

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
الجامعة عين تموشنت
Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
Institut de Technologie
Département de Génie Mécanique



Projet de fin d'étude
Pour l'obtention du diplôme de Master
Domaine : TECHNOLOGIE
Filière : GENIE MECANIQUE
Spécialité : CONSTRUCTION MECANIQUE

Thème

Comportement en rupture d'une fissure centrale

Présenté par :

**BOUROUIS Fatima Zahra
MECEMMENE Nardjis Mokhtaria**

Encadré par :

Pr . BOUAFIA Farida

Juré de soutenance

**Pr. OUDAD Wahid
Dr. DORBANE Abdelhakim**

**UAT.B.B (Ain Temouchent) Président
UAT.B.B (Ain Temouchent) Examineur**

Année universitaire 2021/2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

Nous tenons tous d'abord à remercier Allah de nous avoir donné la force, la patience et le courage pour arriver à accomplir ce travail.

*Nous exprimons notre remerciement les plu sincère à l'encadreur **Pr .BOUAFIA Farida** pour leur patience, remarques et conseils, Qu'il trouve ici le témoignage de notre profonde gratitude.*

Nous remercions tous nos enseignants et l'ensemble du corps professoral du département Génie Mécanique .

Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude a nos parents pour leur contribution et leur soutien.

A toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail,

À mes parents,

ma source de générosité et de patience tout au long de ma carrière scolaire.

Que Dieu vous protège,

Vous prêtez bonne santé et longue vie.

À mes frères et sœurs et ma petite famille,

Qui m'ont toujours indiqué

La bonne voie.

Résumé

Résumé

L'objectif de cette étude est d'analyser numériquement le comportement des facteurs d'intensité de contrainte (FIC) pour une fissure centrale dans une plaque en acier soumise à un chargement de traction uni axiale. La distribution des facteurs d'intensité de contrainte KI en mode d'ouverture et KII en mode de cisaillement a été obtenue pour les différentes longueurs de fissures, en fonction de la charge appliquée et l'angle d'orientation de la fissure.

Mots clés: facteurs d'intensité de contrainte (FIC), fissure centrale, acier, Rupture, élément finis.

Abstract

The objective of this study is to numerically analyze the behavior of factors stress intensity (SIF) for a central crack in a steel plate subjected to a axial uni traction loading. The distribution of stress intensity factors KI in opening mode and KII in shear mode was obtained for the different lengths of cracks, depending on the load applied and the angle of orientation of the crack.

Key words: stress intensity factors (SIF), central crack, steel, fracture, element Finished.

ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو التحليل الرقمي لسلوك عوامل شدة الإجهاد الشق مركزي في صفيحة فولاذية تخضع لشد أحادي المحور . تم الحصول على توزيع عوامل شدة الإجهاد في وضع الفتح و في وضع القص لأطوال الشقوق المختلفة ، اعتماداً على الحمل المطبق وزاوية اتجاه الشق

الكلمات المفتاحية: عوامل شدة الاجهاد، الشق المركزي، الفولاذ، الكسر، العناصر المحدودة..

Table Des Matières

Table Des Matières

Remercîment

Dédicace

Résumé

Table Des Matières	II
Liste Des Tableaux	V
Liste Des Figures	VII
Liste Des Abréviations	XI
Introduction Générale.....	1

Chapitre 1: Mécanique linéaire de la rupture

I.1. Introduction.....	4
I.2. Mécanique linéaire de la rupture	6
I.3. Utilisation de la mécanique de la rupture en conception	6
I.4. Types élémentaires de rupture	7
I.4.1. La rupture fragile	8
1. Rupture fragile transgranulaire (à clivage ou par glissement dans un grain)	8
2. Rupture fragile Intergranulaire (rupture par glissement le long des joints de grain).....	9
I.4.2. La rupture ductile.....	10
I.5. La température de transition ductile fragile	11
I.6. Paramètres de fragilités.....	12
1. Paramètres essentiels (principales)	13
2. Paramètres secondaires de fragilités.....	13
I.7. Conclusion	13

Chapitre 2: Facteur d'intensité de contrainte

II.1. Fisure de la rupture	15
II.2. formation de la mécanique élastique linéaire de la rupture	15
II.2.1. Expression analytique de l'état de contrainte	15
II.2.2. Modes de rupture	17

II.3. Facteur d'intensité de contrainte.....	18
II.4. Application de la mécanique de la rupture pour les matériaux ductiles.	18
II.5. Les Contraintes et déformations de fissure	20
II.6. Expressions des contraintes et des déplacements.....	21
1. Le champ de contraintes	21
2. Le champ de déplacements	23
II.7. Présentation ABAQUS.....	24
II.7.1 Définition ABAQUS	24
II.7.2. Généralité sur le code de calcul ABAQUS	24
II.7.3. Système d'unités dans le code de calcul ABAQUS	25
II.7.4. Organisation de l'interface ABAQUS CAE (complète ABAQUS environnement)	25
II.7.5. Mise en données d'un problème.....	26
II.8. Conclusion	27

Chapitre 3: Simulation numérique

III.1. Modèle utilisé ; matériau analysé	29
1. Le module MESH	30
III.2. Résultats et analyse	
III.2.1. Distribution des contrainte.....	33
III.2.2. Détermination des facteurs d'intensité de contrainte KI et KII	
1.1. Solution théorique	37
1.2. Etude numérique	40
1.3. Comparaison	42
III.2.3. Effet de la charge appliquée σ	43
III.2.4. Effet d'orientation de la fissure	45
III.2.5. Effet d'interaction fissure-défaut	50
Conclusion générale	57
Référence Biographique	59

Liste Des Tableaux

Liste Des Tableaux

Tableau II.1: Système d'unités pour la programmation.....	25
Tableau III.1: les données géométriques de la plaque	29
Tableau III.2: les propriétés mécaniques de la plaque.....	30
Tableau III.3: KI et KII pur différentes longueurs de fissure	42
Tableau III.4: KI et KII pour différents angles d'inclinaison	45
Tableau III.5: KI et KII pur différentes distance d	54

Liste Des Figures

Liste Des Figures

Figure I.1 : Rupture au mouillage du pétrolier ‘Liberty Ship’. En Janvier 1943, le tanker américain T2 SS Schenectady alors qu'il venait de terminer les derniers tests en mer avec succès, se brise soudainement en deux dans le port	5
Figure I.2: Stabilisateur vertical, qui s'est séparée du vol American Airlines 587, conduisant à un accident mortel	5
Figure I.3 : Comparaison de l'approche classique et de l'approche utilisant la MLR	7
Figure I.4: Réponses schématiques de différents matériaux dans un essai de traction	8
Figure I.5: Classement des ruptures selon leur cinétique	8
Figure I.6 : La rupture par clivage à différentes échelles	9
Figure I.7 : Aspect de rupture intergranulaire à l'échelle microscopique	10
Figure I.8: Rupture ductile d'un tuyau de diamètre moyen sous l'effet de la pression interne	11
Figure I.9: Exemple rupture ductiles	11
Figure II.1 : Fissure dans un milieu continu	15
Figure II.2: Singularité en fond de fissure	16
Figure II.3: Modes de rupture	17
Figure II.4: Correction de la zone plastique	19
Figure II.5 : Élément de contrainte au voisinage de la pointe de fissure	20
Figure II.6: Contraintes et déplacements au voisinage de l'extrémité d'une fissure	21
Figure II.7 : Organisation d'ABAQUS	25
Figure II.8: Étapes à suivre pour la programmation	26
Figure III.1: Module Mech	31
Figure III.2: modèle complet avec un fissure	32
Figure III.3: Maillage par éléments finis	32
Figure III.4: Distribution de la contrainte équivalente et normale pour un chargement mécanique : $\sigma = 50$ MPa.	33
Figure III.5: Distribution de la contrainte équivalente et normale pour un chargement mécanique : $\sigma = 10$ MPa.	34

Figure III.6: Distribution de la contrainte équivalente et normale pour un chargement mécanique : $\sigma = 20$ MPa.	35
Figure III.7: Fissure de longueur $2a$ dans une plaque infinie	36
Figure III.8: Champ de contrainte au voisinage de la fissure	37
Figure III.9: Fissure interne chargée dans un milieu infini	37
Figure III.10: Principe de superposition	38
Figure III.11: Point m situant dans le plan de la fissure	38
Figure III.12: Variation de K_I/K_{IC} en fonction de $2a$ pour $\sigma = 50$ MPa.....	41
Figure III.13: Variation de K_{II}/K_{IC} en fonction de $2a$ pour $\sigma = 50$ MPa	41
Figure III.14: Variation de K_I/K_{IC} en fonction de $2a$ pour résultat théorique et simulation pour $\sigma = 50$ MPa	43
Figure III.15: Variation de K_I/K_{IC} en fonction de $2a$ et les contraintes appliquées de traction	44
Figure III.16: Variation de K_{II}/K_{IC} en fonction de $2a$ et la contrainte appliquée de traction	44
Figure III.17: modèle de d'orientation de la fissure	45
Figure III.18: Distribution de la contrainte équivalente et normale pour un chargement mécanique : $\sigma = 50$ MPa et l'angle 90°	46
Figure III.19: Distribution de la contrainte équivalente et normale pour un chargement mécanique : $\sigma = 50$ MPa et l'angle 60°	47
Figure III.20: Distribution de la contrainte équivalente et normale pour un chargement mécanique : $\sigma = 50$ MPa et l'angle 30°	48
Figure III.21: Variation de K_I/K_{IC} en fonction de l'angle d'inclinaison Θ	49
Figure III.22: Variation de K_{II}/K_{IC} en fonction de l'angle d'inclinaison Θ	49
Figure III.23: modèle de d'interaction fissure-défaut	50
Figure III.24: Effet de l'interaction fissure-trou sur la distribution de la contrainte équivalente et des contraintes normales : $\sigma = 50$ MPa et $d = 556$ mm	51
Figure III.25: Effet de l'interaction fissure-trou sur la distribution de la contrainte équivalente et des contraintes normales : $\sigma = 50$ MPa et $d = 980$ mm	52
Figure III.26: Effet de l'interaction fissure-trou sur la distribution de la contrainte équivalente et des contraintes normales : $\sigma = 50$ MPa et $d = 1283$ mm	53

Figure III.27: Variation de KI/KIC en fonction de l'inter-distance trou-fissure ($\sigma = 50$ MPa)

..... **54**

Figure III.28: Variation de KII/KIC en fonction de l'inter-distance trou-fissure ($\sigma = 50$ MPa)

..... **55**

Liste Des Abréviations

Liste Des Abréviations

σ	contraintes appliquées
σ_e	limite d'élasticité
K_C	la ténacité
K_t	facteur de concentration de contrainte
σ_{yy}	la composante de contrainte
Θ et r	les coordonnées cylindriques relatives à la pointe de la fissure
σ_{ij}	le tenseur des contraintes
K	facteur d'intensité des contraintes
f_{ij}	une fonction adimensionnelle, dépendant du mode de chargement et de la géométrie de la pièce.
a	La longueur initiale de la fissure
Y	facteur adimensionnel appelé
a'	la longueur corrigée
r_p	la taille de la zone plastique
σ_y	la limite élastique
ϵ_{ij}	le tenseur des déformations
σ_{ij}	le tenseur des contraintes
$K\alpha$	le Facteur d'Intensité des Contraintes en mode α
α	mode I,II,III
U	déplacement
k	le coefficient de Kolossov
μ	le module de cisaillement du matériau
Re, Im	Partie réelle et partie imaginaire
ZI	Fonction de contraintes de Westergaard
$P2(t)$	Charge interne

Introduction Générale

Introduction Générale

La rupture est un problème auquel les humains doivent faire face chaque fois qu'ils construisent des bâtiments ou fabriquent des structures. Cette question est encore plus critique à l'heure actuelle avec le développement de structures complexes liées au progrès technologique. Les progrès de la connaissance de la mécanique de la rupture permettent de mieux prévenir le risque de rupture aujourd'hui, plus précisément depuis le milieu du XXe siècle. [1]

La mécanique de la rupture est la science qui étudie le comportement des structures fracturées. C'est une discipline récente. Les débuts des recherches sur la fracture dans les matériaux fragiles (qui se déforment peu avant la rupture) remontent aux années 1920, avec les travaux fondateurs de Griffith ; mais ces travaux sont relativement tombés dans l'oubli jusqu'à leur mise au jour dans les années 1950 et 1960, moment où la discipline prend véritablement son essor. (Travail d'Owen et Rice). Quant à la rupture des matériaux ductiles (qui se déforment beaucoup avant rupture), les recherches sur la rupture n'ont commencé qu'à la fin des années 1960 et 1970. L'élasticité linéaire concerne la rupture des matériaux fragiles.[2]

Parmi les méthodes permettant de simuler la croissance des fissures, la mécanique linéaire de la rupture reste la méthode la plus utilisée en pratique aujourd'hui. Les méthodes numériques en mécanique de la rupture sont basées sur la comparaison d'une certaine quantité (taux de récupération d'énergie ou facteur d'intensité de contrainte) pour une géométrie et une évaluation de contrainte données, avec une comparaison avec une valeur limite spécifique (énergie de rupture G_C ou ténacité du matériau K_{Ic}) chaque matériau. Ce type de comparaison est notamment réalisé de manière itérative pour la simulation pas à pas de la propagation de fissures pour un historique de chargement donné. Cette comparaison nécessite une évaluation précise du facteur d'énergie ou d'intensité de contrainte pour une configuration donnée. [3]

Dans la présente étude, l'objectif est la détermination le comportement des FICS dans une plaque contient une fissure au milieu.

La rédaction de cette étude s'organise en trois parties.

Dans le premier chapitre, nous présentons une recherche bibliographique sur la mécanique de la rupture ainsi que le développement théorique des équations qui gouvernent les phénomènes de rupture.

Le second chapitre présente le critère de contrainte défini par le facteur d'intensité de contrainte.

Le troisième et dernier chapitre est consacré à la discussion des résultats de la simulation numérique obtenus par le code d'élément finis Abaqus.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale.

Chapitre 1

Mécanique linéaire de la rupture

I.1. Introduction:

La rupture des matériaux est un problème important en science des matériaux et en ingénierie. Durant ces dernières années, l'industrialisation a vu un développement rapide où la conception mécanique a pris sa part de ce développement. Des ruptures imprévues des armes, des bâtiments, des ponts, des navires, des trains, des avions et diverses machines ont eu lieu partout dans le monde industriel. Certains de ces ruptures ont été dus à une mauvaise conception [4].

Toutes les pièces mécaniques contiennent des fissures, il a été découvert que de nombreuses ruptures ont été causées par des défauts préexistants dans les matériaux qui initient les fissures et qui se développent et conduisent à la rupture. [4]

La théorie de la mécanique de la rupture est un moyen pour estimer la stabilité des fissures qui peuvent survenir à cause des défauts. Elle permet de prévoir l'évolution de la fissure jusqu'à la ruine de la structure. [5]

Parmi les plus célèbres accidents, nous citons le naufrage du navire 'Liberty Ship' dans le port de New-York causé par l'effet de concentration de contraintes et du froid [6], (Figure I.1). Le Stabilisateur vertical, qui s'est séparée du vol American Airlines 587, conduisant à un accident mortel (Figure I.2). Les premiers incidents enregistré sur les structures fut la rupture d'une chaîne du pont suspendu Montrose en Mars 1830 en Grande Bretagne. Depuis, il y a eu un nombre important d'effondrements de ponts, dont le Kings Bridge à Melbourne (1962) ou encore le Point Pleasant Bridge en Virginie (1967). Les accidents ferroviaires dus à une rupture brutale des essieux, des roues ou encore des rails ont également été très nombreux. Entre 1860 et 1870, le nombre de personnes victimes d'accidents de train en Grande Bretagne s'élevait environ à 200 par an. De nombreux accidents intervinrent également sur des pipelines, des pétroliers.

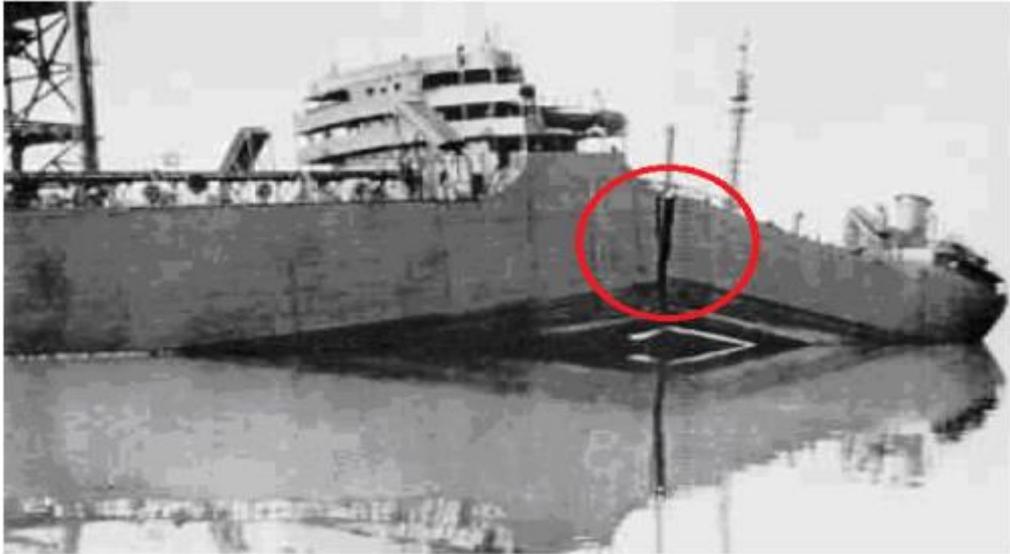


Figure I.1 : Rupture au mouillage du pétrolier ‘Liberty Ship’ [6]. En Janvier 1943, le tanker américain T2 SS Schenectady alors qu’il venait de terminer les derniers tests en mer avec succès, se brise soudainement en deux dans le port



Figure I.2: Stabilisateur vertical, qui s’est séparée du vol American Airlines 587, conduisant à un accident mortel [7].

I.2. Mécanique linéaire de la rupture :

La mécanique de la rupture a été introduite par Griffith vers 1920. L'objectif de la mécanique de la rupture est de caractériser le comportement à la fissuration des structures à l'aide de paramètres quantifiables au sens de l'ingénieur, notamment le champ de contraintes, la taille de la fissure et la résistance à la fissuration du matériau. Les premiers développements théoriques d'analyse des champs de déplacements, déformations et contraintes au voisinage d'une fissure ont été entrepris par Westergaard vers 1940. Une théorie de la rupture basée sur la stabilité de la fissure valable uniquement pour les matériaux fragiles, ne tenant pas compte de la dissipation de l'énergie due à la plastification. En 1948, Irwin proposa une modification de la théorie de Griffith en incluant justement dans le bilan énergétique, l'énergie due à la plastification, pour que l'approche de Griffith soit applicable aux matériaux ductiles. [8]

La mécanique linéaire de la rupture s'applique aux matériaux ayant un comportement élastique obéissant à la loi de Hooke. Même si des corrections liées à la présence d'une zone plastifiée près d'une zone de concentration de contraintes (entaille, fissure) ont été proposées par la suite, ces analyses reposent sur l'hypothèse que la plasticité reste confinée ne sont valables que pour des structures dont le comportement est globalement élastique. Depuis les années 60, les concepts de mécanique de la rupture sont développés pour rendre compte des différents types de comportement non linéaire des matériaux (plasticité étendue, viscoplasticité et viscoélasticité) ainsi que des effets dynamiques. La plupart de ces développements sont des extensions de la mécanique linéaire de la rupture (MLR). Aussi il est important de bien présenter les équations fondamentales de la MLR pour mieux comprendre les concepts plus avancés de la mécanique de la rupture. [9]

I.3. Utilisation de la mécanique de la rupture en conception:

La figure suivante compare l'approche classique pour le dimensionnement des structures basée sur la limite d'élasticité du matériau à l'approche utilisant le concept de ténacité K_{Ic} issu de la mécanique linéaire de la rupture (MLR). [10]

Dans le premier cas, on dimensionne les structures pour que les contraintes appliquées restent inférieures à la limite d'élasticité ($\sigma < \sigma_e$). On utilise en général un coefficient de sécurité pour prévenir tout risque de rupture fragile ($\sigma < \alpha \sigma_e$ avec $\alpha < 1$). Cette approche est à deux

variables σ et σ_e ; elle fait abstraction de l'existence d'éventuels défauts sous forme de microfissures par exemple. [10]

L'approche basée sur la mécanique linéaire de la rupture est à trois variables : la contrainte appliquée, la ténacité K_{Ic} qui remplace la limite d'élasticité et une variable additionnelle qui est la taille du défaut. Il y a cependant deux approches alternatives de la mécanique de la rupture : l'une utilisant le concept d'intensité des contraintes critique (ténacité du matériau) et l'autre un critère d'énergie.

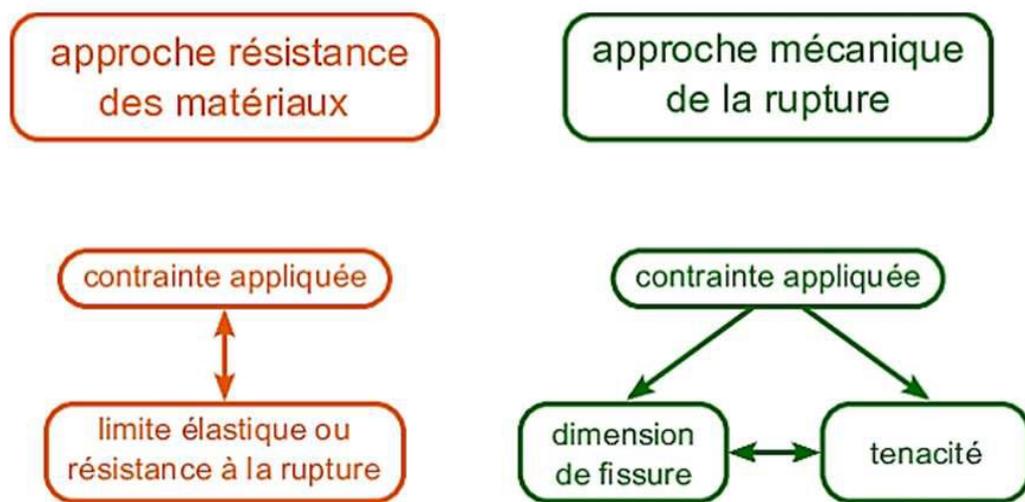


Figure I.3 : Comparaison de l'approche classique et de l'approche utilisant la MLR [11]

I.4. Types élémentaires de rupture: [12]

Il existe deux types de ruptures, les ruptures fragiles et les ruptures ductiles.

Le comportement lié au rapport entre la contrainte de traction et la déformation à ces deux types de rupture est illustré par la figure I.4 suivante :

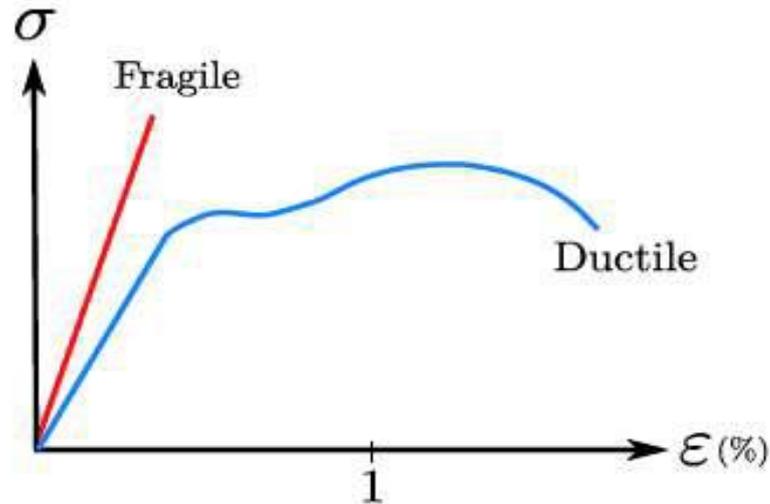


Figure I.4: Réponses schématiques de différents matériaux dans un essai de traction [13]

Les différents types de ruptures peuvent être classés selon deux méthodes distinctes : La première prend en compte à leur cinétique, et la seconde s’appuie sur les observations microstructures [13]

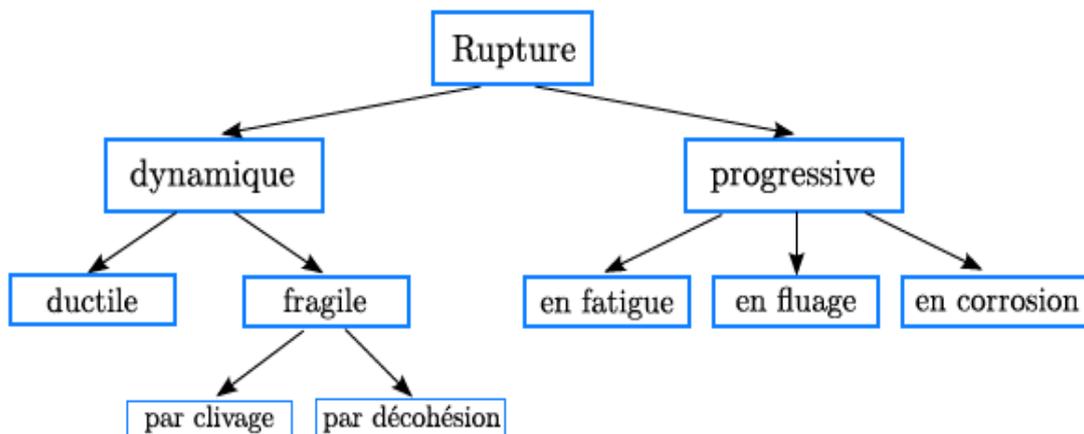


Figure I.5: Classement des ruptures selon leur cinétique [13]

- La rupture par fissuration rapide (dynamique) : ductile, fragile ;
- La rupture par fissuration progressive :
 - Sous sollicitations statique : corrosion sous contrainte, fluage, ...
 - Sous sollicitations cycliques : fatigue mécanique, fatigue thermique ;
 - Sous sollicitations complexes : Fatigue-corrosion, fatigue-fluage, ...

I.4.1. La rupture fragile [14]

- **Mécanisme** : Se manifeste au niveau des liaisons intra-atomiques sans déformation plastique macroscopique.
- **Conditions** : Intervient lorsque l'énergie de déformation locale due aux sollicitations extérieures devient égale à l'énergie nécessaire de décohésion atomique.
- **Caractéristiques** :
 - Propagation très rapide de fissure ;
 - Consommation d'énergie très faible ;
 - Les défauts et accidents géométriques jouent un rôle essentiel dans l'amorçage de la rupture.

Il existe deux types de la rupture fragile : Rupture fragile transgranulaire (à clivage) et rupture fragile intergranulaire (décohésion).

1. Rupture fragile transgranulaire (à clivage ou par glissement dans un grain) :

La rupture suit des plans cristallographiques appelés plans de clivage, elle est caractérisée par un aspect brillant des faciès de rupture cristallin. Ce phénomène se produit par séparation directe le long des plans cristallographiques due à une simple rupture de liaisons atomiques de ce fait la rupture aura lieu sans déformation plastique, dans ce cas le matériau rompt avant d'avoir quitté le régime élastique. [12]

L'interaction de la fissure avec les défauts microstructuraux ou hétérogénéités du métal conduit à des microreliefs très caractéristiques : surfaces de clivage sous forme de traces et marches appelés rivières et languettes (tongues). Les rivières se forment par l'interaction du plan de clivage et de dislocations vis ou par la jonction de deux plans de clivage voisins et convergeant vers la direction du sens de propagation de la fissure. [12]

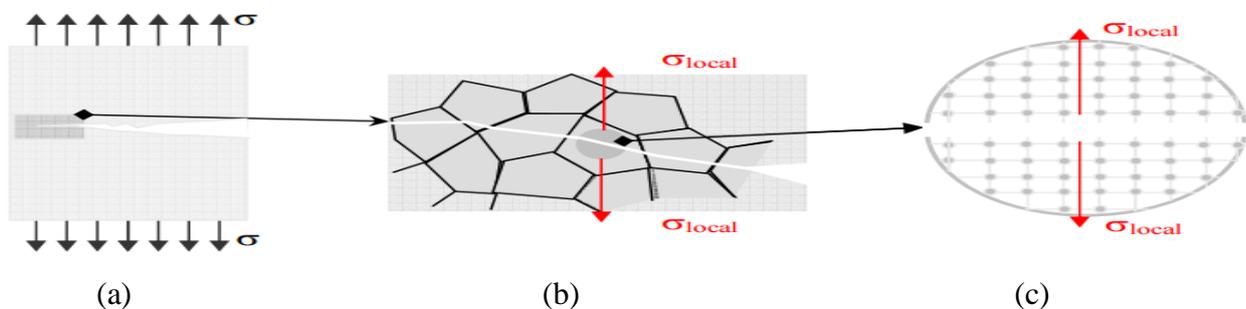


Figure I.6 : La rupture par clivage à différentes échelles[14]

- (a) **Echelle macroscopique:** La surface de rupture est perpendiculaire à la direction de sollicitation.
- (b) Une rupture transgranulaire, la fissure suit des plans et directions cristallographiques dans chaque grain.
- (c) Rupture des liaisons interatomiques dans une direction perpendiculaire au plan de rupture.

2. **Rupture fragile Intergranulaire (rupture par glissement le long des joints de grains)** [12]:

La rupture suit les joints des grains, elle est caractérisée par une décohésion intergranulaire ; elle survient par accumulation d'impuretés ou d'inclusions qui sont à l'origine d'une fragilité introduite, par exemple la fragilité au revenu.

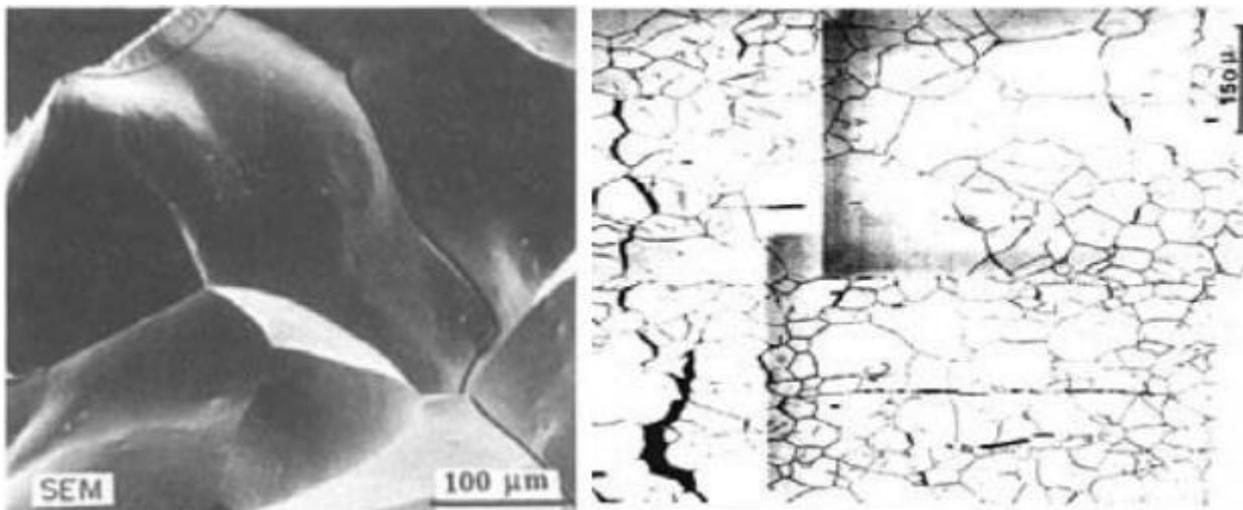


Figure I.7 : Aspect de rupture intergranulaire à l'échelle microscopique [13]

I.4.2. La rupture ductile [12]

La rupture ductile se caractérise par une forte énergie de rupture, une importante déformation à rupture. Elle se manifeste essentiellement par la présence des inclusions ou précipités. Elle résulte de la naissance des cavités, l'allongement de ces cavités dans le sens de déformation et coalescence de celles-ci par striction ou cisaillement qui conduisent à la rupture finale.

Les défauts responsables de l'amorçage dans la rupture ductile sont essentiellement les éléments d'addition dans les alliages, les inclusions, les précipités (par traitement thermique) et les joints de grain (points triples).

À l'échelle macroscopique, on voit des microreliefs appelés cupules.

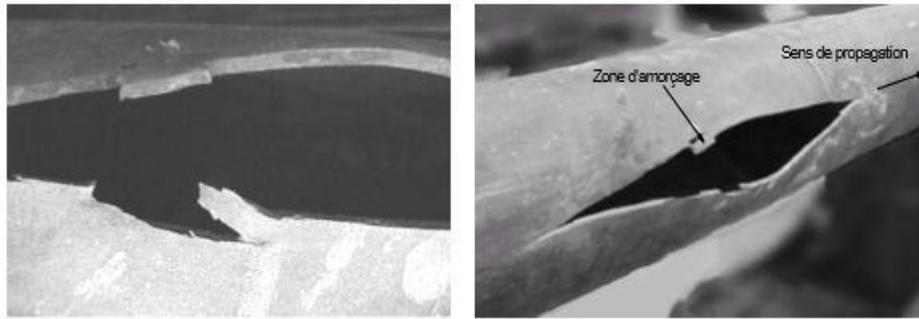


Figure I.8: Rupture ductile d'un tuyau de diamètre moyen sous l'effet de la pression interne.[12]

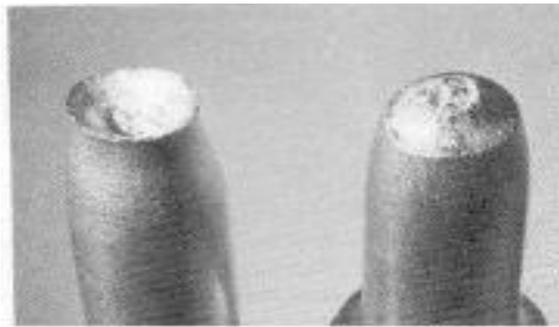
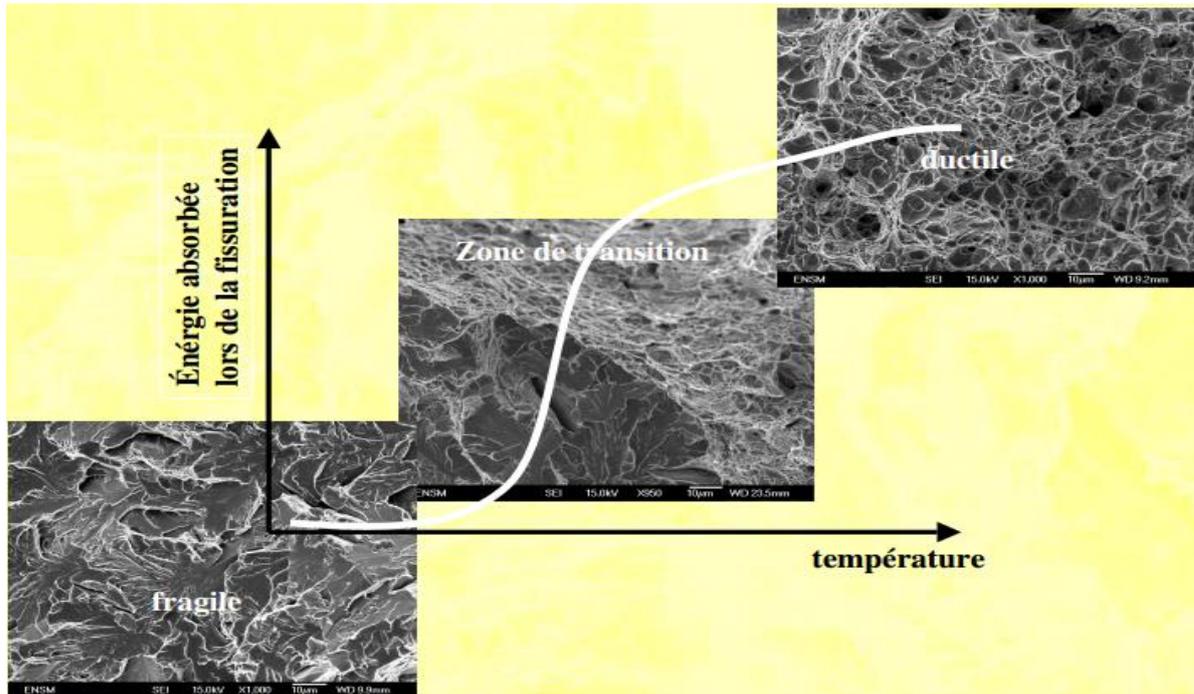


Figure I.9: Exemple rupture ductiles[11]

I.5. La température de transition ductile fragile : [14]

La ductilité d'un matériau dépend de nombreux paramètres, dont notamment **la température et la vitesse de déformation**.

Concernant la température, la plupart des matériaux cristallins sont fragiles à basse température et deviennent ductiles au dessus d'une certaine **température** (mais certains **matériaux** restent fragiles jusqu'à la **fusion**, comme le graphite et les céramiques). Cette température est la **température de transition fragile-ductile**.



Les premiers essais d'impacts faits sur les différents matériaux utilisés dans l'industrie, ont montré qu'un changement important dans l'absorption d'énergie de rupture quand une large plage de la température d'essai est examinée.

- Zone I, à basses températures, dans laquelle la rupture est fragile ;
- Zone III, à températures élevées, dans laquelle la rupture est ductile ;
- Zone II, se situant entre les deux zones précédentes, appelée **zone de transition**.

Les courbes de l'énergie de rupture en fonction de la température d'essai sont appelées: **courbes de transition**.

I.6. Paramètres de fragilités [14]

Les paramètres influençant la fragilité des matériaux se divisent en deux grandes catégories :

- **Paramètres essentiels** : jouent un rôle principal et affecte d'une façon directe la fragilité des matériaux. En s'imposant par leur présence incontrôlé, on ne peut pas les éviter ;
- **Paramètres secondaires** : dont on sert à améliorer ou régler la fragilité des matériaux à éviter à crainte de leurs effets nocifs.

1) Paramètres essentiels (principales) :**a. La température :**

Le choix du matériau se fait par comparaison de sa température de transition et de la température de service.

b. Sensibilité aux entailles :

Certains matériaux ductiles tendent à devenir fragiles en présence de l'entaille .

2) Paramètres secondaires de fragilités :

a. Paramètres métallurgiques : structure des matériaux, teneurs en éléments chimiques et d'alliages, microstructure, ...

b. Conditions de chargement : vitesse de chargement...

c. Paramètres de l'environnement: la corrosion, l'humidité...

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques aspects de la mécanique linéaire de la rupture fragile et ductile,

le prochain chapitre va être consacré à l'étude du champ de contrainte au voisinage d'une fissure.

Chapitre 2

Facteur d'intensité de contrainte

II.1. Fissure de la rupture :

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 .

La rupture est caractérisée par la séparation irréversible d'un milieu continu Ω en deux parties distinctes. On définit alors une fissure comme étant la surface géométrique S de séparation (figure II.1) suivant : [15]

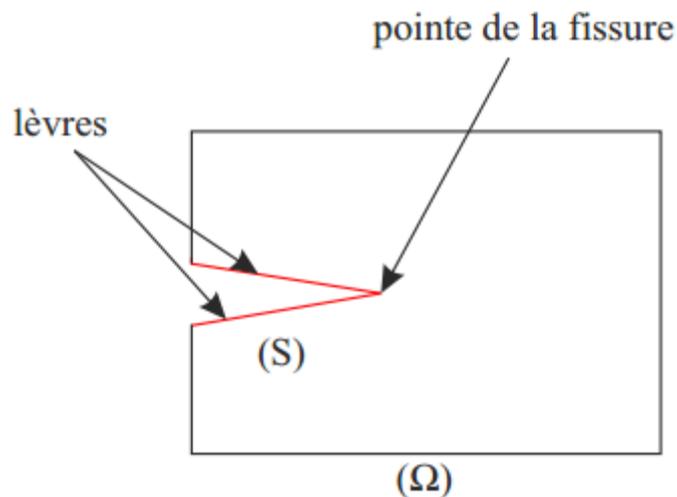


Figure II.1 : Fissure dans un milieu continu

II.2. Formation de la mécanique élastique linéaire de la rupture

II.2.1 Expression analytique de l'état de contrainte [16]

Contrairement à un trou macroscopique dans une plaque semi-infinie, le rayon de la pointe d'une fissure est infiniment petit. Cette particularité géométrique du défaut rend inadéquate l'utilisation du facteur de concentration de contrainte K_t pour l'analyse des contraintes près du fond de la fissure. En effet, il existe une singularité de contrainte, $\sigma \rightarrow \infty$, à la pointe d'une fissure. La courbe pointillée de la Figure II.2 présente la distribution de la composante de contrainte σ_{yy} près du fond de fissure. Θ et r sont les coordonnées cylindriques relatives à la pointe de la fissure.

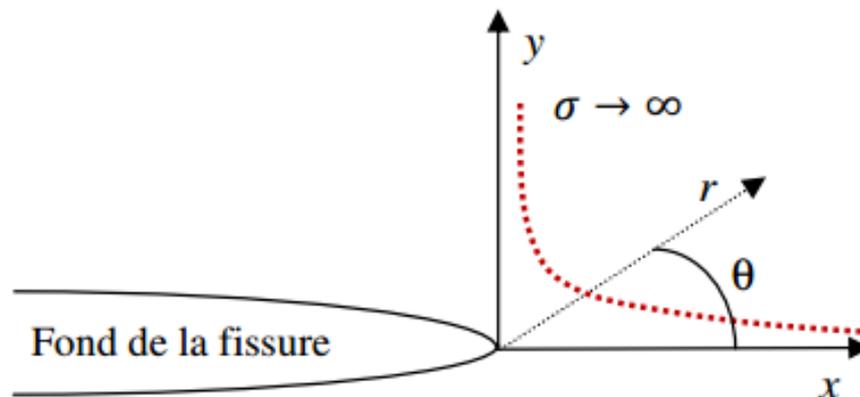


Figure II.2: Singularité en fond de fissure

Les mécaniciens du 20^e siècle ont dû attendre la venue des travaux de Griffith (Griffith, 1921) pour analyser les problèmes de plaques fissurées. Il fut le premier à considérer la notion d'équilibre énergétique entre les surfaces produites par la propagation d'un défaut et le changement d'énergie potentielle du corps fissuré. Par la suite, les travaux d'Irwin (Irwin, 1957) ont été marquants dans le domaine de la mécanique de la rupture, lorsque celui-ci, à l'aide des travaux de Westergaard (Westergaard, 1939), a quantifié le champ de contrainte à proximité du fond de fissure. Cette quantité, le facteur d'intensité de contrainte, K , attribue une valeur à la sévérité du défaut en fond de fissure. Il devient donc possible de comparer cette sévérité à la ténacité du matériau K_{IC} , une quantité intrinsèque au matériau.

L'équation (II.1) provient d'un développement en série proposé par Williams (Williams, 1957) et présente la définition du tenseur des contraintes en fond de fissure:

$$\sigma_{ij} = \left(\frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \right) f_{ij}(\theta) + \text{autre terme} \quad \text{Eq II.1}$$

où σ_{ij} : est le tenseur des contraintes ;

r et θ sont les coordonnées du système de repère polaire ;

K : est le facteur d'intensité des contraintes ;

f_{ij} : est une fonction adimensionnelle, dépendant du mode de chargement et de la géométrie de la pièce;

Quand r tend vers 0, et qu'on approche de la pointe de la fissure, le premier terme de l'Eq.II.1 tend vers l'infini et les autres termes restent constants ou tendent à s'annuler. L'équation décrit alors une singularité de type $1/\sqrt{r}$.

Quel que soit le type de chargement, l'état des contraintes aux alentours de la pointe de la fissure est toujours décrit par l'Eq.II.1, tandis que K et f_{ij} dépendent du chargement et de la géométrie de la pièce et de la fissure.

II.2.2 Modes de rupture[17]

IRWIN considère les fissures comme des surfaces de discontinuité des déplacements. Puisque chacune des trois composantes du vecteur déplacement peut être affecté, il a observé et défini trois modes indépendants possibles pour les mouvements respectifs des deux surfaces d'une fissure :

- ✓ **Mode I** : ouverture (ou clivage), les surfaces de la fissure se déplacent perpendiculairement au plan de fissure ;
- ✓ **Mode II** : cisaillement plan, (glissement de translation) : les surfaces de la fissure se déplacent dans le plan de fissure et dans une direction perpendiculaire au front de fissure;
- ✓ **Mode III** : cisaillement anti-plan, (glissement de rotation) : les surfaces de la fissure se déplacent dans le plan de fissure et dans une direction parallèle au front de la fissure ;

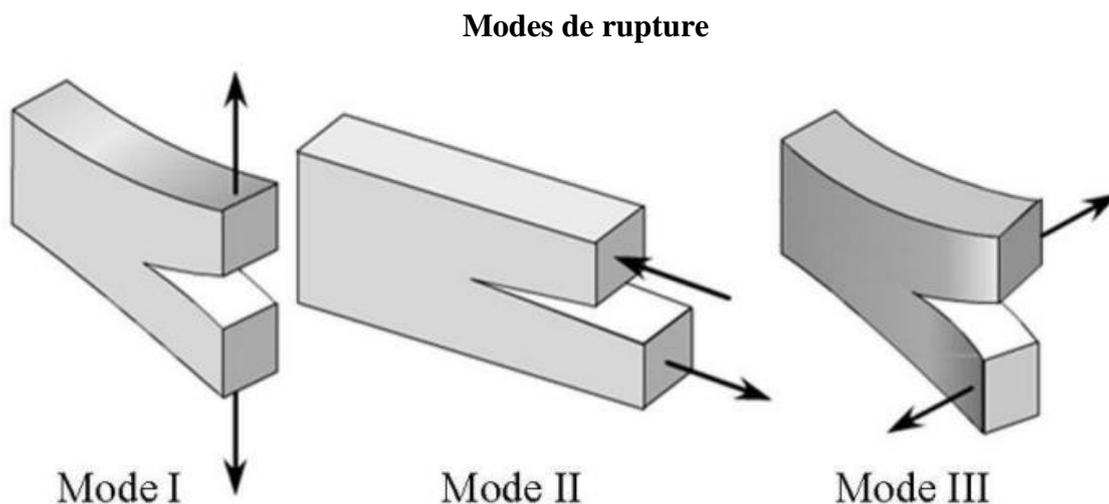


Figure II.3: Modes de rupture [17]

Notons que dans le cas des modes II et III, les lèvres de fissures restent en contact et entraînent donc des frottements qui diminuent l'énergie disponible pour la propagation de fissure. Ces deux modes sont ainsi généralement moins dangereux que le mode I. [15]

Dans le cas général, la surface de rupture se développe suivant une combinaison de ces trois modes. Notons que les ruptures brutales résultent souvent de la propagation des fissures en mode I (Figure II.3). C'est la raison pour laquelle la mécanique de la rupture s'intéresse plus particulièrement à ce mode. [18]

II.3 Facteur d'intensité de contrainte :

Le facteur d'intensité des contraintes K est le seul paramètre significatif, qui permet de connaître l'état de contrainte et de déformation en toute pointe de fissure. Pour une fissure sollicitée en mode I d'ouverture, la relation entre la sollicitation lointaine normale à l'axe de fissure σ et le facteur d'intensité de contraintes K_I est la suivante [19] :

$$K = Y \sigma \sqrt{\pi a} \quad \text{Eq II. 2}$$

Avec

a : La longueur initiale de la fissure

σ : Contrainte uniforme appliquée

Y :: facteur adimensionnel appelé facteur de forme. Il est fonction de la géométrie et de la taille de la fissure a ,

Le facteur de forme est donné par : $Y = \frac{k}{\sigma \sqrt{\pi a}}$

La rupture survient lorsque K atteint une valeur critique K_C caractéristique du matériau appelée ténacité.

II.4 Application de la mécanique de la rupture pour les matériaux ductiles[14]

La mécanique linéaire élastique de la rupture peut être appliquée si une correction de la zone plastique remarquée au voisinage de la fissure est faite.

En faisant introduire une longueur de la fissure de la taille du rayon de la zone plastique, de forme circulaire suggérée par Irwin :

$$a' = a + r_p \quad \text{Eq II.3}$$

a' : la longueur corrigée ;

r_p : la taille de la zone plastique ;

σ_y : la limite élastique ;

K : le facteur d'intensité de contrainte.

- Etat de contrainte plane :

$$r_p = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K}{\sigma_y} \right)^2$$

- Etat de déformation plane :

$$r_p = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K}{\sigma_y} \right)^2$$

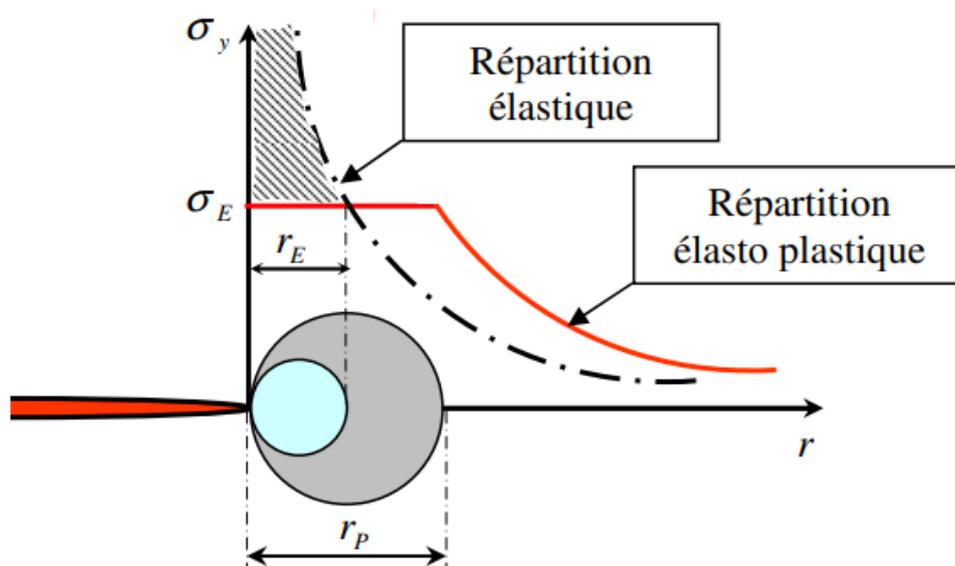


Figure II.4: Correction de la zone plastique.

II.5 Les Contraintes et déformations de fissure :

Pour certaines configurations de structures contenant des défauts, si le matériau a un comportement isotrope et élastique linéaire, il est possible de déterminer les expressions des champs de déformation et contrainte aux alentours de la pointe de la fissure, ce dans le cadre de la mécanique de la rupture [20]. Par Irwin en 1957, propose de décrire la distribution des contraintes et les déformations admissibles au voisinage du front d'une fissure admettent un développement asymptotique dont le terme singulier décrit par la relation suivante [21]

$$\sigma_{ij} = K_{\alpha} \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad \text{Eq II.4}$$

$$\varepsilon_{ij} = K_{\alpha} \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} g_{ij}(\theta) \quad \text{Eq II.5}$$

Avec :

σ_{ij} est le tenseur des contraintes.

ε_{ij} est le tenseur des déformations.

K_{α} est le Facteur d'Intensité des Contraintes (FIC) en mode α .

$\alpha = \text{I, II ou III}$, $ij = xy$.

Les fonctions f et g donnent la répartition angulaire.

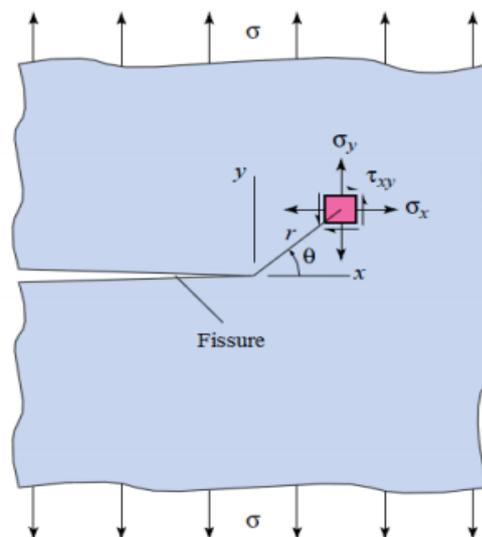


Figure. II.5 : Élément de contrainte au voisinage de la pointe de fissure

II.6 Expressions des contraintes et des déplacements

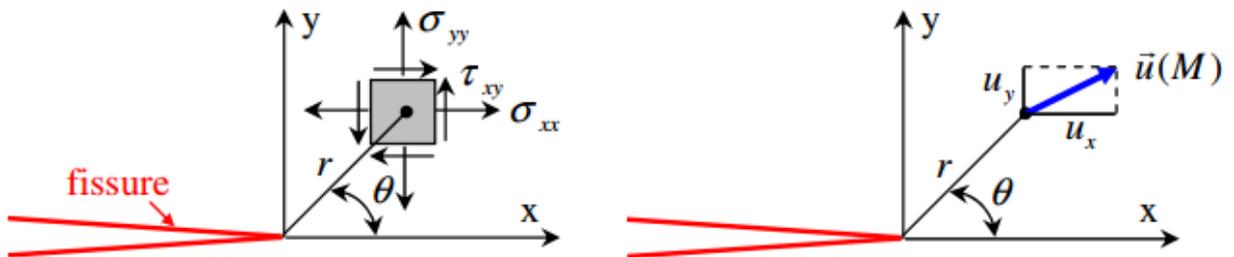


Figure II.6: Contraintes et déplacements au voisinage de l'extrémité d'une fissure [22]

On considère un matériau homogène et isotrope dont le comportement est élastique linéaire.

On note :

- λ et μ ces coefficients de Lamé.
- E son module d'Young.
- κ constante de Kolossov.
- ν son coefficient de Poisson. Les phénomènes étudiés seront bidimensionnels.

1. Le champ de contraintes s'exprime comme: [15]

A. Mode I :

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

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

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

$$\sigma_{xz}(r, \theta) = \sigma_{yz}(r, \theta) = 0$$

- Pour une contrainte plane :

$$\sigma_{zz}(r, \theta) = 0$$

- Pour une déformation plane :

$$\sigma_{zz}(r, \theta) = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$$

B. Mode II :

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

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

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

$$\sigma_{xz}(r, \theta) = \sigma_{yz}(r, \theta) = 0$$

- contrainte plane

$$\sigma_{zz}(r, \theta) = 0$$

- déformation plane

$$\sigma_{zz}(r, \theta) = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$$

C. Mode III :

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

$$\sigma_{yz}(r, \theta) = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

2. Le champ de déplacements s'exprime comme: [15]

A. Mode I :

$$\left\{ \begin{array}{l} ux = \frac{KI}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) (k - \cos(\theta)) \\ uy = \frac{KI}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) (k - \cos(\theta)) \\ uz = \mathbf{0} \text{ En déformation plane} \end{array} \right.$$

B. Mode II :

$$\left\{ \begin{array}{l} ux = \frac{KII}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) (2 + k + \cos(\theta)) \\ uy = \frac{KII}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) (2 - k - \cos(\theta)) \\ uz = \mathbf{0} \text{ En déformation plane} \end{array} \right.$$

C. Mode III :

$$\left\{ uz = \frac{KIII}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right\}$$

Avec:

κ : le coefficient de Kolosov définit comme :

- En contraintes planes $k = 3 - 4\nu$
- En déformations planes $k = \frac{3 - 4\nu}{1 + 4\nu}$

μ : le module de cisaillement du matériau.

II.7 Présentation ABAQUS

II.7.1 Définition ABAQUS [23] :

ABAQUS est un logiciel de calcul en éléments finis développé par DASSAULT. Il est composé de trois produits qui sont : ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE. La gamme de logiciels d'ABAQUS est particulièrement réputée pour sa technologie, sa qualité et sa fiabilité. Elle s'est imposée comme partie intégrante des processus de conception de sociétés de renommée mondiale dans tous les secteurs industriels. ABAQUS offre les meilleures solutions pour des problèmes linéaires, non linéaires, explicites et dynamiques. Le logiciel fournit un environnement inégalé pour analyse par éléments fini, proposant un grand nombre d'alternatives aux opérations impliquant des fournisseurs et des produits multiples.

II.7.2 Généralité sur le code de calcul ABAQUS [24] :

- a. **ABAQUS/Standard** : ABAQUS est un solveur généraliste qui recourt à un schéma traditionnel d'intégration implicite.
 - Résolution basée sur l'algorithme de Newton
 - Raphson et la méthode de Riks.
 - Problèmes linéaires et non linéaires, Géométrie 1D, 2D, 3D et Axisymétrique.
 - Nombreuses procédures d'analyse dans le domaine temporel et fréquentiel.
- b. **ABAQUS/Explicit** : est un schéma d'intégration explicite pour résoudre des problèmes dynamiques ou quasi-statiques non-linéaires :
 - Analyse non linéaire (discrétisation spatiale et temporelle).
 - Problème transitoire et dynamique des structures.
 - Résolution basée sur la méthode explicite d'intégration en temps.
- c. **ABAQUS/CAE**: Constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour les dits solveurs. Chacun de ces produits est complété par des modules additionnels et optionnels, spécifiques à certaines applications. ABAQUS fut d'abord conçu pour analyser les comportements non-linéaires. Il possède en conséquence une vaste gamme des modèles de matériau. Ses modélisations d'élastomères, en particulier, méritent d'être reconnues.

II.7.3 Système d'unités dans le code de calcul ABAQUS [24]:

Avant de commencer à définir un modèle, nous devons choisir le système d'unités que nous utiliserons. ABAQUS n'a pas de système intégré d'unités. Toutes les données d'entrée doivent être spécifiées dans des unités cohérentes dans les résultats qui suivent le système d'unité et base sur SI (mm).le tableau suivant représente la correspondance des unités sous ABQUS

Masse	Longueur	Temps	Force	Pression	Energie
M	L	T	MLT^{-2}	$ML^{-1} T^{-2}$	$ML^2 T^{-2}$
Kg	m	S	N	Pa	J
g	mm	Ms	N	MPa	mJ
Tonne	mm	S	N	MPa	mJ

Tableau (II.1) : Système d'unités pour la programmation

II.7.4 Organisation de l'interface ABAQUS CAE (complète ABAQUS environnement) [25]:

Il est important de savoir que le module CAE figure (II.7) que vous allez utiliser pour créer votre jeu de données est relativement récent (quelques années) et qu'il est plutôt destiné à la mise en données de problèmes relativement classiques. Donc pas toutes les commandes utilisables dans ABAQUS et fait souvent le choix de paramètres par défaut.

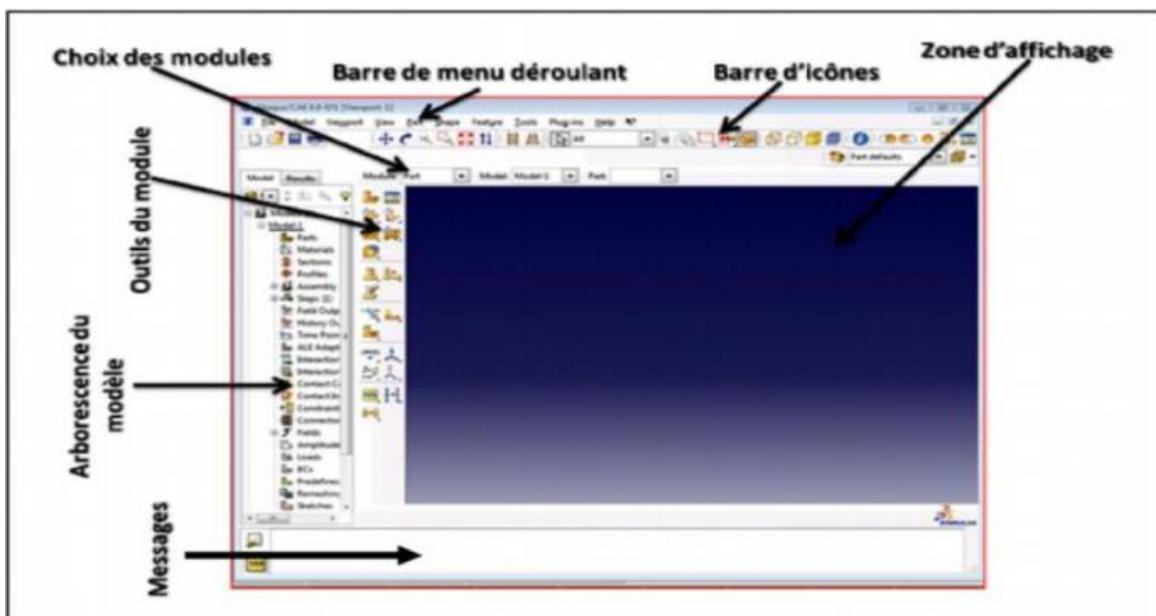


Figure II.7 : Organisation d'ABAQUS

II.7.5 Mise en données d'un problème [24]:

Les Étapes pour la programmation de la Figure suivante :

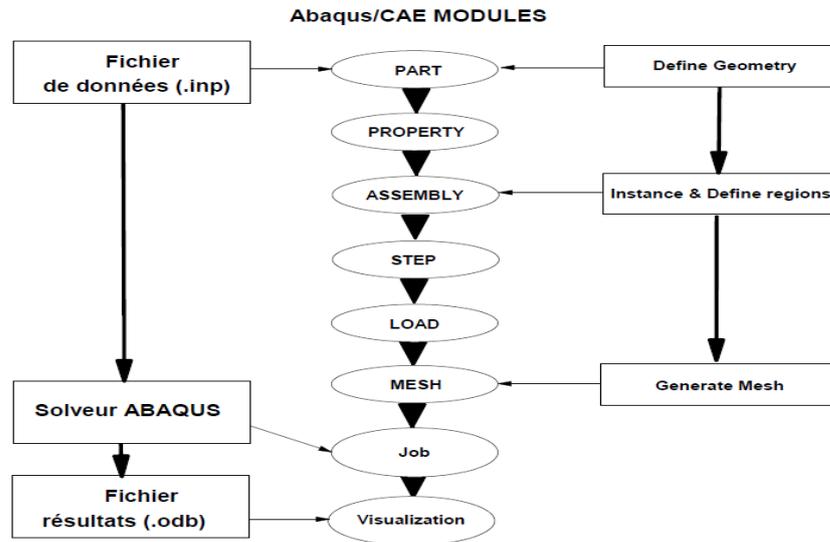


Figure II.8: Étapes à suivre pour la programmation

- ✓ **Property:** On y définit les propriétés du ou des matériaux (élastique. Viscoélastique.....etc), il faut ensuite affecter ces propriétés à une entité du corps dessiner.
- ✓ **Assembly :** Dans ce module, il s'agit de créer une (voir plusieurs) instance(s) à partir des entités qu'on a définit dans le module part.
- ✓ **Step :** C'est dans ce module qu'on choisit le type d'analyse (statique, dynamique, transfert de chaleur,.....). C'est également dans ce module qu'on devra choisir les sorties désirées.
- ✓ **Interaction :** On définit dans ce module les interactions entre différentes entités du modèle, ce qui peut prendre la forme d'un contact.
- ✓ **Load :** On définira ici le chargement, les conditions aux limites.
- ✓ **Mesh :** Dans ce module est définit la nature des éléments choisit et leurs tailles.
- ✓ **Job :** Le lancement du calcul est classique. Après avoir lancé le calcul, on pourra suivre l'évolution du processus en cliquant sur monitor.
- ✓ **Visualization:** Afficher les résultats de l'analyse. Pour plus d'informations
La réalisation complète d'un jeu de données s'effectue après un passage successif par les modules :
- ✓ **Part :** C'est dans ce module qu'est définie la géométrie des entités du modèle

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre , nous avons présenté un rappel théorique sur les grandeurs physiques utilisées dans notre étude tel que le FIC K . Ces paramètres sont très utilisés dans la pratique car il ont une relation directe avec la contrainte et la déformation . a la fin présentation logiciel utilisé ABAQUS .

Chapitre 3

Simulation numérique

III.1 Modèle utilisé ; matériau analysé

Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'étude des contraintes purement mécaniques dans une plaque fissurée soumise à un chargement de traction uni axial . On va utiliser la méthode des éléments finis pour déterminer le facteur d'intensité de contrainte en mode I et II.

Un modèle géométrique bidimensionnel a été développé pour analyser le comportement en rupture d'une plaque carrée avec dimensions $h \times w$ contenant au milieu une fissure de la longueur $2a$.

Sur la **figure III.2** est illustré la géométrie complète du modèle contenant une fissure. La structure est soumise à un chargement mécanique uni axial σ ($\sigma = 50$ MPa) suivant l'axe Y .

Le tableau suivant présente les données géométriques de la plaque :

Grandeurs	Valeur	Unité
Longueur de la plaque h	6×10^3	mm
Largeur de la plaque w	6×10^3	mm
La longueur initiale de la fissure a	0.25×10^3	mm

Tableau III.1 : les données géométriques de la plaque

Le matériau utilisé est un acier au carbone faiblement allié dont les propriétés mécaniques sont obtenues à partir d'un essai de traction [26] et sont exposées sur le tableau **Tableau III.2**

On considère que le matériau est isotrope. La charge correspondant à 30% de la valeur de la résistance à la limite élastique (R_e) ; dans les conditions d'élasticité linéaire. L'étude numérique est faite par le code du calcul ABAQUS [27].

Limite élastique (R_e)	170 MPa
Limite à la rupture (R_m)	300 MPa
Module de Young (E)	205 GPa
Coefficient de Poisson	0.3
Ténacité	$6000 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$

Tableau III.2 : les propriétés mécaniques de la plaque

1. Le module MESH

permet de créer le maillage de la pièce. Il contient tous les outils nécessaires pour générer le maillage élément fini sur un assemblage. Il n'est pas nécessaire que le maillage soit régulier, en effet on peut resserrer le maillage près des endroits d'intérêts (par exemple aux endroits où l'on pense que la solution va beaucoup varier, cependant il faut veiller à avoir des éléments faiblement distordus (se rapprocher d'un polygone régulier). Plus ce maillage est resserré plus la solution que l'on obtient par la méthode des éléments finis sera précise. Il existe plusieurs éléments classiques pour mailler notre pièce (hexaèdre, tétraèdre...).[23]

2. Les types de création de maillage Figure III.1

1. On clique sur seed edges, on sélectionne toute la plaque ; DONE
Method: By number , Bias : None ; Sizing controls : Number of elements tape 20 ; Apply ;ok
2. Après sélectionnez Seed part instance ; Apply ;ok
3. sélectionnez Mesh part instance , ok et mech the part instance. Yes

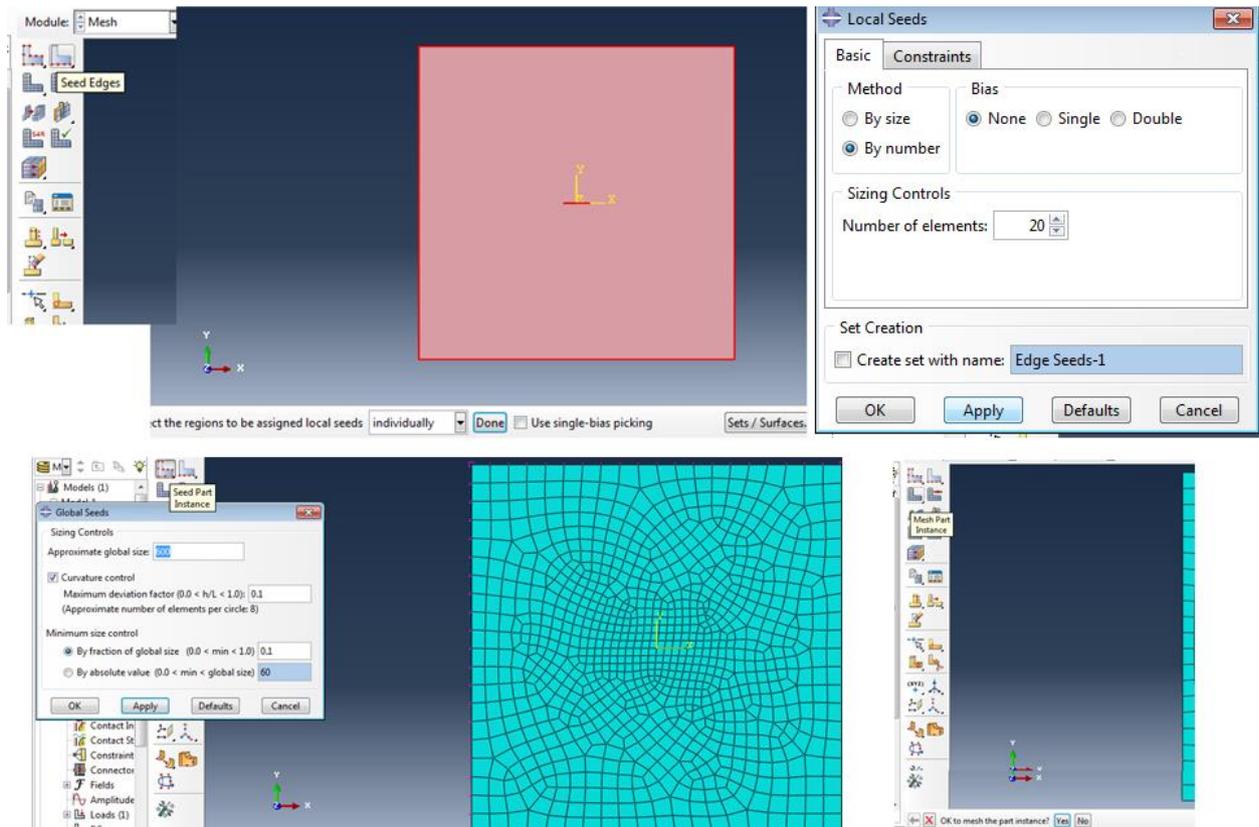


Figure III.1 : Module Mech

Nous avons illustré sur la **Figure III.3**, le maillage de modèle numérique utilisé dans cette étude type quadratif . Le maillage a été raffiné, plus le maillage est fin, plus la solution est fiable. Un maillage optimum constitué d'éléments quadrilatéraux à huit nœuds de type iso paramétrique avec un nombre total d'élément égal à 1376 a été choisi.

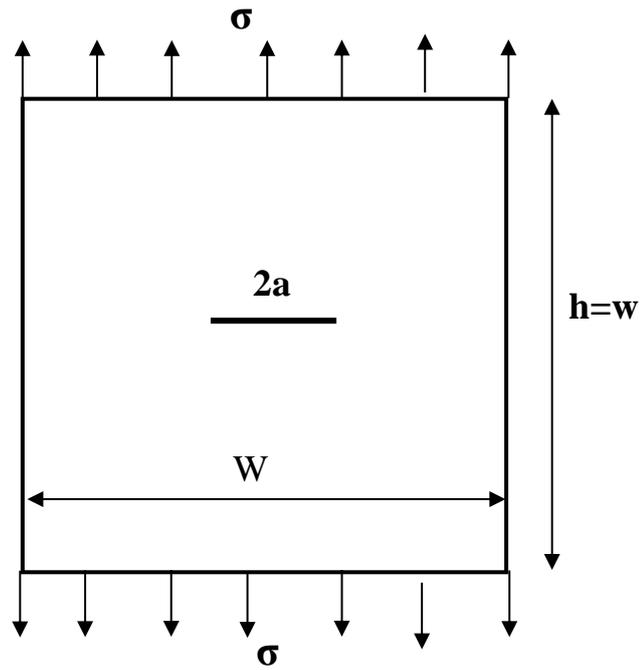


Figure III.2 modèle complet avec un fissure

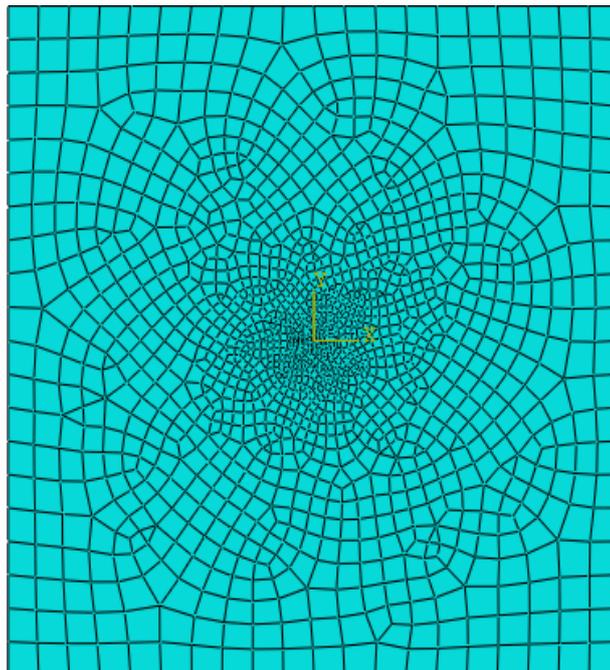


Figure III.3 : Maillage par éléments finis

III.2 Résultats et analyse

III.2.1 Distribution des contraintes

Les résultats obtenus à partir de cette analyse sont illustrés sur les figures III.4 III.5 et III.6, Ces figures présentent la distribution de la contrainte équivalente de Von mises et des contraintes normales dans la plaque près de la fissure. Ces figures montrent clairement que les contraintes plus fortes se sont localisées près de la fissure. Loin de cette dernière, la plaque est totalement relaxée de ces contraintes.

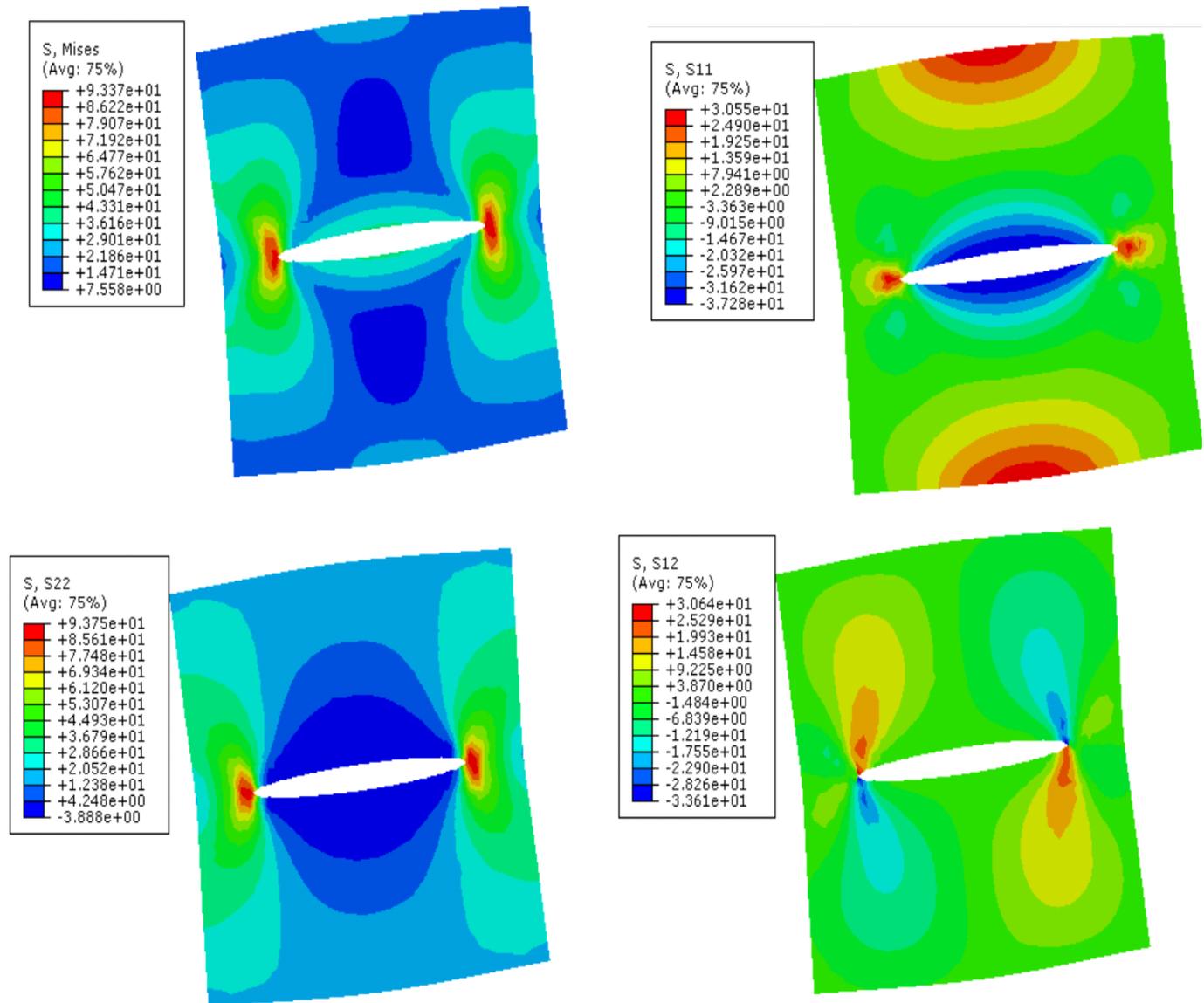


Figure III.4 : Distribution de la contrainte équivalente et normale pour un chargement mécanique : $\sigma = 50$ MPa.

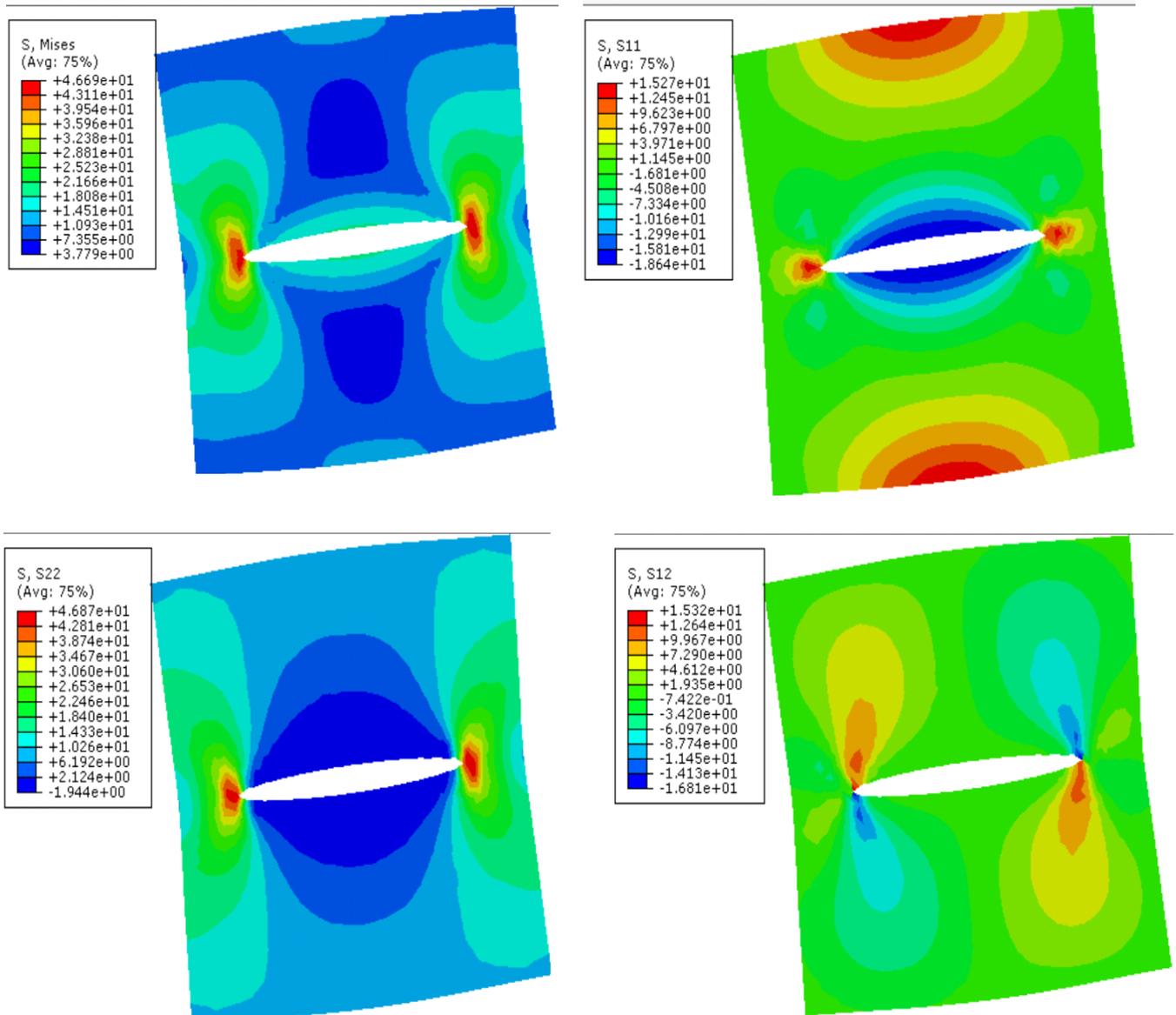


Figure III.5 : Distribution de la contrainte équivalente et normale pour un chargement mécanique : $\sigma = 10$ MPa.

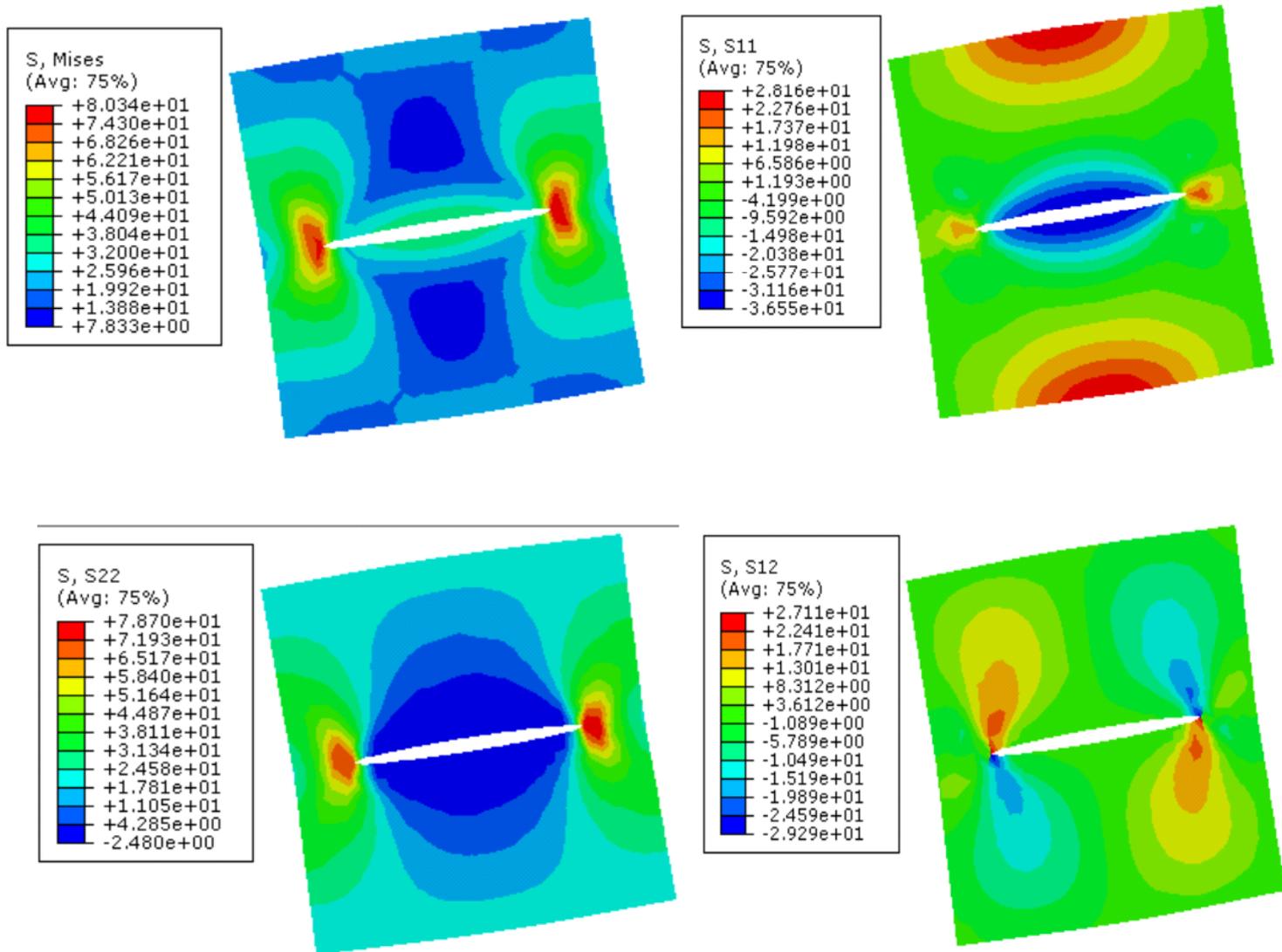


Figure III.6 : Distribution de la contrainte équivalente et normale pour un chargement mécanique : $\sigma = 20$ MPa.

III.2.2 Détermination des facteurs d'intensité de contrainte KI et KII

2.1. Solution théorique : [28]

Il existe dans la littérature plusieurs méthodes analytiques. Dans cette étude, on va travailler avec la méthode de Westergaard .

Les composantes de contraintes en un point m en mode I peuvent être exprimées par les relations suivantes:

$$\sigma_{xx} = \operatorname{Re} Z_I - y \operatorname{Im} Z'_I \quad (\text{III.1})$$

$$\sigma_{yy} = \operatorname{Re} Z_I + y \operatorname{Im} Z'_I \quad (\text{III.2})$$

$$\sigma_{xy} = -y \operatorname{Im} Z'_I \quad (\text{III.3})$$

Avec : $Z'_I = \frac{dZ_I}{dz}$; $z = x + iy$

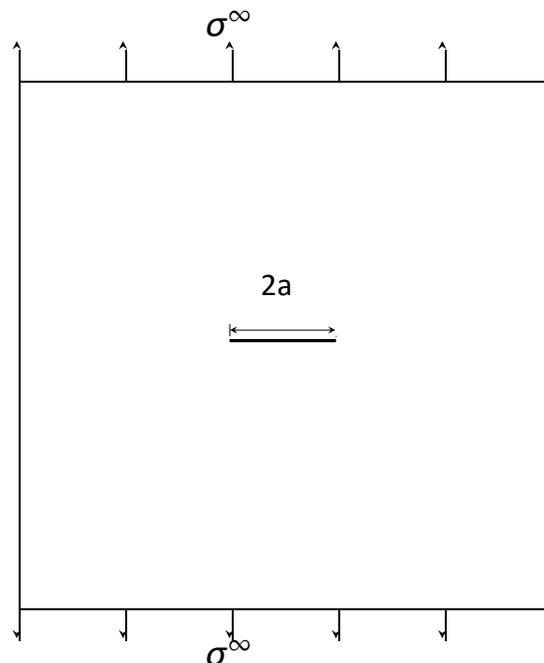


Figure III.7 : Fissure de longueur 2a dans une plaque infinie

Z_I est la fonction de contraintes de Westergaard. **Re** et **Im** représentent la partie réel et imaginaire respectivement. Le champ de contrainte est représenté dans la figure III.7 suivante :

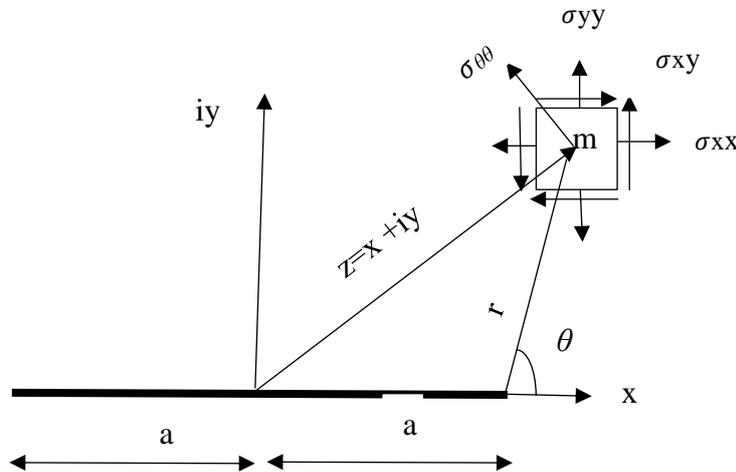


Figure III.8 : Champ de contrainte au voisinage de la fissure

Fonction Z_I pour une fissure interne chargée dans un milieu infini

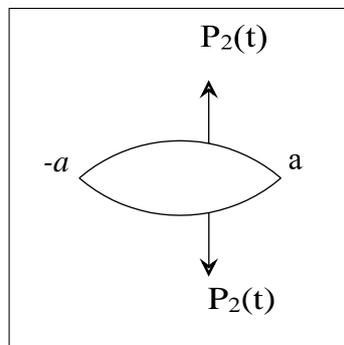


Figure III.9 : Fissure interne chargée dans un milieu infini

Pour ce problème Z_I est donnée par la relation suivante :

$$Z_I = \frac{1}{\pi\sqrt{z^2 - a^2}} \int_{-a}^a P_2(t) \frac{\sqrt{a^2 - t^2}}{z - t} dt \quad (III.4)$$

Afin de pouvoir utiliser la formule (III.4) pour notre problème. On doit le ramener à un problème avec un chargement sur les lèvres de la fissure, à l'aide du principe de superposition :

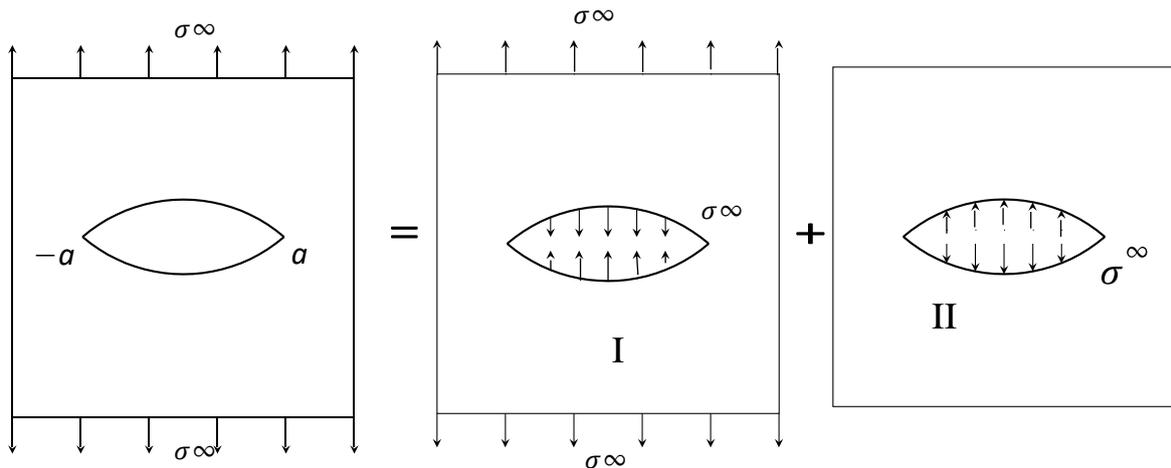


Figure III.10: Principe de superposition

Le problème I est équivalent à un problème homogène sans fissure. Puisqu'on veut calculer K_I , il suffit de traiter le problème II. On a donc :

$$P_2(t) = \sigma^\infty \quad (III.5)$$

Donc :

$$Z_I = \frac{1}{\pi\sqrt{z^2-a^2}} \int_{-a}^a \frac{\sqrt{a^2-t^2}}{z-t} dt$$

$$\int_{-a}^a \frac{\sqrt{a^2-t^2}}{z-t} dt = \pi(z - \sqrt{z^2 - a^2})$$

On aura :

$$Z_I = \sigma^\infty \left(\frac{1}{\sqrt{z^2-a^2}} - 1 \right) \quad (III.6)$$

Maintenant, on va calculer σ_{yy} au niveau du plan de la fissure ($\theta = 0$)

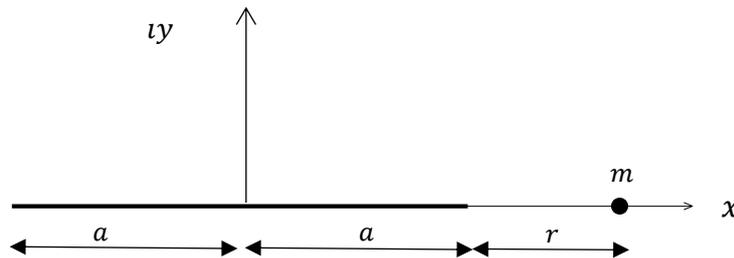


Figure III.11: Point m situant dans le plan de la fissure

$$\theta = 0 \Rightarrow z = r + a$$

La relation (III.2) devient :

$$\sigma_{yy} = \sigma^{\infty} \left(\frac{r+a}{\sqrt{r(r+2a)}} - 1 \right) \quad (\text{III.7})$$

Lorsque $r \rightarrow 0$; $r + a \rightarrow a$ et $r(r + 2a) \rightarrow 2ar$, on aura :

$$\sigma_{yy} = \sigma^{\infty} \sqrt{\frac{a}{2r}} \quad (\text{III.8})$$

D'un autre côté, on a l'expression asymptotique de $\sigma_{\theta\theta}$:

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{KI}{4\sqrt{2\pi r}} \left(3 \cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{3\theta}{2} \right) \quad (\text{III.9})$$

On calcule $\sigma_{\theta\theta}$ dans le plan de la fissure $\theta = 0$, on aura :

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{KI}{\sqrt{2\pi r}} \quad (\text{III.10})$$

Dans le plan de la fissure $\theta = 0 \implies \sigma_{\theta\theta} = \sigma_{yy}$

On aura donc :

$$\frac{KI}{\sqrt{2\pi r}} = \sigma^{\infty} \sqrt{\frac{a}{2r}} \quad (\text{III.11})$$

Ce qui nous donne en final :

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

2.2. Etude numérique:

L'analyse du comportement en rupture d'une plaque contenant une fissure a été faite par la méthode des éléments finis. Cette étude a pour objectif de montrer l'effet de plusieurs facteurs tels que la charge appliquée et les défauts géométriques le comportement en rupture de cette structure.

Les variations des rapports des facteurs d'intensités de contraintes en mode d'ouverture (KI) et en mode de cisaillement (KII) sont en fonction de l'accroissement de la longueur de fissure.

Les figures III .12 et III .13 Présentent respectivement la variation du facteur d'intensité de contraintes KI et KII en fonction de la longueur de fissure $2a$

Les résultats obtenus montrent clairement que le facteur d'intensité de contraintes KI en mode I croît avec l'augmentation de la longueur de fissure $2a$. On observe que pour des longueurs de fissures $2a \geq 500$ mm, le facteur d'intensité de contraintes KI augmente rapidement avec la taille de la fissure jusqu'à la rupture. D'après la figure III .13 , on constate que le facteur d'intensité de contraintes en mode cisaillement KII prend des valeurs aléatoires et maximales pour les faibles tailles de fissure.

Le facteur KII est un paramètre qui permettra la détermination de la direction de la propagation de la fissure. Comparativement au facteur d'intensité de contraintes KI, la valeur du facteur d'intensité de contraintes KII reste relativement faible.

Ceci nous permettra de déduire que le mode dominant dans cette étude est le mode I.

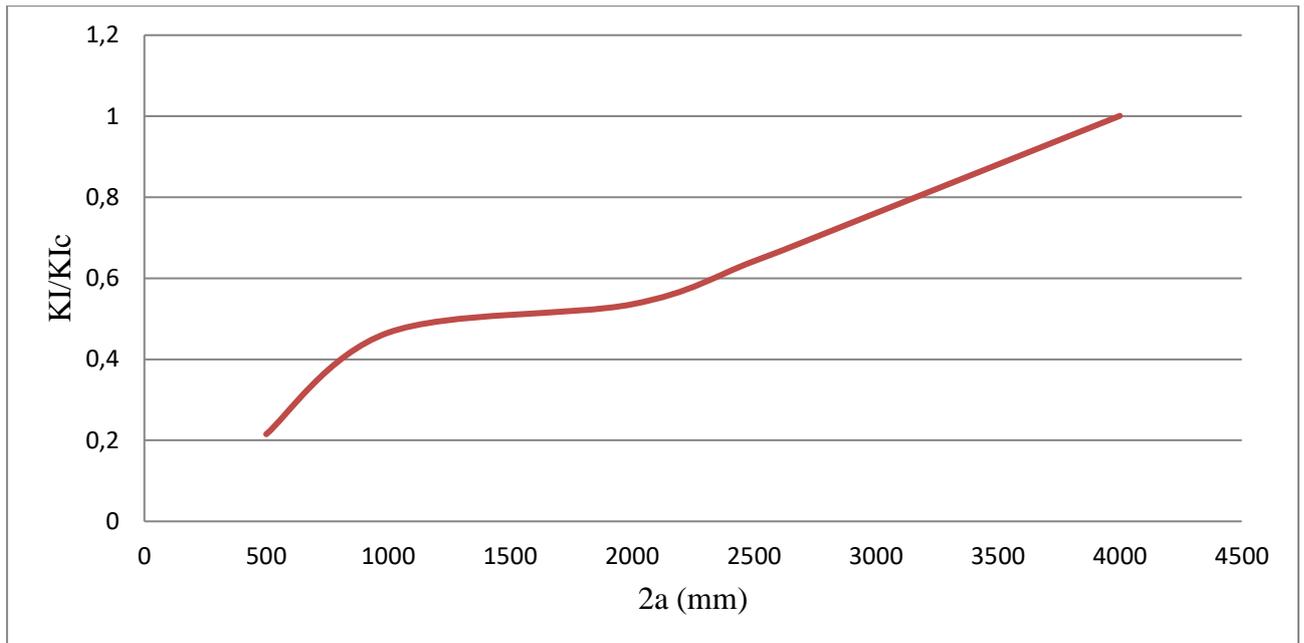


Figure III.12: Variation de K_I/K_{Ic} en fonction de $2a$ pour $\sigma = 50$ MPa

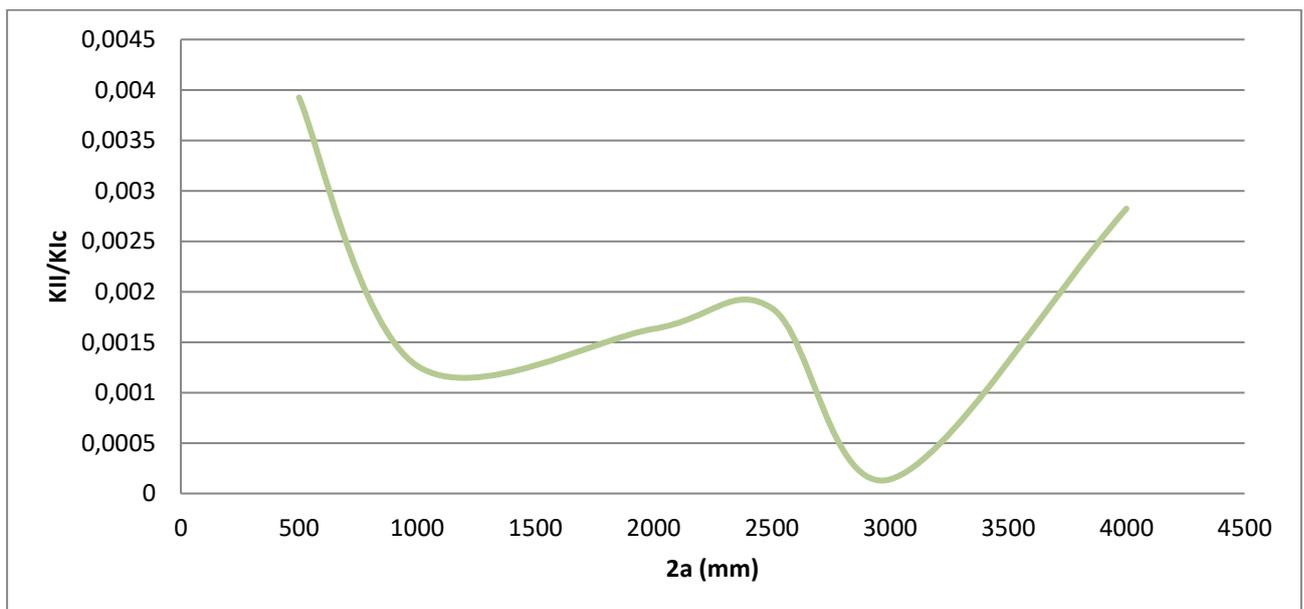


Figure III.13: Variation de K_{II}/K_{Ic} en fonction de $2a$ pour $\sigma = 50$ MPa

2.3. Comparaison :

On va calculer théoriquement le facteur d'intensité de contrainte en mode I pour une fissure de longueur $2a$ situé au milieu d'une plaque infinie soumise à un chargement de traction σ (Figure III . 1).

Donc le calcul théorique de facteur d'intensité de contrainte se fait à partir de l'équation suivante :

$$K = \sigma \sqrt{\pi a}$$

Le tableau suivant donne les résultats trouvés numériquement et théoriquement :

Contrainte appliquée $\sigma = 50$ MPa		
Longue de fissure $2a$ (mm)	Facture d'intensité de contraintes théorique K_{I_t} (MPa \sqrt{mm})	KI numérique (MPa \sqrt{mm})
500	1981.6	1291
1000	2802.4	2795
2000	3963.3	3215
2500	4431.1	3854
3000	4854	4566
4000	5605	6325

Tableau III.3 : KI et KII pour différentes longueurs de fissure

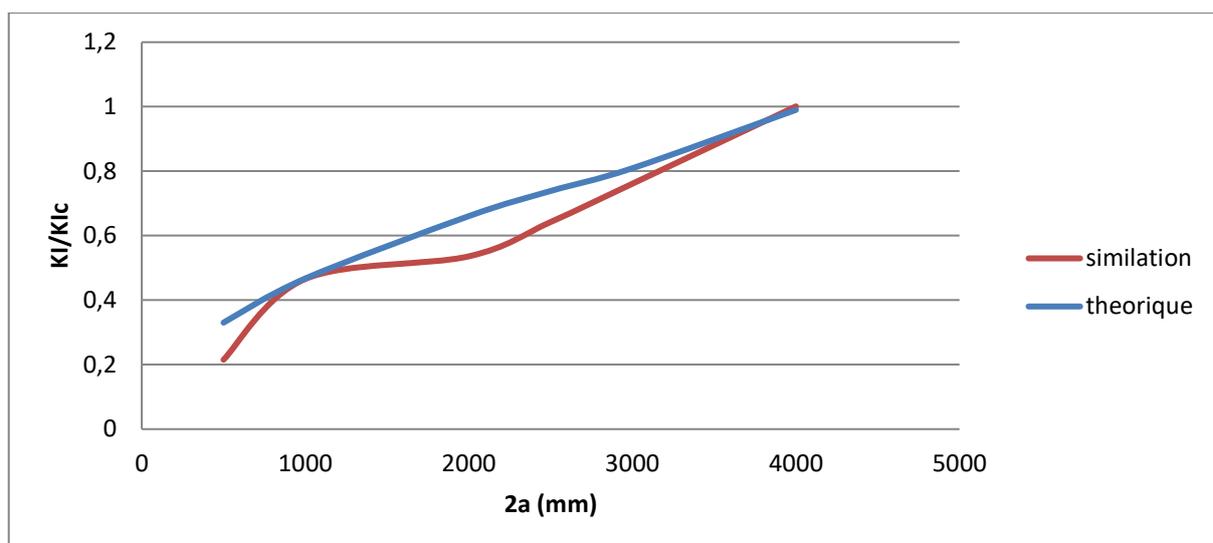


Figure III.14: Variation de KI/KIC en fonction de $2a$ pour $\sigma = 50$ MPa

La figure III.14 présente les variations du rapport du facteur d'intensité de contraintes KI/KIC en fonction de la longueur de fissure $2a$ pour une étude théorique et numérique. Cette figure montre clairement que les deux courbes suivent la même variation. Donc on peut assimiler la plaque étudiée à une plaque infinie.

III.2.3 Effet de la charge appliquée σ :

La charge appliquée est un paramètre qui influe sur l'évolution du facteur d'intensité de contraintes en mode I et II. Dans cette partie d'étude et pour la même plaque, on essaiera d'analyser l'effet de la charge appliquée σ sur les facteurs d'intensité de contraintes en mode I et II. On a fait varier la charge de **10 MPa** jusqu'à **50 MPa**. Ces valeurs sont très inférieures aux limites d'élasticité de l'acier.

Les figures III.15 et III.16 présentent la variation des facteurs d'intensité de contraintes en mode I et II en fonction de la longueur de fissure et la charge appliquée.

La Figure III.15 montre la proportionnalité qui existe entre le rapport KI/KIC et la contrainte appliquée, à la plus grande contrainte correspond la plus grande valeur du facteur KI .

Donc, quel que soit la longueur de la fissure, le facteur d'intensité de contraintes en mode I augmente avec l'augmentation de la contrainte appliquée jusqu'à la rupture.

On remarque aussi que quel que soit la longueur de la fissure $2a$, le rapport K_{II}/K_{IC} varie proportionnellement à la contrainte appliquée.

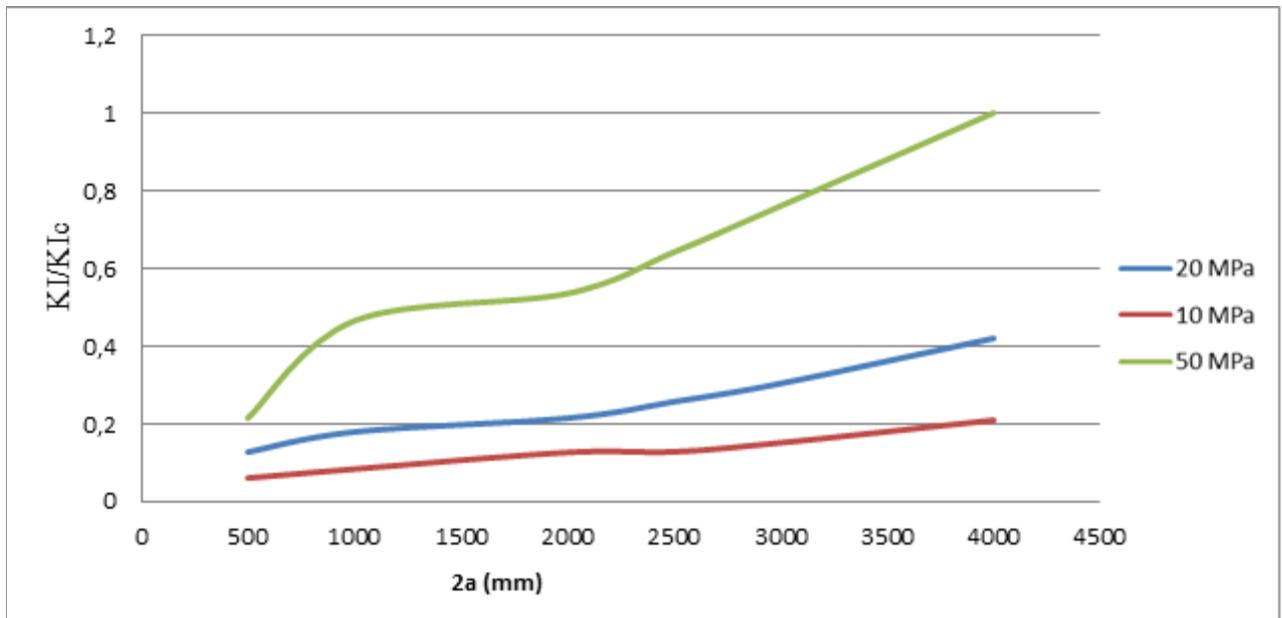


Figure III.15: Variation de K_I/K_{IC} en fonction de $2a$ et les contraintes appliquées de traction

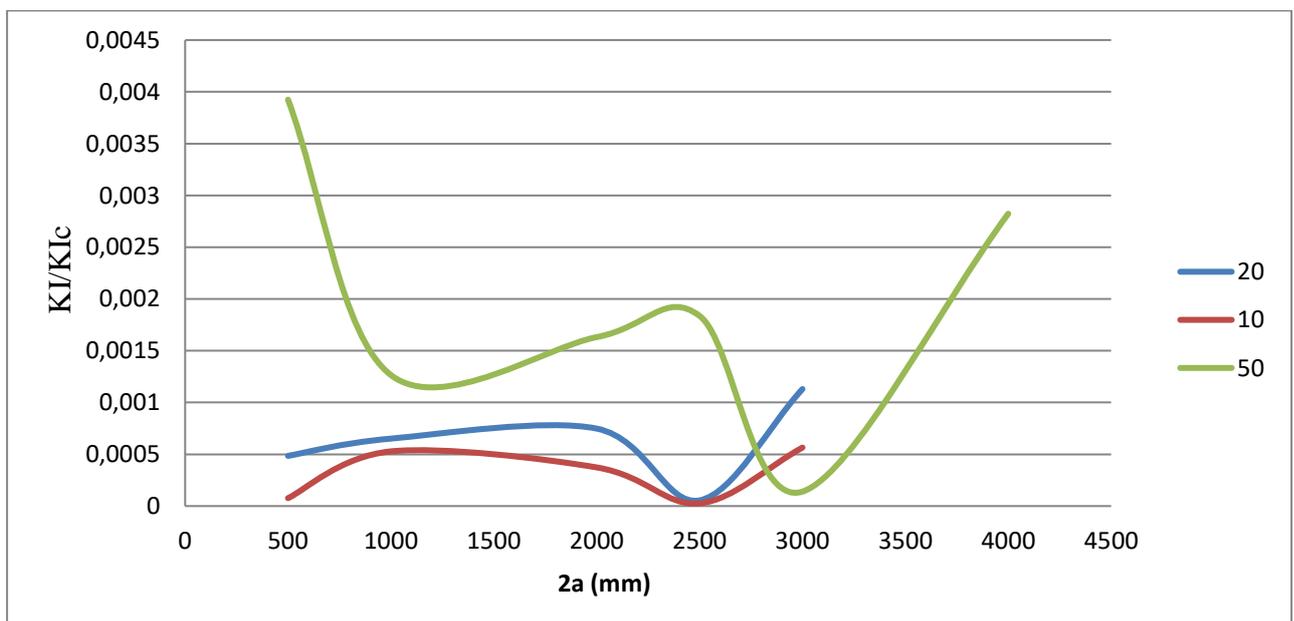


Figure III.16: Variation de K_{II}/K_{IC} en fonction de $2a$ et la contrainte appliquée de traction

III.2.4. Effet d'orientation de la fissure

Les études précédentes ont été faites avec l'hypothèse que la fissure est amorcée perpendiculaire au chargement appliqué [29]. Dans cette partie du travail, l'effet de l'orientation de la fissure, caractérisée par l'angle Θ , sur le rapport du facteur d'intensité de contraintes en mode I et II a été analysé. Les résultats de cette analyse sont représentés sur les figures III.16, figure III.17 figure III.18 et le tableau suivant :

$\sigma = 50 \text{ MPa}, 2a = 2000 \text{ mm}$		
Ongle d'inclinaison de fissure	KI MPa \sqrt{mm}	KII MPa \sqrt{mm}
0	3215	9.79
30	2696	1486
60	791.9	1345
90	6.697	2.45

Tableau III.4 : KI et KII pour différents angles d'inclinaison

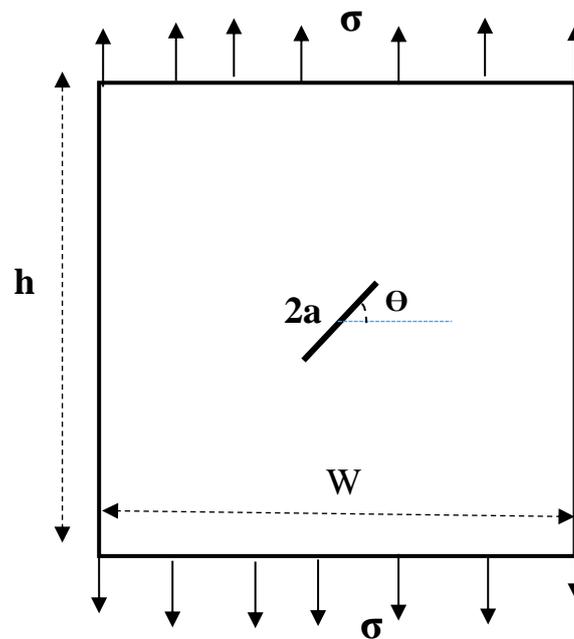


Figure III .16 modèle de d'orientation de la fissure

La figure III. 19 présente la distribution de la contrainte équivalente de Von mises et des contraintes normales dans la plaque. Cette figure montre que les contraintes plus élevées se sont localisées au tête de fissure. Loin de cette dernière, la plaque est totalement relaxée de ces contraintes quel que soit l'angle d'inclinaison.

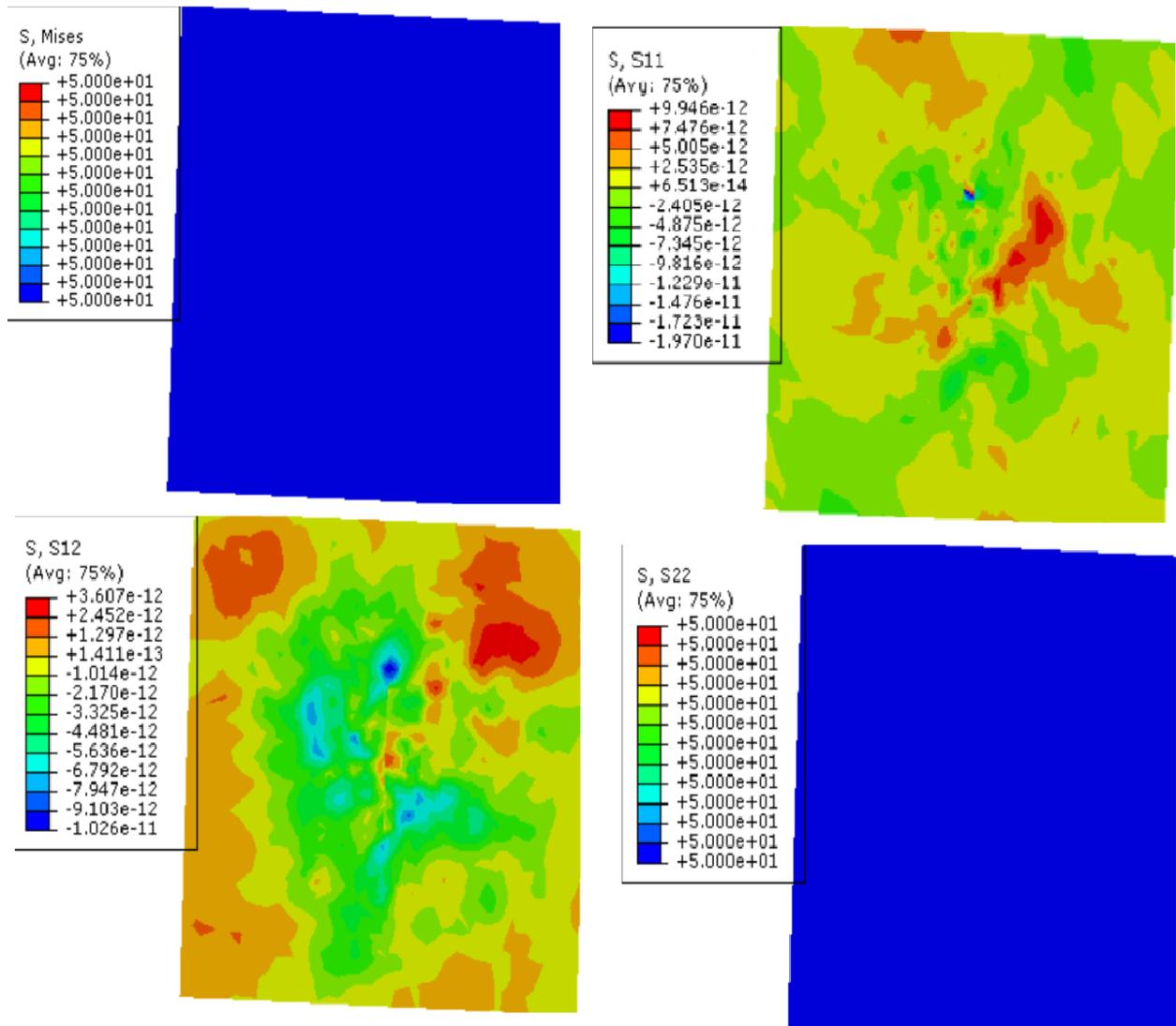


Figure III.18 : Distribution de la contrainte équivalente et normale pour un chargement mécanique : $\sigma= 50$ MPa et l'angle 90

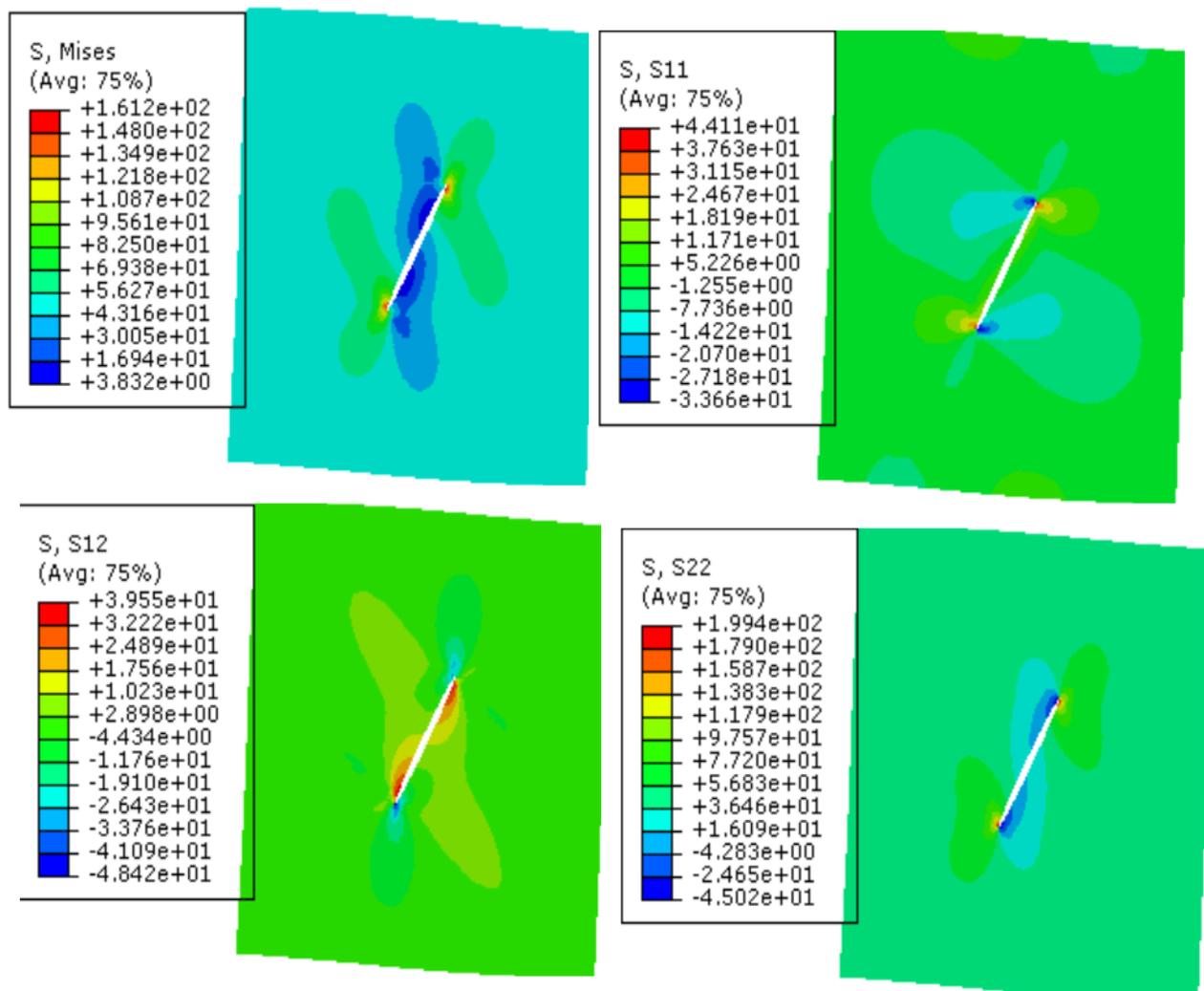


Figure III.19 : Distribution de la contrainte équivalente et normale pour un chargement mécanique : $\sigma= 50$ MPa et l'angle 60

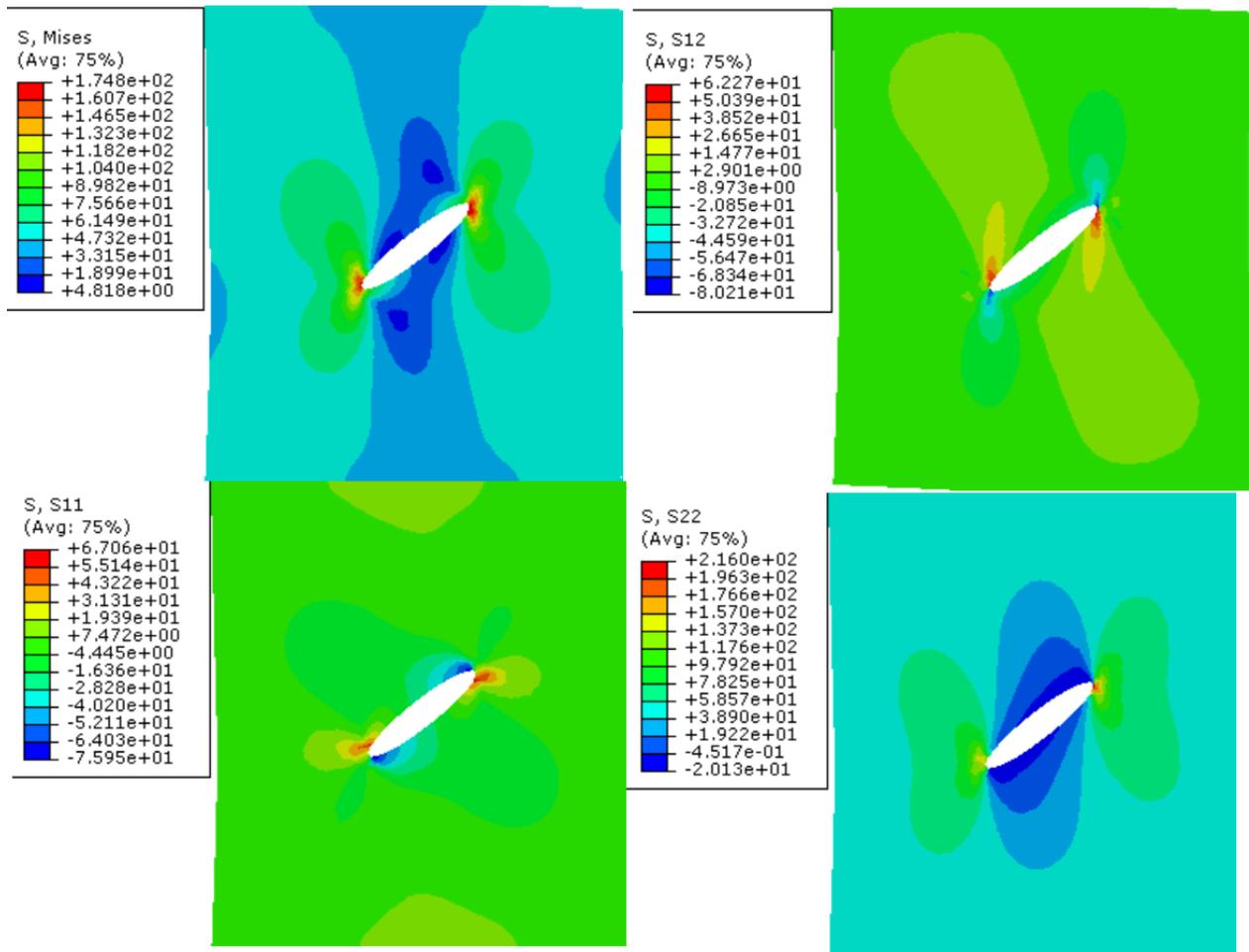


Figure III.20 : Distribution de la contrainte équivalente et normale pour un chargement mécanique : $\sigma= 50$ MPa et l'angle 30

Les figures III.21 et III.22 illustrent la variation du facteur d'intensité de contrainte KI et KII en fonction de l'orientation de la fissure, amorcée perpendiculairement au chargement appliqué. Cette figure montre que le facteur d'intensité de contrainte en mode d'ouverture est sensible à la position de la fissure. KI augmente avec la diminution de l'angle d'inclinaison Θ .

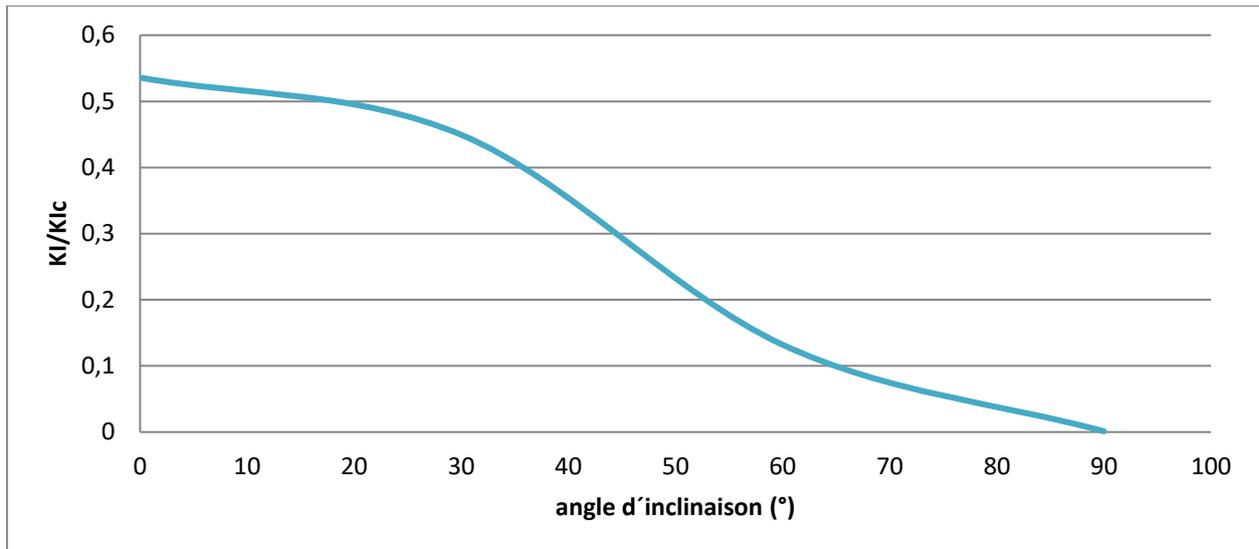


Figure III.21: Variation de K_I/K_{Ic} en fonction de l'angle d'inclinaison Θ

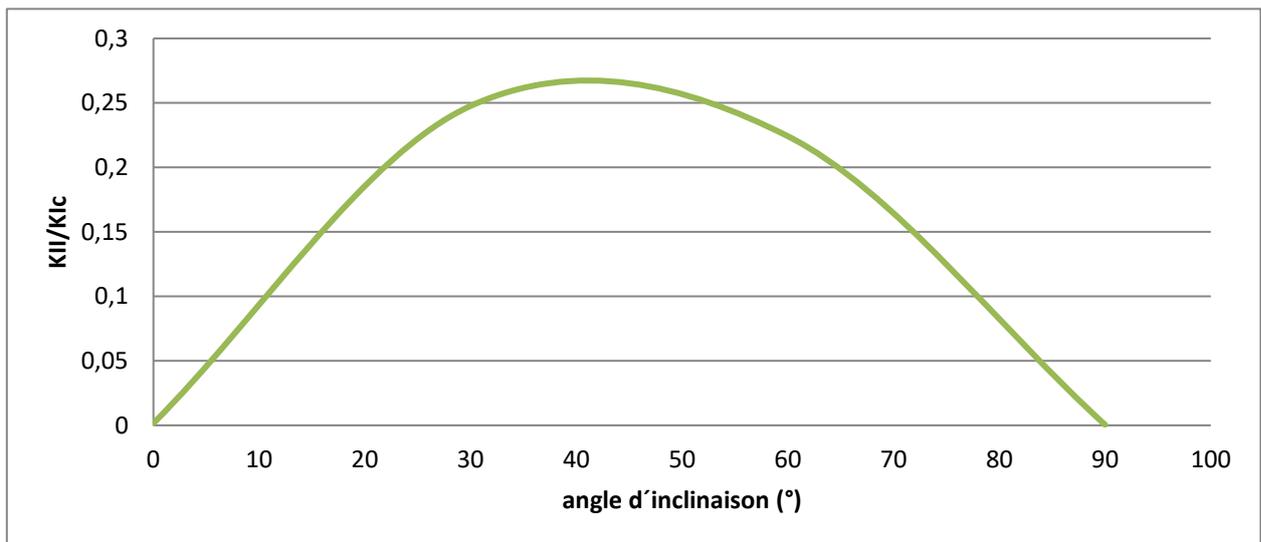


Figure III.22: Variation de K_{II}/K_{Ic} en fonction de l'angle d'inclinaison Θ

Le facteur d'intensité de contraintes K_{II} dépend de l'orientation de la fissure. Pour la position $\Theta = 45$, la valeur de K_{II} est plus élevée. Donc le mode de croissance de la fissure dépend son orientation par rapport à la direction de traction.

III.2.5. Effet d'interaction fissure-défaut

La concentration de contraintes est un problème souvent rencontré dans la conception mécanique d'un composant ou organe mécanique. C'est un phénomène d'augmentation locale des contraintes dans une zone comportant une modification géométrique de la pièce. Il apparaît dans une discontinuité de la pièce ou d'une structure avec la présence d'une entaille après l'usinage par exemple. La zone de concentration de contraintes est souvent le site d'amorçage des fissures de fatigue mais peut être aussi l'origine d'une rupture brutale dans le cas d'un matériau fragile.

La présence des défauts et leur interaction dans une structure métallique peuvent être le siège de concentration de contraintes. C'est pourquoi une analyse de l'interaction trou-fissure, perpendiculairement à la direction du chargement mécanique, sur l'évolution de facteur d'intensité de contraintes. Le niveau de la contrainte équivalente et des contraintes normales en fonction de la distance fissure-trou est montré sur la figure III.24 . Les contraintes le plus élevées sont localisées près du trou et de la fissure.

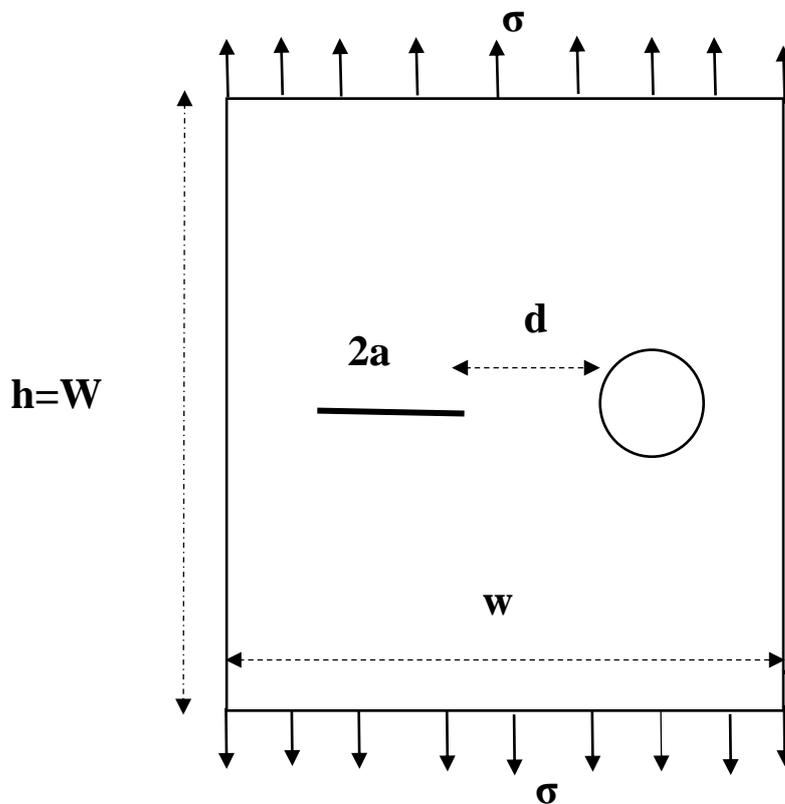


Figure III.23 modèle de d'interaction fissure-défaut

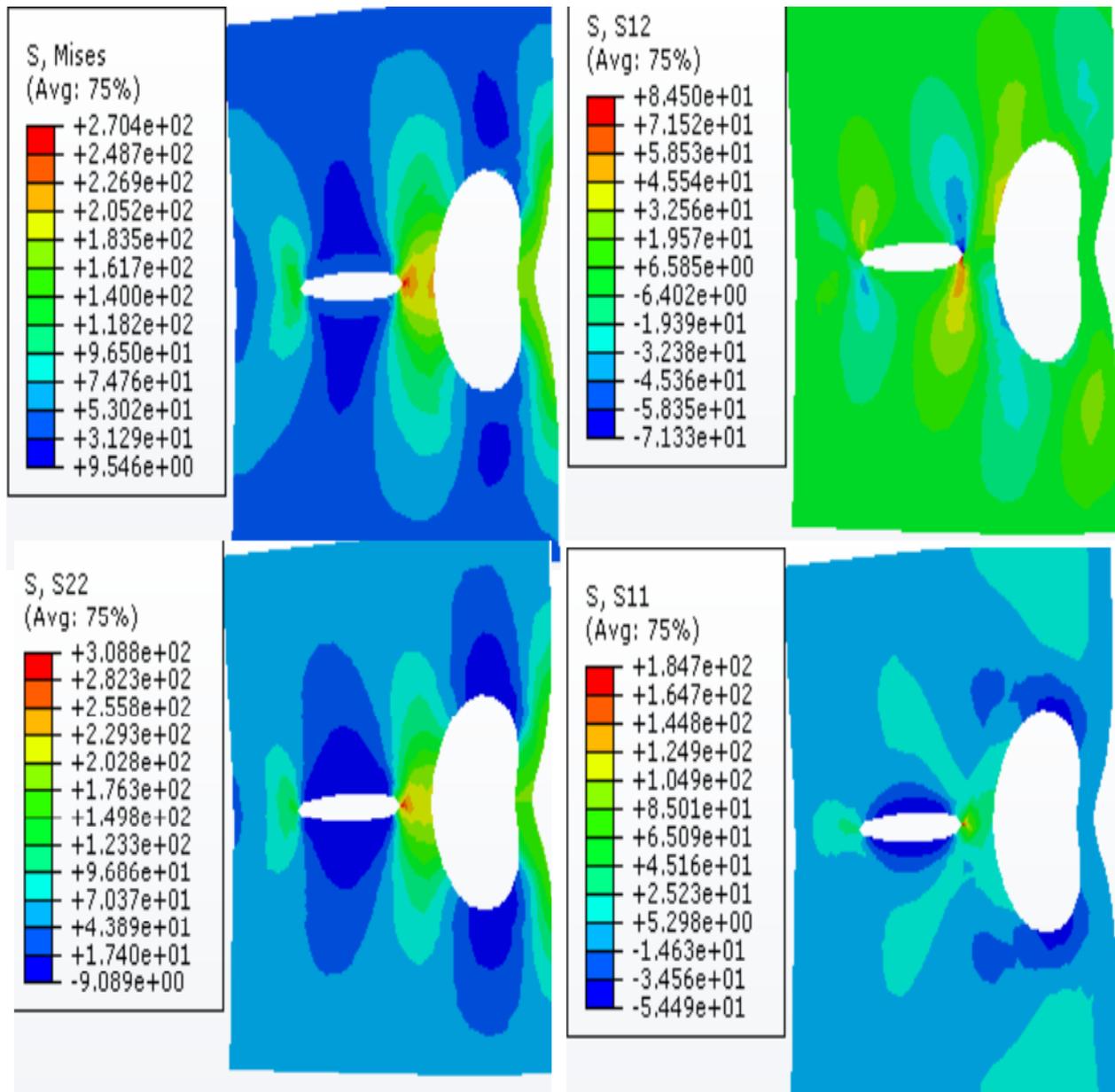


Figure III.24 : Effet de l'interaction fissure-trou sur la distribution de la contrainte équivalente et des contraintes normales : $\sigma = 50$ MPa et $d = 556$ mm

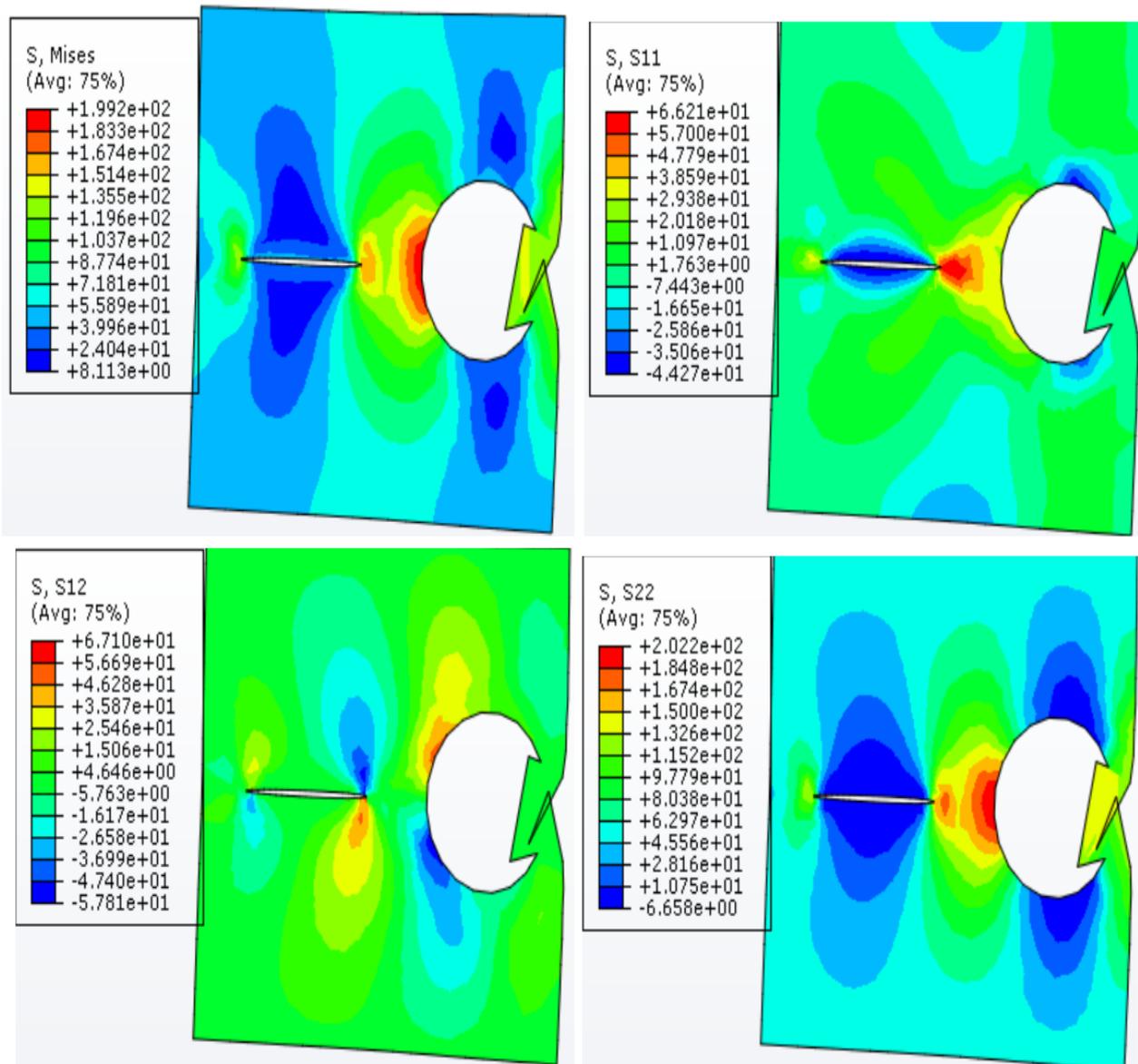


Figure III.25 : Effet de l'interaction fissure-trou sur la distribution de la contrainte équivalente et des contraintes normales : $\sigma = 50$ MPa et $d = 980$ mm

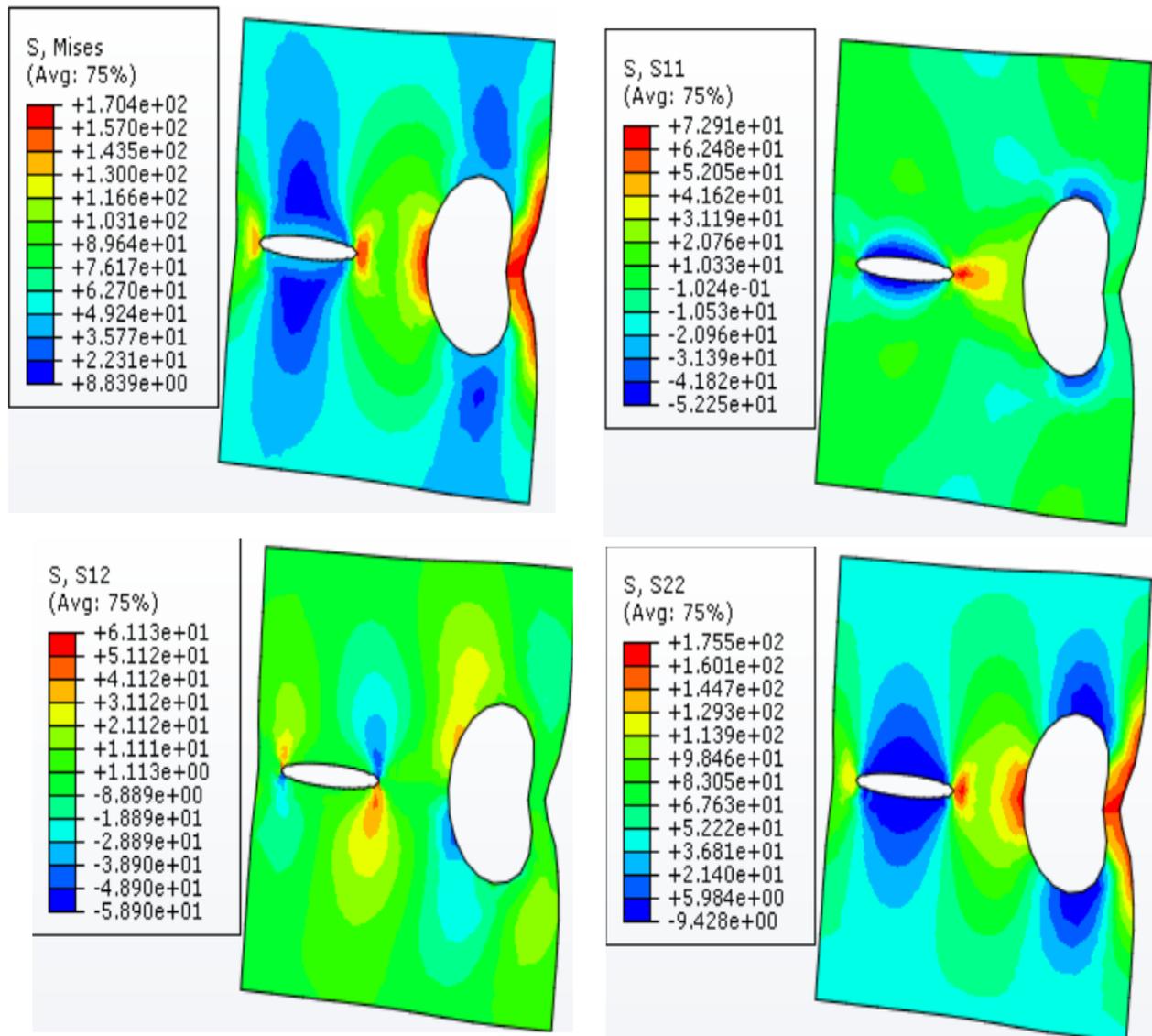


Figure III.26 : Effet de l'interaction fissure-trou sur la distribution de la contrainte équivalente et des contraintes normales : $\sigma = 50$ MPa et $d = 1283$ mm

Sur la figure III.27 et III.28 est illustrée la variation de facteur d'intensité de contraintes I et II en fonction de la distance entre la fissure et le trou. Cette figure montre clairement qu'une évolution de la fissure vers le trou ou une diffusion du trou vers la fissure conduisent à une forte intensification de contrainte, donc une augmentation du facteur d'intensité de contraintes.

$\sigma = 50 \text{ MPa}$, $2a = 2000\text{mm}$, démettre de trou égale 2000mm		
Distance d (mm)	KI ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$)	KII ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$)
556	4184	236.3
980	3248	67.14
1283	2760	20.83

Tableau III.5 : KI et KII pour différentes distance d

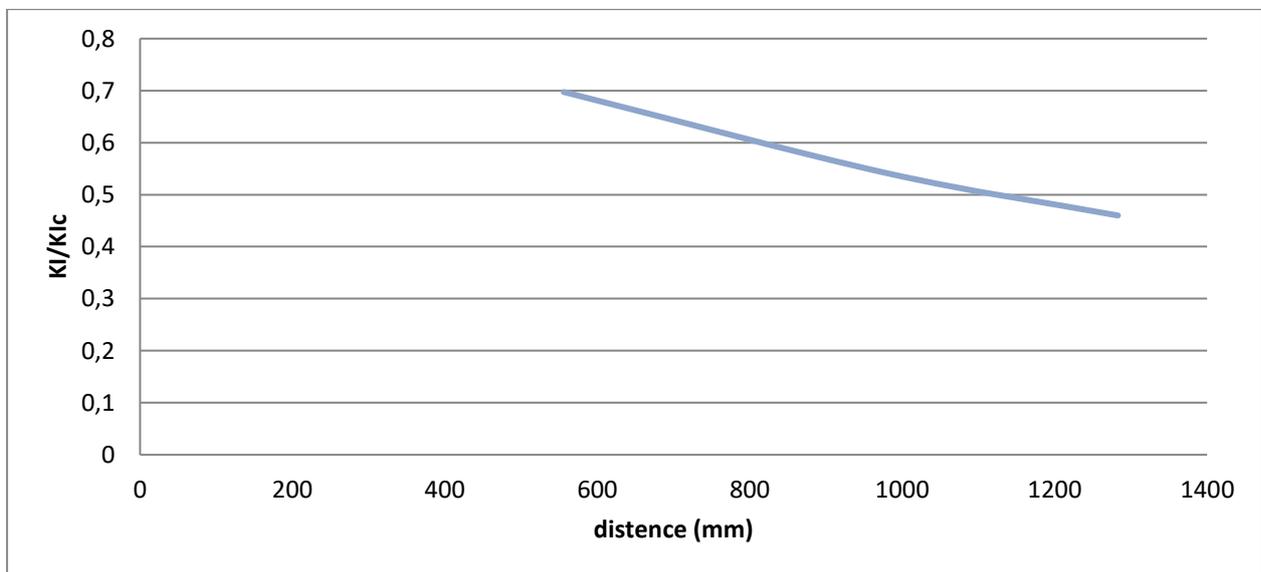


Figure III.27 : Variation de KI/KIc en fonction de l'inter-distance trou-fissure ($\sigma = 50 \text{ MPa}$)

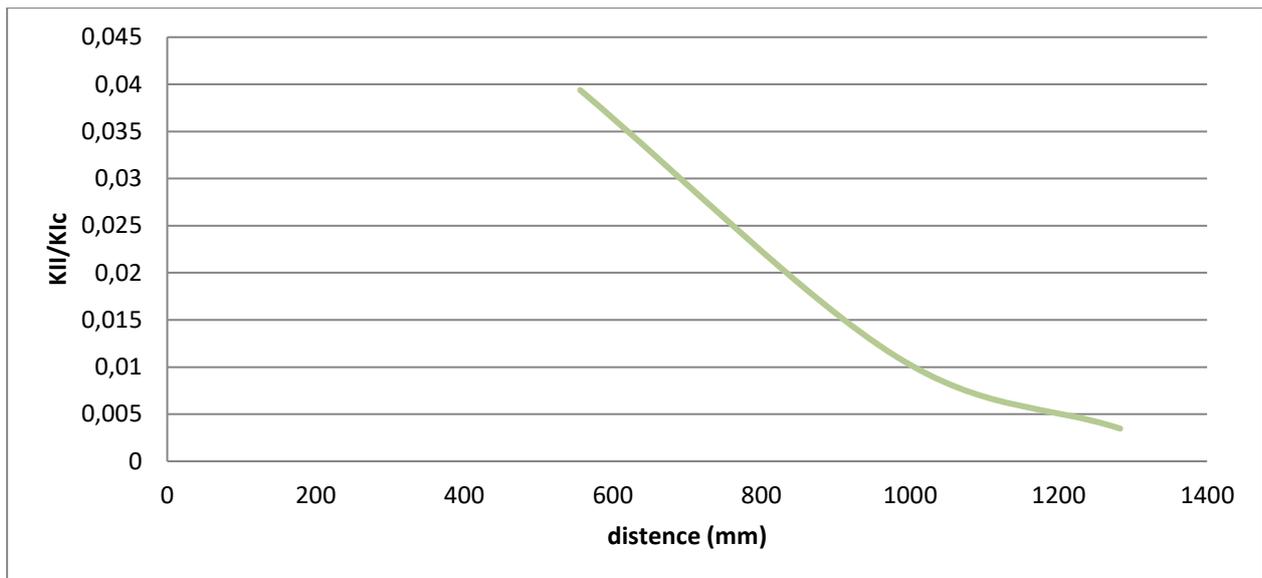


Figure III.28 : Variation de K_{II}/K_{IC} en fonction de l'inter-distance trou-fissure ($\sigma = 50$ MPa)

La distance séparant une fissure et un trou détermine le mode de rupture plus dominant. Une tendance de ces deux défauts favorise le mode d'ouverture K_I de cette fissure et un écartement le mode de cisaillement K_{II} .

La présence du trou accélère la cinétique de croissance de la fissure.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'analyse des facteurs d'intensité de contraintes, en mode I et II, d'une plaque contenant une fissure a été abordée dans le cadre de cette mémoire. Les résultats obtenus dans cette étude nous montre que :

Les résultats obtenus montrent que le facteur d'intensité de contraintes KI en mode I croît avec l'augmentation de la longueur de fissure $2a$.

La variation du facteur KII était aléatoire, admet des valeurs négatives, elle nous permettra de déterminer la direction de propagation de la fissure.

L'analyse numérique par la méthode des éléments finis d'effet du chargement mécanique montre clairement qu'un chargement plus intense induit une contrainte plus forte à la tête fissure.

Le facteur d'intensité de contrainte en mode d'ouverture et cisaillement est sensible à la position de la fissure.

L'influence d'un trou existant au voisinage d'une fissure, sur le facteur d'intensité de contrainte a été analysé. Il a été démontré que le facteur d'intensité de contrainte est d'autant plus élevé que les deux défauts sont très proche l'un de l'autre.

Référence

Bibliographie

Référence Bibliographie

[1] : MAZOUZI Abdelhamid. " SIMULATION NUMERIQUE PAR ELEMENTS FINIS DE L'AMORÇAGE ET LA PROPAGATION D'UNE FISSURE EN MODE I DANS UNE EPROUVETTE DCB EN COMPOSITE " Mémoire magister en mécanique. Université Houari Boumediene ; 25/12/2012.

[2] : MEGDOUD Soufiane. "Analyse et calcul par Méthode des élément finis étendus XFEM des matériaux fissurées " Mémoire magister en mécanique, Ingénierie des système . UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES ; 2011/2012.

[3] : Ba Danh LE. " Modélisation discrète en mécanique de la rupture des matériaux fragiles " Thèse de Doctorat en mécanique ; génie civil . Ecole doctorale MSII ED [N° 269], université de Strasbourg ;7 juin 2013.

[4] : MOUSSAOUI Mustafa. " ETUDE ET MODELISATION DE LA RESISTANCE A LA RUPTURE SUR DES EPROUVETTES ENTAILLEES" Thèse de Doctorat en génie mécanique. Université Constantine ,2015.

[5] : BOUZA Mohamed ,BOURAS Zaki ." Application de la méthode de collocation de frontière au calcul facture d'intensité de contrainte en mode I "Mémoire De fin d'études , département de mécanique . UNIVERSITE SAAD DAHJEB BLIDA 1; (2016 / 2017).

[6] Pluvinage G. Fatigue and fracture emanating from notch; the use of the notch stress intensity factor, Nuclear Engineering and Design 185: 173-184, (1998).

[7] Eric Cavazos, Robert Khan. Fracture and Bending Mechanics. First Edition, Academic Studio, 4735/22 Prakashdeep Bldg, Delhi – 110002, (2012).RBAH OUARGLA; (2018 / 2019).

[8] : NATECHE Tahar. "Réhabilitation et renforcement des canalisations sous pression en présence des défauts de surfaces" Thèse de doctorat en génie mécanique. Université des sciences et de la technologie- Mohamed Boudiaf- Oran.

[9] : Mme KHAMMAR Leila. " Etude et Modélisation de la Propagation des Fissures Sous Chargement Thermique Cyclique " Thèse de doctorat en génie mécanique. Université des frères MENTOURI CONSTANTINE 1 ;2018

- [10] : Mr Ahmed BENHAMOUDA. " Etude du comportement des fissures dans les tubes sous pression interne " Mémoire magister en génie mécanique. Université MENTOURI CONSTANTINE 1 ;2010.
- [11]: IMSI . Cours "mécanique de la rupture ". Université Oran2, 7mars 2020.
- [12] : AMMARA Zenati Abdeljalil. "Etude du comportement des aciers API 5L X60 Sollicités par contraintes mécaniques et milieu de sol Algérien simulé" Thèse de doctorat En génie mécanique option science des matériaux. Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen (2014).
- [13] : MESLI Kamel, LAKEHAL Mohammed El Habib." ETUDE PAR ELEMENTS FINIS DE LA PROPAGATION DE LA FISSURE D'UNE PLAQUE "Mémoire MASTER II ACADEMIQUE, département génie mécanique . UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA ; (2018 / 2019).
- [14]: Dr BOUAFIA Farida . Cours "mécanique de la rupture "département de génie mécanique . Université Ain temochente.
- [15] : Melle SAIB Meriem. " Etude expérimentale et numérique d'une structure fissurée sous contrainte de fatigue " Mémoire magister en génie mécanique. Université M'HAMED BOUGARA DE BOUMERDES ;2012.
- [16] pierre-Antony Deschênes, "comportement des fissures de fatigue dans un champ de contraintes résiduelles de tension". Thèse 2016
- [17] : Erwan MORICE . "Fissuration dans les matériaux quasi-fragiles : approche numérique et expérimental pour la détermination d'un modèle incrémental à variables condensées" ; THÈSE DE DOCTORAT DE L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE CACHAN; UniverSud Paris ;28 Mars 2014
- [18] : BELMOKHTAR Abdelkader." Contribution au développement d'un modèle de propagation pour la prédiction de la durée de vie en fatigue " Magister en génie mécanique, Ecole Doctorale : Mécanique des Matériaux & Structures. ; Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen. 2012-2013
- [19] NOURREDINE ait Hocine . Approches globales de la mécanique de la rupture appliquée aux élastomères . Thèse de doctorat ; Université des sciences et technologies de Lille ;1996.

[20] : Saverio Fiordalisi FIORDALISI. " Modélisation tridimensionnelle de la fermeture induite par plasticité lors de la propagation d'une fissure de fatigue dans l'acier 304L" Thèse de doctorat ISAE-ENSMA Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique - Poitiers, 2014. Français

[21] : Aimé-Claude Nyongue. " Comportement à la rupture des matériaux fragiles sous sollicitations dynamiques : Application sur le verre" Thèse de doctorat des mécanique des matériaux. Université Paul Verlaine - Metz, 2001. Français. ;2001.

[22]: Abderrahim ZEGHLOUL. cours "CONCEPTS FONDAMENTAUX DE LA MECANIQUE DE LA RUPTURE " Master MECANIQUE, MATERIAUX, STRUCTURES, PROCEDES. Université De lorraine. (2016.2017).

[23] : Dr. DEGHBODJ Samir. Cours "logiciels de simulation numérique en mécanique ABQUS " département de génie mécanique master . Université Larbi Tébéssi-Tébessa ,2019.

[24] : ZEGHDOUDI Mohammed Nadjib." Etude Et Modélisation Du Comportement Mécanique Des Engrenages Fissurés "diplôme Master , Faculté de TECHNOLOGIE. Université ABOUBAKR belkaïd Tlemcen.

[25] : Bari Taieb. " Modélisation des structures 3D en élasto plasticité utilisant l'Abaqus " Mémoire de master génie mécanique. Université Mohamed Khider de Biskra ;2019 .

[26] : E. Ergun, K. Aslantas, S. Tasgetiren, M. Topcu, Materials and Design 27 (2006) 2-9

[27] : ABAQUS, User's Manual, 6.14, Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc.F.

[28] : Hossem Eddine, SAIDI Mohamed Abdellahi OULD AHMED. " CALCUL DU FACTEUR D'INTENSITÉ DE CONTRAINTE PAR ABAQUS POUR UNE FISSURE CENTRALE ET UNE FISSURE DÉBOUCHANTE" MÉMOIRE DE MASTER en génie mécanique. Université SAAD DAHLAB BLIDA 1, Juin 2016.

[29] : Nadjid Hamani." L'effet de l'orientation d'une fissure sur la charge critique de flambement dans un composite hybride". CFM 2013 - 21ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2013, Bordeaux, France.