.7. Effet du diamètre du pore :

Dans cette partie du travail, une analyse de l'effet du diamètre du pore sur la distribution des contraintes de Von Mises dans une plaque fissurée est réalisée. Les dimensions de la plaque sont fixées, tandis que le diamètre du pore est modifié. La longueur de la fissure est tenue constante à $a=50\mu\text{m}$. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure III.20.

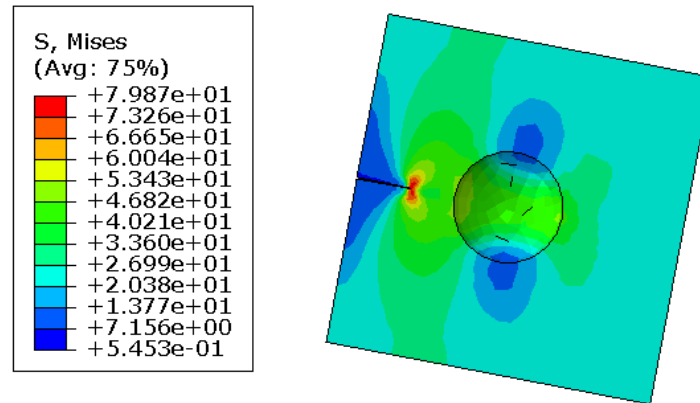


Figure.III. 20: Effet de diamètre du défaut sur la distribution de la contrainte équivalente pour $\sigma = 25 \text{ MPa}$ et diamètre du pore $D = 100\mu\text{m}$

Les figures montrent que l'augmentation du diamètre du pore entraîne une augmentation du facteur d'intensité de contrainte. En particulier, le facteur K_I (Figure III.21), représentant le mode d'ouverture, augmente significativement avec le diamètre du pore, traduisant une intensification de la concentration des contraintes autour de la fissure. La courbe de K_{II} (Figure III.22), bien que moins marquée, présente également une légère évolution, suggérant que l'accroissement du pore modifie légèrement le champ de cisaillement. Ces résultats indiquent que la taille du défaut adjacent influence fortement le comportement en rupture de la plaque fissurée.

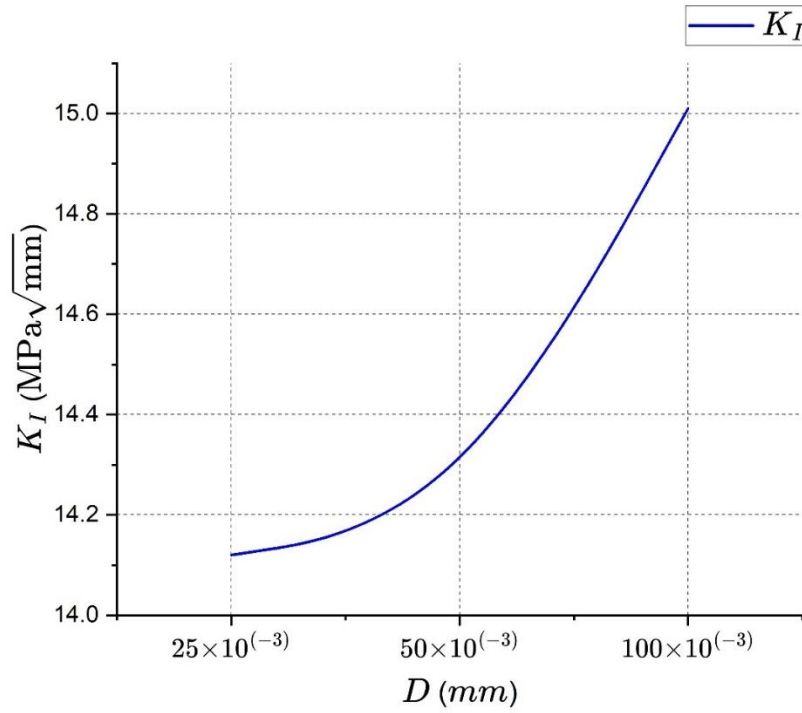


Figure.III. 21: Variation de K_I en fonction de diamètre du pore D pour $\sigma = 25 \text{ MPa}$

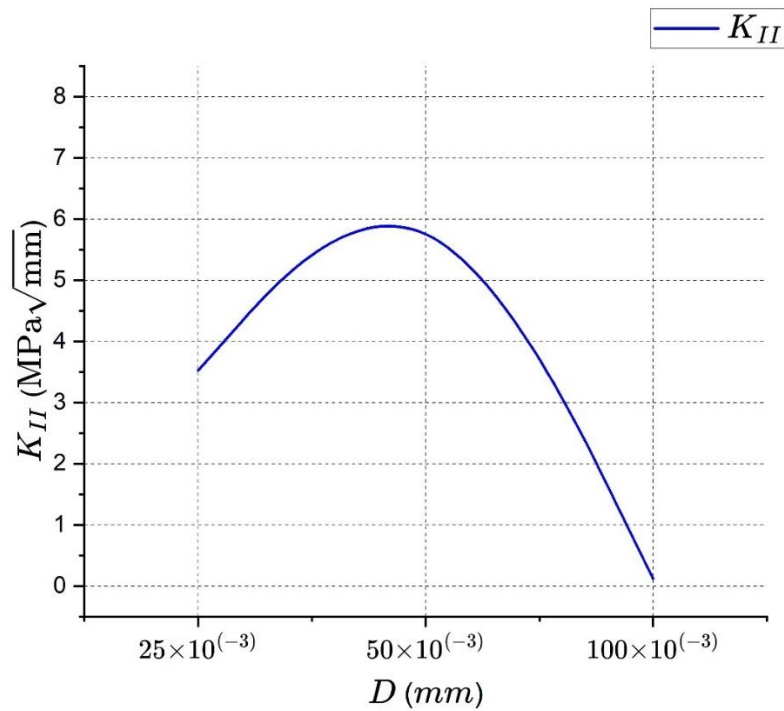


Figure.III. 22: Variation de K_{II} en fonction de diamètre du pore D pour $\sigma = 25 \text{ MPa}$

III.3.8. Effet de la forme du défaut(pore) :

Dans cette partie, on étudie l'effet de la **forme géométrique du pore** sur la distribution des contraintes dans une plaque fissurée. La fissure et les dimensions de la plaque sont maintenues constantes, tandis que la forme du pore varie : circulaire, elliptique, ou allongée. Cette variation permet d'évaluer l'effet de la géométrie du défaut sur les facteurs d'intensité de contrainte sous une charge appliquée de 25 MPa.

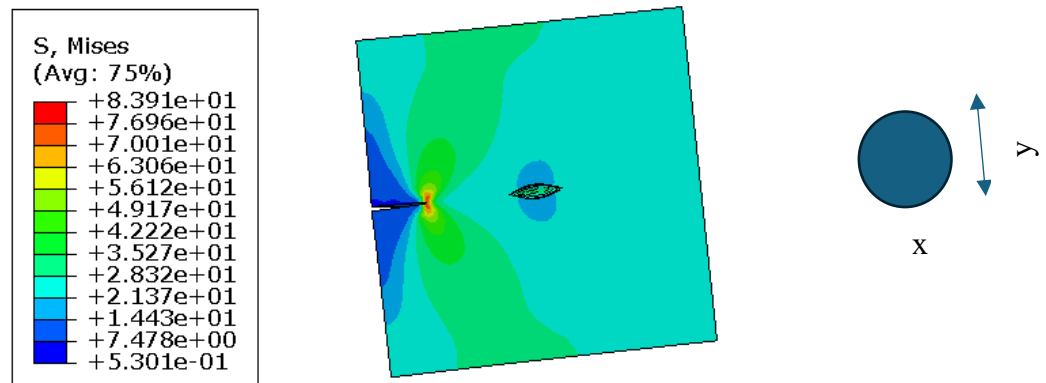


Figure.III. 9: Variation de K_{II} en fonction de la forme du pore pour $\sigma = 25 \text{ MPa}$

La modification de la **forme du pore** a un effet significatif sur la **distribution de la contrainte équivalente de Von Mises (figure III.23)**. Lorsque le pore devient elliptique ou allongé, on observe une **concentration plus intense des contraintes** autour de ses extrémités, ce qui accroît le risque de rupture locale. Ce phénomène est confirmé par l'augmentation du facteur KI (figure III.24), qui traduit une intensification du mode d'ouverture de la fissure sous l'effet de la forme effilée du défaut.

Le facteur KII peut également varier selon l'orientation et l'asymétrie du pore, indiquant une légère contribution du cisaillement (mode II) (figure III.25). Ces résultats montrent que **la forme du défaut influence non seulement le niveau de contrainte dans le matériau, mais aussi les modes dominants de propagation de fissure.**

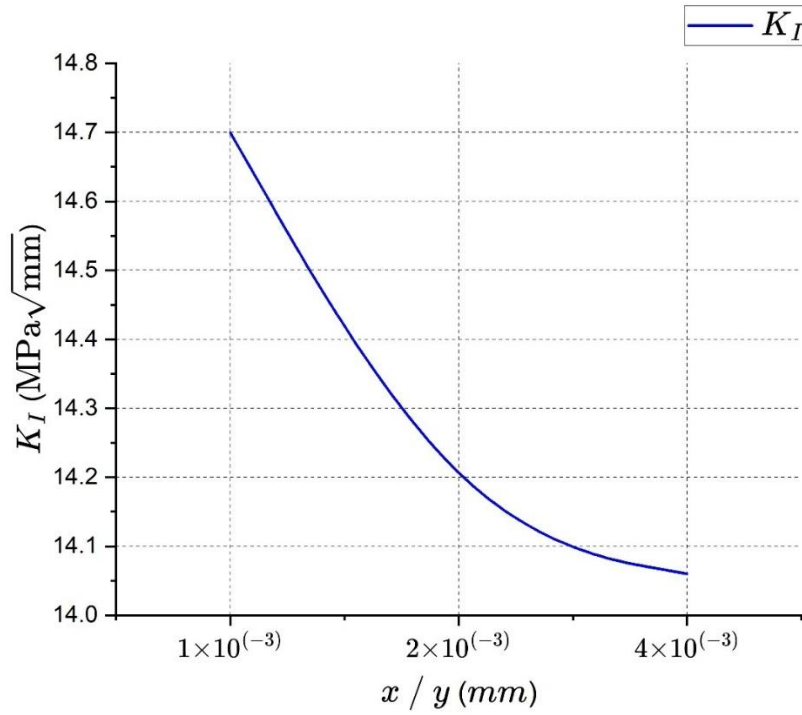


Figure.III. 24: Variation de K_I en fonction de x/y pour $\sigma = 25 \text{ MPa}$

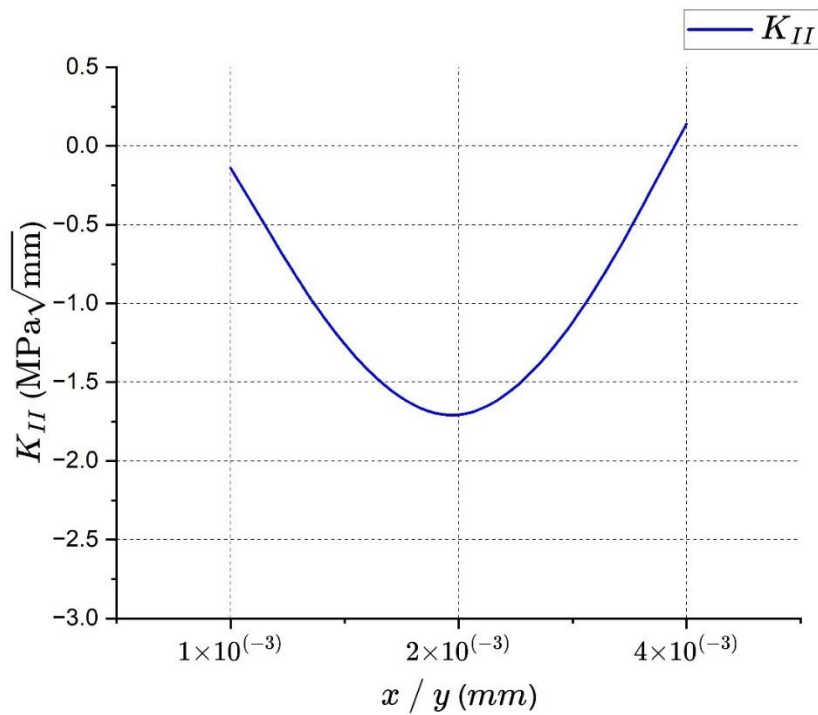


Figure.III. 10: Variation de K_{II} en fonction de x/y pour $\sigma = 25 \text{ MPa}$

Conclusion générale :

Les résultats obtenus numériquement à l'aide de la méthode des éléments finis montrent que le facteur d'intensité de contrainte (FIC) augmente avec la longueur de la fissure.

Cette augmentation s'explique par le fait que, plus une fissure est longue, plus les contraintes mécaniques se concentrent à son extrémité, appelée pointe de fissure. En effet, l'allongement de la fissure modifie le champ de contraintes autour de cette zone critique, ce qui provoque une élévation du FIC. Cela signifie que le matériau devient plus sensible à la propagation de la fissure à mesure que celle-ci grandit, ce qui peut accélérer l'endommagement de la structure.

L'augmentation de la charge appliquée entraîne une élévation proportionnelle du facteur d'intensité de contrainte en modes I et II. Autrement dit, le facteur d'intensité de contrainte (KI et KII) évolue linéairement avec la charge : si la charge appliquée est doublée, les valeurs de KI et de KII doublent également.

Quand un pore est proche d'une fissure, il augmente les contraintes autour de celle-ci, ce qui rend la fissure plus susceptible de s'agrandir. Plus le pore est près, plus l'effet est important.

Lorsque deux fissures sont proches, leur interaction augmente le facteur KI, qui diminue progressivement avec l'écartement jusqu'à atteindre celui d'une fissure isolée. Le facteur KII reste faible, avec une légère variation due au cisaillement induit par l'interaction à courte distance.

La taille du pore, en particulier son diamètre, a un impact significatif sur la distribution du facteur d'intensité de contrainte en modes I et II. Une variation de ce paramètre modifie le champ de contraintes autour du pore, affectant ainsi les valeurs locales de KI et KII.

La forme du pore influence fortement la distribution des contraintes et les modes de rupture. Un pore allongé ou elliptique provoque une concentration accrue des contraintes et une hausse du facteur KI, favorisant l'ouverture de fissure. Le facteur KII varie aussi selon l'orientation, indiquant une contribution du cisaillement.

Référence bibliographique

- [1] T. Anderson, Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, 3rd Edition éd., Boca Raton, FL: CRC Press (Taylor & Francis Group), 2005, p. 621.
- [2] D. Broek, Elementary Engineering Fracture Mechanics, 4^e édition éd., Dordrecht: Springer Netherlands, 1986, p. 437.
- [3] S. T. R. John M. Barsom, Fracture and Fatigue Control in Structures: Applications of Fracture Mechanics, 3^e édition éd., West Conshohocken, PA: ASTM International, 1999, p. 516.
- [4] M. H. S. e. M. R. Abdelhak, «Facteur d'intensité de contrainte d'une structure fissurée,» Belhadj Bouchaib Ain Temouchent Université, Ain Temouchent, 2021.
- [5] D. R. J. Michael F. Ashby, Matériaux pour l'ingénieur, 1^{re} édition française (traduction de l'édition américaine) éd., vol. 2 tomes, 2013: Dunod, collection Sciences Sup, 2013, p. 700+ pages par tome.
- [6] M. Z. M. E. Sallah, «Mécanique de la rupture et endommagement,» UNIVERSITE DE IBN KHALDOUN TIARET, TIARET, 2023.
- [7] T. MALLET, «L'effet de différentes formes de défaut latéral Sur le comportement mécanique dans une plaque en alliage d'aluminium par la méthode des éléments finis étendus (XFEM),» TAVES' MALLET, .., 2018.
- [8] M. k. L. M. E. Habib, «Etude par les éléments finis de la propagation de la fissure d'une plaque,» Mesli kamel Lakehal Mohammed El Habib, OUARGLA, 2018.
- [9] M. Bencherif, Évaluation numérique de la ténacité JIC pour un acier A508 AISI (16MND9), Tizi-Ouzou: Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2018, p. 58.
- [10] W. D. & R. D. G. Callister, Science et génie des matériaux : une introduction, 10^e édition éd., .: Wiley, 2020.
- [11] D. & B. D. J. Hull, Introduction to Dislocations, 4^e édition éd., Oxford / Boston: Butterworth-Heinemann, 2001, p. 242.
- [12] B. Lawn, Fracture of Brittle Solids (Rupture des solides fragiles), 2^e édition éd., Cambridge: Cambridge University Press, 1993, p. 400.

Référence bibliographique

- [13] H. H. M. Y. V. S. M. M. J. Fu, A Linear Elastic Fracture Mechanics Analysis of the Pre-Cracked Concrete Failure Mechanism Under Modes I, II, III, and IV Loading Conditions, .: Springer, 2021, p. 796.
- [14] TECHNIA, «Abaqus,» Explicit - High-Speed Event Simulation, 4 avril 2025. [En ligne]. Available: [https://www.technia.com/software/simulia/abaqus/explicit/..](https://www.technia.com/software/simulia/abaqus/explicit/)
- [15] G. Sih, Linear Elastic Fracture Mechanics, 1^{re} édition éd., Leyde: Noordhoff International Publishing, 1973.
- [16] J.-L. P. Sébastien Grange, La mécanique de la rupture et la mesure de la ténacité, .: Ministère de l'Éducation nationale (plateforme Eduscol STI), 2017, p. 63.