

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université –Ain T'émouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département de génie mécanique



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master
Domaine : Science et Technologie
Filière : Génie mécanique
Spécialité : construction mécanique
Thème

**Analyse numérique par la méthode des éléments finis (Abaqus) de
la concentration des contraintes et du facteur d'intensité des
contraintes au niveau des fissures dans les jonctions soudées des
pipelines**

Présenté Par :

- 1) AID DJIHENE
- 2) ALLIAOUI MEROUA

Devant le jury composé de :

Mr. Djebbar Noureddine	Pr	Université d'ain témouchent de belhadj bouchaib	Président
Mme. Bouafia Farida	Pr	Université d'ain témouchent de belhadj bouchaib	Encadrante
Mme. Bouzitouna Wahiba	MCA	Université d'ain témouchent de belhadj bouchaib	Examinatrice

Année Universitaire 2025/2026

Remerciements

Tout d'abord nous tenons à remercier ALLAH le tout puissant de nous avoir fournis de la patience au moment de besoin, de la force au moment de la faiblesse et de la volonté contre le désespoir, et de nous avoir permis d'en arriver là.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à notre encadreur Dr Bouaffia Farida maitre conférence à l'université de Belhadj Bouchaib - Ain Témouchent, d'avoir accepté de nous encadrer, orienter et surtout on le remercie pour sa disponibilité au cours de la préparation de notre mémoire.

Ce travail a été réalisé pour l'obtention du diplôme de fin d'études en Master II, option Génie mécanique. Merci également aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner ce travail, d'assister à la soutenance et d'enrichir ce dernier via leurs commentaires.

Nous ne pourrions pas mettre fin à ces remerciements sans associer nos familles et nos amis pour leurs encouragements.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À ma très chère mère, source d'amour, de tendresse et de soutien.

À mon frère Abdelkader, pour son encouragement et sa présence constante.

À mes tantes, mes oncles, leurs familles ainsi qu'à mes cousines, pour
leur affection et leurs précieux conseils.

À la mémoire de mon grand-père maternel, qu'Allah lui accorde Sa miséricorde.

Son souvenir restera à jamais gravé dans mon cœur.

À ma chère grand-mère, pour son amour, ses prières et sa bienveillance.

À mon amie Aïd Djihéne, en témoignage de notre sincère amitié.

À une personne très chère à mon cœur, pour son soutien, sa confiance
et sa présence à mes côtés.

Enfin, à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la
réalisation de ce travail, avec toute ma gratitude et ma profonde reconnaissance.

Dédicace

A mon adorable mère BOUHAMIDI DJAMILA, mon précieux offre du dieu, et mon père BELKHALED, ce travail représente l'abolissement du leur soutien qu'ils prodigués tout au long de ma scolarité, mes remerciements ne pourront jamais égaler leur amour, encouragements et sacrifices.

A mon frères ABD EL BASSET et ma sœur NOUR EL HOUDA

A mes chères amies Fatima, Wissem Et Imane pour leurs encouragements, conseils et leur soutien moral.

A mon binôme Alliaoui meroua A toutes ces âmes je dédie ce travail en signe de reconnaissance et de respect.

Ainsi que tous mes enseignants durant tout mon cursus.

Et a toutes les personnes que j'aime et ceux qui m'aiment

DJIHENE

Résumé

Résumé

Cette mémoire porte sur l'analyse du comportement mécanique des pipelines, en mettant l'accent sur les jonctions soudées et leur sensibilité aux défauts tels que les fissures. L'objectif principal est d'étudier les mécanismes de concentration de contraintes et les conditions de rupture au niveau de ces zones critiques, en utilisant une approche basée sur la mécanique de la rupture et la simulation numérique par éléments finis (Abaqus).

Mots clés :

Pipelines, Jonctions soudées, Mécanique de la rupture, Fissures, Concentration de contraintes, Facteur d'intensité des contraintes (K), Ténacité à la rupture, Méthode des éléments finis, Abaqus, Analyse numérique

Abstract

This thesis focuses on the analysis of the mechanical behavior of pipelines, with particular emphasis on welded joints and their sensitivity to defects such as cracks. The main objective is to study the mechanisms of stress concentration and the fracture conditions in these critical zones, using an approach based on fracture mechanics and finite element numerical simulation (Abaqus).

Keywords:

Pipelines, welded joints, fracture mechanics, cracks, stress concentration, stress intensity factor (K), fracture toughness, finite element method, Abaqus, numerical analysis.

ملخص

تتناول هذه المذكرة تحليل السلوك الميكانيكي لخطوط الأنابيب، مع التركيز بشكل خاص على الوصلات الملحومة وحساسيتها تجاه العيوب مثل الشقوق. ويتمثل الهدف الرئيسي في دراسة آليات تركّز الإجهادات وظروف الكسر في هذه المناطق الحرجة، باستخدام منهج يعتمد على ميكانيكا الكسر والمحاكاة العددية بطريقة العناصر المحدودة (Abaqus).

الكلمات المفتاحية:

خطوط الأنابيب، الوصلات الملحومة، ميكانيكا الكسر، الشقوق، تركيز الإجهادات، عامل شدة الإجهاد (K) ، متانة الكسر، طريقة العناصر المحدودة، أباكوس، التحليل العددي.

Remerciements.....	i
Dédicace	ii
Résumé.....	iv
Liste des figures	ix
Liste des tableaux.....	x
Introduction générale	1
Chapitre I.....	3
Généralités sur les Pipelines et les Jonction soudées.....	3
Introduction	4
I.2 Types de pipelines et condition de service.....	6
I.2.1. Types de pipelines	6
I.2.2. Conditions de service	7
I.3. Jonction soudées dans les pipelines	8
I.3.3. Procédes de soudage utilises	9
I.4. Défauts de soudage et mécanismes d'endommagement.....	13
I.5. Conclusion.....	20
Chapitre II	21
Mécanique de la Rupture.....	21
Introduction	22
II.1 Rappels sur la concentration de contraintes	22
II.1.1 Historique	22
II.1.2 Définition	23
II.2 Mécanique linéaire élastique de la rupture (MLER)	26
II.2.1 Energie de rupture (G).....	27
II.2.2 Zone plastique confinée.....	28
II.3. Facteur dintensité de contraintes (Mode I , II , III)	33
II.4 .Critères de rupture et ténacité a la rupture	35
II.4.1 Critères de rupture.....	35
II.4.2 Ténacité a la rupture	40
II.5. Conclusion	40
Chapitre III.....	41
Analyse Numérique et Résultats.....	41

Sommaire

Introduction	42
III.1. Présentation générale du logiciel abaqus	42
III.2. Modèle utilisé :	44
III.3 Résultats et analyse.....	47
III. 3.1 Distribution des contraintes :	47
III. 3.2. Effet de la charge appliquée :	50
III. 3.3. Comparaison simulation / théorique	52
III.3.4 Effet du module de Young (E)	54
III.3.5 .Effet de diamètre :	55
III.3.6 : Effet des défauts (cavité) sur le comportement mécanique du pipeline	57
III.3.7 Interdistance entre fissure et défaut.....	60
II.4. Conclusion.....	67
Conclusion générale.....	69
Références Bibliographies	71

Liste des figures

Figure I.1: Pipeline[2].....	5
Figure I.2:Gazoducs[3]	6
Figure I.3: Oléoduc[4]	7
Figure I.4: Types de joints[7]	9
Figure I. 5: Procédé de soudage selon les différentes sources d'énergie[7]	10
Figure I.6: Energie spécifique des différents procédés de soudage[7].....	11
Figure I.7: Procédé de soudure à l'arc électrique[7]	13
Figure I.8: électrode enrobée[7]	13
Figure I.9: Exemple de la présence des porosités dans une soudure (Sur film réel de radiographie)[8]	15
Figure I.10: Exemple des inclusions de laitier (Sur film réel de radiographie)[8]	16
Figure I.11: Exemple d'une Fissuration Transversale (Sur film réel de radiographie)[8]	18
Figure I.12: Exemple d'une Fissuration Longitudinale (Sur film réel de radiographie)[8]	18
Figure II.1 : Représentation graphique du critère de Tresca [12]	38
Figure II.2: Triangulation [14]	Erreur ! Signet non défini.
Figure III.1: L'interface Abaqus.[15]	Erreur ! Signet non défini.
Figure III.2: Représentation du modèle : (a) création du cercle,(b) modélisation géométrique d'un tube cylindrique,(c)création de deux cercles concentriques,(d)partitionnement de la géométrie,(e)suppression des faces sélectionnées,(f) model 3D	Erreur ! Signet non défini.
Figure III.3: Distribution de la contrainte équivalente normale et tangentielles	48
Figure III.4: Variation de K1 en fonction de a	49
Figure III.5: Variation de K2 en fonction de a	50
Figure III.6: Variation de k1 en fonction de a	51
Figure III.7: Variation de k2 en fonction de a	52
Figure III.8: évolution de KI en fonction de la fissure a	54
Figure III.9: Variation de K1 en fonction de a et les module d'Young E	54
Figure III.10: Variation de K2 en fonction de a et les module d'Young E	55
Figure III.11:variation de K1 En fonction de la diamètre d	56
Figure III.12:variation de K2 en fonction de la diamètre d	Erreur ! Signet non défini.
Figure III.13 Figure 28: Visualisation 3D des contraintes de Von Mises	58
Figure III.14: Effet de la taille du défaut sur les facteurs d'intensité des contraintes K1	59
Figure III.15: Effet de la taille du défaut sur les facteurs d'intensité des contraintes K2	59
Figure III.16: Répartition des contraintes de Von Mises pour une distance donné entre la fissure et le défaut	61
Figure III.17:Variation de K1 en fonction de d	62
Figure III.18 :Variation de K2 en fonction de d	63
Figure III.19: Champ des contraintes de Von mises au voisinage du défaut du tube	65
Figure III.20: Variation de KT en fonction de P.	65
Figure III.21: Variation de KT en fonction de d.	67

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau II.1: contraintes nominales suivant la nature de la sollicitation [10]	23
Tableau III.1 : les propriétés mécaniques d'acier API 5L X52	46

Introduction générale

Introduction générale :

Les structures industrielles, en particulier les pipelines, jouent un rôle essentiel dans le transport des fluides sur de longues distances dans divers secteurs tels que l'industrie pétrolière, gazière et chimique. Leur fiabilité et leur sécurité constituent donc un enjeu majeur, car toute défaillance peut entraîner des conséquences économiques et environnementales importantes.

Dans ces structures, les jonctions soudées représentent des zones critiques, car elles assurent la continuité mécanique entre les différentes sections du pipeline. Cependant, ces zones sont souvent le siège de concentrations de contraintes élevées dues aux discontinuités géométriques et métallurgiques introduites par le procédé de soudage. Ces concentrations peuvent favoriser l'apparition et la propagation de fissures, réduisant ainsi la durée de vie des structures.

La mécanique de la rupture constitue alors un outil fondamental pour l'analyse du comportement des structures fissurées. Elle permet de caractériser l'influence des défauts sur la résistance mécanique à travers des paramètres tels que le facteur d'intensité des contraintes et la ténacité des matériaux. Par ailleurs, la méthode des éléments finis, notamment via des logiciels comme Abaqus, offre une approche numérique puissante pour simuler et analyser les champs de contraintes au voisinage des fissures.

Dans ce contexte, ce travail vise à réaliser une analyse numérique de la concentration de contraintes et du facteur d'intensité des contraintes au niveau des fissures présentes dans les jonctions soudées des pipelines. L'objectif est de mieux comprendre le comportement mécanique de ces zones critiques afin d'améliorer la fiabilité et la sécurité des structures.

Chapitre I

Généralités sur les Pipelines et les Jonction soudées

Introduction

Les pipelines représentent un moyen largement utilisé pour le transport des fluides tels que le pétrole, le gaz naturel et d'autres produits industriels. Ils permettent d'assurer le transfert de ces fluides sur de longues distances de manière efficace et sécurisée. Pour garantir leur bon fonctionnement, plusieurs facteurs doivent être pris en compte, notamment la conception des conduites, les conditions de service et la qualité des assemblages.

Parmi les éléments importants de la structure des pipelines, on trouve les jonctions soudées. Ces dernières permettent d'assembler les différentes sections de la conduite afin d'assurer la continuité du transport. Cependant, ces zones peuvent être sensibles à différents types de contraintes et peuvent parfois présenter des défauts de soudage qui peuvent affecter la fiabilité du pipeline.

Dans ce chapitre, nous allons d'abord présenter une vue générale sur les pipelines. Ensuite, nous aborderons les différents types de pipelines ainsi que leurs conditions de service. Nous présenterons également les jonctions soudées utilisées dans les pipelines, avant de terminer par une présentation des principaux défauts de soudage et des mécanismes d'endommagement susceptibles d'apparaître au cours de leur exploitation.

I.1 Présentation générale des pipelines

I.1.1 Définitions

Un pipeline est un réseau de conduites interconnectées conçu pour transporter de manière continue des fluides, **notamment des hydrocarbures liquides et gazeux**, sur de longues distances. Il constitue une solution à la fois stratégique et économique, car il permet d'acheminer de grandes quantités de produits énergétiques de manière fiable, efficace et à moindre coût.

Les pipelines sont généralement enterrés pour des raisons de sécurité, de protection de l'environnement et de fiabilité opérationnelle. Leur fonctionnement repose sur différentes installations, telles que des stations de pompage ou de compression, des vannes de régulation du débit, des dispositifs de surveillance et de contrôle, ainsi que des points de livraison situés aux extrémités ou à des emplacements stratégiques du réseau.

Dans le secteur pétrolier et gazier, les pipelines sont largement privilégiés en raison des nombreux avantages qu'ils présentent :

- **Un transport continu, fiable et sécurisé des fluides.**
- **Des coûts d'exploitation relativement faibles par rapport aux autres modes de transport, tels que le camion, le train ou le navire.**
- **Une réduction des émissions polluantes ainsi qu'un risque d'accident généralement plus faible [1].**



Figure I.1: Pipeline[2]

I.2 Types de pipelines et condition de service

I.2.1. Types de pipelines

Chaque canalisation doit respecter des critères rigoureux en matière de planification, de réalisation, d'exploitation et de gestion technique. Ces réglementations ont pour objectif de garantir la sécurité des individus et la préservation de l'environnement, tout en réduisant les risques d'explosions, d'incendies et de contamination.

Les principales catégories de pipelines sont les suivantes :

- Le transport du gaz naturel s'effectue via des conduites appelées gazoducs [1].
- Les hydrocarbures sous forme liquide, en particulier le pétrole, sont déplacés à l'aide d'oléoducs [1].

Pour assurer un déplacement sécurisé et efficace des sources d'énergie sur de longues distances, une administration rigoureuse et des infrastructures adaptées sont essentielles [1].



Figure I.2:Gazoducs[3]



Figure I.3: Oléoduc[4]

I.2.2. Conditions de service

Les conditions de service des pipelines (hydrocarbures, eau) englobent des normes strictes de conception, d'exploitation et de sécurité : pressions élevées (jusqu'à 100 bars), contrôle rigoureux de la corrosion, surveillance continue, essais de pression, et protection cathodique pour garantir l'intégrité. Ils sont soumis à des réglementations de sécurité, notamment des contraintes de distance par rapport aux habitations et aux sols, ainsi qu'à des inspections régulières.

Caractéristiques et conditions clés :

- **Pression et Température** : Les pipelines sont conçus pour supporter des pressions de service élevées, pouvant atteindre **100 bars**.
- **Intégrité et Maintenance** : Inspection par contrôles non destructifs (ultrasons, radiographie, magnétoscopie) et surveillance de la corrosion.
- **Protection** : Application de revêtements protecteurs et utilisation de la protection cathodique (anodes sacrificielles) pour empêcher la corrosion.

- **Sécurité et Réglementation** : Les pipelines sont enfouis et protégés sur une bande de terrain (souvent 5 mètres) où aucune construction durable n'est permise. Ils sont soumis à des autorisations de construction et d'exploitation.
- **Épreuves** : Test de pression obligatoire avant la mise en service.
- **Exploitation** : Surveillance constante de la pression, de la température et du débit pour assurer la sécurité et la fiabilité du transport[5].

I.3. Jonction soudées dans les pipelines

I.3.1.Définition

Un joint soudé est la configuration de deux surfaces métalliques reliées par soudage, qui peuvent impliquer des matériaux similaires ou différents, avec ou sans matériau d'apport. Selon l'**American Welding Society (AWS)**, un joint soudé définit la façon dont deux pièces **s'assemblent**.

Les joints de soudure sont cruciaux pour l'intégrité structurelle et les performances, car ils garantissent une bonne répartition des charges et une bonne résistance aux facteurs environnementaux [6].

I.3.2. Types de jonctions soudées dans les pipelines

Sur les structures, on trouve une grande variété de joints soudés : ils sont fabriqués à partir de quatre configurations de base que l'on peut classer de la manière suivante :

- a) Joint en angle
- b) Joint à recouvrement
- c) Joint bout-à-bout
- d) Joint en T [7].

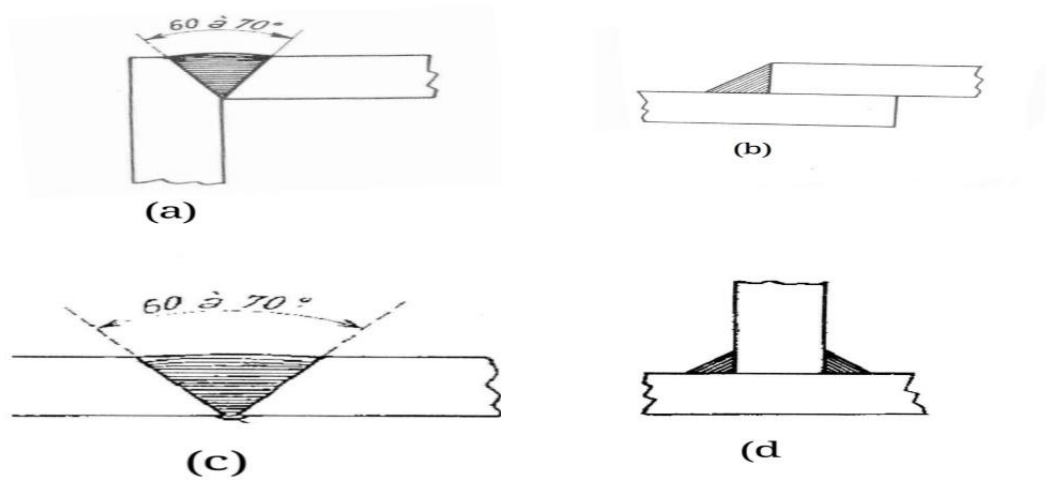


Figure I.4: Types de joints[7]

I.3.3. Procédés de soudage utilisés

La grande variété des procédés de soudage existants peut être classée en fonction de la nature des énergies mises en œuvre [7].

✓ Les procédés de soudage par fusion

Les procédés de soudage par fusion peuvent aussi être classés suivant l'intensité de la source d'énergie qui induit des différences de caractéristiques importantes sur les cordons de soudure. L'énergie spécifique de chaque procédé agit sur la pénétration, qui est le rapport de la profondeur de la soudure sur la largeur, et sur les caractéristiques mécaniques des cordons de soudure[7] .

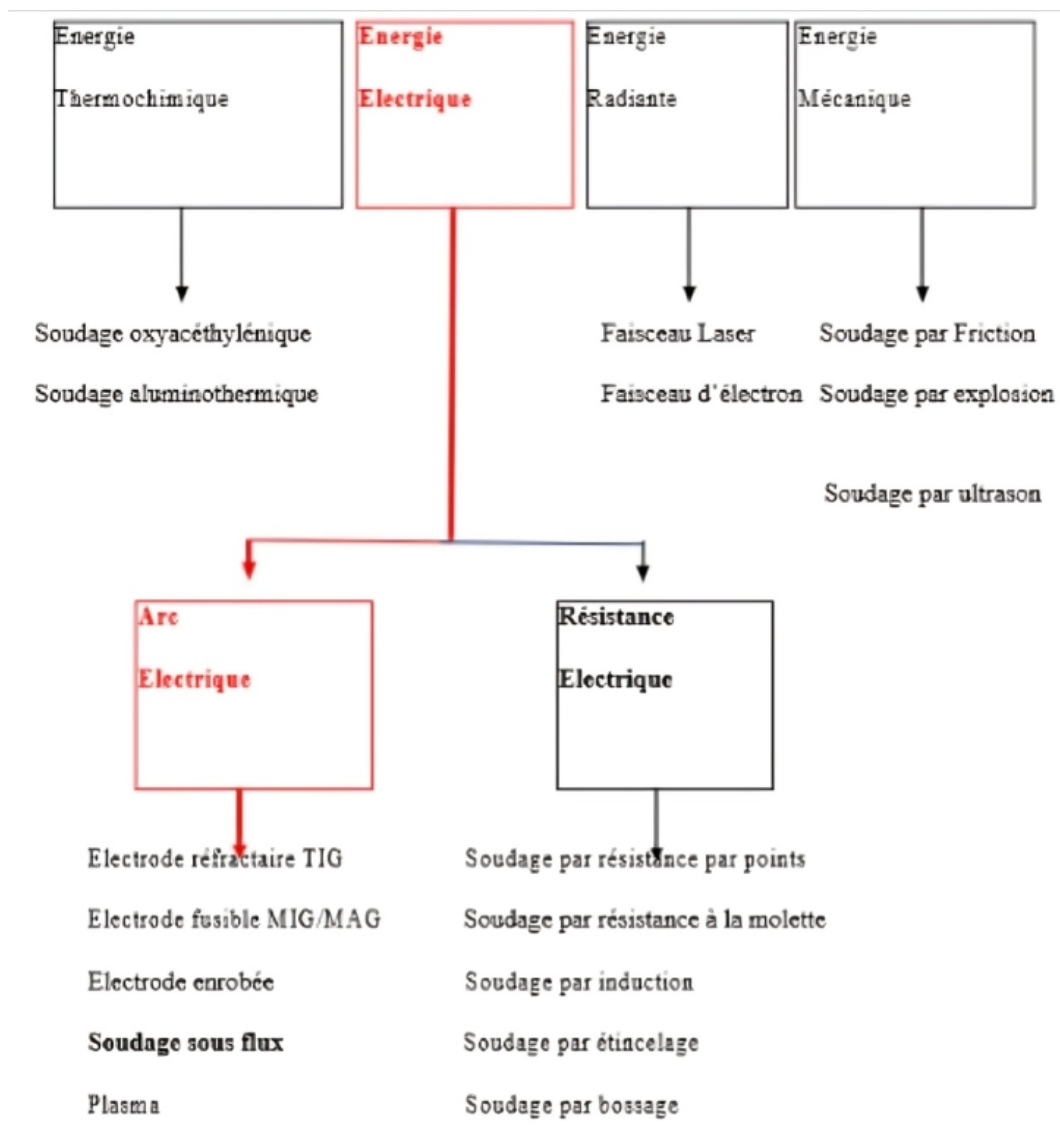


Figure I. 5: Procédé de soudage selon les différentes sources d'énergie[7]

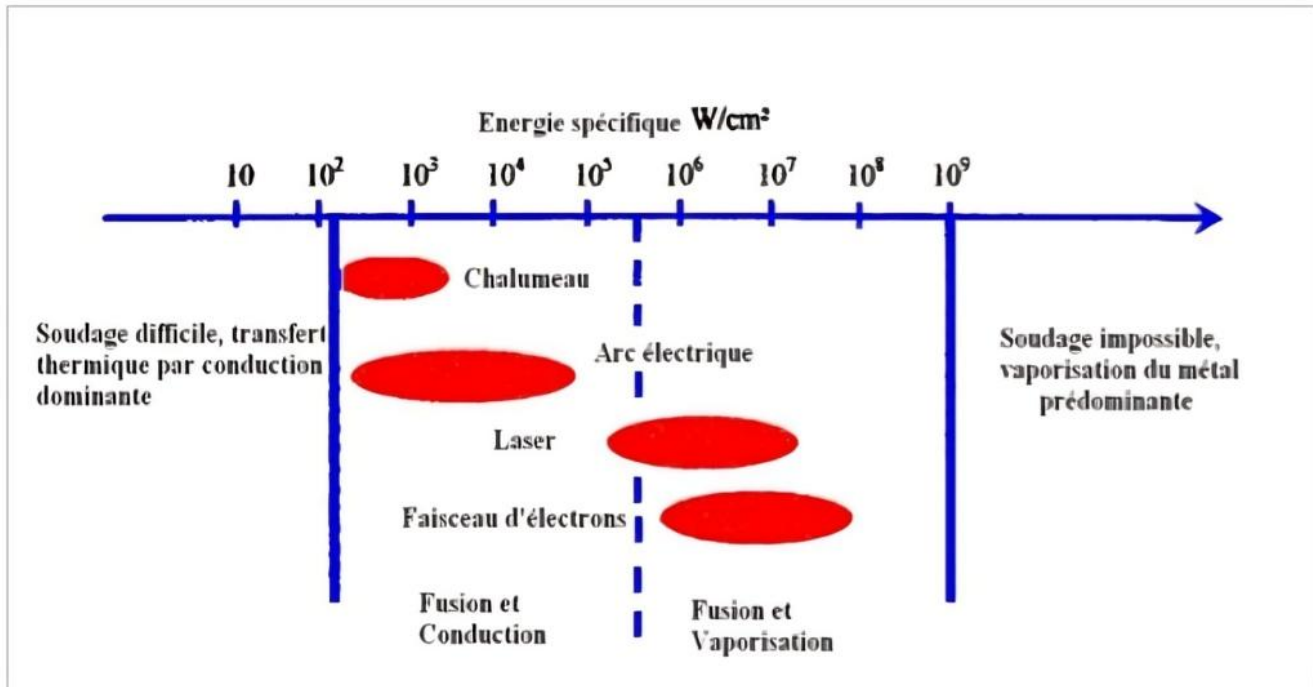


Figure I.6: Energie spécifique des différents procédés de soudage[7]

✓ Les procédés de soudage à l'arc :

Le soudage à l'arc est un terme générique au cours duquel un arc électrique est créé entre une électrode et les pièces à assembler afin de conduire à une fusion superficielle et à la formation d'un bain de métal fondu qui se solidifie sans action extérieure. Il regroupe quatre procédés :

-Le soudage à l'électrode enrobée : Afin de limiter l'oxydation et la nitruration du métal, l'âme métallique de l'électrode est enrobée par un oxydant, un acide, un basique ou un revêtement cellulosique selon les besoins. Il a pour but de faciliter l'amorçage, de protéger le métal et le cordon contre un refroidissement trop rapide, ainsi que de guider l'arc grâce à un retard à la fusion. Suivant les propriétés recherchées pour le cordon ou le laitier, différents modèles d'électrode enrobée existent

-Le soudage avec fils pleins (GMAW) : L'électrode est composée d'un fusible continu, servant de métal d'apport et se dévidant automatiquement sous protection gazeuse (Ar ou CO₂).

-Le soudage avec une électrode réfractaire: L'électrode non consommable est constituée d'une pointe de tungstène portée par une torche dotée d'une arrivée annulaire d'un gaz protecteur. On nomme aussi cette technique Tungstène Inert Gaz (TIG).

-Le soudage à arc submergé sous flux solide : Un flux en poudre est versé en talus autour du fil de l'électrode. L'arc jaillissant à l'intérieur du flux est ainsi protégé de l'oxydation et d'un refroidissement trop rapide [7].

✓ L'arc électrique :

Les procédés de soudage à l'arc utilisent comme moyen de chauffage l'énergie d'un arc électrique que l'on crée entre une électrode et les pièces à assembler.[7]

Les électrodes métalliques assurent un double rôle celui de conducteur de courant électrique et celui de métal d'apport ; [6] on peut dire aussi que C'est la partie métallique de l'électrode. C'est le métal d'apport déposé pour assembler les pièces. Elle compose le centre de l'électrode.

Si l'électrode est simplement constituée par un fil de métal de section circulaire, elle est dite nue; si le fil métallique est entouré d'une gaine fusible de produits appropriés, l'électrode est dite enrobée [7]

Les électrodes ont des diamètres différents ce sont les suivants: 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,15; 4; 5; 6,3; 7 et 8 mm et leurs compositions son l'acier, alliage d'aluminium ou de cuivre, Nickel [7]

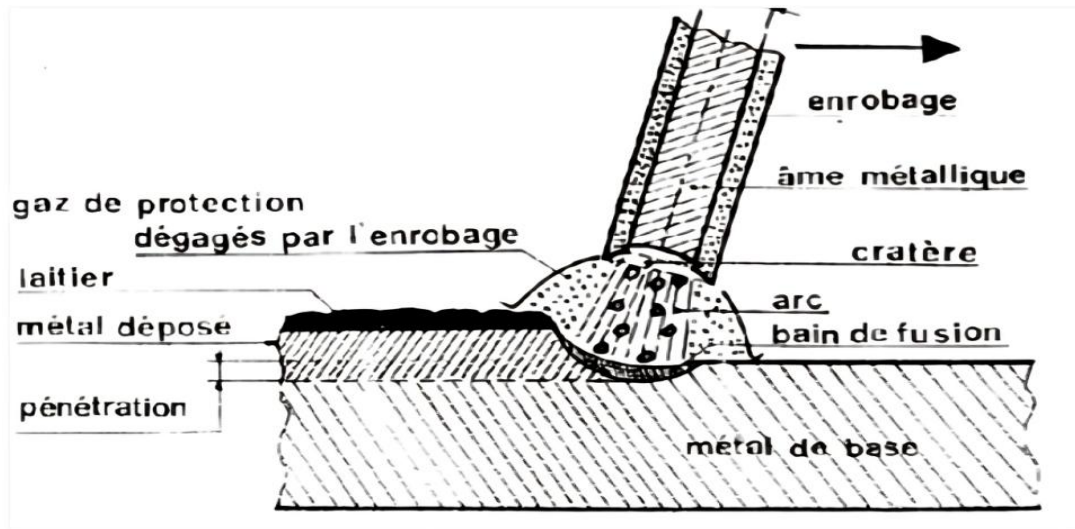


Figure I.7: Procédé de soudure à l'arc électrique[7]

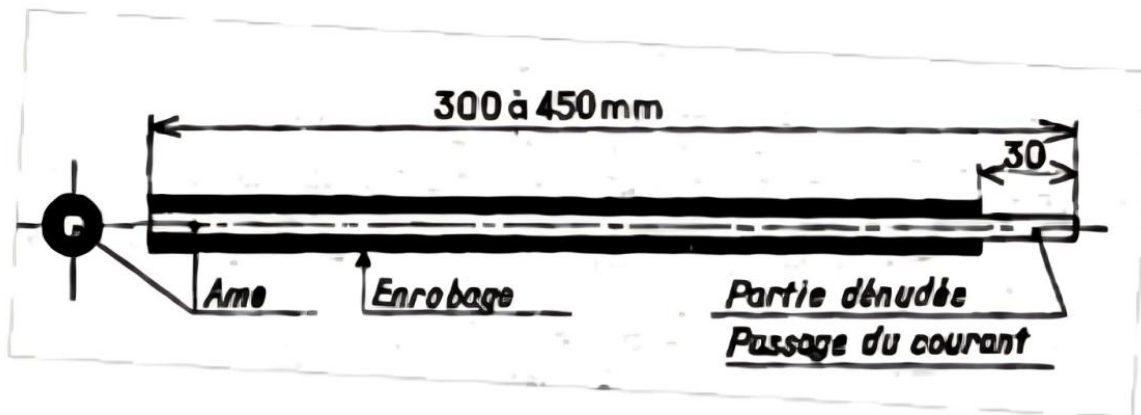


Figure I.8: électrode enrobée[7]

I.4. Défauts de soudage et mécanismes d'endommagement

Les joints soudés, de par leur nature, contiennent des discontinuités de différents types et de différentes tailles. En dessous d'un certain niveau acceptable, ils ne sont pas considérés comme nocifs. Au-delà de ce niveau, ils sont considérés comme des défauts. Le niveau d'acceptation varie selon la sévérité du service à rencontrer.

Les discontinuités parfois rencontrées dans les soudures réalisées sont :

- Porosité ;
- Inclusions du laitier ;
- Fusion incomplète ;
- Fissures. [8]

● **Porosité**

Ce terme est utilisé pour décrire les poches de gaz ou les vides dans le métal soudé. Ils contiennent du gaz plutôt que des solides et, à cet égard, ils diffèrent des inclusions de laitier. Il existe quatre mécanismes susceptibles de donner naissance à des porosités dans le métal fondu :

- l'instabilité du capillaire gazeux dans le cas des soudures effectuées au moyen des procédés à haute densité d'énergie ;
- une surpression gazeuse sous la racine du cordon ;
- une teneur en gaz dissous dans le métal liquide supérieur à la limite de solubilité dans le métal solide à la température de solidification ;
- une réaction chimique au sein du bain liquide donnant naissance à un gaz.

La porosité peut généralement être évitée en utilisant un ampérage approprié et en tenant une longueur d'arc appropriée. Les électrodes sèches sont également utiles dans de nombreux cas[8].

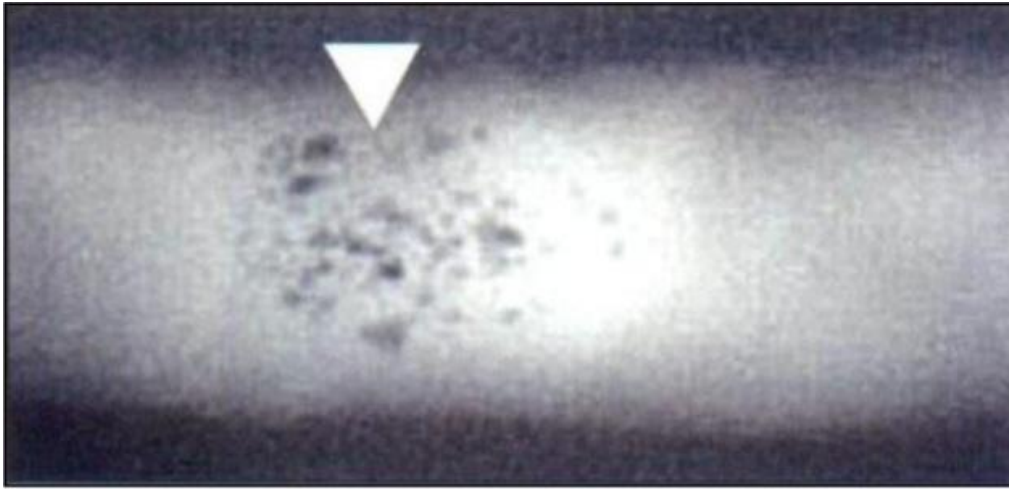


Figure I.9: Exemple de la présence des porosités dans une soudure (Sur film réel de radiographie)[8]

- **Inclusions de Laitier**

Les inclusions de laitier sont les oxydes et les solides non métalliques qui sont parfois emprisonnés dans le métal soudé, entre les billes adjacentes ou entre le métal soudé et le métal de base. Lors du dépôt et de la solidification subséquente du métal soudé, de nombreuses réactions chimiques se produisent. Certains des produits de ces réactions sont des composés non métalliques solides qui sont insolubles dans le métal fondu. En raison de leur plus faible densité, ces composés s'élèveront à la surface du métal fondu à moins qu'ils ne soient emprisonnés dans le métal soudé.

Les laitiers formés à partir du revêtement des électrodes à arc en métal enrobé peuvent être forcés sous la surface du métal fondu par l'action d'agitation de l'arc. Le laitier peut aussi s'écouler en avant de l'arc si le soudeur n'est pas prudent. Cela peut facilement se produire lors du soudage sur la crevasse entre deux perles parallèles mais convexes ou entre une perle convexe et une paroi latérale de la rainure. Cela peut également se produire lorsque le soudage est effectué en descente. Dans de tels cas, le métal fondu peut s'écouler sur le laitier, emprisonnant le laitier sous le cordon.

La plupart des inclusions de laitier peuvent être évitées par de bonnes pratiques de soudage et par une préparation adéquate de la rainure avant le dépôt du prochain cordon de métal soudé. Dans ces cas, il faut prendre soin de corriger les contours qui sont difficiles à pénétrer adéquatement avec l'arc.[8].

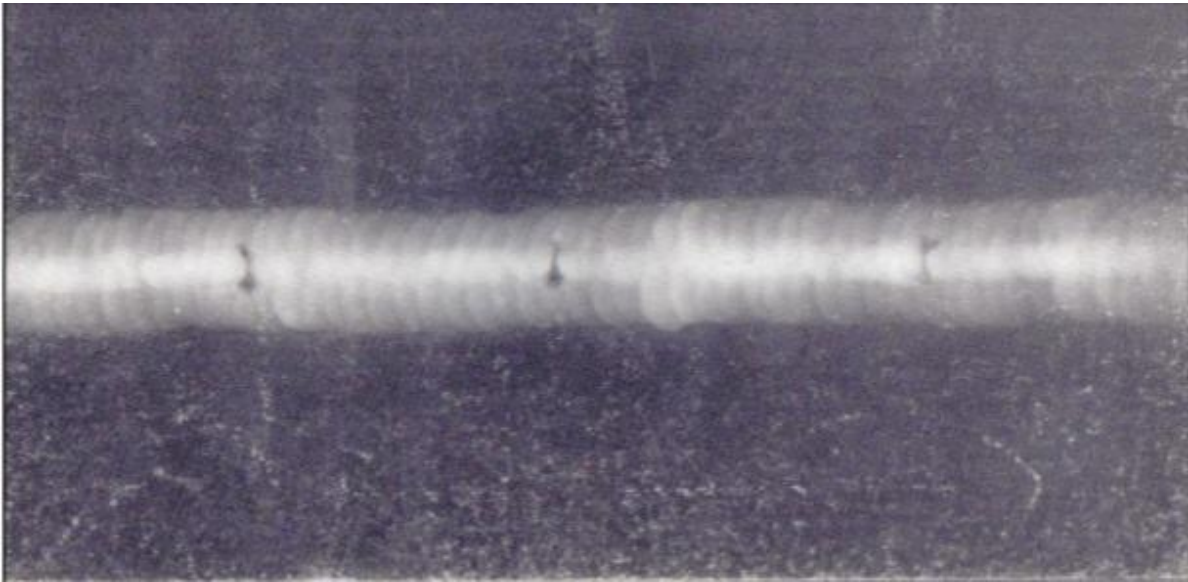


Figure I.10: Exemple des inclusions de laitier (Sur film réel de radiographie)[8]

- **Fusion incomplète**

Ce terme fait référence à l'omission de fusionner les perles adjacentes de métal soudé ou de métal soudé et de métal de base. Cette condition peut être localisée ou étendue, et elle peut se produire à n'importe quel point dans la rainure de soudage.

Une fusion incomplète peut être causée par le défaut d'élever le métal de base (ou le cordon de métal de soudure déposé précédemment) à la température de fusion. Elle peut également être causée par le défaut de dissolution, en raison d'un fluxage incorrect, les oxydes ou d'autres corps étrangers qui pourraient être présents sur les surfaces qui doivent fusionner avec le métal soudé.

La fusion incomplète peut être évitée en s'assurant que les surfaces à souder sont correctement préparées et ajustées et sont lisses et propres. Dans le cas d'une fusion incomplète de la racine, les corrections doivent s'assurer que :

- la face de la racine n'est pas trop grande ;
- l'ouverture de la racine n'est pas trop petite ;
- l'électrode n'est pas trop grande ;
- le courant de soudage n'est pas trop faible ;
- la vitesse de déplacement n'est pas trop élevée[8].

- **Les Fissures**

Les fissurations constituent l'un des défauts de soudure les plus fréquents. Elles sont causées par la présence de tensions internes trop importantes à l'intérieur du métal soudé. Elles peuvent se produire dans le métal fondu ou dans le métal de base, ou dans les deux.

- ❖ **Dans le métal fondu** : elles dépendent de la nature du métal d'apport et des conditions d'exécution de la soudure.
- ❖ **Dans le métal de base** : elles se produisent généralement dans la zone de liaison ; elles sont généralement reliées à une plus faible soudabilité du métal.

Lorsque la fissuration se produit dans un cordon de métal fondu, elle peut se propager lors de chaque passe de soudage ultérieure. Pour éviter cela, de telles fissures doivent être enlevées avant que des perles ultérieures ne soient déposées[8].



Figure I.11: Exemple d'une Fissuration Transversale (Sur film réel de radiographie)[8]

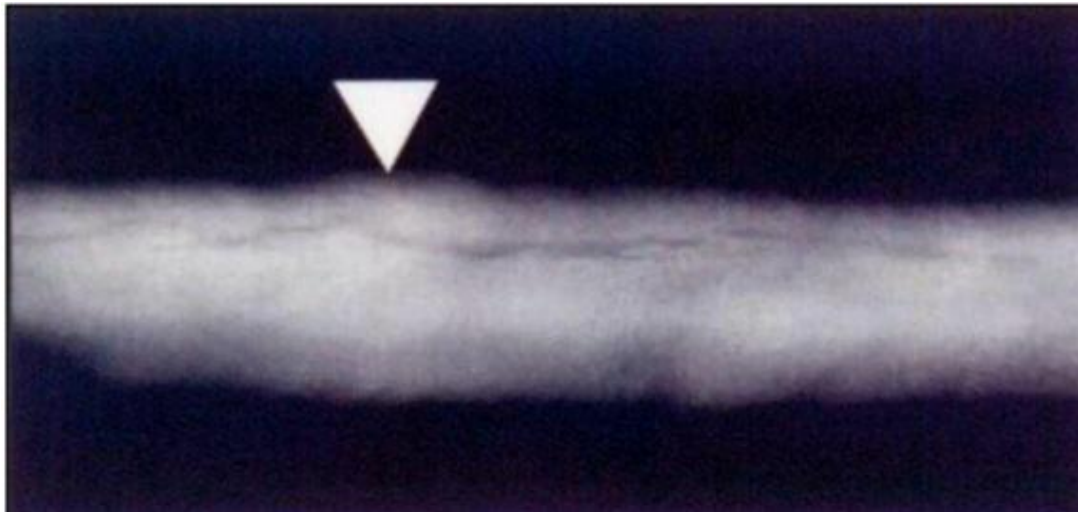


Figure I.12: Exemple d'une Fissuration Longitudinale (Sur film réel de radiographie)[8]

Les fissurations sont classées aussi selon le moment où elles surviennent à la suite d'une soudure : la **fissuration à chaud** et la **fissuration à froid**.

- **Fissuration à chaud** : elle est en fonction de la composition chimique. La principale cause de fissuration à chaud est la présence d'impuretés dans le métal soudé dont la température de fusion est relativement basse et qui s'accumulent aux limites des grains pendant la solidification. Un exemple typique est le sulfure de fer dans l'acier. Les fissures sont intergranulaires ou interdendritiques. Elles se

forment à mesure que le métal soudé se refroidit. Au fur et à mesure que la solidification progresse dans la soudure en cours de refroidissement, les contraintes de retrait augmentent et finissent par séparer les grains qui ont encore un peu de liquide à leurs limites.

Fissuration à froid : elle peut apparaître pendant des heures, voire des jours après le soudage, elle est le résultat d'une ductilité insuffisante ou de la présence d'hydrogène dans les aciers durcissables. Une ténacité insuffisante en présence d'une entaille mécanique ou métallurgique et des contraintes d'une amplitude suffisante sont à l'origine de cette condition. Pour éviter la fissuration à froid dans les aciers durcissables, il est nécessaire d'utiliser des électrodes sèches à faible teneur en hydrogène et un préchauffage approprié. Le préchauffage est également nécessaire pour les matériaux qui sont naturellement faibles en ductilité ou en ténacité. On prend soin de refroidir les pièces susceptibles de fissuration à froid très lentement pour éviter l'apparition de tensions internes favorisant l'apparition de fissures[8]

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions générales concernant les pipelines et les jonctions soudées. Nous avons commencé par une présentation générale des pipelines et de leur rôle dans le transport des fluides. Ensuite, nous avons décrit les différents types de pipelines ainsi que les conditions dans lesquelles ils fonctionnent.

Nous avons également abordé les jonctions soudées qui assurent l'assemblage des conduites et qui jouent un rôle important dans la résistance et la continuité du pipeline. Enfin, nous avons présenté les principaux défauts de soudage et les mécanismes d'endommagement qui peuvent apparaître au niveau des jonctions soudées.

Ces éléments permettent de mieux comprendre la structure et le fonctionnement des pipelines, et constituent une base pour l'étude plus détaillée qui sera présentée dans les chapitres suivants. Cette compréhension est essentielle pour l'analyse de l'intégrité des jonctions soudées et l'évaluation de leur comportement en service.

Chapitre II

Mécanique de la Rupture

Introduction

La mécanique de la rupture constitue un domaine essentiel de la mécanique des matériaux, visant à comprendre le comportement des structures en présence de défauts ou de fissures. Contrairement aux approches classiques basées uniquement sur les contraintes admissibles, cette discipline s'intéresse particulièrement à l'initiation et à la propagation des fissures, qui peuvent conduire à des défaillances brutales.

Dans ce chapitre nous présentons tout d'abord des rappels sur la concentration de contraintes, un phénomène clé expliquant l'amplification locale des contraintes autour des discontinuités. Ensuite, nous introduisons les principes de la mécanique linéaire élastique de la rupture (MLER), qui fournit un cadre théorique pour l'analyse des fissures dans les matériaux. Nous abordons également le facteur d'intensité de contraintes, paramètre fondamental caractérisant le champ de contraintes au voisinage du front de fissure selon différents modes de sollicitation. Enfin, nous examinons les critères de rupture ainsi que la ténacité à la rupture, permettant de prédire les conditions de défaillance des matériaux. Ce chapitre constitue ainsi une base théorique indispensable pour l'analyse du comportement des structures fissurées et l'évaluation de leur intégrité en service.

II.1 Rappels sur la concentration de contraintes

II.1.1 Historique

Le phénomène de concentration de contraintes a été d'abord traité par **G. Kirsh**, en 1898 pour un problème de concentration de contraintes autour d'un trou. Ensuite, des solutions analytiques et des formules empiriques ont été progressivement trouvées par différents chercheurs pour des géométries de pièces de plus en plus complexes. **C. E. Inglis** a également abordé ce problème en 1913, mais ce sont **H. Neuber** et **R.E. Peterson** qui ont plus contribué à la connaissance dans ce domaine[10] .

II.1.2 Définition

Le facteur de concentration de contrainte est défini comme étant le rapport de la contrainte maximale réelle sur la contrainte nominale.

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad (1)$$

On désignera les contraintes obtenues à l'aide des résultats analytiques par :

- σ_{nom} : la contrainte nominale ;
- σ_{max} : la contrainte maximale [10].

Traction/compression	Flexion	Torsion
$\sigma_{nom} = \frac{F}{S}$	$\sigma_{nom} = \frac{M}{I/V}$	$\sigma_{nom} = \frac{Mt}{I_o/V}$
F : effort de traction ou de Compression. S : section de l'éprouvette	M : moment de flexion I : moment d'inertie par rapport l'axe neutre	Mt : moment de torsion I _o : moment d'inertie polaire V : distance de la fibre considérée a l'axe neutre

Tableau II.1: contraintes nominales suivant la nature de la sollicitation [10]

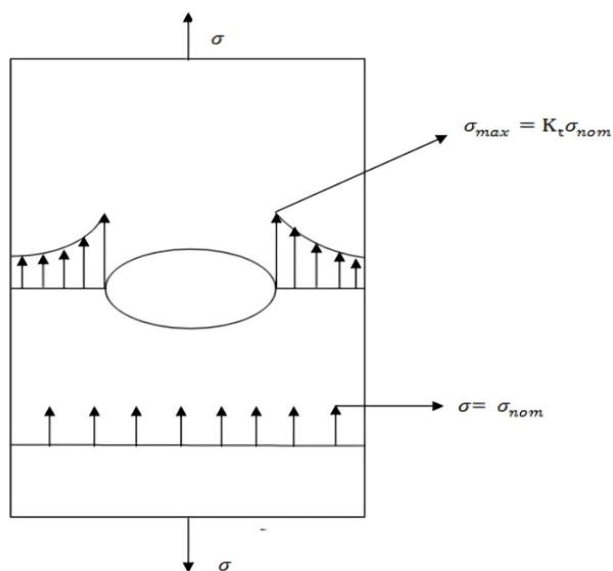


Figure II.1 : Répartition de contraintes sur une plaque comportant un trou elliptique [10]

La contrainte maximale augmente avec le rapport a/ρ , de sorte qu'un trou très étroit perpendiculaire à la direction de traction provoque une très forte concentration de contraintes ; ceci explique que les fissures perpendiculaires à la direction des efforts ont tendance à s'étendre [10].

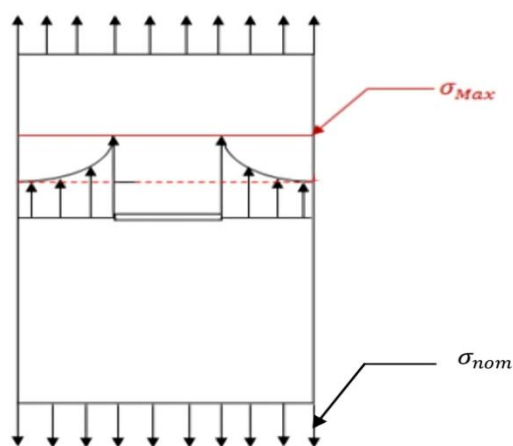


Figure II.2 : Répartition de contraintes sur une plaque comportant une fissure[10]

On peut percer des trous aux extrémités de la fissure en vue d'éliminer les angles aigus qui donnent lieu à des concentrations intenses de contraintes.

Bien sûr, dans ce cas il est important de ne pas confondre le coefficient de concentration de contraintes k_t qui ne donne qu'une information locale à la pointe même de la fissure et le facteur d'intensité de contrainte K_I qui décrit la singularité spatiale du champ de contrainte. Si k_t est sans dimension K_I est le produit d'une contrainte par la racine carrée d'une longueur et se mesure en $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

Le passage à la limite permettant de définir une fissure comme la limite d'un trou elliptique complètement aplati conduit naturellement à une relation entre les deux grandeurs, la grandeur intervenant dans K_I étant reliées à la taille du défaut c par la relation d'Irwin :

$$K_I = \lim_{\rho \rightarrow 0} \sigma_m \sqrt{\frac{\pi}{2} \rho} \quad (2)$$

σ_m étant la contrainte en tête de la fissure elliptique et ρ son rayon de courbure.

Pour une fissure elliptique aplatie de longueur $2c$ dans une plaque infinie (en pratique des dimensions grandes devant (c) soumise à une traction σ , on a $\sigma_m = k_t \sigma$, avec $k_t = \sqrt{c/\rho}$, le passage à la limite conduit à $K_I = \sigma \sqrt{\pi c}$.

On constate que la section de la pièce n'est donc pas le seul paramètre de calcul ; il faut aussi tenir compte d'autres paramètres, comme la géométrie de la pièce et surtout la nature de la sollicitation

En réalité la contrainte au bord du trou est plusieurs fois plus grande que P/S et diminue très rapidement lorsqu'on s'éloigne du trou. En fait, à une distance de l'ordre du diamètre, elle est même inférieure à P/S , et cela parce que l'équilibre des forces impose que :

$$\int_{S_1} \delta \cdot dS = P \quad (3)$$

Autrement dit, l'intégrale de la contrainte normale sur toute la section doit équilibrer la charge appliquée **P**, et la valeur moyenne de la contrainte multipliée par la section **S₂** doit donner **P**.

En conséquence si la contrainte au bord du trou est plus grande que **P/S₂**, elle doit être inférieure à cette valeur autre part[10]

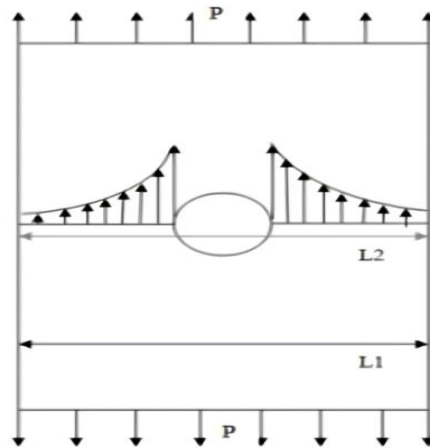


Figure II.3: Répartition de contraintes sur une plaque trouée[10]

II.2 Mécanique linéaire élastique de la rupture (MLER)

La mécanique linéaire de la rupture est une approche qui est caractérisée par trois variables : la contrainte appliquée, la ténacité K_{IC} (facteur d'intensité de contrainte critique) 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 du facteur d'intensité des contraintes critique (ténacité du matériau) et l'autre un critère d'énergie [11].

II.2.1 Energie de rupture (G)

Au début du 20^{ème} siècle, Griffith s'est rendu compte que la propagation de fissure est un phénomène consommateur d'énergie. Afin de mieux comprendre ce phénomène, ce chercheur a proposé un critère d'énergie pour la rupture des matériaux fragiles, par la suite, **Irwin et Orowan** l'ont étendu aux matériaux ductiles. L'énergie de Griffith notée **G** (qu'on appelle aussi taux de restitution d'énergie) est définie par la variation d'énergie par unité de surface fissurée associée à la propagation d'une fissure dans un matériau linéaire élastique. La rupture se produit lorsque **G** atteint une valeur critique **G_c**, qui est une mesure de la ténacité du matériau.

Pour une fissure de longueur **2a** (figure II .4) dans une plaque de dimensions infinies (ce qui équivaut à dire que la longueur de fissure est très petite par rapport aux dimensions de la plaque dans le plan de chargement), constituée d'un matériau de module d'Young **E** et soumise à une contrainte de traction. L'énergie de Griffith **G** par unité de surface fissurée est donnée par :

$$G = \frac{\pi(\sigma)^2 a}{E} \quad (4)$$

Si on continue à augmenter la contrainte appliquée **σ** , la rupture se produira lorsque l'énergie **G** atteint sa valeur critique pour une contrainte appliquée **σ_R** , et d'après l'équation :

$$G_c = \frac{\pi(\sigma_R)^2 a}{E} \quad (5)$$

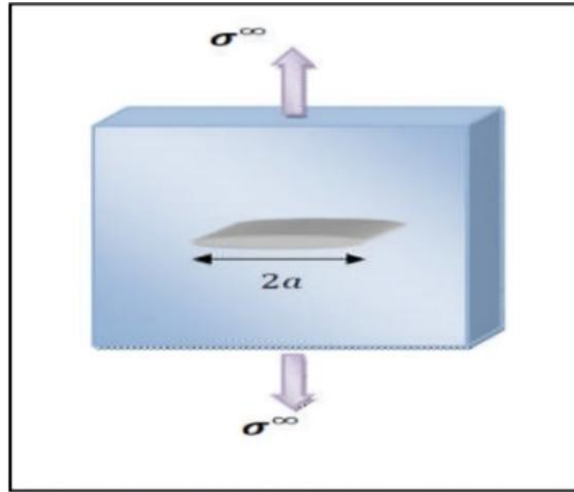


Figure II.4 : Fissure traversant de longueur $2a$ dans une plaque infinie[11]

II.2.2 Zone plastique confinée

Dans le cas d'un matériau ductile, la singularité des contraintes en fond de fissure engendre une plastification locale autour de ce défaut. Au fur et à mesure que la taille de la zone plastifiée qui se forme à l'extrémité de la fissure devient importante, la MLER devient progressivement imprécise. Il est donc nécessaire que la taille de cette zone reste petite par rapport à la longueur de la fissure, c'est pour cela la norme ASTM impose une condition afin de savoir si on est dans le cas d'une plasticité confinée ou non.

Cette condition est :

$$\text{Min}(e, a, b) \geq \frac{5}{2} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_0} \right)^2 \quad (6)$$

Où σ_0 est la limite élastique, et K_{Ic} est la ténacité du matériau. Lorsque c'est le cas, on peut continuer à utiliser les concepts de la mécanique linéaire de la rupture.

Dans le cas d'une plastification étendue, pour laquelle la zone plastique n'est plus négligeable devant la longueur de la fissure ou la dimension du ligament, des modifications basées sur de simples corrections à la MLR sont toutefois possibles, du moins lorsque la taille de la zone plastifiée reste raisonnable. En revanche, au-delà d'une certaine plastification, le FIC (K) n'est plus adapté à la description des champs des contraintes et des déplacements à l'extrémité de la fissure. Compte tenu de ces limites d'application de la MLR, la détermination de la taille de la zone plastique en fond de fissure devient essentielle. Plusieurs estimations ont été mises en œuvre, parmi elles, on trouve celles d'**Irwin** et de **Dugdale-Barenblatt**. Elles conduisent toutes les deux à des corrections simples du FIC. Le terme de zone plastique permet de caractériser une zone de déformations inélastiques.

II.2.2.1 .L'approche d'Irwin

Dans le plan d'une fissure et en aval de l'extrémité de celle-ci, la contrainte normale σ_y est donnée, par exemple dans le cas d'une sollicitation en mode I (avec $\theta=0$), par :

$$\sigma_y = \frac{k_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (7)$$

Irwin considère en première approximation que la frontière entre zones élastique et plastique correspond aux lieux des points où les contraintes atteignent la limite d'élasticité du matériau.

Pour la détermination du rayon r_E pour lequel cette frontière coupe le plan d'une fissure en contraintes planes, il pose $\sigma_y = \sigma_E$ où σ_E est la limite d'élasticité en traction simple

Ce qui conduit à :

$$r_E = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{k_I}{\sigma_E} \right)^2 \quad (8)$$

Pour représenter la longueur r_E (figure 17), on suppose que le comportement du matériau est élastique plastique parfait pour ensuite tout simplement tronquer le champ des contraintes à $\sigma_y = \sigma_E$ [11].

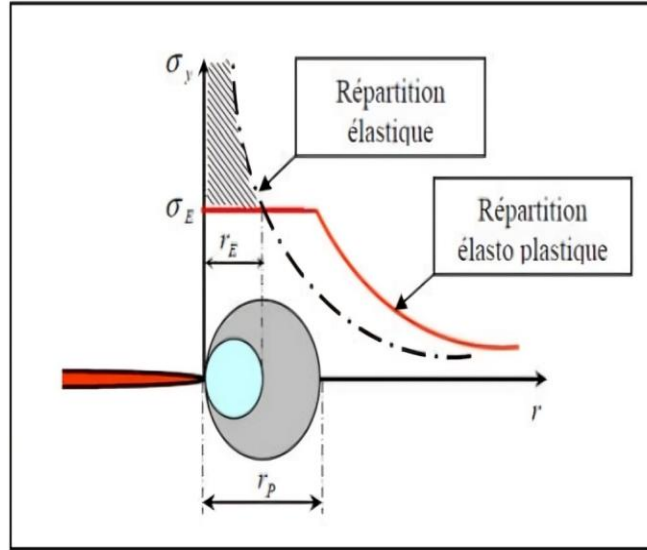


Figure II.5: Répartition des contraintes élastique et élastoplastiques dans le plan de la fissure et en aval de son extrémité[11]

Cette analyse fait cependant abstraction des forces non transmises représentées par l'aire hachurée.

Pour tenir compte de ces forces, il convient d'assurer l'équilibre entre les deux répartitions (élastique et élastoplastique) des contraintes. La taille r_p de la zone plastique doit être supérieure à r_E . L'équilibre des forces entre les deux configurations conduit à :

$$r_p = \frac{1}{\pi} \left(\frac{k_I}{\sigma_E} \right)^2 \quad (\text{Contrainte planes}) \quad (9)$$

$$r_p = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{k_I}{\sigma_E \sqrt{3}} \right)^2 \quad (\text{Déformation planes}) \quad (10)$$

La distribution des contraintes dans la répartition élastoplastique pour $r > r_p$ est obtenue par une translation d'une distance r_E de la répartition élastique (figure 17). Irwin rend compte de cette translation

en définissant un FIC effectif qu'il obtient en augmentant la longueur de fissure de r_E , ce qui revient à considérer non pas la longueur réelle a de la fissure mais une longueur effective $a_{eff} = a + r_E$. C'est ainsi que, dans le cas d'une fissure traversant une plaque infinie chargée en mode I, le FIC_{eff} devient :

$$k_{eff} = \sigma \sqrt{\pi(a + r_E)} = \sigma \sqrt{\pi a} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma}{\sigma_E} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

A noter que dans le cas du FIC non corrigé est $k_I = \alpha \sigma \sqrt{\pi a}$ [11]

II.2.2.2 l'approche de Dugdale-Barenblatt

Dugdale et Barenblatt considèrent une fissure de longueur $a + \rho$ avec des contraintes de compression égales à la limite d'élasticité σ_E , qui s'exercent sur la longueur ρ près de chacune des extrémités (figure 18) ; la longueur ρ représente alors la taille de la zone plastique[11]

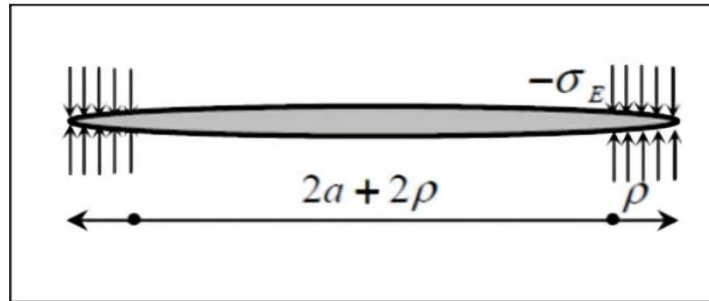


Figure II.6: Modèle de Dugdale-Barenblatt[11]

Lorsqu'on charge une structure fissurée, une zone plastique se forme à l'extrémité de la fissure. Lors de la décharge et si on suppose le comportement du matériau élastique parfaitement plastique, la structure reste élastique et exerce sur la zone plastique des contraintes de compression $-\sigma_E$.

La taille ρ de la zone plastique est ensuite calculée pour une fissure traversant une plaque infinie, d'où on aura :

$$a_{\text{eff}} = (a + \rho) \quad (12)$$

$$k_I = a\sigma\sqrt{\pi(a + \rho)} \quad (13)$$

Pour effectuer ce calcul, Dugdale et Barenblatt utilisent la fonction de Westergaard, préalablement déterminée par Irwin dans le cas du chargement indiqué sur la figure 19 [11].

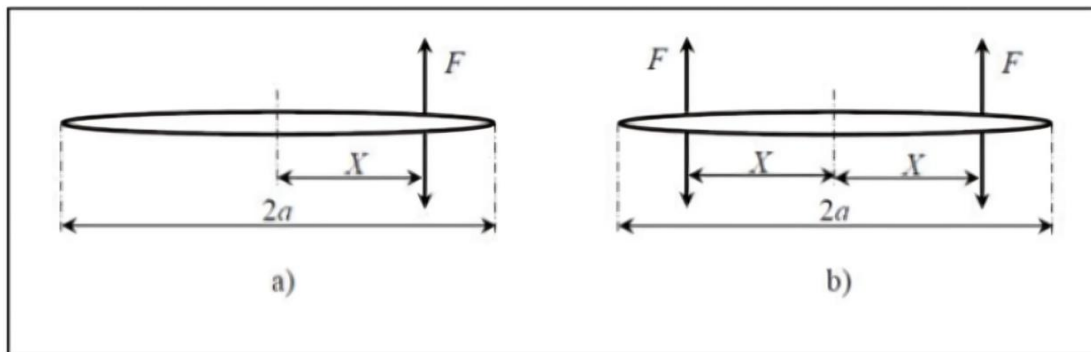


Figure II.7: Fissure chargée en mode I par une paire de force F appliquée sur les lèvres à la distance X du centre de la fissure[11]

La taille ρ de la zone plastique devient très grande lorsque la contrainte appliquée σ tend vers la limite d'élasticité σ_E du matériau. A l'inverse, quand cette contrainte est faible par rapport à σ_E , un développement limité simple donne :

$$\rho = \frac{\pi}{8} \left(\frac{k_I}{\sigma_E} \right)^2 \quad (14)$$

Le modèle de Dugdale-Barenblatt conduit, après la correction de zone plastique au FIC effectif suivant :

$$K_{eff} = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{\sqrt{\cos\left(\frac{\pi\sigma}{2\sigma_E}\right)}} \quad (15)$$

Cette relation tend toutefois à surestimer la valeur du FIC. Pour un FIC plus rapproché, Burdekin et Stone proposent une estimation plus raisonnable (toujours pour le même type de modèle) ; la nouvelle expression du k_{eff} est ainsi formulée :

$$k_{eff} = \sigma_E \sqrt{\pi a} \sqrt{-\frac{8}{\pi^2} \log \left[\cos \left(\frac{\sigma\pi}{2\sigma_E} \right) \right]} \quad (16)$$

II.3. Facteur d'intensité de contraintes (Mode I , II , III)

Les fonctions KI, KII, KIII représentent les facteurs d'intensité de contraintes respectivement en mode I, II, III, qui traduisent l'état de contrainte au voisinage du fond de fissure, la superposition des trois modes constitue le cas général.

Ces facteurs sont des paramètres scalaires indépendants du point et qui ne varient qu'avec les sollicitations $(\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \gamma_{zz})$ et la demi-longueur de la fissure (a). Si l'on connaît leurs valeurs, ils permettent de déterminer complètement les champs des contraintes ou des déplacements, si l'on connaît les expressions des composantes non nulles des contraintes et des déplacements, on peut déterminer les facteurs d'intensité de contraintes par les expressions suivantes qui constituent leurs définitions pour les milieux fissurés plan

$$k_I = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{E}{8C} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} [u] \right) \quad (17)$$

$$k_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{E}{8C} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} [v] \right) \quad (18)$$

$$k_{III} = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{E}{8C} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} [w] \right) \quad (19)$$

Avec :

$C=1$ En contraintes planes

$C = 1 - \nu^2$ En déformations planes.

[U], [v], [w] Étant respectivement, les déplacements d'ouvertures de la fissure dans les directions OX, OY et OZ.

Le facteur d'intensité de contraintes pour une plaque infinie présentant un défaut de longueur

2a présente une solution exacte pour le mode I de sollicitation. Cette expression est donnée par la relation

$$k_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi a}$$

Pour une plaque de dimension finie, on aura :

$$k_I = \alpha \sigma \cdot \sqrt{\pi a}$$

Où α étant facteur correctif tenant compte de la géométrie de la fissure et du détail fissuré ainsi que du type de sollicitation. Ce paramètre est donné pour chaque type d'une fonction polynomiale de (a/w), où w est la largeur de l'éprouvette.

σ : est la contrainte nominale appliquée en MPa

Le facteur d'intensité de contraintes s'exprime en $\text{Nm}^{-3/2}$ ou en $\text{Pa}\sqrt{\text{m}}$ Le plus souvent est employé comme unité le $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ [9] .

II.4 .Critères de rupture et ténacité a la rupture

II.4.1 Critères de rupture

II.4.1.1 Critère de Mohr-Coulomb

Le critère de rupture de **Mohr- Coulomb** (Fig. II.8) est connu comme le critère le plus utilisé dans la pratique de l'ingénierie pour décrire de manière approchée le comportement des sols pulvérulents (sable et gravier) et le comportement drainé, à long terme des sols fins saturés (limon et argile).[12]

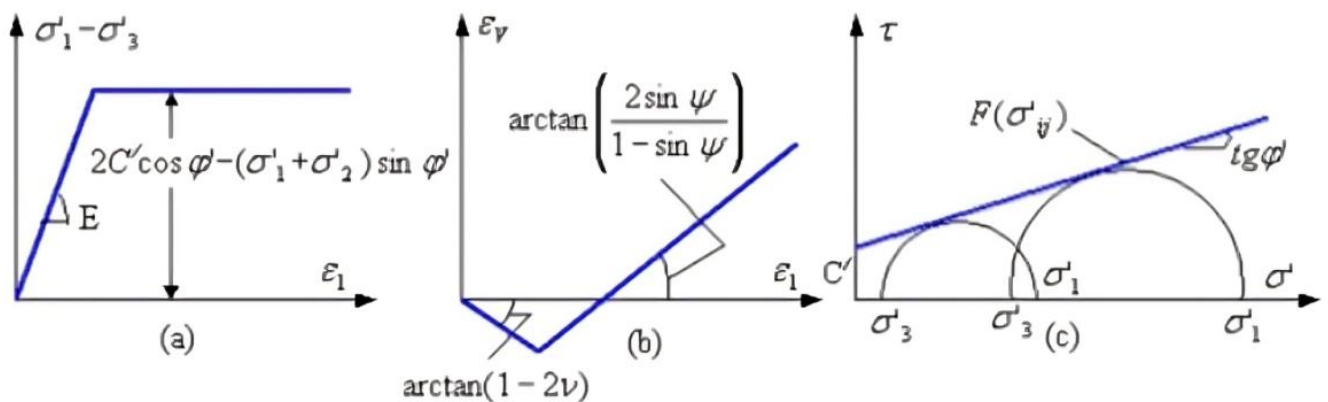


Figure II.8 : Loi de comportement élastique , parfaitement plastique de mohr-Coulomb[12]

Le critère de rupture de Mohr-Coulomb présenté dans le plan (contrainte normale σ' -contrainte de cisaillement τ) est défini comme suit :

$$\tau = \sigma' \tan \varphi' + C' \quad (20)$$

Avec :

$$\sigma' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} + \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \cos(-2\theta)$$

$$\tau = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \sin(-2\theta)$$

σ'_1, σ'_3 : contraintes effectives principales majeure et mineure

θ : angle repérant la facette par rapport à la facette de la contrainte principale majeure σ_1

φ' : angle de frottement,

C' : cohésion

Le comportement élastique linéaire parfaitement plastique avec le critère de rupture de Mohr-Coulomb est finalement caractérisé par une élasticité linéaire (E, ν) et un seuil de plasticité, défini par la cohésion c' , l'angle de frottement interne φ' , et l'angle de dilatance ψ , en plus de l'état initial. Il faut pour cela faire au moins deux essais triaxiaux à des pressions de confinement différentes pour déterminer les paramètres du modèle. La surface de charge $F(\sigma_{ij})$ du critère de Mohr-Coulomb s'exprime de façon suivante :

$$F(\sigma'_{ij}) = (\sigma'_1 - \sigma'_3) - (\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin \varphi' - 2C' \cdot \cos \varphi' = 0$$

Dans l'espace des contraintes principales, l'équation $\tau = \sigma' \tan \varphi' + C'$ représente un cône dont la section normale à chaque point est un hexagone irrégulier (Fig.II.9).[12]

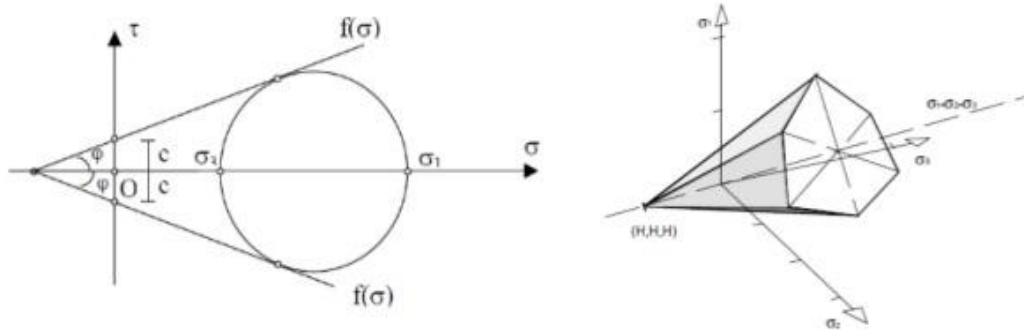


Figure II.9 : Représentation graphique du critère de Mohr-Coulomb[12]

Lorsque l'angle de frottement $\varphi = 0$, le critère est appelé critère de Tresca.[12]

II.4.1.2 Critère de Tresca

Tresca [1864], après des essais sur le Plomb, conclut la plastification arrive quand la contrainte tangentielle maximale atteinte une certaine limite. On peut écrire donc :

$$F = \sigma_1 - \sigma_3 - 2k$$

$$\text{Où : } \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$$

Si les contraintes principales sont $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, ou $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ alors la plastification commence quand :

$$\sigma_1 - \sigma_3 = Y(k)$$

Où : Y : un paramètre matériel déterminé expérimentalement.

K : paramètre d'écrouissage

Le seuil de la valeur de Y est habituellement la contrainte qui est déterminé de l'essai de traction simple (unidimensionnel). Pour la condition de plastification, on a :

$$\sup_{i,j} |\sigma_i - \sigma_j| \leq \sigma_0$$

Où

$$\max \left[\frac{|\sigma_1 - \sigma_2|}{2}, \frac{|\sigma_2 - \sigma_3|}{2}, \frac{|\sigma_3 - \sigma_1|}{2} \right] = \frac{|\sigma_3 - \sigma_1|}{2} = \frac{\partial y}{2}$$

∂y : Est la contrainte d'épuisement initiale en traction simple.

Dans l'espace de contraintes principales $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, la surface définie par la fonction de charge est un prisme parallèle à l'axe $(1,1,1)$ à base hexagonale régulière (Figure II.9). [12]

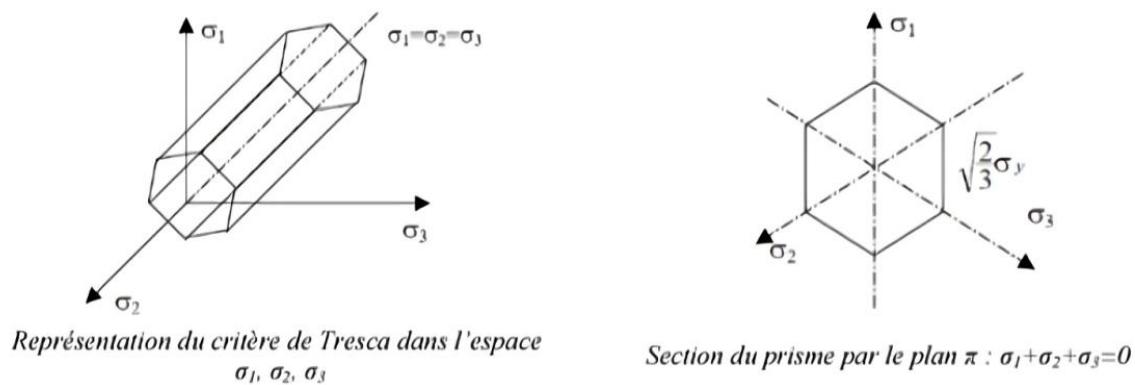


Figure 13 : Représentation graphique du critère de Tresca [12]

II.4.1.3 Critère de Von-Mises

Selon le critère de plasticité de Von Mises, la déformation d'un matériau commence lorsque le second invariant de contrainte déviatorique J_2 atteint une valeur critique. C'est pourquoi cette théorie est parfois appelée Théorie de la plasticité J_2 ou du flux J_2 :

$$F = J_2 - k^2 = 0$$

La plasticité se produit quand :

$$\sqrt{3}J_2 \geq \sigma_y$$

Où :

$$J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} = \frac{1}{2} [s_x^2 + s_y^2 + s_z^2] + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2$$

Ou bien :

$$F = \frac{1}{6} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) - k^2 = 0$$

C'est l'équation d'un cylindre à base circulaire axé sur la trisectrice de repère $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$, sa section par le plan π ($\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$) est un cercle dont le rayon est $k\sqrt{2}$ (Figure II.10).

Le paramètre k représente la résistance maximale du matériau au cisaillement simple (roches) ou à la traction simple (métaux). [12]

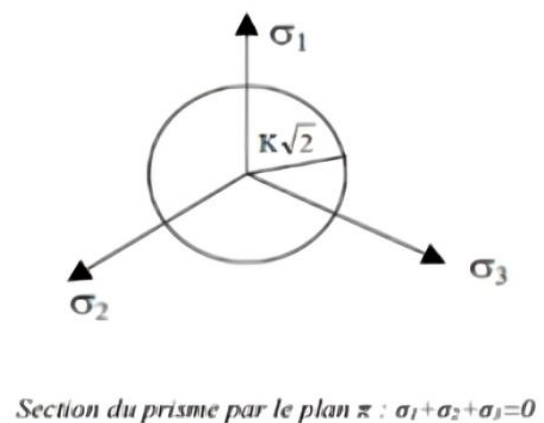
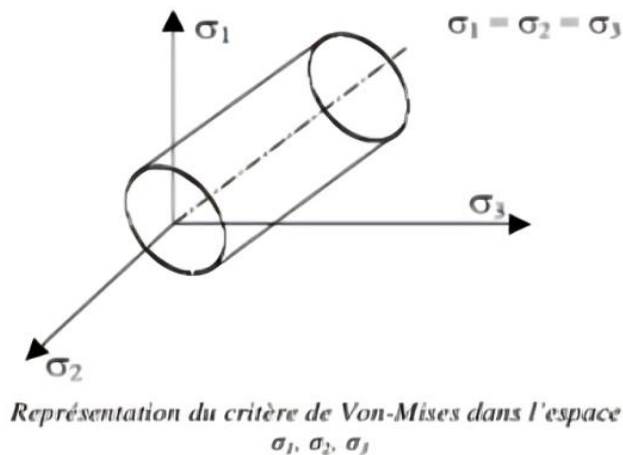


Figure II.10 : Représentation graphique du critère de Von mises[12]

L'élasticité associée est l'élasticité linéaire isotrope de Hooke. La loi de comportement de Von Mises comporte donc 3 paramètres : E , ν , k . Ce critère a été formulé pour étudier le comportement des métaux et il n'est pas bien adapté à la représentation du comportement des sols. [12]

II.4.2 Ténacité a la rupture

La ténacité est la capacité d'un matériau à résister à la propagation d'une fissure ; cela s'oppose à la fragilité.

Elle est caractérisée par le champ d'action mécanique de la rupture (prend en compte la présence de défauts) et apparaît lorsque l'on rappelle que la rupture est un mode de défaillance gouverné par la fissuration (créée, amorcée, propagée) [13].

II.5. Conclusion

Au terme de ce chapitre, il apparaît que la mécanique de la rupture joue un rôle fondamental dans la compréhension et la prévention des défaillances des structures. L'étude de la concentration de contraintes met en évidence l'importance des défauts géométriques dans l'amplification locale des contraintes. Par ailleurs, la mécanique linéaire élastique de la rupture fournit des outils analytiques puissants pour modéliser le comportement des fissures.

Le facteur d'intensité de contraintes se révèle être un paramètre clé pour caractériser l'état de contrainte au voisinage des fissures, tandis que les critères de rupture et la ténacité permettent d'évaluer la résistance des matériaux face à la propagation des fissures. Ainsi, ces concepts constituent une base indispensable pour la conception sûre et fiable des structures en ingénierie.

Ce chapitre constitue donc un socle théorique essentiel pour l'analyse des structures fissurées et la compréhension des mécanismes de rupture en mécanique des matériaux.

Chapitre III

Analyse Numérique et Résultats

Introduction

Dans ce chapitre, une étude numérique des jonctions soudées fissurées est réalisée à l'aide de la méthode des éléments finis sous le logiciel Abaqus. Cette approche permet d'analyser le comportement mécanique de la structure en présence de fissures et de défauts géométriques soumises à différentes conditions de chargement.

Après une présentation du principe de la méthode des éléments finis ainsi que du logiciel utilisé, un modèle numérique de la jonction soudée est développé afin de reproduire les conditions réelles de fonctionnement. Les résultats obtenus permettent d'étudier la distribution des contraintes, l'influence de la charge appliquée, l'effet des propriétés mécaniques du matériau, notamment du module de Young, ainsi que l'impact des paramètres géométriques tels que le diamètre, la taille des défauts et la distance entre la fissure et le défaut.

L'objectif principal de ce chapitre est d'évaluer l'influence de ces différents paramètres sur la concentration des contraintes et sur le comportement global de la structure, afin de mieux comprendre les mécanismes pouvant conduire à l'amorçage ou à la propagation des fissures.

III.1. Présentation générale du logiciel abaqus

Abaqus est un progiciel de calcul **par** éléments finis développé par **Hibbitt, Karlsson & Sorensen (HKS)**. Créé il y a plus de 30 ans, il a évolué progressivement afin d'intégrer les avancées de la théorie des éléments finis ainsi que les besoins industriels. En octobre 2005, l'entreprise **ABAQUS, Inc.** a été rachetée par **Dassault Systèmes**.

Abaqus est avant tout un logiciel de simulation numérique par éléments finis permettant de résoudre une grande variété de problèmes en mécanique.

Il est particulièrement reconnu pour ses performances dans le traitement des problèmes non linéaires.

Le progiciel Abaqus se compose de trois principaux produits :

- **Abaqus/Standard** : solveur généraliste reposant sur un schéma traditionnel d'intégration implicite.
- **Abaqus/Explicit** : solveur utilisant un schéma d'intégration explicite pour résoudre des problèmes dynamiques ou quasi statiques non linéaires.
- **Abaqus/CAE** : interface intégrée de modélisation, de visualisation et de gestion des calculs associée aux deux solveurs précédents.

Chacun de ces produits peut être complété par des modules additionnels et/ou optionnels, adaptés à des applications spécifiques.

Les produits Abaqus, et notamment Abaqus/CAE, sont développés principalement en **C++**, **Fortran** pour les calculs numériques et **Python** pour les scripts et la paramétrisation. La gestion de l'interface graphique est assurée par **FOX Toolkit**.

Abaqus est largement utilisé dans les secteurs automobile et aéronautique. Grâce à l'étendue de ses capacités d'analyse et à son ergonomie, il est également très répandu dans les milieux universitaires pour la recherche et l'enseignement.

Initialement conçu pour l'analyse des comportements non linéaires, Abaqus dispose d'une vaste bibliothèque de modèles de matériaux. Ses modèles dédiés aux élastomères sont notamment reconnus pour leur précision et leur efficacité.

Depuis son acquisition par Dassault Systèmes en 2005, Abaqus est intégré à la plateforme **SIMULIA**.

Le cœur du logiciel Abaqus est son moteur de calcul. À partir d'un fichier de données portant l'extension **.inp**, qui décrit l'ensemble du problème mécanique, le logiciel analyse les données, exécute les simulations demandées et enregistre les résultats dans un fichier **.odb**.

Deux étapes essentielles accompagnent le calcul :

- Le **prétraitement**, qui consiste à générer le fichier de données ;
- Le **post-traitement**, qui permet d'exploiter et d'analyser les résultats obtenus.

La structure du fichier de données peut rapidement devenir complexe, car celui-ci doit contenir toutes les informations relatives à la géométrie, au maillage, aux matériaux, aux conditions aux limites, aux chargements et aux paramètres de calcul, tout en respectant une syntaxe précise.

Il est important de noter que le prétraitement et le post-traitement peuvent être réalisés à l'aide d'autres logiciels. Toutefois, Abaqus propose le module **Abaqus/CAE**, une interface graphique permettant de gérer l'ensemble des opérations de modélisation, notamment :

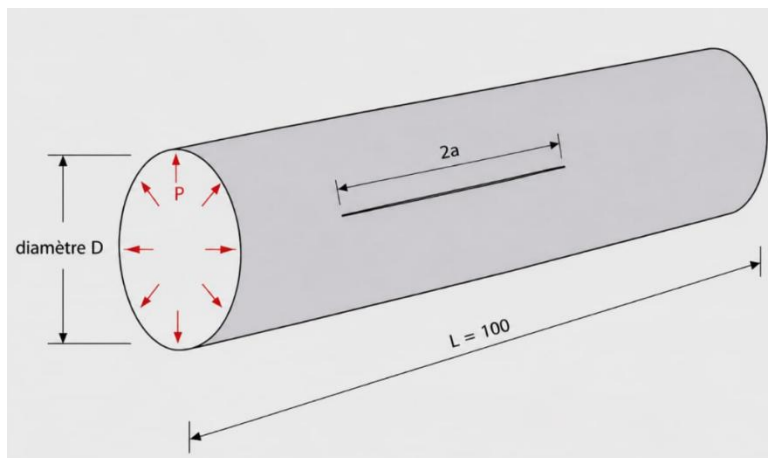
- La génération du fichier de données ;
- Le lancement du calcul ;
- L'exploitation et la visualisation des résultats.

III.2. Modèle utilisé :

Le modèle étudié est un pipeline cylindrique soumis à une pression interne. Les dimensions géométriques ont été choisies de manière à représenter une configuration industrielle réaliste (**Figure III.1**).

Le pipeline est modélisé à l'aide d'éléments de type **coque (Shell)**. Il présente un diamètre de **20 mm** et une longueur totale de **100 mm**. Une fissure longitudinale de **20 mm** de longueur est située au centre de la structure.

(a)



(b)

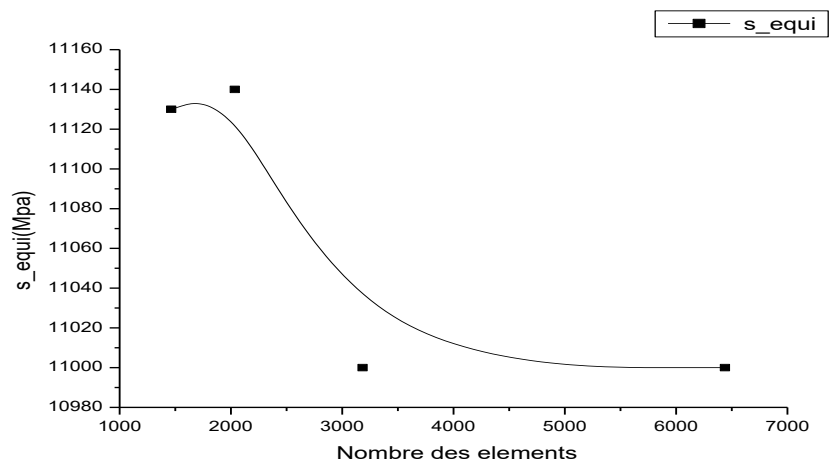
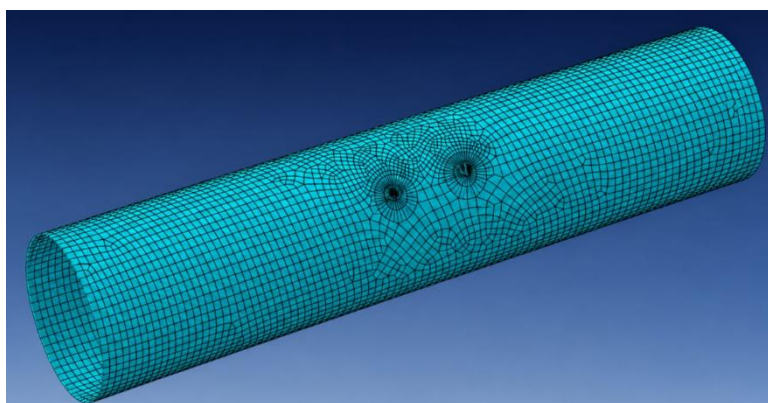


Figure III.1: (a) : Modèle géométrique tridimensionnel d'un pipeline présentant une fissure, (b)

Maillage par éléments finis et étude de convergence du maillage.

Le matériau utilisé est un **acier API 5L X52**, dont le comportement est supposé **élastique linéaire** durant l'analyse (Tableau III.1).

Les conditions de chargement consistent en l'application d'une **pression interne de 15 MPa**. Cette sollicitation permet d'étudier la réponse mécanique de la structure fissurée ainsi que la distribution des contraintes au voisinage de la fissure. Les extrémités du pipeline sont supposées **complètement encastrées**, afin de reproduire une condition de fixation rigide et d'éliminer tout mouvement de corps rigide. Cette hypothèse impose l'annulation de tous les degrés de liberté en déplacement aux deux extrémités du modèle.

Ainsi, les trois composantes de déplacement sont nulles, soit : $U1 = U2 = U3 = 0$. Cette condition aux limites permet de garantir la stabilité numérique du modèle et de simuler un comportement mécanique représentatif des conditions de service étudiées.

Pour garantir une représentation précise du comportement mécanique, un maillage raffiné a été adopté au voisinage de la fissure, où se concentrent les contraintes. Le modèle a été discrétisé à l'aide d'éléments de coque linéaires de type S4R. Le maillage comporte 6462 **nœuds** et **6439 éléments**.

Cette discrétisation permet de capturer avec précision la distribution des contraintes autour de la fissure et d'évaluer l'influence de la pression interne de **15 MPa** sur le comportement structural du pipeline.

Tableau III.1 : les propriétés mécaniques d'acier **API 5L X52** :

Grandeurs	Valeur	Unité
Limite élastique (Re)	360	MPa
Module de Young (E)	210	GPa
Coefficient de poisson	0.3	
Tenacité ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)	120 (3794 $\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$)	
Pressure interne	15	MPa

L'analyse numérique est réalisée à l'aide du logiciel **ABAQUS**. Dans cette étude, la longueur de la fissure est progressivement variée de **10 mm à 40 mm** afin d'évaluer son influence sur le comportement mécanique de la structure.

Le code de calcul Abaqus permet d'obtenir les valeurs des facteurs d'intensité des contraintes en mode d'ouverture (mode I) ainsi qu'en mode de cisaillement (mode II) pour chaque longueur de fissure considérée. Ces résultats sont utilisés pour analyser l'évolution de la sévérité du défaut en fonction de sa taille.

III.3 Résultats et analyse

III. 3.1 Distribution des contraintes :

L'intensité et la répartition des contraintes mécaniques équivalentes et normales dans le **pipeline**, au voisinage du défaut, jouent un rôle déterminant dans l'évaluation de sa durée de vie.

La figure III.2 présente la distribution des contraintes équivalentes de **Von Mises** ainsi que des contraintes normales dans le pipeline fissuré. L'analyse du champ de contraintes montre que les valeurs maximales sont localisées au voisinage immédiat de la fissure, tandis qu'elles diminuent progressivement en s'éloignant de cette zone critique.

Sous l'effet de la pression interne appliquée, les contraintes de Von Mises ainsi que les contraintes normales atteignent leurs valeurs maximales à proximité de l'extrémité de la fissure, traduisant une forte concentration de contraintes. Cette concentration constitue un facteur favorable à l'amorçage et à la propagation du défaut, alors que les zones éloignées restent relativement peu sollicitées.

Cette concentration de contraintes est directement liée aux paramètres de mécanique de la rupture, notamment les facteurs d'intensité de contraintes (KI et KII). En effet, l'augmentation des contraintes

locales au voisinage de la fissure entraîne une élévation des valeurs de ces facteurs, ce qui permet de quantifier la sévérité du défaut et d'évaluer le risque de propagation.

L'étude met ainsi en évidence l'influence significative du défaut sur le comportement mécanique du pipeline et confirme l'importance de l'analyse des champs de contraintes pour comprendre l'évolution de la fissure.

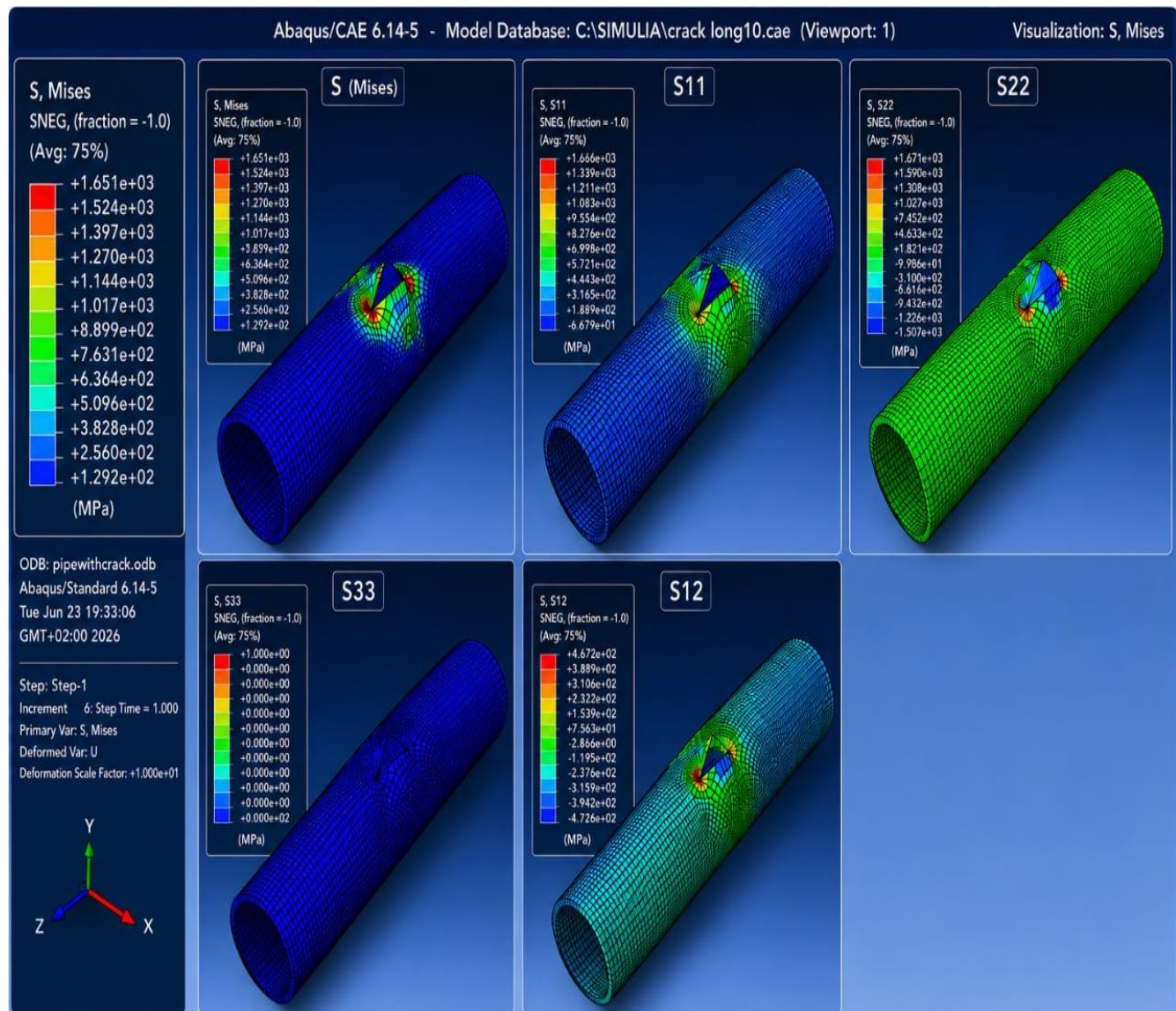


Figure III.2 : Distribution de la contrainte équivalente normales et tangentielles pour un chargement mécanique : $P = 15 \text{ MPa}$.

Les résultats obtenus à partir de cette analyse sont représentés sur les figures III.3 et III.4. Ces dernières illustrent la variation des facteurs d'intensité de contraintes en fonction de la longueur de fissure **a**.

La figure 14 présente l'influence de la taille de la fissure sur le facteur d'intensité de contraintes en mode d'ouverture (**K_I**). Elle montre clairement que ce facteur augmente avec l'accroissement de la longueur de la fissure. En effet, une fissure plus longue engendre une intensification plus importante du champ de contraintes en pointe de fissure.

La figure 154 illustre la variation du facteur d'intensité de contraintes en mode de cisaillement (**K_{II}**) en fonction de la longueur de fissure **a**. Les résultats montrent que la valeur de **K_{II}** reste relativement faible et négligeable par rapport à **K_I**, ce qui indique que le mode d'ouverture domine largement le comportement de propagation de la fissure dans le cas étudié.

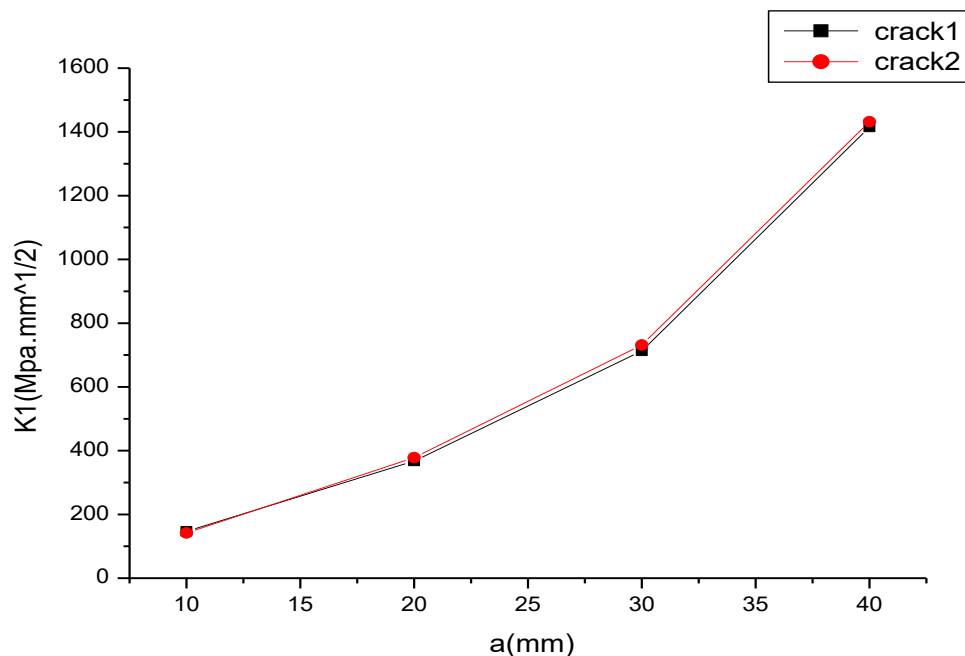


Figure 16 : Variation de **K_I** en fonction de **a** pour un chargement mécanique : **P= 15 MPa**.

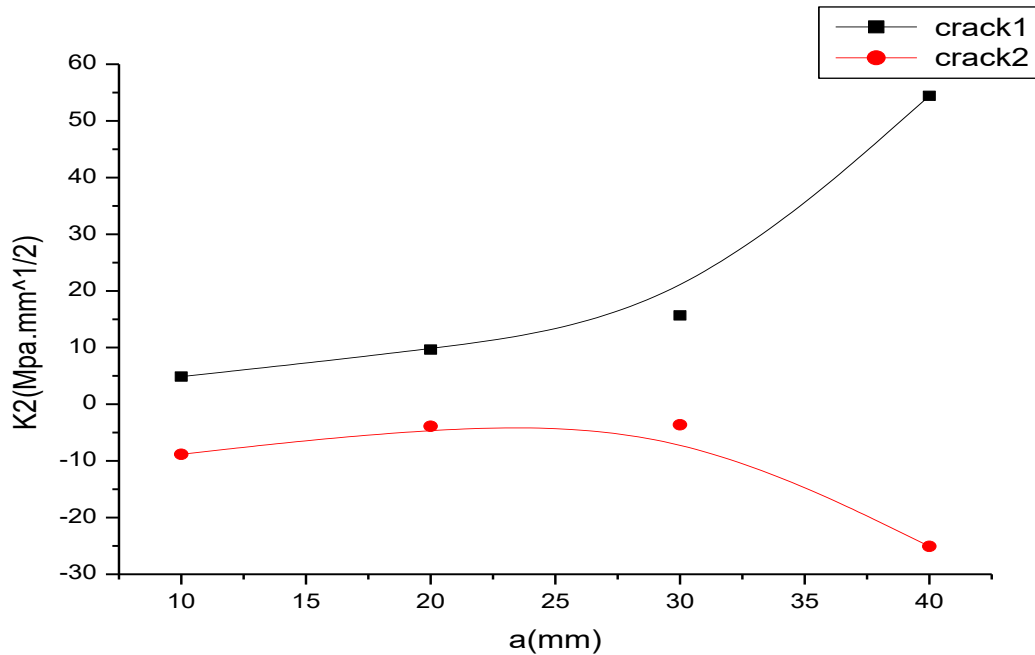


Figure III.4 : Variation de K_{II} en fonction de a pour un chargement mécanique : $P = 15 \text{ MPa}$.

III. 3.2. Effet de la charge appliquée :

Dans cette section, trois niveaux de chargement mécanique sont considérés, tandis que la longueur de la fissure est variée de 10 mm à 40 mm. Les valeurs de pression appliquées restent inférieures à la limite d'élasticité de l'acier, garantissant ainsi un comportement purement élastique du matériau.

Pour chaque niveau de chargement, la variation des facteurs d'intensité de contraintes en mode I et en mode II est déterminée en fonction de la taille de la fissure. Les niveaux de pression étudiés sont : $P_1 = 15 \text{ MPa}$, $P_2 = 10 \text{ MPa}$ et $P_3 = 5 \text{ MPa}$.

L'influence du chargement mécanique sur les facteurs d'intensité de contraintes en mode d'ouverture (**KI**) et en mode de cisaillement (**KII**) est représentée sur les figures III.5 et III.6. Ces résultats montrent clairement qu'une augmentation de la pression appliquée entraîne une augmentation significative du facteur **KI**.

En revanche, le facteur **KII** reste relativement faible pour l'ensemble des cas étudiés, ce qui indique que le mode d'ouverture domine largement le comportement de la fissure.

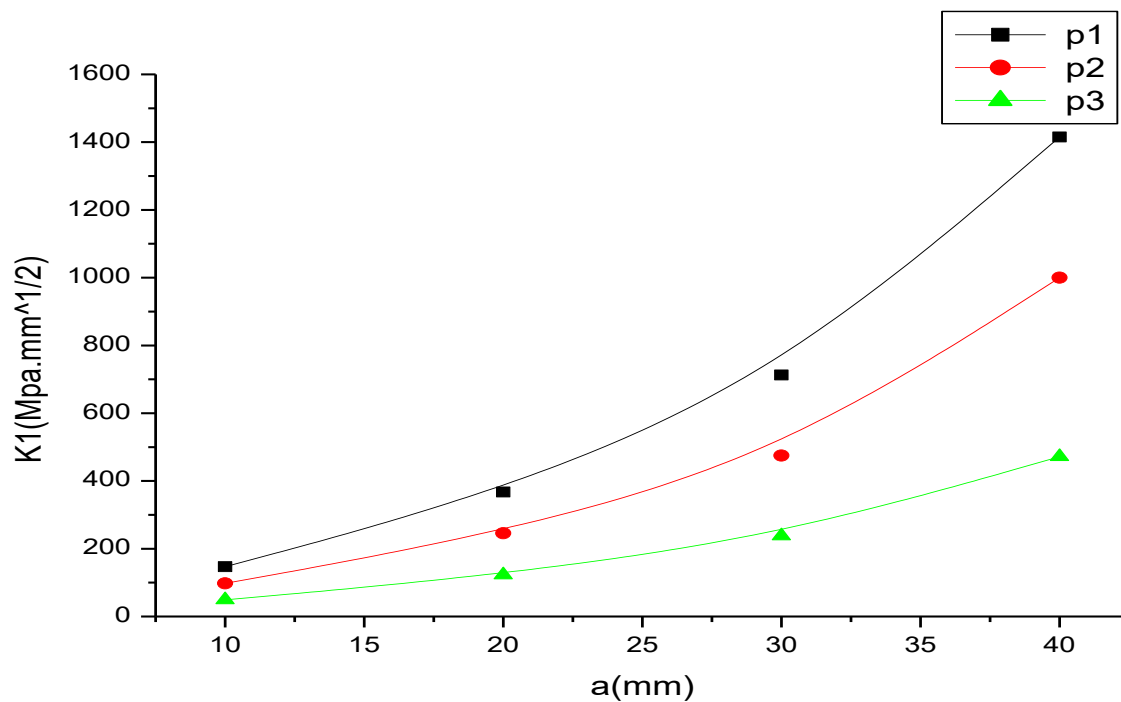


Figure III.5: Variation de KI en fonction de a et la pression interne

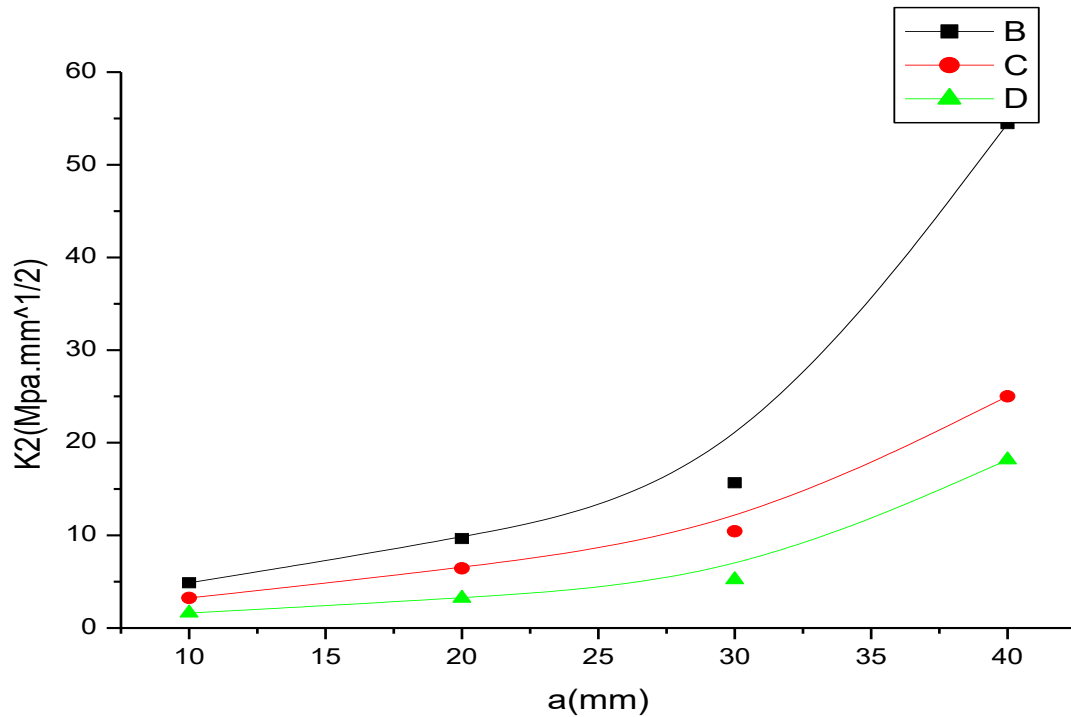


Figure III.6 : Variation de K_{II} en fonction de a et la pression interne

III. 3.3. Effet de l'épaisseur du pipeline sur K_I

L'épaisseur du pipeline constitue un paramètre géométrique déterminant dans le comportement mécanique des structures tubulaires soumises à une pression interne. Elle influence directement le niveau des contraintes développées dans la paroi du tube ainsi que l'intensité du champ de contraintes au voisinage des défauts, notamment les fissures longitudinales.

Les résultats obtenus par simulation numérique (Figure III.7) montrent une influence significative de l'épaisseur du pipeline sur le facteur d'intensité des contraintes K_I . En effet, une diminution de l'épaisseur entraîne une augmentation notable de K_I , traduisant une aggravation de l'état de contrainte au voisinage de la fissure.

Ce comportement s'explique par la relation inverse entre l'épaisseur et la contrainte circonférentielle, donnée par $\sigma_\theta = \frac{PD}{2t}$. Ainsi, les structures à faible épaisseur présentent une rigidité plus faible et une capacité réduite à redistribuer les contraintes autour de la fissure, ce qui favorise la concentration des contraintes.

À l'inverse, l'augmentation de l'épaisseur améliore la résistance globale du pipeline en diminuant le niveau de contrainte membranaire, ce qui réduit directement le facteur d'intensité des contraintes et retarde la propagation de la fissure.

Ces résultats confirment donc que l'épaisseur constitue un paramètre de conception essentiel dans l'analyse de la rupture des pipelines, notamment dans les applications où la sécurité structurale est critique.

L'étude met en évidence que le contrôle de l'épaisseur permet d'agir directement sur la résistance à la fissuration du pipeline. Une optimisation de ce paramètre est donc indispensable pour garantir la fiabilité des structures soumises à des pressions internes élevées.

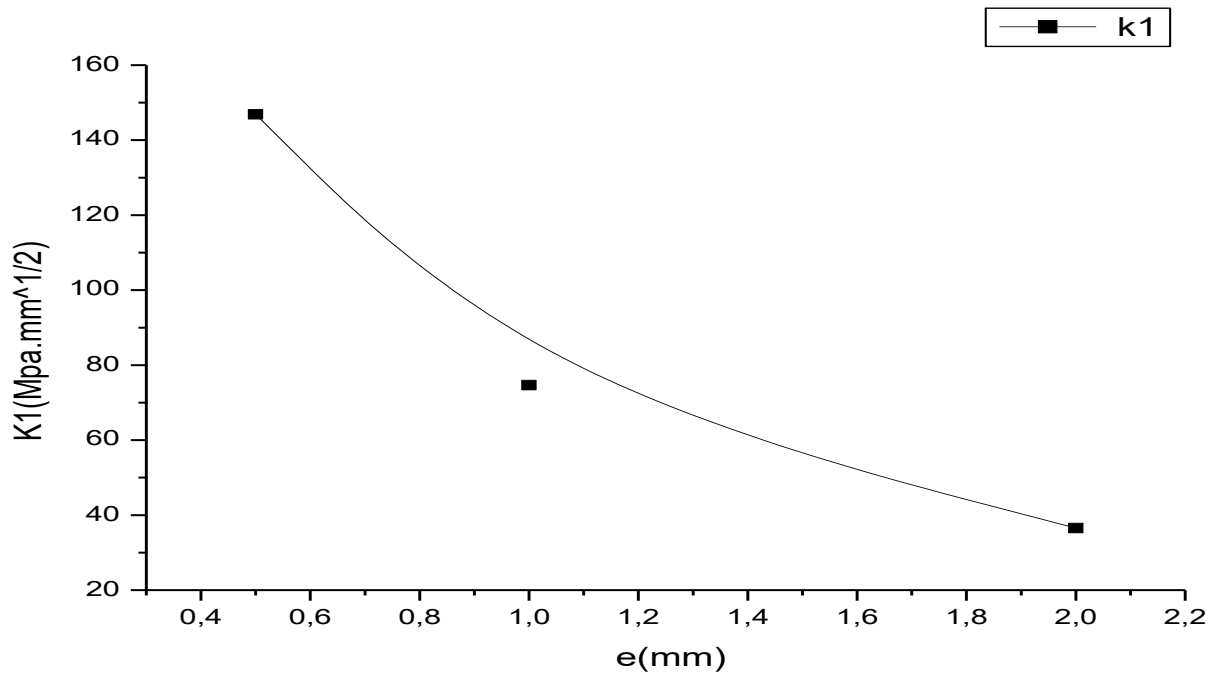
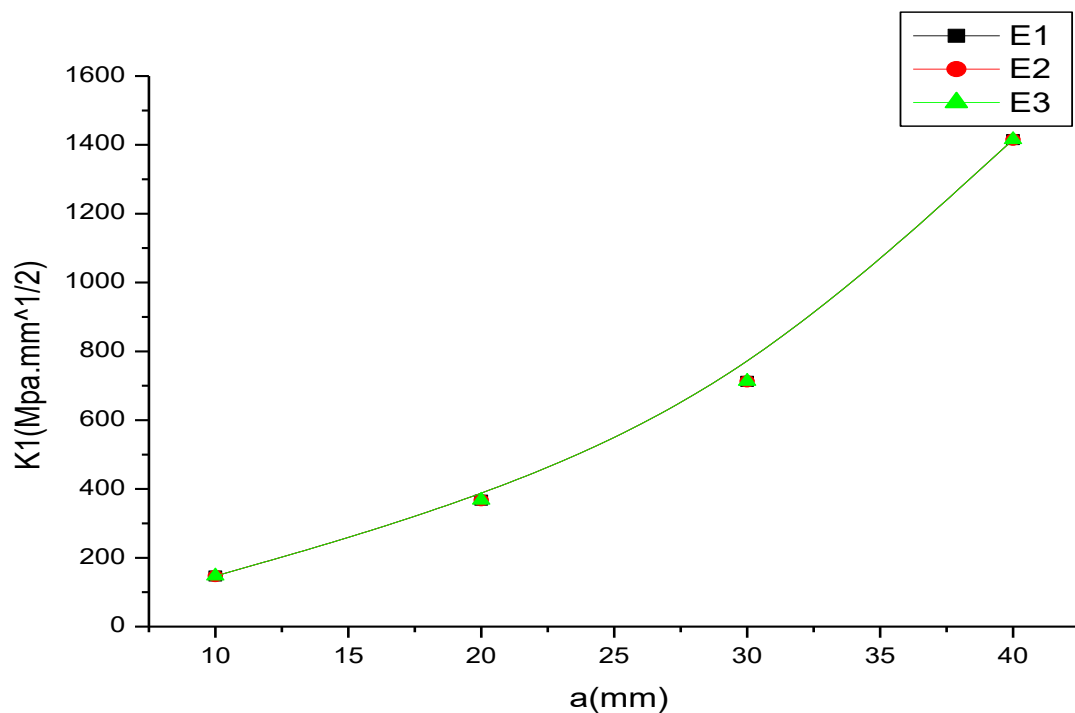


Figure III.7. Variation de K_I en fonction de l'épaisseur t pour $a=20\text{mm}$ et $P=15\text{MPa}$

III.3.4 Effet du module de Young (E)

Dans cette section, l'influence du module de Young sur la variation du facteur d'intensité de contraintes en mode I est étudiée en fonction de la longueur de la fissure. Trois valeurs différentes du module de Young sont considérées : E_1 , $E_2 = 2 \cdot E_1$ et $E_3 = E_1/2$, tout en maintenant une pression appliquée constante de **15 MPa**. La longueur de la fissure varie entre **10 mm et 40 mm**.

Les figures III.8 et III.9 montrent clairement que le facteur K_I augmente avec la taille de la fissure, quel que soit le module de Young utilisé.

Figure III.8 : Variation de K_I en fonction de a et Les modules d'Young E

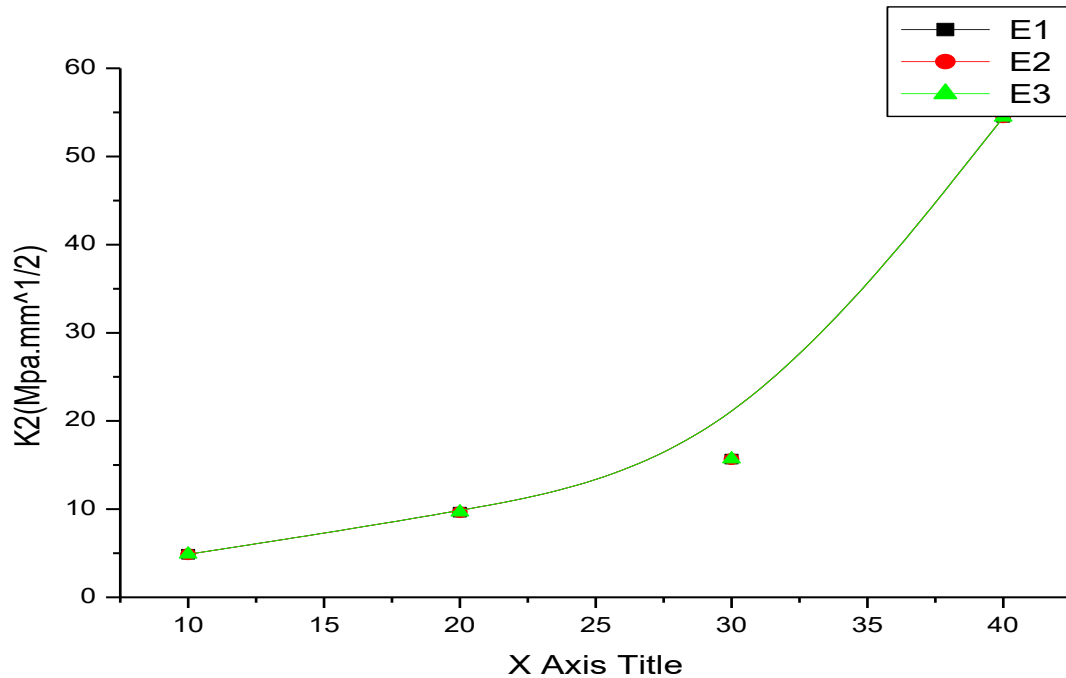


Figure III.9. : Variation de KII en fonction de a et les module d'Young E

III.3.5. Effet de diamètre :

L'étude de l'effet du diamètre du pipeline montre que ce paramètre influence directement le comportement mécanique de la structure. Dans cette analyse, trois valeurs du diamètre sont considérées : $D_1 = 20 \text{ mm}$, $D_2 = 2D_1 = 40 \text{ mm}$ et $D_3 = 4D_1 = 80 \text{ mm}$.

L'augmentation du diamètre entraîne une modification de la surface soumise à la pression interne, ce qui affecte la répartition des contraintes et des déformations dans la structure. Pour une pression appliquée constante et une épaisseur inchangée, l'augmentation du diamètre conduit généralement à une augmentation des contraintes circonférentielles ainsi qu'à une amplification des déformations globales du pipeline (Figure III. 10).

Les résultats obtenus permettent ainsi d'évaluer l'influence de la géométrie sur la résistance mécanique du pipeline et de mettre en évidence l'importance du choix du diamètre dans les conditions de fonctionnement étudiées.

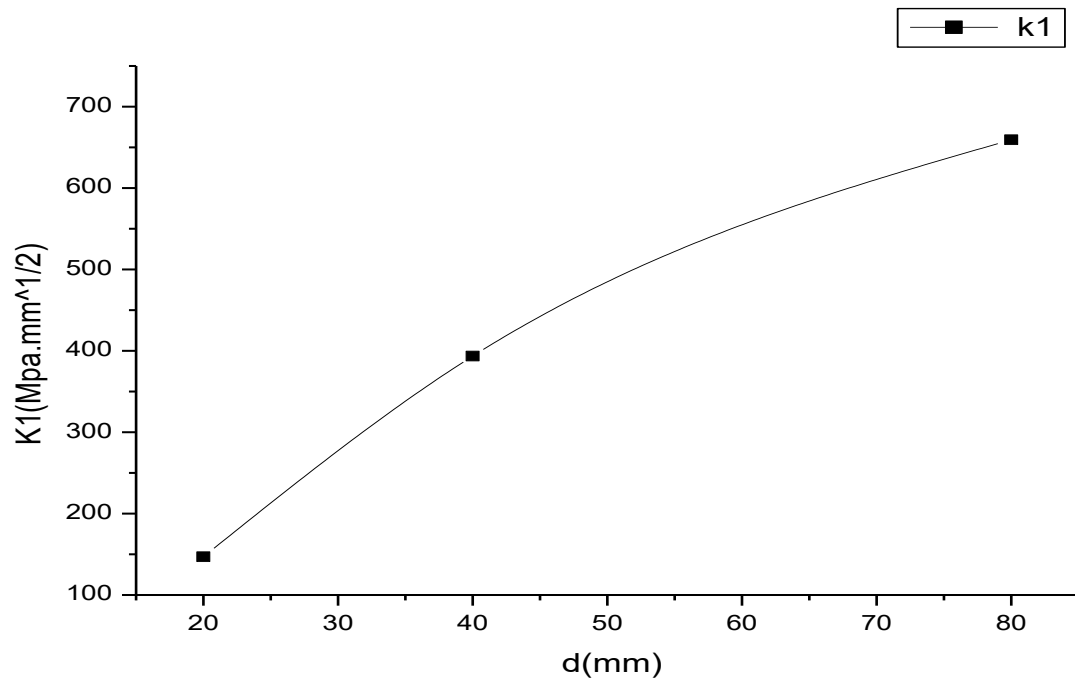


Figure III.10 : Variation du facteur d'intensité de contraintes KI en fonction du diamètre D

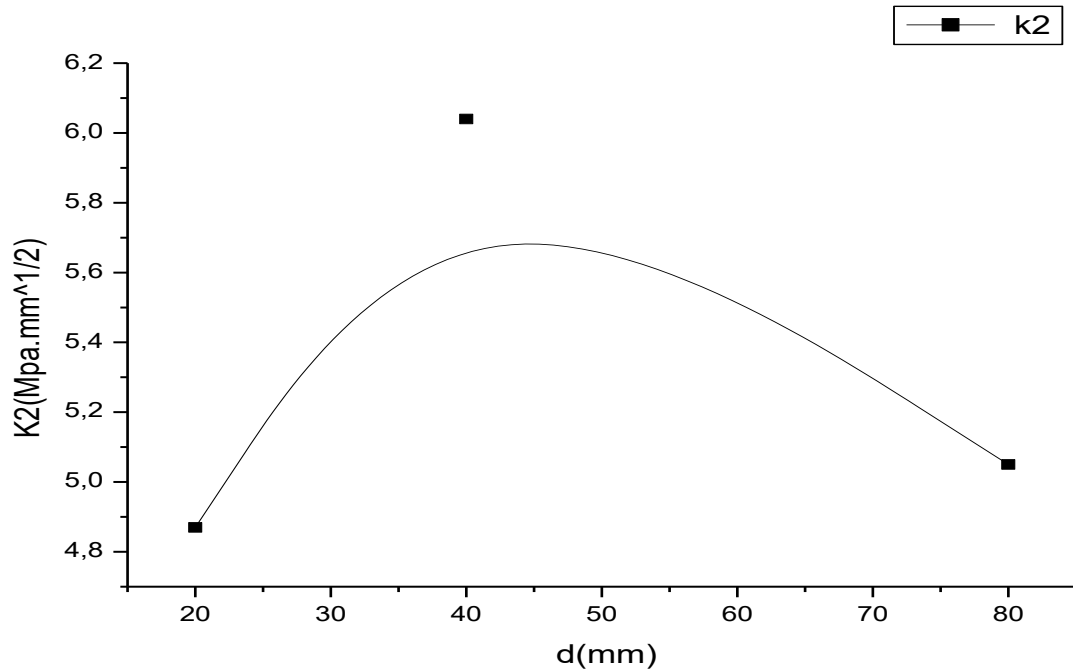


Figure III.11: Variation du facteur d'intensité de contraintes K_{II} en fonction du diamètre D

III.3.6 : Effet des défauts (cavité) sur le comportement mécanique du pipeline

L'étude de l'effet des défauts sur le comportement mécanique du pipeline est essentielle pour évaluer son intégrité structurale. La présence d'un défaut modifie en effet la répartition des contraintes et entraîne des concentrations locales importantes, susceptibles de favoriser l'amorçage ainsi que la propagation des fissures (Figure III.12).

Afin d'analyser cette influence, plusieurs dimensions de défauts ont été considérées, et les valeurs du facteur d'intensité de contraintes ont été déterminées pour chaque cas étudié (Figure III.13).

L'analyse des résultats montre que le facteur d'intensité de contraintes en mode I diminue avec l'augmentation du diamètre du pipeline en présence d'une cavité. Cette tendance s'explique par le fait

qu'un diamètre plus important modifie la répartition des contraintes et réduit l'intensité du champ de contraintes au voisinage du défaut.

Ainsi, pour une même pression appliquée, l'augmentation du diamètre conduit à une diminution de la concentration des contraintes en pointe de la cavité, ce qui se traduit par une baisse du facteur **KI**. Par conséquent, les structures de plus grand diamètre présentent une sensibilité réduite à l'effet de ce type de défaut dans les conditions étudiées.

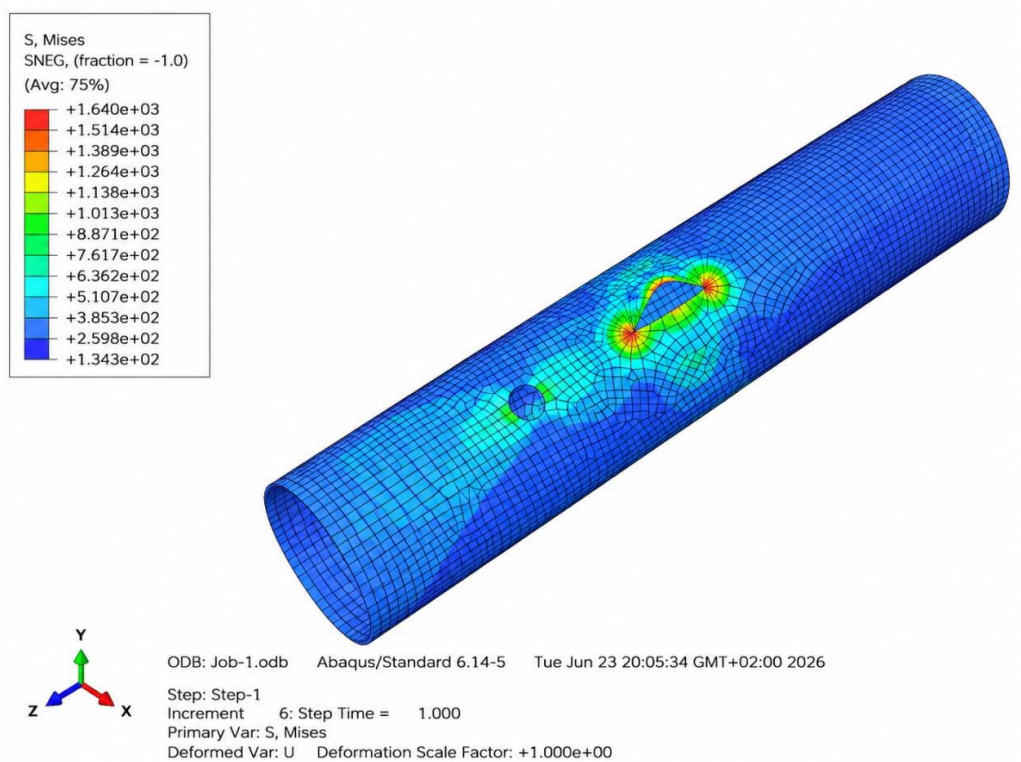


Figure III.12 : Visualisation 3D de contrainte de Von Mises

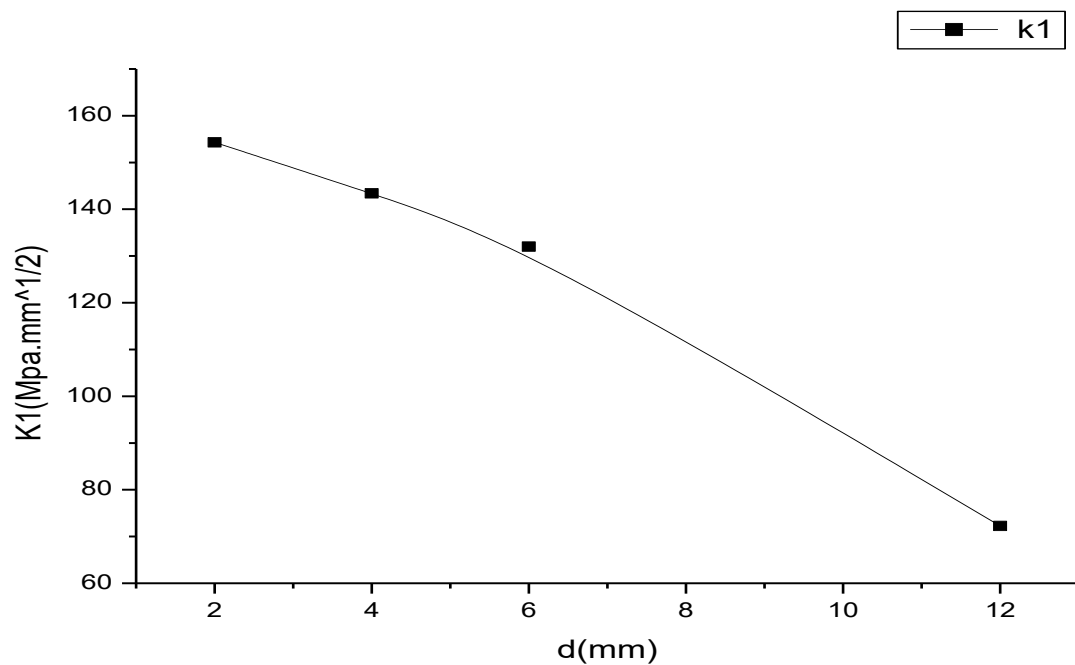


Figure III.13: Effet de la taille du défaut sur le facteur d'intensité de contrainte KI

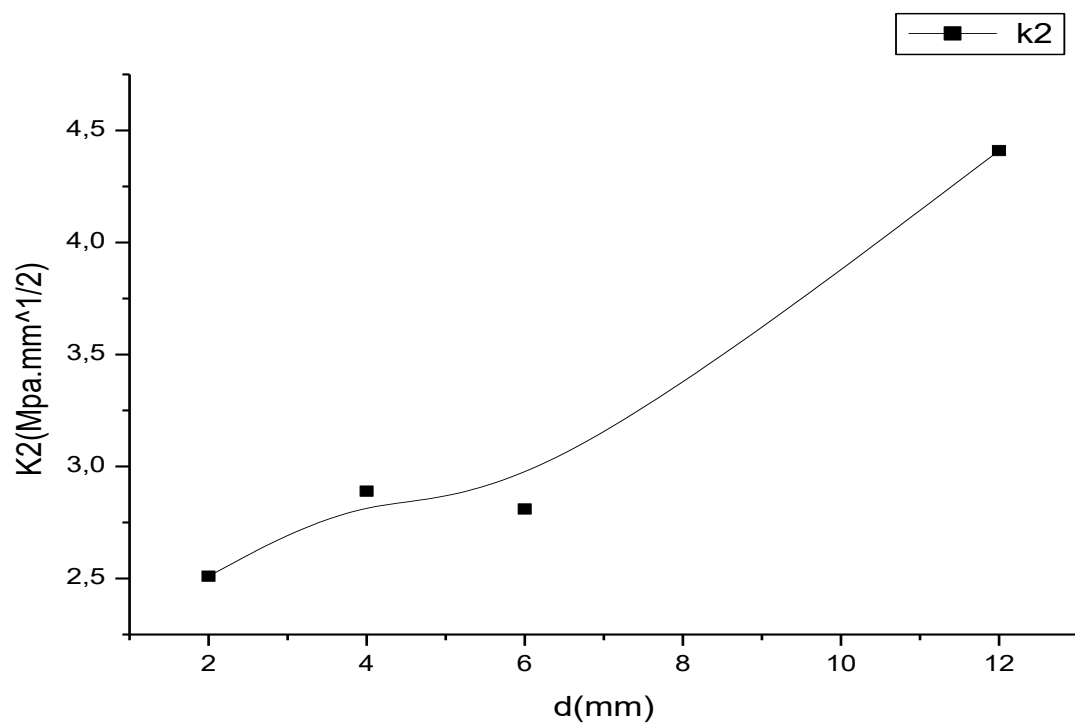


Figure III.14 : Effet de la taille du défaut sur le facteur d'intensité des contraintes KII

III.3.7 Interdistance entre fissure et défaut

L'étude de l'interdistance entre la fissure et le défaut permet d'évaluer l'influence de leur position relative sur le comportement mécanique du pipeline. Dans cette analyse, quatre distances sont considérées : $d_1 = 2 \text{ mm}$, $d_2 = 10 \text{ mm}$, $d_3 = 20 \text{ mm}$ et $d_4 = 60 \text{ mm}$.

Lorsque la distance entre la fissure et le défaut est faible, l'interaction entre ces deux discontinuités est importante, ce qui entraîne une forte concentration des contraintes et une augmentation du risque de propagation de la fissure.

En revanche, lorsque l'interdistance augmente, cette interaction diminue progressivement et les champs de contraintes deviennent de moins en moins couplés. Ainsi, pour des distances importantes, le comportement du pipeline tend à se rapprocher de celui d'une structure ne comportant qu'une seule discontinuité (Figure III.15).

Les résultats obtenus permettent ainsi d'évaluer l'effet de l'interdistance sur la résistance et l'intégrité structurale du pipeline.

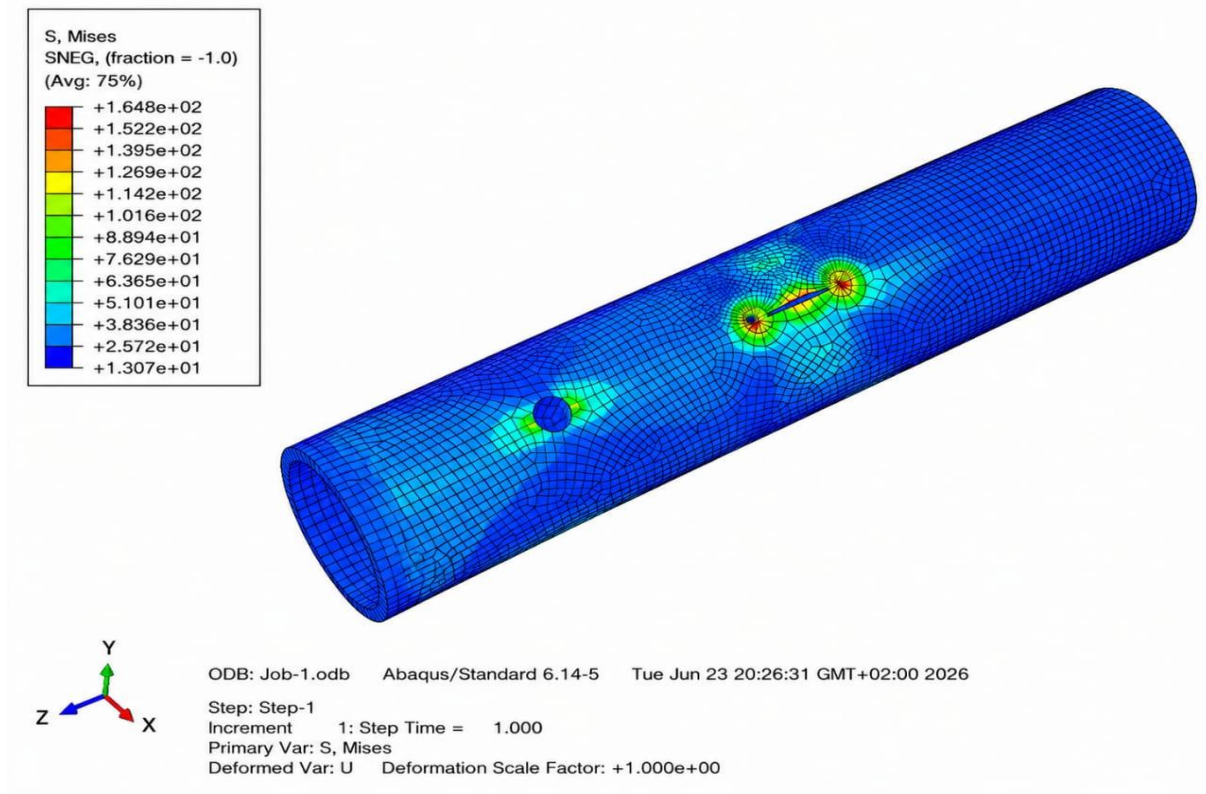


Figure III.15. Répartition de contrainte de Von Mises pour une distance donnée entre la fissure et le défaut

La figure III.16 présente la variation du facteur d'intensité de contraintes en mode I en fonction de l'interdistance d entre la fissure et le défaut.

Les résultats obtenus montrent une augmentation progressive de K_I avec l'accroissement de l'interdistance. Cette évolution s'explique par la diminution de l'effet d'atténuation des contraintes lorsque la distance entre la fissure et le défaut augmente. En effet, lorsque les deux discontinuités sont proches, leur interaction peut redistribuer localement les contraintes, limitant ainsi l'intensité en pointe de fissure.

En revanche, lorsque l'interdistance devient plus importante, cette interaction diminue et le champ de contraintes se concentre davantage au voisinage de la fissure principale, ce qui entraîne une augmentation du facteur **K_I**.

Ainsi, les résultats montrent que l'augmentation de l'interdistance modifie significativement le comportement mécanique du pipeline et conduit à une augmentation de la sévérité du facteur d'intensité de contraintes dans les conditions étudiées.

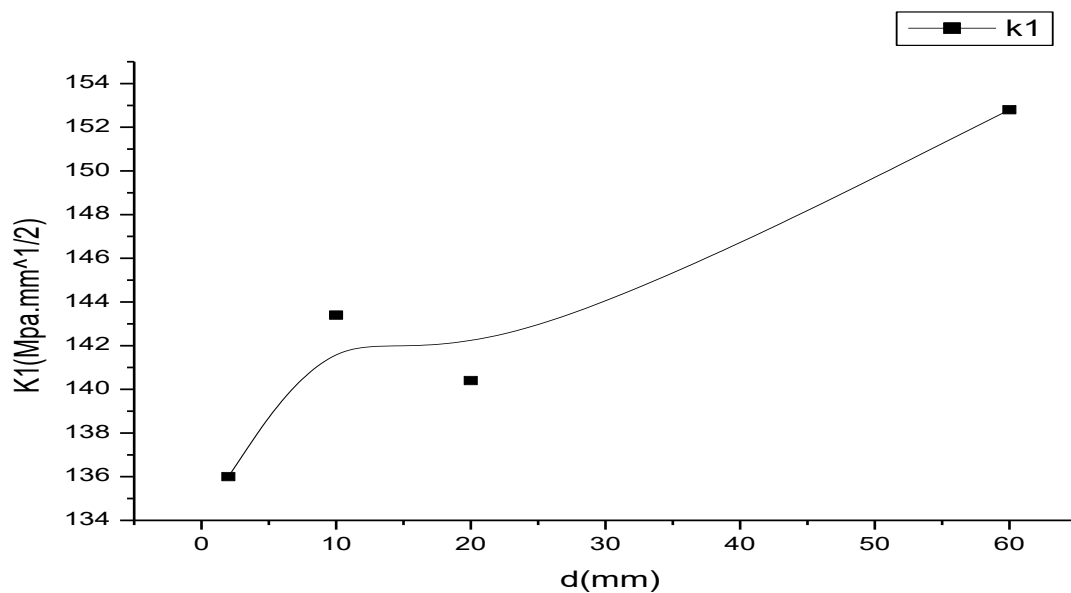


Figure III.16 : Variation du facteur d'intensité de contraintes K_I en fonction de l'interdistance d entre la fissure et le défaut

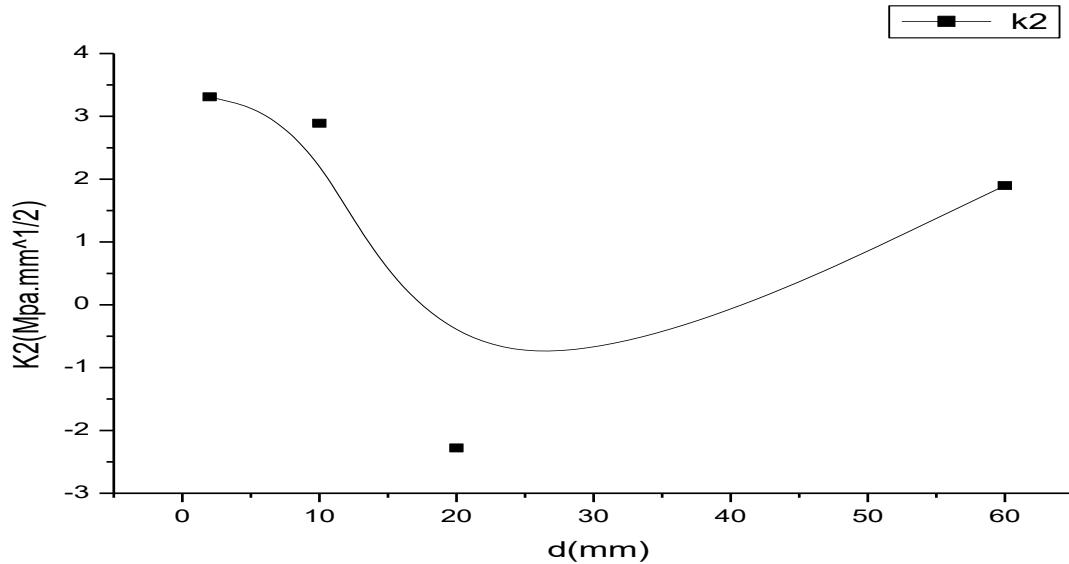


Figure III.17 : Variation du facteur d'intensité de contraintes K_{II} en fonction de l'interdistance d entre la fissure et le défaut

III.3.8. Concentration des contraintes K_T

La concentration des contraintes dans un pipeline constitue un paramètre essentiel pour l'évaluation de son intégrité structurale. La présence d'une fissure ou d'un défaut perturbe la répartition homogène des contraintes et engendre une augmentation locale de celles-ci au voisinage de la zone endommagée.

Cette concentration est généralement caractérisée par le facteur de concentration des contraintes (K_T), défini comme le rapport entre la contrainte maximale locale et la contrainte nominale appliquée. Ainsi, plus la valeur de (K_T) est élevée, plus le risque d'amorçage ou de propagation de la fissure est important.

L'étude de ce paramètre permet donc d'identifier les zones critiques du pipeline et d'évaluer son comportement mécanique sous l'effet des charges appliquées.

❖ *Effet de la pression interne sur K_T*

Dans ce cas, le même modèle géométrique est considéré, mais sans fissure et avec la présence d'une cavité de diamètre **4 mm**. Le pipeline est soumis à une pression interne de **15 MPa**.

L'objectif de cette étude est d'analyser la variation du facteur de concentration des contraintes (**K_T**) en fonction de la variation de la pression interne, tout en conservant un diamètre de cavité constant.

Cette approche permet d'évaluer l'influence du niveau de chargement sur la concentration des contraintes autour de la cavité et d'identifier les conditions les plus critiques pour l'intégrité de la structure.

Les résultats obtenus dans les figures III.18 et III.19 montrent que le facteur de concentration des contraintes K_T reste pratiquement constant malgré l'augmentation de la pression interne. En effet, la contrainte maximale au voisinage de la cavité et la contrainte nominale dans la paroi du pipeline augmentent de manière proportionnelle avec la pression appliquée. Par conséquent, leur rapport, qui définit le facteur de concentration des contraintes, varie très peu.

Cette observation indique que, pour une cavité de diamètre constant et dans le domaine élastique du matériau, le facteur K_T dépend essentiellement de la géométrie de la discontinuité et non du niveau de chargement. L'augmentation de la pression interne entraîne une hausse des contraintes absolues dans la structure, mais n'affecte pas significativement le mécanisme de concentration des contraintes autour de la cavité.

Ainsi, la géométrie de la cavité constitue le paramètre prépondérant dans l'évaluation de K_T , tandis que la pression interne influence principalement l'amplitude des contraintes développées dans le pipeline. Les résultats confirment donc le comportement théorique attendu en élasticité linéaire, où le facteur de concentration des contraintes demeure pratiquement indépendant de la charge appliquée.

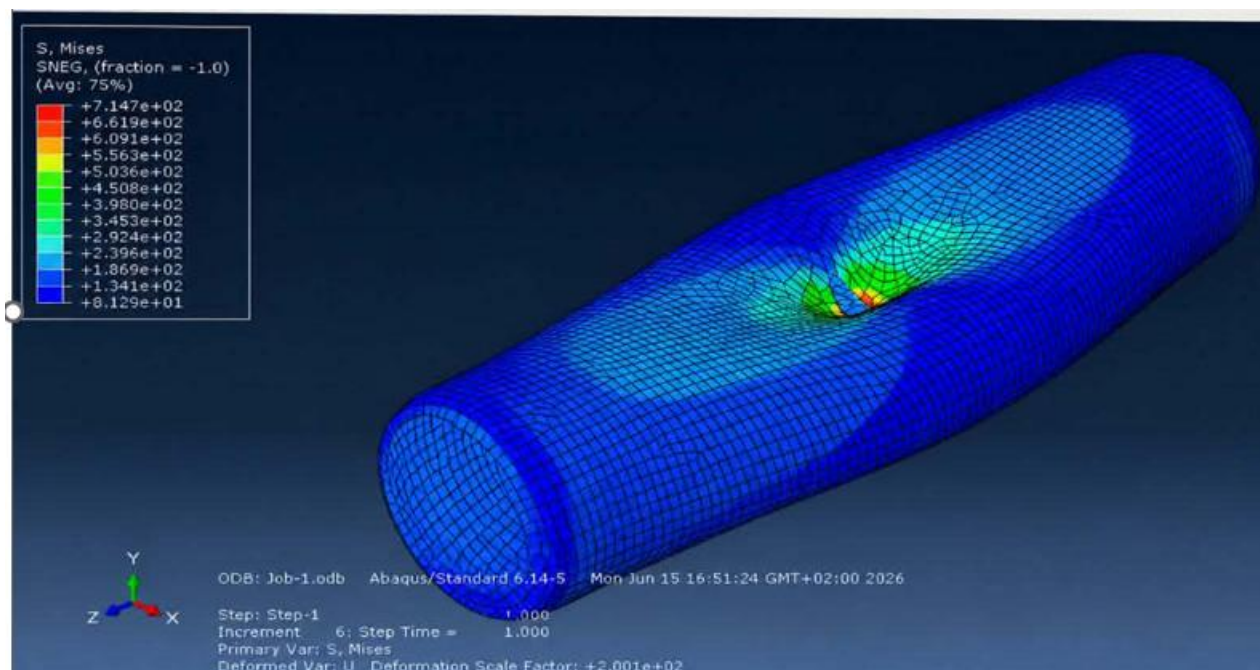
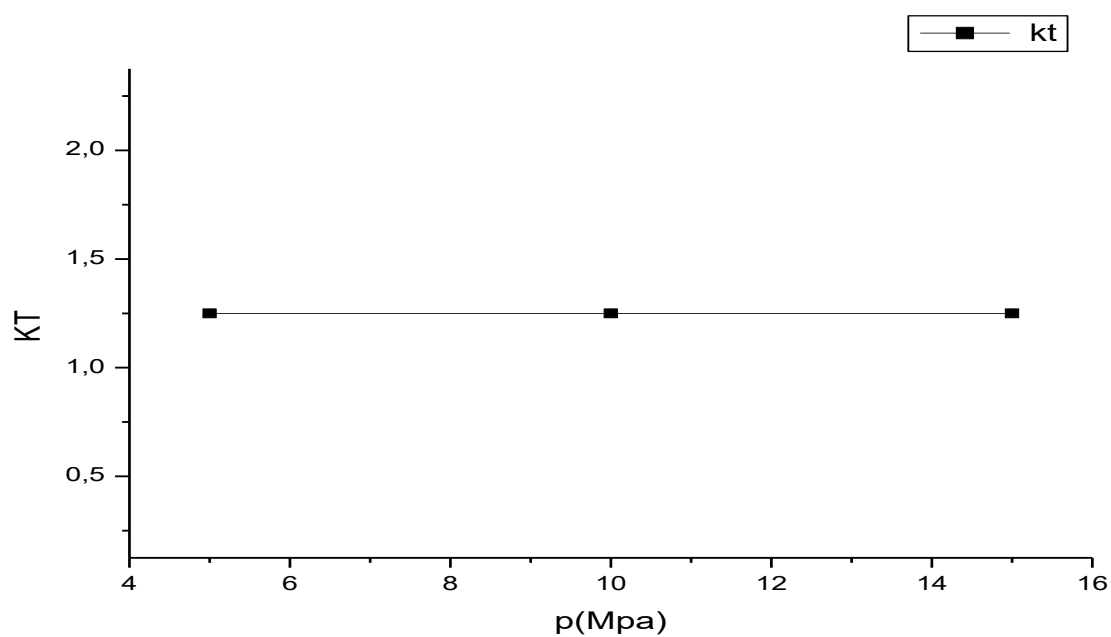


Figure III.18: Champ des contraintes de Von mises au voisinage du défaut

Figure III.19: Variation du facteur de concentration des contraintes K_T en fonction de la pression interne p

❖ Effet du diamètre du trou sur K_T

Dans cette partie, le même modèle géométrique est étudié en considérant uniquement la présence d'une cavité, sans fissure. Le pipeline est soumis à une pression interne constante de **15 MPa**.

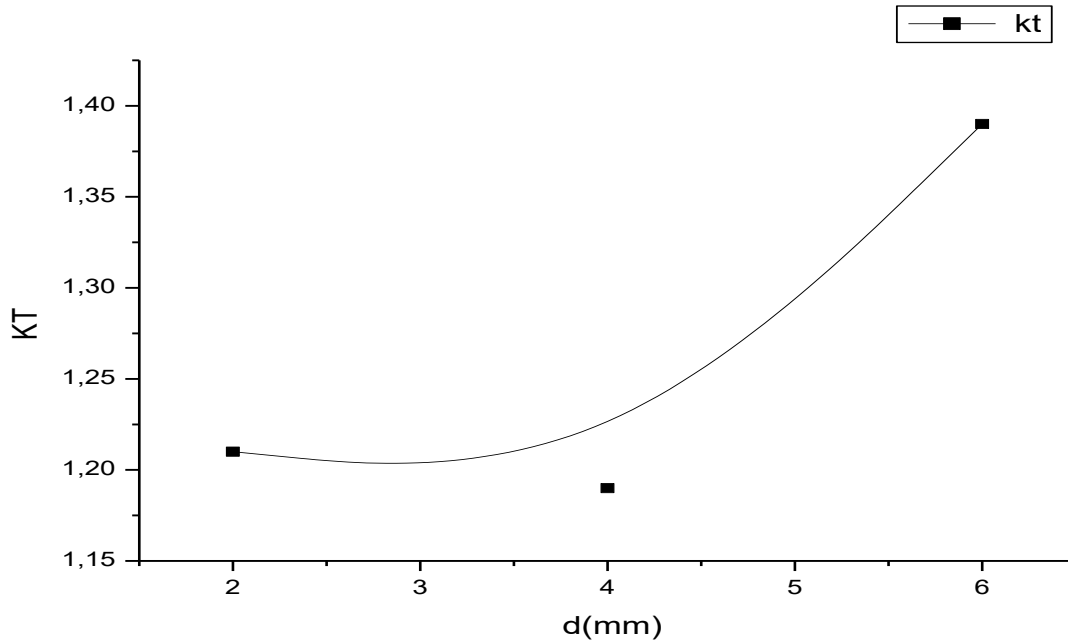
L'objectif de cette analyse est d'évaluer l'influence du diamètre de la cavité sur le facteur de concentration des contraintes K_T . À cet effet, le diamètre du trou est progressivement augmenté tandis que les autres paramètres géométriques et les conditions de chargement sont maintenus constants.

Les résultats obtenus permettent d'étudier l'évolution de K_T en fonction de la taille du défaut et de mettre en évidence l'impact du diamètre de la cavité sur la concentration des contraintes et sur le comportement mécanique du pipeline.

Les résultats obtenus montrent que le facteur de concentration des contraintes augmente avec l'augmentation du diamètre de la cavité. Cette évolution indique que les défauts de plus grande taille engendrent une perturbation plus importante du champ de contraintes dans le pipeline (figure III.20).

En effet, l'augmentation du diamètre de la cavité accentue la discontinuité géométrique de la structure, ce qui favorise l'apparition de concentrations de contraintes plus élevées au voisinage du défaut. Par conséquent, les valeurs maximales des contraintes locales augmentent plus rapidement que les contraintes nominales, entraînant ainsi une augmentation du facteur.

Ces résultats montrent que la taille de la cavité constitue un paramètre déterminant dans l'évaluation de l'intégrité structurale du pipeline. Plus le diamètre du défaut est important, plus le risque d'endommagement local et d'amorçage de fissures est élevé.



33

Figure III.20 : Variation du facteur de concentration des contraintes K_T en fonction du diamètre du trou

II.4. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude numérique du comportement mécanique des jonctions soudées fissurées à l'aide de la méthode des éléments finis implémentée dans le logiciel **ABAQUS**. Les simulations réalisées ont permis de mettre en évidence la répartition des contraintes au sein de la structure et d'identifier les zones critiques situées au voisinage des fissures et des défauts, où les concentrations de contraintes sont les plus importantes.

L'analyse paramétrique effectuée a montré que plusieurs facteurs influencent significativement le comportement mécanique de la structure, notamment la charge appliquée, le module de Young, le diamètre du pipeline, ainsi que la taille, la forme et la position des défauts. Les résultats obtenus ont également permis d'évaluer l'effet de ces paramètres sur les facteurs d'intensité de contraintes et sur la concentration locale des contraintes.

Par ailleurs, la comparaison entre les résultats numériques et les prédictions théoriques a mis en évidence une bonne concordance, ce qui confirme la pertinence du modèle numérique développé et la fiabilité des simulations réalisées.

En définitive, cette étude démontre l'intérêt de la méthode des éléments finis comme outil d'analyse et de prédiction du comportement des structures fissurées. Les résultats obtenus constituent une base utile pour l'évaluation de l'intégrité structurale des pipelines soudés et contribuent à l'amélioration de leur conception, de leur fiabilité et de leur sécurité en service.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les pipelines constituent des éléments essentiels dans le transport des fluides, et leur performance dépend directement de la qualité des jonctions soudées ainsi que de leur intégrité structurale. La présence de défauts tels que les fissures ou les cavités peut entraîner des concentrations de contraintes importantes, susceptibles de réduire la durée de vie des structures et de compromettre leur sécurité en service.

Dans ce travail, une synthèse des notions relatives aux pipelines, aux défauts de soudage et aux principes fondamentaux de la mécanique de la rupture a été présentée. Une étude numérique basée sur la méthode des éléments finis, réalisée à l'aide du logiciel **ABAQUS**, a permis d'analyser le comportement mécanique d'une jonction soudée fissurée soumise à différents chargements et configurations géométriques.

Les résultats obtenus ont montré que les contraintes maximales se localisent systématiquement au voisinage des fissures et des défauts, confirmant ainsi leur rôle critique dans l'initiation et la propagation de la rupture. L'analyse paramétrique a également mis en évidence l'influence significative de plusieurs paramètres géométriques et mécaniques sur la réponse de la structure.

En conclusion, cette étude met en évidence l'intérêt de la simulation numérique comme outil performant pour l'évaluation de l'intégrité structurale des pipelines. Elle constitue un moyen efficace pour mieux comprendre le comportement des structures fissurées et pour contribuer à l'amélioration de leur conception, de leur fiabilité et de leur sécurité industrielle.

Références Bibliographies

Références bibliographie

- [1] A. HASNAOUI, « Planification, optimisation et pilotage du transport de Carburant dans un réseau de pipeline », PhD Thesis, Directeur: Mr. BENNEKROUF Mohammed/CO-Directeur: Mr. BENACER Djamel, 2025. Consulté le: 24 février 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://thesis.essa-tlemcen.dz/handle/STDB_UNAM/652
- [2] « Pipeline - Wikipedia ». Consulté le: 8 mars 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://en.wikipedia.org/wiki/Pipeline>
- [3] « Transport de gaz : production, acheminement et distribution | Choisir.com ». Consulté le: 11 mars 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.choisir.com/energie/articles/104394/le-transport-de-gaz>
- [4] « Transport du pétrole : oléoducs et navires pétroliers ». Consulté le: 11 mars 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/transport-du-petrole>
- [5] « Condition de service des pipelines - Recherche Google ». Consulté le: 11 mars 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://www.google.com/search?sca_esv=517629e0db3c0ca4&sxsrf=ANbLn5nrVumlzghaEYQkWOEPZ47fkgWQ:1773240742204&q=Condition+de+service+des+pipelines&source=lnms&fbs=ADc_l-bpk8W4E-qsVlOvbGJcDwpnHC5OJXXTJvmMu2n9YYx-G8xzgQk24aW1N_FyIND5zVDADCs_Fwd6mWmfkY-_5enaVlb8kyVj3FSWIUdu3l6J7zSfqRU6u37PeC2EvVO49ApHZbAQaaZj8DvdlKFPmAn5wnJ_GUSeupUdLhaFjfeX1KaYZmD1gLXFR78FK48wPWwN78YmO_DGBNY3WNnqobk420RZbw&sa=X&ved=2ahUKEwjA_ajEjJiTaxUI_QIHHc0mC2YQ0pQJegQIDRAB&biw=1219&bih=592&dpr=1
- [6] « Un guide des types de joints de soudure les plus courants | Rapide Direct ». Consulté le: 11 mars 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.rapiddirect.com/fr/blog/types-of-welding-joints/>

Références bibliographies

- [7] « TALAIMohamedMonce.pdf ». Consulté le: 11 mars 2026. [En ligne]. Disponible sur:
<https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2019/09/TALAIMohamedMonce.pdf>
- [8] « Beghdaoui Ihab SGM ING 2020.pdf ». Consulté le: 12 mars 2026. [En ligne]. Disponible sur:
<http://ensmm.memoires.ensti-annaba.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/405/Beghdaoui%20Ihab%20SGM%20ING%202020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [9] T. Kebir, « Nocivité des défauts sur la durée de vie en fatigue des pipelines », 2011. doi:
10.13140/RG.2.2.22171.57128.
- [10] B. Ali et C. Tassadit, « détermination du facteur de concentration de contraintes et du facteur d'intensité de contraintes avec la méthode photoélastique et la méthode des éléments finis ».
- [11] « Caractérisation a la rupture des tôles en acier inoxydable AISI 304L ». Consulté le: 17 mars 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://dspace.ummto.dz/server/api/core/bitstreams/582ceb53-a56f-4e04-beef-ac22106fb793/content>
- [12] « Cours de Rhéologie des sols, M2 Géotechnique
Université Djilali Bounaama Khemis Meliana ».
- [13] « La ténacité ». Consulté le: 27 mars 2026. [En ligne]. Disponible sur: http://www.sgm.univ-savoie.fr/LP/carac_2010/Berlioux_Gilloux_Jacob/Cotterel-tenacite/Berlioux%20_Gilloux_Jacob__tenacite.pdf