

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ FRÈRES MENTOURI CONSTANTINE 1  
FACULTÉ DES SCIENCES DE LA TECHNOLOGIE  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE



N° d'ordre : .....  
N° de série : .....

## THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de  
DOCTORAT LMD  
Spécialité : Génie Mécanique  
Option : Construction Mécanique

***ÉTUDE DE L'ENDOMMAGEMENT PAR FISSURATION  
D'UNE CANALISATION SOUS PRESSION INTERNE***

PAR

**ZITOUNI Tidjani Ahmed**

Soutenue le ... / ... / ...

**Devant le jury :**

**Président :**

Mr. BENISSAAD Smail      Prof.      Université Frères Mentouri, Constantine 1

**Rapporteur :**

Mme. LABED Zohra      Prof.      Université Frères Mentouri, Constantine 1

**Examineurs :**

Mr. NECIB Brahim      Prof.      Université Frères Mentouri, Constantine 1

Mr. KHELIF Rabie      Prof.      Université Badji Mokhtar, Annaba

Mr. BOUCHENITFA Hichem      M.C.A      Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf, Mila

# Remerciements

Je remercie tout d'abord mon dieu ALLAH de m'avoir donné la patience et la volonté et tous ses serviteurs qui m'ont aidé et m'ont encouragé pour compléter ce travail.

Je tiens à remercier ma famille, pour leur soutien constant sans lequel ce travail n'aurait pas pu voir le jour.

Ma gratitude et ma reconnaissance s'adressent à mon directeur de thèse Professeur Madame LABED Zohra, pour la confiance qu'elle m'a accordée et de m'avoir guidé depuis le master. J'ai pu arriver grâce à son soutien scientifique et moral.

Je remercie très sincèrement Monsieur BENISSAAD Smail qui a accepté de présider mon jury de thèse.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous les membres de jury, pour l'honneur qu'ils me font d'accepter l'examen de ce manuscrit.

Mes remerciements vont enfin à tous ceux ou celles qui ont participé de près ou de loin à la réussite de ce travail, mes amis et collègues ainsi que tous les enseignants du département de Génie Mécanique.

## Dédicace

Je tiens à dédier ce travail à mes parents qui n'ont jamais cessé de croire en moi

Merci à mon père et à ma mère et que tout espoir et fierté qui peuvent éventuellement en jaillir, sont aussi et tout naturellement les leurs.

À mon frère et mes deux sœurs de m'avoir soutenu et qui étaient toujours à mes côtés.

À mes proches amis, qui m'ont poussé spécialement moralement jour après jour pour finaliser mon doctorat.

À tous ceux qui viennent de commencer leur parcours de doctorat, je dirais :

"Profitez simplement de la route."

**ZITOUNI TIDJANI AHMED**

## *Résumé*

Les fissures peuvent exister en tant que défaut de base du matériau ou être créées pendant la fabrication ou la construction. Ces fissures sont responsables de la majeure partie des défaillances qui se produisent dans des structures telles que les pipelines, qui sont soumis à des contraintes statiques ou dynamiques.

Dans ce travail, nous présentons l'étude de l'endommagement par fissuration des canalisations sous pression interne. Le code de calcul (Ansys Workbench - statique structurale) a été utilisé pour lancer de multiples simulations sur la structure des pipes, étudier les contraintes dans les pipelines, varier les conditions de fixations de charge et le matériau, proposer de nouvelles structures, initier des défauts et les étudier de point de vue dimensionnel, de l'orientation et de l'emplacement ainsi que l'endroit de l'amorçage, effectuer des analyses à court et long terme, traiter des analyses de fatigue. Les résultats numériques obtenus par ce code sont extrêmement raisonnables car ils ont été évalués en comparant des simulations basées sur des normes et des recherches afin d'établir un environnement approprié pour faire converger les résultats, Un bon accord a été établi sur la simulation avancée et qui nous a permis d'explorer deux techniques de réparation (patch composite et coquille soudé), des résultats fascinants sont enregistrés selon les trois modes d'ouverture de Paris et l'intégrale de Jim Rice.

**Mots clé :** Canalisations, PEHD, Pression, Simulation, Contraintes, Fissure semi elliptique, Réparation, Demi-coquille, Patch époxy,

## *Abstract*

Cracks can exist as a basic material defect or be created during fabrication or construction. These cracks are responsible for the majority of failures that occur in structures such as pipelines that are subjected to static or dynamic stresses.

In this work, we present the study of cracking damage of pipelines under internal pressure. The computational code (Ansys Workbench - structural statics) has been used to run multiple simulations on the pipe structure, study the stresses in the pipelines, vary the load fixing conditions and material, propose new structures, initiate defects and study them from the point of view of dimension, orientation and location as well as the location of initiation, perform short and long term analyses, handle fatigue analyses. The numerical results obtained by this code are extremely reasonable as they have been evaluated by comparing simulations based on standards and research in order to establish an appropriate environment to converge the results. A good agreement has been reached on the advanced simulation which allowed us to explore two repair techniques (composite patch and welded shell), fascinating results are recorded according to the three Paris opening modes and the Jim Rice integral.

**Key words:** Pipes, HDPE, Pressure, Simulation, Stresses, Semi-elliptical crack, Repair, Half-shell, Epoxy patch,

## ملخص

يمكن أن توجد التشققات كعييب أساسي في المادة أو تنشأ أثناء التصنيع أو البناء. هذه الشقوق هي المسؤولة عن معظم حالات الفشل التي تحدث في الهياكل مثل خطوط الألياف ، والتي تخضع لضغوط ثابتة أو ديناميكية.

في هذا العمل نقدم دراسة الأضرار الناتجة عن تشقق الألياف تحت الضغط الداخلي. تم استخدام كود الحساب (أنسيس ووركبانس للتحليل الإنشائي) لإطلاق عمليات محاكاة متعددة على هيكل الألياف ، ودراسة الإجهادات في خطوط الألياف ، تنوع الشروط الإندائية كالتثبيتات ، الأحمال و نوعية المواد ، إقتراح هياكل الجديدة ، و دء التشققات ودراستها من الجانب البعدي ، التوجيه ، التموضع وكذلك مكان البدء ، إجراء تحليلات قصيرة وطويلة المدى وتحليلات التعب العملية. النتائج العددية التي تم الحصول عليها من خلال هذا المحاكى معقولة للغاية حيث تم تقييمها من خلال مقارنة المحاكاة القائمة بناءً على المعايير والبحوث لإنشاء بيئة مناسبة و تقريب النتائج ، وقد تم الاتفاق جيداً على المحاكاة المتقدمة والمقارنة بين تقنيتين للإصلاح ( رقعة مركبة وغطاء ملحوم) ، تم تسجيل نتائج رائعة وفقاً لأنماط فتح أريس الثلاثة ونظام جيم رابيس المتكامل.

**كلمات مفتاحية:** الألياف ، البولي إيثيلين ، الضغط ، المحاكاة ، الضغوط ، الكراك شبه الإهليلجي ، الإصلاح ، نصف الغلا ، التصحيح الإيبوكسي .

## Table des matières

Remerciements.....	I
Dédicace.....	II
Résumé.....	III
Table des matières.....	VI
Liste des figures.....	X
Liste des tableaux.....	XV
Nomenclature.....	XVI
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES PIPELINES ET LES FISSURES.....</b>	<b>.....</b>
I.1 Introduction .....	5
I.2 Procédés de fabrication des pipelines .....	6
I.2.1 Les tubes soudés sous forme spirale.....	6
I.2.2 Les tubes soudés sous forme longitudinale .....	9
I.2.3 Les tubes sans soudure .....	10
I.2.4 Procédé de fabrication du tube PE (Polyéthylène) .....	11
I.3 Emplacement et dimensionnement des canalisations.....	13
I.3.1 Emplacement des canalisations .....	13
I.3.2 Dimensionnement des canalisations.....	14
I.4 Contraintes dans les pipelines.....	15
I.4.1 Pression interne de service .....	16
I.4.2 Contraintes résiduelles.....	17
I.4.3 Contraintes de flexion ou d'ovalisation.....	18
I.4.4 Contraintes secondaires .....	18
I.4.5 Contraintes thermiques .....	18
I.4.6 Contraintes longitudinales (axiales) .....	18
I.5 Les Caractéristiques des pipelines :.....	19
I.6 Les incidents des pipelines .....	20
I.7 Les Fissures .....	21
I.7.1 Fissuration de corrosion de contrainte de ph presque neutre.....	24

I.7.2 Fissuration par corrosion à haute tension de ph – SCC.....	24
I.7.3 Fissures de fatigue .....	24
I.7.4 Fissuration induite par l'hydrogène et par corrosion sous contrainte .....	25
I.7.5 Laminage .....	25
I.7.6 Les fractures en crochet.....	26
I.7.7 L'absence de fusion.....	26
I.7.8 Manque de fusion .....	26
I.7.9 Caractéristiques planaires des tubes soudés par ERW et HFI.....	26
I.7.10 Fissuration de soudure .....	26
I.7.11 Fissures aux pieds.....	27
I.7.12 Porosité .....	27
I.7.13 Manque de pénétration .....	27
I.7.14 Fissuration par corrosion sous contrainte circonférentiel.....	28
I.7.15 Fissure circonférentielle dans la soudure circulaire .....	28
I.7.15.1 Fissure à froid.....	28
I.7.15.2 Fissuration à chaud.....	28
I.7.16 Caractéristiques planaires de soudure de sangle.....	28
I.7.16.1 Fissure à froid.....	28
I.7.16.2 Manque de pénétration à la racine .....	29
I.7.16.3 Manque de fusion.....	29
CHAPITRE II : NOTIONS SUR LA MÉCANIQUE DE LA RUPTURE.....	
II.1 Introduction .....	31
II.2 Mécanique linéaire, et non-linéaire de la rupture.....	32
II.2.1 Rupture fragile.....	32
II.2.2 Rupture ductile .....	34
II.3 Les trois modes de rupture .....	35
II.4 Critères de rupture et de propagation .....	36
II.4.1 Démarche de Griffith .....	36
II.4.2 Facteur d'intensité de contraintes.....	37
II.4.3 Facteur de concentration de contraintes .....	37
II.4.4 Distribution des contraintes en fond d'entaille .....	39
II.4.5 La méthode de Cherepanov et Jim Rice.....	40
II.4.6 La méthode volumétrique.....	40
II.4.7 Démarche à deux paramètres .....	44
II.4.7.1 La détermination de la Contrainte T .....	46

II.4.7.1.1 Méthode d'extrapolation .....	46
II.4.7.1.2 La Méthode SDM .....	47
II.5 Critère de plastification .....	48
II.5.1 Critère de Tresca .....	48
II.5.2 Critère de Von mises .....	49
II.6 La Fatigue.....	50
II.6.1 Courbes de Wöhler.....	52
II.6.2 Les courbes de propagation de fissures.....	53
<b>CHAPITRE III : SIMULATIONS SUR LES PIPELINES .....</b>	
III.1 Introduction.....	56
III.2 Notions sur les éléments finis .....	56
III.3 Description du code de calcul .....	57
III.4 Les essais préliminaires .....	58
III.5 Simulation statique des plaques .....	60
III.6 Simulation dynamique explicite d'une plaque.....	67
III.7 Simulation statique sur les pipes en acier .....	69
III.8 Simulation statique sur un assemblage soudé.....	75
III.9 Simulation statique sur les pipes en PEHD.....	79
III.10 Proposition des nouvelles formes de section des pipelines .....	83
III.11 Les essais de fatigue.....	88
III.12 Initiation du défaut.....	92
<b>CHAPITRE IV : INSPECTION ET SIMULATION DE RÉPARATION.....</b>	
IV.1 Introduction.....	101
IV.2 Techniques d'identification des défauts de pipeline par CND.....	101
IV.2.1 Détection visuel .....	101
IV.2.2 Détection par ressuage.....	102
IV.2.3 Détection par ultrasons .....	102
IV.2.4 Détection radiographique.....	103
IV.2.5 Détection par raclage .....	104
IV.3 Méthodes de réparation des pipelines.....	105
IV.3.1 Réparation par patch composite.....	105
IV.3.1.1 Le choix d'adhésif.....	106
IV.3.1.2 Le choix de composite .....	106
IV.3.2 Réparation par demi coquille.....	106
IV.4 Simulation comparative.....	107

IV.4.1 Pipe avec une fissure semi elliptique.....	107
IV.4.2 Réparation par demi-coquille .....	109
IV.4.3 Réparation par patch composite.....	111
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE.....</b>	<b>113</b>
<b>RÉFÉRENCES.....</b>	<b>116</b>

## Liste des figures

Figure I.1	Projet 16 BRN-MLE SONATRACH – Algérie.....	5
Figure I.2	Fabrication des tubes soudés en spirale .....	7
Figure I.3	Relation géométrique entre le diamètre (D) du tube, l'angle d'entrée ( $\alpha$ ) et la largeur de feuillard (B).....	8
Figure I.4	a) Croquage b) Formage sous forme "U" c) Formage sous forme "O" .....	9
Figure I.5	Soudage d'un tube.....	10
Figure I.6	Expansion & Lamage.....	10
Figure I.7	Fabrication de pipeline sans soudure .....	11
Figure I.8	Matière première PE sous forme de granulés et tube PEHD .....	11
Figure I.9	Schéma du processus de production des tubes PE.....	12
Figure I.10	Système de coordonnées et contraintes principales dans un tube.....	15
Figure I.11	Définition des contraintes principales.....	15
Figure I.12	Déformation induites par la pression interne dans un tube .....	16
Figure I.13	Déformation et contrainte longitudinales dans un tuyau.....	18
Figure I.14	Caractéristiques des tubes .....	20
Figure I.15	Les principales causes des incidents (y compris des incidents importants) subis par les membres de CEPA entre 2013 et 2017 .....	21
Figure I.16	Quelques exemples de fissures et de caractéristiques de pipeline .....	23
Figure I.17	Manque de pénétration à la racine .....	29
Figure I.18	Manque de fusion.....	29
Figure II.1	Rupture fragile .....	33
Figure II.2	Rupture Trans granulaire .....	33
Figure II.3	Rupture Inter granulaire.....	34
Figure II.4	Rupture ductile.....	34
Figure II.5	Zone délimitant le voisinage d'une pointe de fissure .....	35
Figure II.6	Les 3 modes d'ouverture.....	36
Figure II.7	Paramètres géométriques des discontinuités de matière (défauts).....	38
Figure II.8	Définition de la contrainte globale, maximale et nominale.....	38
Figure II.9	Contraintes en un point près de l'extrémité d'une fissure .....	39
Figure II.10	Le diagramme représente la distribution des contraintes sous une forme bi logarithmique, la longueur du ligament et la gradation de tension étant liées.....	42
Figure II.11	Champ de Contraintes contenant le terme $T$ à l'extrémité d'une fissure.....	44
Figure II.12	Conditions limites pour le modèle circulaire.....	45
Figure II.13	Répartition des contraintes à l'extrémité de la fissure ( $\theta=0$ ).....	46
Figure II.14	Un exemple de progression des contraintes le long du ligament ( $a/t = 0,2$ ).....	47
Figure II.15	Représentation géométrique du critère de Tresca .....	49
Figure II.16	Représentation géométrique du critère de Von Mises .....	50
Figure II.17	Différents types de signaux de chargements .....	51
Figure II.18	Représentation schématique d'un chargement de fatigue .....	51
Figure II.19	Représentation schématique des sollicitations périodiques .....	52
Figure II.20	Courbe de Wöhler .....	53
Figure II.21	Longueur de fissure en fonction du nombre de cycle .....	54
Figure II.22	Courbe de propagation de fissure .....	54
Figure III.1	Exemple d'éléments finis en 1, 2 et 3 dimensions .....	57

Figure III.2 Vue isométrique de model importé (la plaque sans défaut) .....	59
Figure III.3 Procédure de la simulation sur structure statique .....	60
Figure III.4 Maillage automatique contrôlé de la plaque sans défaut.....	61
Figure III.5 Fixation et l'application de la charge .....	62
Figure III.6 Les résultats Déplacements, Déformations et les contraintes (F = 5 KN) .....	62
Figure III.7 Les résultats Déplacements, Déformations et les contraintes (F = 7.5 KN) .....	62
Figure III.8 Les résultats des Déplacements, des Déformations et des contraintes (F = 10 KN) .....	63
Figure III.9 Les résultats Déplacements, Déformations et les contraintes (F = 11.5 KN) .....	63
Figure III.10 Le récapitulatif des contraintes de Von Mises pour 4 différentes forces .....	63
Figure III.11 Les résultats d'une plaque avec un défaut circulaire $\varnothing=10$ mm (force = 7.5 KN) .....	64
Figure III.12 Récapitulatif des contraintes de V.M pour une plaque avec un défaut circulaire .....	64
Figure III.13 Les résultats d'une plaque avec un défaut elliptique verticale (25 x 10) (force = 11.5KN) .....	64
Figure III.14 Récapitulatif des contraintes de V.M pour une plaque avec un défaut elliptique verticale.....	65
Figure III.15 Les résultats d'une plaque avec un défaut elliptique horizontal (10 x 25) (force = 10KN) .....	65
Figure III.16 Récapitulatif des contraintes de V.M pour une plaque avec un défaut elliptique horizontal .....	65
Figure III.17 Les résultats d'une plaque avec un défaut en V (10 x 1.5) (force = 5KN).....	66
Figure III.18 Le récapitulatif des contraintes de V.M pour une plaque avec un défaut en V..	66
Figure III.19 Maillage linière de la plaque sans défaut .....	67
Figure III.20 Le déroulement de la simulation : les contraintes de V.M par rapport au temps .....	68
Figure III.21 La géométrie, maillage, l'endroit de fixations et l'applications de la charge....	69
Figure III.22 Affichage métrique de qualité de l'éléments de maillage .....	70
Figure III.23 Les résultats d'un pipe soumis à la traction sous pression de 8 MPa.....	70
Figure III.24 Le récapitulatif des déplacements totaux pour 4 différents pressions.....	71
Figure III.25 Récapitulatif des déformations pour 4 différentes pressions.....	71
Figure III.26 Le récapitulatif des contraintes de Von Mises pour 4 différentes pressions .....	71
Figure III.27 Le récapitulatif des erreurs structurales pour les 4 différents pressions.....	72
Figure III.28 L'ajout d'un outil de dimensionnement .....	72
Figure III.29 La géométrie, maillage, fixations et l'applications de la charge .....	72
Figure III.30 Affichage métrique de qualité de l'éléments de maillage .....	73
Figure III.31 L'indépendance du maillage.....	73
Figure III.32 Les résultats d'un pipe soumis à une pression interne de 8 MPa.....	74
Figure III.33 Le récapitulatif des déplacements totaux pour 4 différents pressions.....	74
Figure III.34 Le récapitulatif des déformations pour 4 différents pressions.....	74
Figure III.35 Le récapitulatif des contraintes de Von Mises pour 4 différents pressions.....	75
Figure III.36 Le récapitulatif des erreurs structurales pour 4 différents pressions .....	75
Figure III.37 La géométrie de pipe, cordon de soudure et l'assemblage.....	75
Figure III.38 Le joint soudé (1) le joint parfait (2) le joint défectueux .....	76
Figure III.39 Les résultats de $\sigma_{max}$ et $\sigma_{min}$ pour le modèle 1 sous pression interne 50 MPa	77
Figure III.40 Les résultats des contraintes sous différents pressions (cas de joint parfait) .....	77

Figure III.41 Les résultats des déplacements et des déformations (Modèle 1).....	77
Figure III.42 Les résultats de $\sigma_{max}$ et $\sigma_{min}$ pour le modèle 2 sous pression interne 50 MPa	78
Figure III.43 Les résultats des contraintes pour différents pressions (cas de joint défectueux)	78
.....	78
Figure III.44 Les résultats des déplacements et les déformations (Modèle 2).....	78
Figure III.45 Les contraintes longitudinales et circonférentielles dans une canalisation .....	79
Figure III.46 Conception 3D, l'application de pression .....	81
Figure III.47 L'ajout d'un outil de maillage de faces .....	81
Figure III.48 Les résultats d'un pipe en PE80 soumis à une pression interne de 2 MPa.....	81
Figure III.49 Le récapitulatif des contraintes de PE80 sous pression interne 2 MPa .....	82
Figure III.50 Les résultats d'un pipe en PE100 soumis à une pression interne de 2.5 MPa....	82
Figure III.51 Le récapitulatif des contraintes de PE100 sous pression interne 2.5 MPa .....	83
Figure III.52 Section de canalisations utilisée et valeur massique de chaque échantillon .....	84
Figure III.53 La définition de maillage tétraédrique.....	85
Figure III.54 Les résultats du PE100 idéal soumis à une pression interne 2.5 MPa.....	85
Figure III.55 Les résultats pour le cas cercle soumis à une pression de 2.5 MPa.....	86
Figure III.56 Les résultats pour le cas carrée soumis à une pression de 2.5 MPa .....	86
Figure III.57 Les résultats pour le cas triangle soumis à une pression de 2.5 MPa.....	86
Figure III.58 Le récapitulatif des déplacements pour les 4 formes.....	87
Figure III.59 Le récapitulatif des déformations pour les 4 formes .....	87
Figure III.60 Le récapitulatif des contraintes pour les 4 formes.....	88
Figure III.61 Courbe de Wöhler pour le matériel d'étude (PE-100) intégré au logiciel .....	89
Figure III.62 Les résultats de fatigue de PE100 avec section normale.....	90
Figure III.63 Sensibilité de la durée de vie pour le pipe normale d'une borne de charge <50%	90
et >150% .....	90
Figure III.64 Les résultats de fatigue PE100 avec section triangulaire .....	90
Figure III.65 Sensibilité de la durée de vie pour le pipe modifié d'une borne de charge<50%	91
et >150% .....	91
Figure III.66 Parcours de fluide .....	92
Figure III.67 Dimensions du tube et orientation des fissures .....	92
Figure III.68 Maillage tétraédrique et présentation des contours .....	93
Figure III.69 Résultat des déplacements totaux maximaux pour la fissure transversale .....	94
Figure III.70 Résultats de la déformation élastique maximale pour la fissure longitudinale (a)	94
LCR = 0,25 ; (b) LCR = 0,75.....	94
Figure III.71 Résultats de contrainte maximale pour la fissure transversale.....	95
Figure III.72 Résultats pour la fissure longitudinale (a) LCR = 0,25 ; (b) LCR = 0,75 .....	96
Figure III.73 Le maillage d'une fissure initié à la paroi extérieure du pipe .....	97
Figure III.74 Amorçage de fissure externe dans différentes zones. (a) zone I ; (b) zone II ...	97
Figure III.75 Les valeurs de FIC avec longueur de fissure. (a) zone I ; (b) zone II .....	97
Figure III.76 Le maillage d'une fissure initié à la paroi intérieure du pipe.....	98
Figure III.77 Amorçage de fissure interne dans différentes zones. (a) zone I ; (b) zone II....	98
Figure III.78 Les valeurs de FIC avec longueur de fissure . (a) zone III ; (b) zone IV .....	98
Figure IV.1 Inspection visuelle à distance [83] .....	102
Figure IV.2 Contrôle par ressuage .....	102
Figure IV.3 Inspection par ultrasons avancés [84] .....	103
Figure IV.4 Inspection par radiographie [84] .....	103
Figure IV.5 Ultra-Inspection, outil longitudinal HR [86] .....	104

Figure IV.6 Pure Technologies, Ltd, Balle intelligente pour l'inspection des pipelines [87]	105
Figure IV.7 Banks Industrial Group, Revêtements protecteurs et réparation par composites époxy [96] .....	106
Figure IV.8 Réparation par demi coquille soudée [97].....	107
Figure IV.9 Les Résultats (a) Contraintes; (b) Déplacements; (c) Déformations.....	108
Figure IV.10 Résultats du 1 <sup>er</sup> cas, pipe fissuré sans réparation .....	108
Figure IV.11 Géométrie des deux méthodes de réparation.....	109
Figure IV.12 Le maillage global Tétraèdre de structure.....	110
Figure IV.13 Résultats pour le 2 <sup>ème</sup> cas, pipe réparé avec demis coquille.....	110
Figure IV.14 Le maillage global Tétraèdre de structure.....	111
Figure IV.15 Résultats du 3 <sup>ème</sup> cas, pipe réparé avec patch composite .....	112

## Liste des tableaux

Tableau I.1 Coefficients de sécurité pour les canalisations de transport de gaz.....	14
Tableau I.2 Coefficients de sécurité pour les canalisations de transport des hydrocarbures liquides.....	14
Tableau I.3 Composition des contraintes dans une conduite.....	16
Tableau I.4 Contrainte maximale de service selon la classe d'emplacement.....	17
Tableau III.1 Les différents types des plaques réalisées.....	59
Tableau III.2 Propriétés mécanique de l'acier standard.....	61
Tableau III.3 Propriétés mécanique de l'acier 4340.....	67
Tableau III.4 Propriétés mécaniques de l'acier ISO 3183 X80M.....	69
Tableau III.5 Les dimensions de pipe et le cordon de soudure.....	76
Tableau III.6 Les propriétés de MB, ZAT, Cordon de soudure.....	76
Tableau III.7 Propriétés mécanique de PE80 et PE100.....	79
Tableau III.8 La dimension choisie selon les normes.....	80
Tableau III.9 Paramètres initiaux de dimension de fissure et toutes les possibilités.....	93
Tableau IV.1 Informations sur la fissure semi-elliptique.....	107
Tableau IV.2 Propriétés mécaniques de l'AA R610.....	109
Tableau IV.3 Propriétés mécaniques du carbone époxy.....	111

## Nomenclature

<b><i>a</i></b>	longueur de fissure	[mm]
<b>BAP</b>	Bétons Auto-Plaçant	
<b>C</b>	Factor of Safety, Facteur De Sécurité	
<b>CEPA</b>	Canadian Environmental Protection Act	
<b>D</b>	le diamètre extérieur nominal	[mm]
<b>D<sub>ext</sub></b>	Diamètre extérieur	[mm]
<b>D<sub>in</sub></b>	Diamètre intérieur	[mm]
<b>e</b>	l'épaisseur minimale du tuyau	[mm]
<b>E</b>	Module de Young	[MPa]
<b>EFW</b>	Electric Fusion Welding	
<b>E<sub>P</sub></b>	épaisseur	[mm]
<b>ERW</b>	Electric resistance welding	
<b>F</b>	le travail des forces extérieurs	[J]
<b>FIC, K<sub>I</sub>, K<sub>σ</sub></b>	Facteur d'intensité de Contrainte	[MPa mm <sup>0.5</sup> ]
<b>G</b>	Energie de Griffith	
<b>HFI</b>	High Frequency Induction	
<b>HIC</b>	Hydrogen Induced Cracking	
<b>HRR</b>	Hutchinson, Rice et Rosengren	
<b>JINT</b>	L'intégral de Jim Rice	[mJ/mm <sup>2</sup> ]
<b>K</b>	paramètre significatif, ce qui permet de déterminer l'état de contrainte et de déformation à chaque pointe de fissure	
<b>K<sub>Ic</sub></b>	Facteur d'intensité de Contrainte Critique	[MPa mm <sup>0.5</sup> ]
<b>K<sub>I max</sub>, K<sub>II max</sub>, K<sub>III max</sub></b>	Coefficients D'intensité De Contrainte maximal I, II et III	
<b>K<sub>T</sub></b>	Facteur de concentration de contraintes	
<b>LCR</b>	Largest Contour Size, le plus grand rayon de contour	
<b>LEMS</b>	la Limite D'écoulement Minimale Spécifiée	

<b>Ma</b>	le rayon majeur	[mm]
<b>MB</b>	Métal de base	
<b>MEF</b>	Méthode Eléments Finis	
<b>Mi</b>	le rayon mineur	[mm]
<b>MOP</b>	Maximum Operating Pressure	[MPa]
<b>MRS</b>	Minimum Required Strength	[MPa]
<b>N</b>	le nombre de cycles	
<b>P</b>	pression de service	[MPa]
<b>P<sub>c</sub></b>	la pression limite de sécurité de l'élément tubulaire	[MPa]
<b>pH</b>	Potentiel Hydrogène	
<b>PE</b>	Polyéthylène	
<b>PEHD</b>	Polyéthylène A Haut Densité	
<b>r, <math>\Theta</math></b>	coordonnées polaires	
<b>R</b>	le rayon moyen de paroi	[mm]
<b>R</b>	Le rapport des contraintes	
<b>r<sub>p</sub></b>	Rayon autour du fond de fissure	[mm]
<b>s<sub>a</sub></b>	L'amplitude de contrainte	[MPa]
<b>SAW</b>	Submerged Arc Welding	
<b>SCC</b>	Stress Corrosion Cracking	
<b>SDR</b>	Standard Dimension Ratio, Rapport de dimension standard	
<b>s<sub>m</sub></b>	La contrainte moyenne	[MPa]
<b>SOHIC</b>	Stress Oriented Hydrogen Induced	
<b>SSCC</b>	Sulfide Stress Corrosion Cracking	
<b>SWC</b>	Cracking Step-Wise	
<b>t</b>	l'épaisseur de paroi	[mm]
<b>T</b>	la contrainte transversale de traction-compression.	[MPa]
<b>TS</b>	Résistance ultime à la traction	[MPa]
<b>U</b>	l'énergie de déformation élastique du solide	[J]
<b>V.M</b>	Von-Mises	
<b>x</b>	Distance	[mm]
<b>x<sub>eff</sub></b>	la distance effective	[mm]

<b>YS</b>	Yield Strength	[MPa]
<b>ZAT</b>	Zone Affectée Thermiquement	
<b><math>\delta</math></b>	Déplacement	[mm]
<b><math>\delta_{xi}, \delta_{xj}</math></b>	Symboles De Kronecker	
<b><math>\epsilon</math></b>	déformation totale	[mm/mm]
<b><math>\Pi, P</math></b>	l'énergie potentielle	[J]
<b><math>\sigma</math></b>	tension de paroi, contrainte dimensionnelle	[MPa]
<b><math>\sigma_a</math></b>	contrainte alternée	[MPa]
<b><math>\sigma_e</math></b>	Contraintes extérieures, limite d'élasticité	[MPa]
<b><math>\sigma_{eff}</math></b>	la contrainte effective	[MPa]
<b><math>\sigma_g</math></b>	les contraintes globales	[MPa]
<b><math>\sigma_H</math></b>	contrainte circonférentielle	[MPa]
<b><math>\sigma_i</math></b>	Contraintes intérieures	[MPa]
<b><math>\sigma_l</math></b>	contrainte longitudinale	[MPa]
<b><math>\sigma_{max}, S_{max}</math></b>	la contrainte maximale	[MPa]
<b><math>\sigma_{nom}, S_{min}</math></b>	la contrainte nominale	[MPa]
<b><math>\sigma_r</math></b>	la contrainte radiale	[MPa]
<b><math>\sigma_t</math></b>	la contrainte transversale supportée par le métal	[MPa]
<b><math>\tau</math></b>	Contrainte de cisaillement	
<b><math>\chi</math></b>	Gradient relatif de contrainte	[mm <sup>-1</sup> ]

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le sujet de cette thèse de doctorat est l'étude des dommages causés aux pipelines par la fissuration sous pression interne. Il est déterminé par le fait que ce phénomène est la phase la plus "critique" de la défaillance d'un pipeline fonctionnel.

Les pipelines sont toujours considérés comme le moyen le plus fiable de transfert des fluides, ces derniers peuvent être construits en acier, en aluminium, en polyéthylène ou en d'autres matériaux, selon la nature de la substance transportée. Lors de l'exploitation de ces canalisations, sous des sollicitations mécaniques et thermiques, naturelles ou occasionnelles, European Gas Pipeline Incident Group a réalisé de nouvelles études sur 1060 cas de rupture dans les canalisations selon leurs rapports [1], les agressions externes représente 49.6 % des causes, en deuxième place les défauts de fabrication et l'installation 16.5 %, les défauts de corrosion 15.3 %, les glissements de terrain 7.3%, ouverture de vannes par erreur 4.6%, et autres avec 6.7% . Ces causes influent sur la structure des pipes, provoquant des fissures et même des ruptures, la majorité des recherches actuelles sont axées sur le développement de nouveaux pipelines plus efficaces, et pour permettre une meilleure structure, les différentes caractéristiques géométriques ou mécaniques doivent être correctement dimensionnées. Plusieurs efforts dans le domaine de la conception et de la modélisation des pipelines sont initiés dans ce contexte afin de prolonger leur durée de vie en fatigue. La prédiction de cette dernière est un problème industriel critique. Ce phénomène est provoqué par des sollicitations cycliques d'amplitudes inférieures à la limite élastique du matériau. Les approches et technologies numériques permettent d'optimiser la conception, en augmentant la résistance structurelle tout en minimisant l'encombrement. En d'autres termes, la qualité des canalisations à haut débit est déterminée par la sélection d'un mélange optimal de qualités de canalisations, notamment la résistance et la ténacité.

Plus de 90 % des défaillances en service sont dues au développement de fractures par fatigue et à la rupture due à des concentrations de contraintes. La présence d'une discontinuité géométrique, telle qu'une entaille, entraîne une détérioration de la résistance à la rupture de la conduite. Elle diminue la section transversale de la conduite, la rendant plus vulnérable aux pressions de service et aux contraintes induites par les mouvements du sol; l'action d'amplification des contraintes locales amplifie alors de façon exponentielle la nocivité du défaut.

Les méthodes de la mécanique des fractures ayant été adoptées dans l'analyse du contrôle des fractures des pipelines, dont l'industrie des pipelines a besoin que de mesure simple de la résistance à la propagation des fractures pour les fissures à croissance dynamique, et a découvert que le CVN (énergie d'impact Charpy Vee-Notched) ou le DWTT (énergie d'essai de déchirure par chute de poids) peuvent être utilisés à cette fin. Le facteur d'intensité de la contrainte  $K$ , le taux de libération de l'énergie élastique  $G$ , l'intégrale  $J$ , le déplacement d'ouverture de la pointe de la fissure (CTOD) et l'angle d'ouverture de la pointe de la fissure (CTOA) sont quelques-uns des paramètres de ténacité standard utilisée en mécanique des fractures. Ce sont des mesures typiques de la résistance à la rupture réelle pour les fissures quasi-statiques.

L'objectif de notre travail consiste à présenter une suite des études numériques utilisant Ansys Workbench, d'une part faire des tests sur multiples structures des pipes sous chargement statique, variant plusieurs paramètres dans le but de donner des explications sur la distribution des contraintes au niveau des parois, d'autre part faire des analyses de fatigues jusqu'à l'apparition de défaut manipuler ce dernier et simuler différents types des réparations. Avec cette introduction générale le présent travail de thèse comprend quatre chapitres avec une conclusion générale. La thèse est structurée comme suit :

**Le chapitre I** présente des généralités sur les pipes, les types, les procédés de fabrication, les emplacements et dimensionnements des canalisations et les différentes contraintes dans ces derniers. On a mentionné les incidents des pipelines et spécialement les fissures pour identifier leurs sources, leurs caractéristiques, les principales causes du développement et quelques exemples des fissures dans les pipelines.

**Le chapitre II** présente l'état de l'art sur la mécanique linéaire de la rupture, les trois modes de rupture, les critères de rupture et de propagation donnent les démarches à un et à deux paramètres, définir les critères de plastifications (Tresca et Von Mises), ensuite comment effectuer les essais de fatigue et interpréter les résultats. Enfin présenter des courbes importantes pour l'estimation de la durée et de vie et le mode de propagation de fissure.

**Le chapitre III** est consacré à l'étude numériques préliminaire sur plusieurs prototypes de plaques dans le but de comprendre l'effet de discontinuité de la matière et effectuer des

simulations sur des pipes en acier et en PEHD varier plusieurs paramètres et propriétés pour étudier les différentes contraintes, les déplacements et les déformations dans les pipes afin de proposer de nouvelles formes de sections des tubes. Faire des analyses de fatigues, initier des fissures et les étudier, variant des paramètres tels que les dimensions, l'orientation du défaut et l'endroit d'initiation.

**Le chapitre IV** s'articule sur les principales méthodes d'inspection des pipelines, à savoir l'inspection visuelle, ressuage, ultrasons, radiographie et par outils intelligents, comme nous avons présenté les méthodes de réparation en prenant en considération les deux plus importantes réparations, par Patch composite et par demi-coquille soudé, tout en faisant une comparaison de ces dernières par une simulation comparative avancée et ceux afin d'évaluer le meilleur procédé.

Une **Conclusion générale** met l'accent sur les résultats les plus importants, obtenus dans cette thèse.

# **CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES PIPELINES ET LES FISSURES**

## I.1 Introduction

Les pipelines sont des moyens essentiels pour l'énorme transfert de fluides (liquides, liquéfiés ou gazeux) sur de longues et courtes distances. Ils allient débit exceptionnel et discrétion, prouvant année après année qu'ils sont le moyen le plus sûr et le plus écologique de transporter les hydrocarbures notamment [2], depuis de nombreuses décennies. Le transport par pipeline a pris une importance croissante en réponse à une croissance continue des quantités de produits utilisés et consommés, soulignant l'intérêt pour les énormes modes de transport [3,4].

Les pipelines, contrairement à d'autres modes de transport, fournissent au client final un approvisionnement en gaz naturel plus constant, plus fiable et plus riche en énergie. L'avantage du transport par pipeline est qu'il est bien établi, rentable et efficace. Sa technologie est largement reconnue et elle est facilement évolutive. Le coût en capital d'un projet de pipeline dépend principalement de son diamètre et de sa longueur, mais d'autres considérations telles que la géographie et la topographie sont également importantes. Les dépenses courantes et l'autoconsommation des articles sont comparativement plus faibles et prévisibles, tout comme la quantité à transporter, la relation offre-demande, la pression opérationnelle, etc. La durée de vie projetée de la réserve et les différents facteurs de danger sont tous deux limités. Ces limitations sont plus strictes en mer que sur terre [5].



Figure I.1 Projet 16 BRN-MLE SONATRACH – Algérie

## I.2 Procédés de fabrication des pipelines

Les tubes peuvent être fabriqués à partir de divers matériaux, notamment de la fonte, des polymères, des résines renforcées, etc. La majorité des pipelines sont composés d'acier, mais le plastique et l'aluminium sont parfois utilisés pour les réseaux de distribution de gaz naturel. Les tuyaux en acier sont construits en soudant ensemble de petites longueurs de tuyaux (20 m) et en les recouvrant d'une substance isolante (polyéthylène, polypropylène, etc.) pour les protéger de la corrosion. À l'intérieur ou à l'extérieur, ils peuvent être revêtus pour améliorer l'écoulement du fluide transporté ou pour éviter la corrosion. Nous découvrons :

- Les tubes soudés sous la forme en spirale.
- Les tubes soudés sous forme longitudinale.
- Les tubes formés sans soudure [6]

### I.2.1 Les tubes soudés sous forme spirale

La ligne de fabrication de tubes soudés en spirale est principalement utilisée pour fabriquer des tubes en acier spiralés, ces derniers soudés à la production déroulent et nivellent les bobines d'acier. Ils sont ensuite introduits dans la machine de façonnage sous un certain angle. La machine à rouler à trois rouleaux forme les tubes continus, qui sont complétés par un angle spécifique. Un équipement de soudage à l'arc submergé est utilisé pour effectuer un soudage en spirale continu. La ligne de production de tubes soudés en spirale, qui convient à la fabrication de tubes en acier à joint, est largement utilisée dans différents fluides de transport tels que le gaz naturel, le pétrole et l'eau, ainsi que dans la construction de tubes structurels et de tubes pour pilotis. La méthode de fabrication de tubes soudés est une ligne de production continue, avec un équipement pouvant fabriquer des tuyaux en acier soudés en spirale qui répondent aux normes de qualité API .

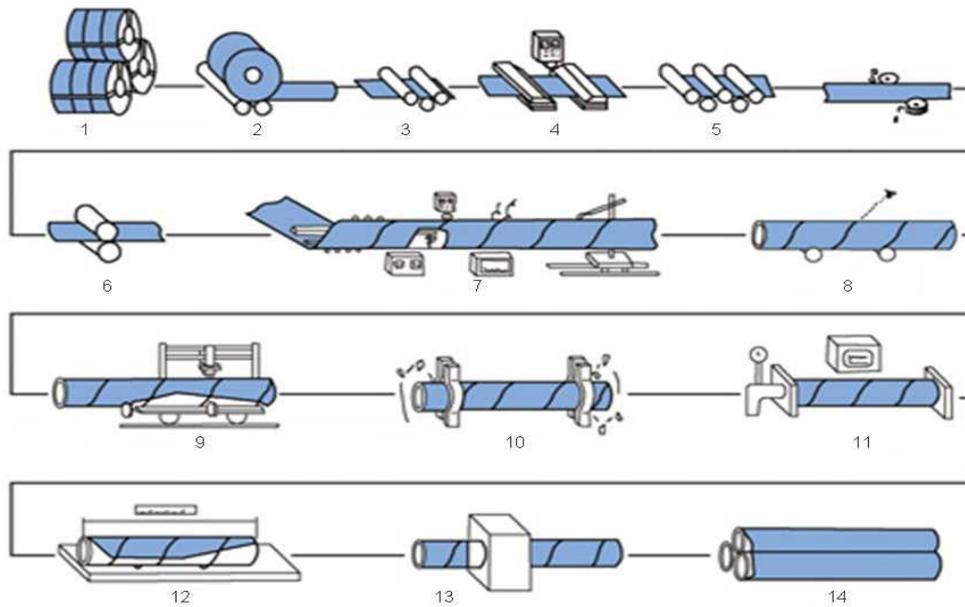


Figure I.2 Fabrication des tubes soudés en spirale

**1. Inspection des matières premières :** Les bobines d'acier, le fil à souder et le flux sont les ingrédients de base, faite des tests physiques et chimiques.

**2. Déroulage :** Le soudage à l'arc submergé à fil simple ou double est utilisé pour le soudage bout à bout de bandes d'acier, et lorsque les bobines sont produites à partir de tubes en acier, le soudage à l'arc submergé automatisé est utilisé pour compenser le soudage.

**3. Nivellement rugueux :** La bande d'acier est nivelée, coupée, bordée, nettoyée en surface et pré-serrée avant le formage.

**4. Fin de coupe et soudage bout à bout :** Le manomètre à contact électrique régule la pression dans les cylindres de compression des deux côtés du convoyeur pour assurer le bon fonctionnement de la bande.

**5. Nivellement de précision :** Formage à rouleaux avec contrôle externe ou interne.

**6. Livraison :** Le contrôleur d'espace de soudage garantit que la fente de soudage répond aux spécifications de soudage, et que le diamètre du tuyau, la quantité de désalignement et l'espace de soudage sont toutes strictement contrôlés.

**7. En formant intérieur et extérieur de soudage :** Les soudures intérieures et extérieures sont entièrement réalisées à l'aide d'un soudage à l'arc submergé à fil simple ou double avec un soudeur Lincoln Electric des États-Unis, ce qui permet d'obtenir une spécification de soudure solide.

**8. Soudure Slag nettoyage & inspection générale :** Pour obtenir une couverture de 100 pour cent des tests non destructifs de toutes les soudures en spirale, toutes les soudures soudées ont été examinées à l'aide d'un testeur de défauts automatisé à ultrasons en ligne continu. S'il y a des défauts, ils seront détectés et peints automatiquement. Pour éliminer les défauts en temps opportun, le personnel de production modifiera les paramètres du processus à tout moment.

**9. Couper :** le tuyau d'acier en morceaux séparés avec une coupe-plasma à air.

**10. Chanfreinage :** Après la découpe d'un seul tube en acier, un système d'inspection rigoureuse est effectué sur les trois premiers tubes de chaque lot pour examiner les caractéristiques mécaniques, la composition chimique, l'état de fusion, la qualité de surface des tubes en acier et des essais non destructifs avant de pouvoir commencer la fabrication.

**11. Essais hydrostatiques :** Après les tests manuels par ultrasons et rayons X, il y a une marque de détection de défaut d'onde sonore continue sur la soudure., s'il y a un défaut, il doit subir à nouveau des tests non destructifs jusqu'à ce qu'il soit déterminé que le problème a été corrigé.

**12. Auto-Longueur de mesure et de pesage :** Les soudures bout à bout et les intersections avec des soudures en spirale de bandes d'acier sont inspectées à l'aide d'un film télévisé ou radiographique.

**13. Revêtement et marquage :** Chaque tube serré en diagonale doit être testé hydrostatiquement. Le dispositif de contrôle de la pression hydraulique des tuyaux en acier contrôle étroitement la pression et le temps d'épreuve. Les paramètres de test sont imprimés et enregistrés automatiquement.

**14. Stockage :** La verticalité de la face d'extrémité, l'angle de la rainure et le bord émoussé sont soigneusement réglés lors de l'usinage à chaîne fine.

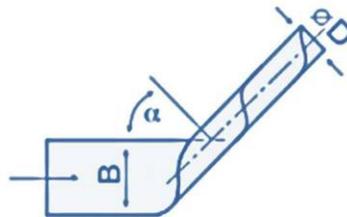


Figure I.3 Relation géométrique entre le diamètre (D) du tube, l'angle d'entrée ( $\alpha$ ) et la largeur de feuillard (B)

Le tube spiralé est produit par l'inclinaison de l'angle d'introduction de la bande, qui est calculé à l'aide de la relation suivante.

$$D = \frac{B}{\pi \sin \alpha} \quad (I.1)$$

Où :

D : le diamètre du tube ;

B : la largeur de feuillard ;

$\alpha$  : l'angle d'entrée.

## I.2.2 Les tubes soudés sous forme longitudinale

La technique de fabrication des tubes soudés sous forme longitudinale est typiquement basée sur le formage à froid de la tôle selon le procédé "UOE", et elle est limitée aux tubes de diamètres supérieurs à 406,4 mm (16"). Cette méthode consiste en trois étapes de formage :

**Croquage et formage :** La plaque sera pliée à la fin ; le but de cette opération est de faciliter le processus de bombage en réalisant les étapes suivantes ; à partir de là, la tôle ou la plaque unitaire est pliée dans deux types de presses : la première donne à la plaque une forme " U ", et la seconde lui donne une forme " O ". L'effet de chaque opération a été étudié par [9]

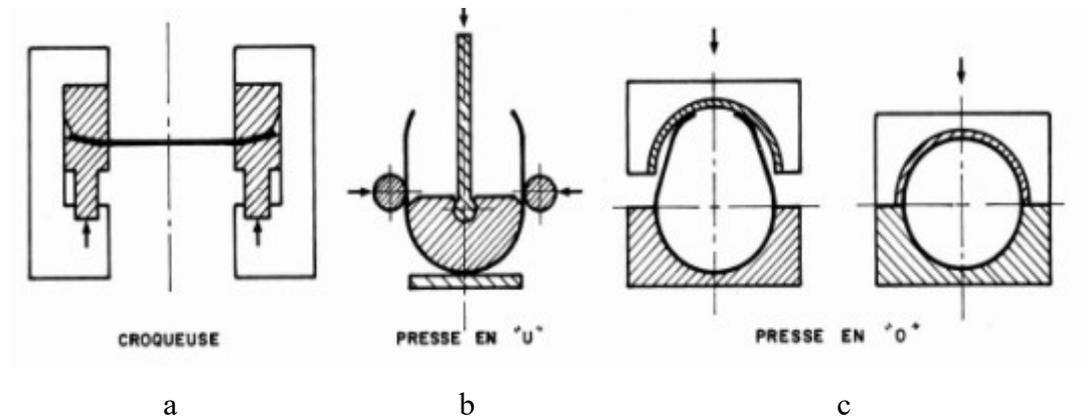


Figure I.4 a) Croquage b) Formage sous forme "U" c) Formage sous forme "O"

**Le soudage du tube :** Le soudage par flux d'air submergé (SAW) est utilisé ici. Deux travaux de soudure sont effectués, l'un à l'extérieur et l'autre d'un demi-tour vers l'avant à l'intérieur des tubes au niveau de l'accostage du rebord.



Figure I.5 Soudage d'un tube

**Expansion et calibrage :** L'objectif principal de cette opération est de produire des tubes avec des sections précisément circulaires dont le diamètre augmente de 1 à 1,5 pour cent (Figure I.6).

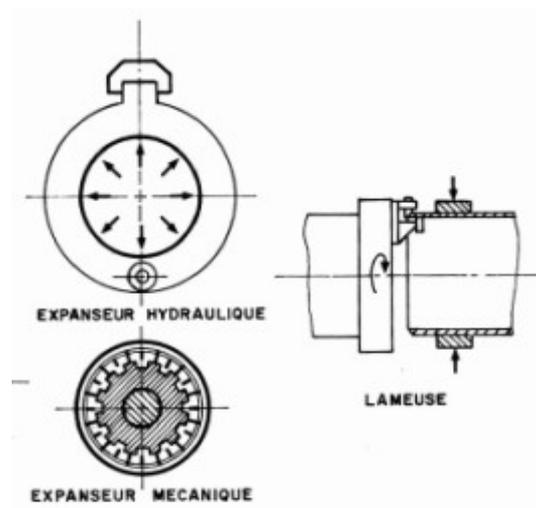


Figure I.6 Expansion & Lamage [10]

### I.2.3 Les tubes sans soudure

Les tubes sans soudure, qui sont des produits tubulaires en acier forgé sans ligne de soudure, seront fabriqués à partir d'une ébauche cylindrique en utilisant un travail de métal à chaud (laminage) pour obtenir la forme, les dimensions et les caractéristiques souhaitées. Ils ont souvent des diamètres minuscules (inférieurs à 450 mm). Le processus de fabrication de ce type de tube est basé sur la fourniture du métal de manière à ce qu'il soit confiné entre la matrice et l'aiguille. En conséquence, un tube monobloc sans soudure est obtenu. Il existe une variante de filature à nez d'aiguille dans laquelle l'aiguille est fixée.

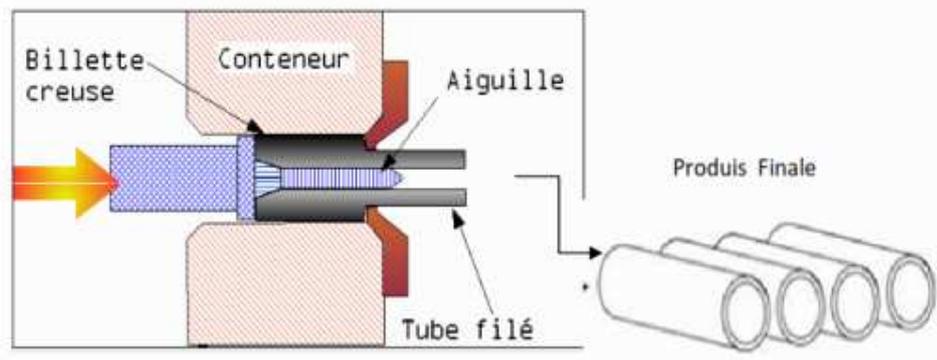


Figure I.7 Fabrication de pipeline sans soudure

### I.2.4 Procédé de fabrication du tube PE (Polyéthylène)

La matière première PE est principalement constituée de granulés noirs (Figure I.8), avec une bordure colorée indiquant l'application du tube. Les tuyaux bleus transportent l'eau potable, tandis que les tuyaux jaunes transportent le gaz naturel. Un aspirateur ramasse les grains et les dépose dans une trémie.



Figure I.8 Matière première PE sous forme de granulés et tube PEHD [11]

Les tuyaux en polyéthylène sont recommandés pour les raisons suivantes :

- Flexibilité : rayon de courbure important, ce qui permet d'éliminer beaucoup de raccords
- Résistance aux secousses Sismiques
- Insensibilité aux courants vagabonds
- Très avantageux pour le forage horizontal dirigé
- Faibles pertes de charge :
  - Une rugosité hydraulique de 0.01 pour les tuyaux d'un diamètre nominale inférieure ou égale à 200 mm

- Une rugosité hydraulique de 0.05 pour les tuyaux d'un diamètre nominale plus à 200 mm
- Alimentarité
- Résistance à la corrosion
- Etanchéité et résistance aux coups de bélier
- Légèreté et facilité de mise en œuvre grâce aux couronnes
- Rareté ou absence des fuites [12]

Le processus de fabrication commence par l'introduction des matières premières dans la chaîne de production illustrée dans la figure I.9.

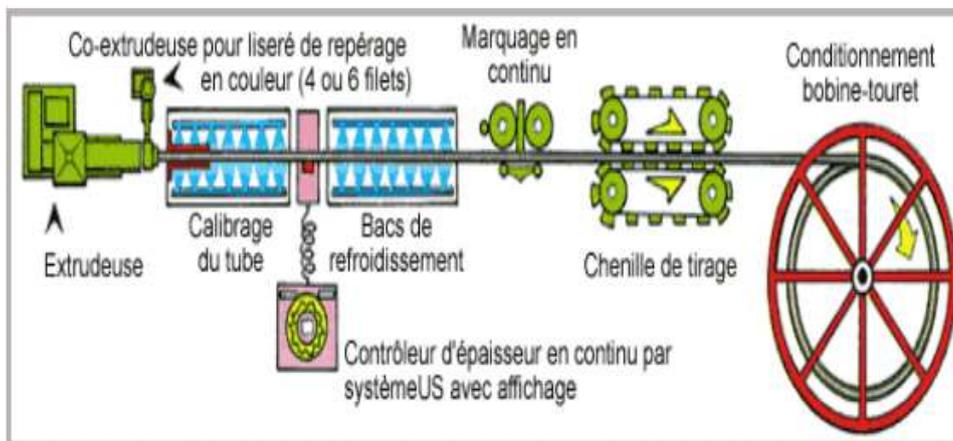


Figure I.9 Schéma du processus de production des tubes PE [11]

L'extrusion est utilisée pour créer un tuyau en PE. Le granulé sera chauffé par l'extrudeuse, qui utilisera un système de résistances et une ou plusieurs vis pour le transformer en pâte à 230°C et le pousser à travers un outil de mise en forme. La languette est passée à travers une filière, qui détermine le diamètre et l'épaisseur du tube, et une co-extrudeuse crée six bordures de couleur bleue sur le tube (transport d'eau potable). Le tube extrudé est refroidi dans une cuve de refroidissement après passage dans un calibre. Après refroidissement, un tube est formé, qui est marqué et scié à la longueur appropriée. Un extracteur maintient le tube en mouvement le long de la chaîne, tandis qu'une bobine (pour les plus petits diamètres) enroule les tubes dans une couronne [13].

### I.3 Emplacement et dimensionnement des canalisations

Une grande partie des normes de sécurité algériennes est consacrée à la construction et à l'exploitation des canalisations de transport d'hydrocarbures, à savoir les règles de sécurité pour les canalisations de transport de gaz combustible [14] et celles pour les canalisations de transport d'hydrocarbures liquides [15]. Selon le degré d'urbanisation des régions, ils désignent typiquement quatre classes de canalisations et trois classes de tubes formant ces canalisations pour le premier type, où les règles de construction des ouvrages changent en fonction de la catégorie des lieux où ils se situent, ainsi que les coefficients de sécurité croissants avec l'urbanisation.

Les emplacements de ces canalisations sont divisés en 04 zones pour le transport de gaz inflammables et 03 zones pour le transfert d'hydrocarbures liquides. Les deux types de canalisations diffèrent pour les zones I et II, mais sont comparables pour les zones III et IV [16].

#### I.3.1 Emplacement des canalisations

-Transport de gaz combustibles

- **Zone I** : Les régions urbaines fortement habitées sont incluses.
- **Zone Ia** : Comprend les zones urbaines de moyenne densité (par hectare 40), ainsi que les régions rurales ou désertiques du domaine public national, ainsi que les infrastructures auxiliaires telles que les terminaux de départ et d'arrivée et les compresseurs.

-Transport des hydrocarbures liquides

- **Zone I** : Sont inclus les emplacements en zone urbaine ou à proximité de locaux isolés fréquentés par le public, les établissements présentant un risque d'incendie ou d'explosion et les bâtiments d'habitation. Il couvre également le domaine public et des portions du pipeline à l'intérieur des installations pétrolières.

-Transport de gaz combustibles et hydrocarbures liquides

- **Zone II** : Les emplacements dans les régions rurales, les pâturages, les terres cultivées, les bois et les approches des zones bâties sont tous inclus.
- **Zone III** : Les emplacements dans les zones arides sont inclus.

### I.3.2 Dimensionnement des canalisations

La principale contrainte sur le pipeline pendant les essais hydrostatiques, la mise en service et l'exploitation donnée par :

$$P_c = \frac{2e\sigma_t}{D} \quad (I.2)$$

Où  $P_c$  est la pression limite de sécurité de l'élément tubulaire en MPa, reliée à l'épaisseur minimale du tuyau  $e$  en mm ;  $D$  est le diamètre extérieur nominal en mm ; et  $\sigma_t$  est la contrainte transversale ou circonférentielle maximale supportée par le métal en MPa.

Cette pression maximale admissible en service est telle que la contrainte transversale soit limitée par rapport à la limite d'élasticité  $\sigma_{0.2}$  exprimée en MPa et à la contrainte de rupture  $\sigma_R$  également exprimée en MPa, aux valeurs définies dans les tableaux suivants.

Tableau I.1 Coefficients de sécurité pour les canalisations de transport de gaz

Emplacements	Enterrée ou Aérienne	Enterrée	Surface
	$\sigma_t / \sigma_{0.2}$	$\sigma_t / \sigma_R$	$\sigma_t / \sigma_R$
Zone I	0.5	0.3	0.3
Zone Ia	0.6	0.36	0.36
Zone II	0.73	0.55	0.44
Zone III	0.8	0.6	0.55

Tableau I.2 Coefficients de sécurité pour les canalisations de transport des hydrocarbures liquides

Emplacements	Enterrée ou à l'aire libre	Enterrée	à l'aire libre
	$\sigma_t / \sigma_{0.2}$	$\sigma_t / \sigma_R$	$\sigma_t / \sigma_R$
Zone I	0.67	0.47	0.44
Zone II	0.75	0.59	0.44
Zone III	0.82	0.65	0.65

### I.4 Contraintes dans les pipelines

Une contrainte de pipeline est définie comme le rapport d'une charge par unité de surface appliquée sur le mur et causée par : le contenu sous pression, le mouvement du sol et/ou les procédés de fabrication conférant des contraintes résiduelles [17].

Trois contraintes principales sont exprimées dans un système de coordonnées local qui coïncide avec le repère cylindrique du pipeline, (figure I.10) : la contrainte  $\sigma_x$ , agissant dans x une direction parallèle à l'axe du baril du tuyau, ou contrainte longitudinale, la contrainte  $\sigma_y = \sigma_\theta$ , agissant dans la direction ortho radiale, ou contrainte circonférentielle ou tangentielle et la contrainte  $\sigma_r$ , agissant dans la direction radiale et variant dans l'épaisseur de la paroi du tube, ou contrainte radiale [18,19].

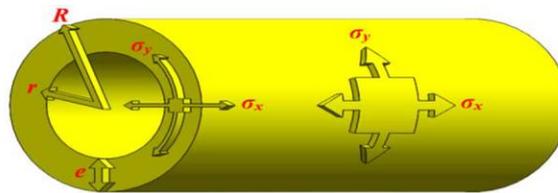


Figure I.10 Système de coordonnées et contraintes principales dans un tube

La répartition des contraintes est linéaire sur l'épaisseur du tuyau. Les figures I.10 et I.11 montrent les valeurs extrêmes des contraintes mesurées sur les fibres intérieures  $\sigma_i$  et extérieures  $\sigma_e$  de la conduite en fonction de la position angulaire [18].

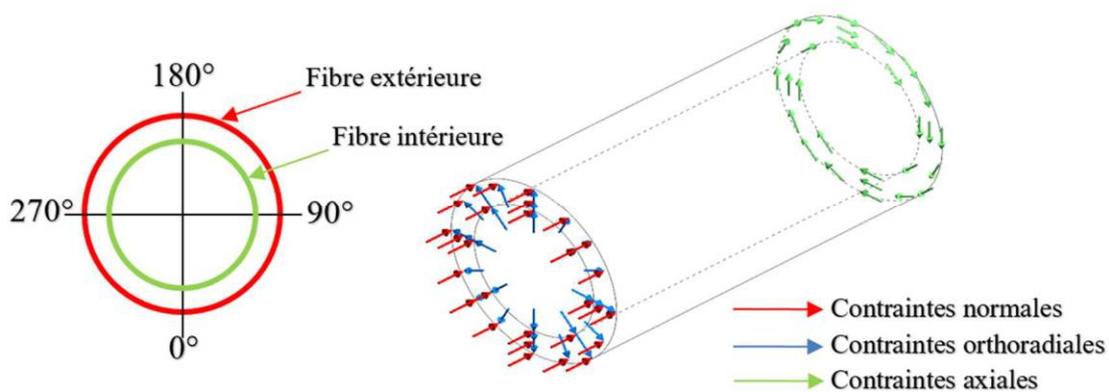


Figure I.11 Définition des contraintes principales

Selon l'hypothèse des coques minces, lorsque le rapport entre le rayon moyen ( $R$ ) du tube et l'épaisseur ( $t$ ) de sa paroi est supérieur à 10 ( $R/t > 10$ ), la contrainte radiale  $\sigma_r$  est communément négligeable. Les contraintes  $\sigma_x$  et  $\sigma_y$ , pratiquement uniformes dans toute l'épaisseur de la paroi, sont la somme de contraintes provenant de plusieurs sources, telles que regroupées dans le tableau I.3 [18,17]:

Tableau I.3 Composition des contraintes dans une conduite[18,17]

Composantes	Contrainte		Sources
	Circonférentielle	longitudinale	
Pression interne	X	X	Pression de service
Contrainte résiduelle	X	X	Procédés de fabrication
Contrainte de flexion	X		Ovalisation de la conduite
Contrainte locale	X	X	Concentrateurs des contraintes
Contrainte secondaire	X	X	Mouvement du sol
Contrainte thermique	X	X	Gradient de température

### I.4.1 Pression interne de service

Sous pression interne de service, le tuyau subit une expansion radiale uniforme induisant une contrainte circonférentielle significative dans la paroi, (figure I.12), ce qui fait d'elle la principale source de contraintes ; il est donc courant, dans l'industrie, d'exprimer la contrainte dans la paroi de la conduite en fonction de la contrainte circonférentielle, telle que calculée par la formule de Barlow, (équation I.3), en pourcentage de la limite d'écoulement minimale spécifiée (LEMS) du matériau utilisé dans la fabrication de la conduite [20].

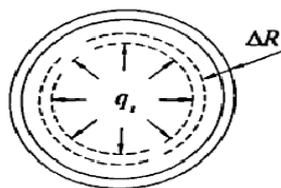


Figure I.12 Déformation induites par la pression interne dans un tube [19]

$$\sigma_H = \frac{P \cdot D}{2t} \quad (I.3)$$

Où :

$\sigma_H$  : contrainte circonférentielle,

P : pression de service,

D : diamètre de la conduite,

t : épaisseur de la paroi.

Le (tableau I.4) montre la contrainte circonférentielle maximale autorisée recommandée par la norme canadienne CSA Z662 en fonction de l'emplacement du pipeline et de la densité des habitations. Cette limitation est limitée à 72 pour cent de la limite de débit minimale définie aux États-Unis, et clairement dans d'autres pays (LEMS) [20, 21,22].

Tableau I.4 Contrainte maximale de service selon la classe d'emplacement [20]

Classe d'emplacement	Description	Contrainte maximale de service (% de la LEMS)			
		Gaz naturel	Gaz acide	HPV <sup>2</sup>	BPV <sup>3</sup>
1	< 10 habitations	80	72	80	80
2	10 - 46 habitations ou zones désignées	72	60	64	80
3	> 46 habitations	56	50	64	80
4	immeubles de 4 étages ou plus	44	40	64	80

### I.4.2 Contraintes résiduelles

Les procédés de fabrication et les coudes produits par formage créent des zones de tension et d'autres de compression dans l'épaisseur du tube. Ceci provoque une inhomogénéité de déformation dépendant de l'épaisseur et de l'existence de contraintes résiduelles dont les plus élevées peuvent approcher 25 % de la limite d'écoulement dans la conduite terminée.

### I.4.3 Contraintes de flexion ou d'ovalisation

La pression interne a tendance à arrondir un tuyau ovale sous l'influence de son propre poids ou de charges externes, créant une contrainte de flexion dans l'épaisseur de la paroi et augmentant la tension circonférentielle à la surface extérieure du tuyau.

### I.4.4 Contraintes secondaires

Ces contraintes, qui émergent le long du périmètre ou le long de l'axe longitudinal, sont généralement provoquées par des mouvements de terrain (glissement de terrain ou tassement) ou par le poids du remblai. Leur niveau est pour la plupart inconnu et impossible à prévoir. Elle peut cependant être suffisamment élevée pour provoquer l'effondrement de la canalisation en fonction du mouvement du sol.

### I.4.5 Contraintes thermiques

Les changements de température dans la paroi du tuyau peuvent entraîner des contraintes de flexion circonférentielles localisées. Ils sont cependant sans importance car la paroi est suffisamment mince pour que les variations de température entre les surfaces extérieure et intérieure soient négligeables.

### I.4.6 Contraintes longitudinales (axiales)

Les canalisations en exploitation sont soumises à des contraintes axiales en plus des contraintes circonférentielles (voir tableau I.3), qui peuvent atteindre 30 pour cent de la contrainte circonférentielle (lorsque la canalisation est bloquée parce qu'elle est enterrée ou suspendue) ou 50 pour cent (lorsque le tuyau est libre) [19, 17, 23].

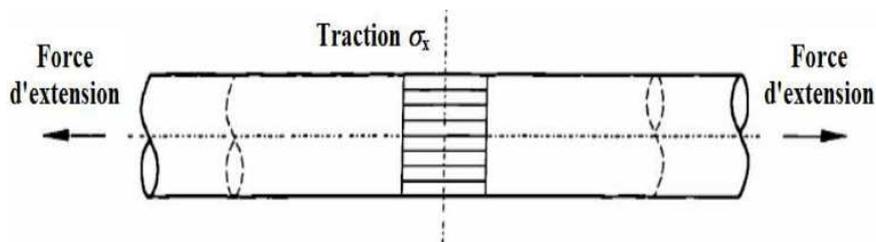


Figure I.13 Déformation et contrainte longitudinales dans un tuyau [19]

$$\sigma_l = \sigma_x = \frac{P \cdot D}{4t} \quad (I.4)$$

Où :

$\sigma_l$  : contrainte longitudinale,

P : pression de service,

D : diamètre de la conduite,

t : épaisseur de la paroi.

### I.5 Les Caractéristiques des pipelines :

On désigne par « pipelines », les oléoducs ou gazoducs qui sont des canalisations de diamètres pouvant aller de 1 à 42 pouces (1pouce = 2.54 centimètres) [24]. Celles-ci sont le plus souvent en acier, constituées d'éléments linéaires soudés bout en bout et revêtus, dans lesquelles transitent, sous des pressions relativement élevées, des produits pétroliers, liquides ou gazeux. Ces produits pétroliers sont propulsés par des installations de pompage ou de compression. Elles servent à transporter un produit entre deux points donnés et elles sont construites avec des matériaux et des techniques qui apportent la solution la plus économique au problème posé.

Les qualités physiques et les conditions d'acheminement du produit déterminent le type et le nom d'une canalisation.

- Gazoduc, lorsqu'on parle de gaz naturel
- Oléoduc pour le pétrole
- Aqueduc pour l'eau industrielle
- Saumoduc pour l'eau salée
- Les termes oxyduc ou oxygènoduc sont employés ce qui concerne l'oxygène
- hydrogènoduc pour l'hydrogène

En général, le suffixe d'origine latine « ductus », dérivé de « duere », qui signifie « conduire », permet de construire le nom français d'un pipeline personnalisé pour la livraison d'un certain type de produit. Les conduites d'eau, qui étaient auparavant en maçonnerie ou en fonte grise (métallurgie) à graphite lamellaire, sont désormais en fonte grise (métallurgie) à graphite sphéroïdal (également appelée fonte ductile), polychlorure de vinyle, polyéthylène haute densité (PEHD), mais aussi en béton armé ou en acier [25].

Cela dites, les caractéristiques majeures des canalisations (diamètres, épaisseur, type d'acier, normes de construction, températures et pression de fonctionnement, etc.) sont contrôlées par un ensemble complexe de lois et font l'objet de nombreux calculs et compromis économiques.

Comme le montre la (figure I.14), les caractéristiques d'une canalisation sont déterminées en fonction du débit des produits à transporter, de leur viscosité, de leur densité et des conditions de fonctionnement, afin d'obtenir un compromis économique entre la puissance des stations de pompage ou de compression à installer et l'investissement total à réaliser [26].

Lorsque des considérations techniques et économiques ont permis de fixer le diamètre ainsi que la pression de service, l'épaisseur est déterminée en fonction de cette pression de service ou des circonstances de pose qui imposent parfois des caractéristiques dimensionnelles plus sévères.

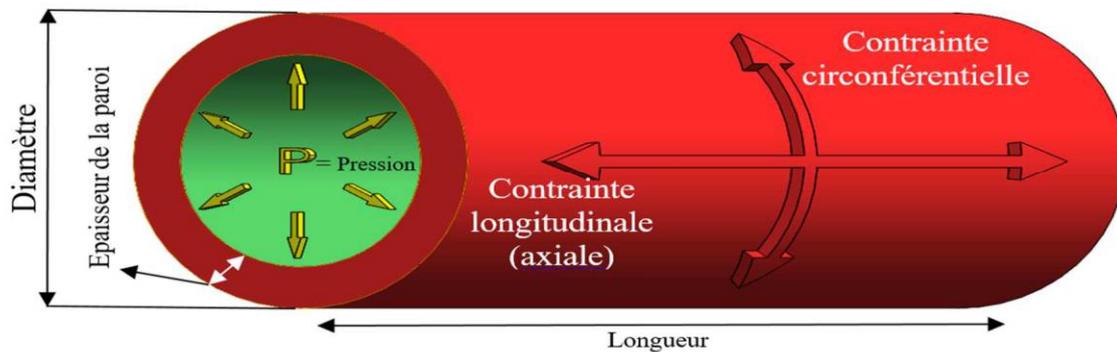


Figure I.14 Caractéristiques des tubes

## I.6 Les incidents des pipelines

Les canalisations sont livrées sur les chantiers et mises en service. En conséquence, l'émergence de ce qu'on appelle les dommages commence. La maîtrise de la nocivité des imperfections de surface des canalisations a fait l'objet de recherches [27, 28].

Les canalisations sont soumises à des oscillations pendant le transport, ce qui peut induire de microfissures en affaiblissant le maillage du matériau.

Les soudures réalisées sur site (soudage bout à bout) lors de l'assemblage des tubes peuvent développer des ruptures car elles sont parfois réalisées dans des conditions difficiles et ne sont pas toujours réglementées (manque de pénétration du matériau).

Lors des opérations de maintenance, une machine entre en contact avec la canalisation, provoquant une déformation appelée cas (rayure, dépression, ou combinaison (rayure + dépression)).

Selon le type de canalisation (enterrée/immergée ou aérienne), l'environnement a un impact négatif en créant de la corrosion.

Voici les principales causes d'incidents de pipeline :

- Fissuration
- Dégradation du métal ou réduction de l'épaisseur du tuyau due à la corrosion, à l'érosion ou à d'autres raisons
- Défauts dans les matériaux, l'artisanat et la construction
- Une tierce partie météorologique ou affecter



Figure I.15 Les principales causes des incidents (y compris des incidents importants) subis par les membres de CEPA entre 2013 et 2017

## I.7 Les Fissures

Le développement de défaillances métallurgiques, telles que des fissures ou des fractures dans les pièces métalliques, est la cause la plus fréquente d'arrêt des composants mécaniques. Toute défaillance mécanique sur les moyens de production ou sur les pièces fabriquées entraîne une perte de temps et d'exploitation, et peut même entraîner des astreintes. De plus, cela peut entraîner des problèmes de sécurité, ce qui peut parfois conduire à un accident.

Il faut savoir que le cadre d'une expertise est fourni par la plus grande quantité d'informations recueillies auprès de l'utilisateur sur les circonstances de défaillance et l'environnement dans lequel évoluent les composants cassés (par exemple, charges appliquées, température, etc.). En conséquence, il est important de porter une attention particulière à la collecte de toute information pouvant être pertinente pour la compétence, un détail mineur qui pourrait faire la différence.

Les tuyaux sont généralement construits sur place à partir de tubes en acier soudés bout à bout (soudures bout à bout). Avant le transport du tube sur le chantier, les soudures longitudinales réalisées lors de la formation du tube en usine sont vérifiées.

Une fissure est un type de défaillance dans laquelle des lignes de fracture se forment autour du périmètre du tuyau et/ou le long de celui-ci. Les fissures se produisent principalement dans les tuyaux rigides et peuvent être un prélude à la rupture ou à la rupture du tuyau. Les fractures de tuyaux peuvent être classées en quatre types : les fissures longitudinales, les fissures latérales, les fissures intergranulaires et les fissures qui proviennent d'un endroit spécifique.

Des fissures peuvent également se produire en raison d'un certain nombre de contraintes, notamment :

- Fissuration induite par l'hydrogène
- Fissuration par corrosion sous contrainte intergranulaire
- Fissuration environnementale
- La fissuration est l'une des raisons les plus courantes de la nécessité d'une réhabilitation sans tranchée

Les fissures dans les tuyaux sont généralement une indication qu'il y a eu un certain type de dommage (à l'exception des tuyaux en béton armé où les fissures peuvent être causées par des changements de température et un retrait). La fissure dans le tuyau est étroitement liée à la cause sous-jacente. En conséquence, il est possible de déterminer la source d'une fracture en analysant ses caractéristiques, telles que :

- Motif de fissure
- La profondeur de la fissure
- L'emplacement de la fissure
- Le taux de progression dans le temps

Les principales causes du développement de fissures dans les tuyaux sont :

- Règlement (généralement des tuyaux construits à partir de matériaux cassants tels que l'argile)
- Dommages pendant le transport, le stockage, l'installation, le remblayage ou l'entretien
- Usure excessive et corrosion [29]

La fissuration peut se produire partout, mais elle nécessite des conditions aux limites particulières pour commencer. En conséquence, la dépendance temporelle des anomalies de

type fissure, comme d'autres anomalies de pipeline courantes, est une préoccupation majeure. Il est difficile de discerner une dépendance temporelle dans le craquage. En conséquence, les fissures de pipeline peuvent être divisées en deux types : les fissures actives assistées par l'environnement et les anomalies planaires liées à l'usine ou latentes.

La fissuration peut se produire n'importe où dans le pipeline, que ce soit dans le corps du tuyau ou dans les sections soudées. Les fissures du pipeline, en revanche, se trouvent toujours perpendiculairement à la direction de contrainte locale principale du matériau du tuyau. Une contrainte circonférentielle se produit dans un pipeline sous pression, créant un environnement sensible à la fissuration axiale. De même, une contrainte axiale sur la canalisation favorise la formation de fractures circonférentielles.

Une autre considération est l'exposition de la surface du pipeline. Un environnement corrosif ou un autre effet sur la surface du tuyau, tel que des dommages mécaniques, augmente le début de la fissuration en raison de la micro-fragilisation. Enfin, les qualités matérielles et mécaniques de la canalisation jouent un rôle essentiel. Les aciers à plus haute résistance seront plus vulnérables aux processus de fissuration assistés par l'environnement liés à la fragilisation par l'hydrogène, tels que le SSCC, ou la fragilisation par l'hydrogène causée par la surprotection du CP. En raison des pressions résiduelles locales, l'existence de plaques dures pourrait potentiellement conduire à une susceptibilité accrue à la fissuration assistée par l'environnement.



Figure I.16 Quelques exemples de fissures et de caractéristiques de pipeline

### **I.7.1 Fissuration de corrosion de contrainte de pH presque neutre**

Le SCC à pH neutre proche peut également être observé sur les surfaces extérieures des tuyaux sous les zones de pelage du revêtement, mais où le CP est complètement protégé. Les fissures de surface, comme le BAP à pH élevé, développent généralement des colonies le long de la direction axiale du tuyau.

Comme il se produit dans des circonstances de corrosion libre, c'est-à-dire sans polarisation CP, la fissuration à pH presque neutre du SCC est fréquemment associée à des piqûres et à une corrosion générale. Contrairement au SCC à pH élevé, la propagation des fractures à travers l'épaisseur de la paroi du tuyau est Trans granulaire. Les parois de fracture corrodées sont remplies de produits de corrosion, ce qui entraîne des fissures plus importantes.

On pense qu'il est plus fréquent dans les hautes latitudes lorsqu'il y a un changement saisonnier important dans la teneur en dioxyde de carbone du sol. Certaines études ont également établi un lien entre l'activité microbienne anaérobie et l'apparition de SCC à un pH proche de la neutralité ; cependant, le mécanisme est encore inconnu et contesté. Néanmoins, il est reconnu qu'un certain degré de cycle de contrainte est nécessaire pour le démarrage et le développement.

### **I.7.2 Fissuration par corrosion à haute tension de pH – SCC**

Un SCC à pH élevé se développe sur les surfaces extérieures du tuyau près du pelage du revêtement et du CP partiellement protégé. Les fissures du pipeline développent généralement des colonies qui s'alignent axialement avec le tuyau. La propagation intergranulaire se produit à travers l'épaisseur de la paroi du tuyau. Les piqûres externes ou la rouille générale ne sont généralement pas liées à des fissures. Des contraintes élevées, des cycles de pression et le développement d'un environnement carbonate-bicarbonate, qui protège partiellement la protection cathodique appliquée, des températures modérément élevées et une humidité permanente ou saisonnière dans le sol contribuent tous à l'initiation et à la croissance de la fissuration par corrosion sous contrainte à pH élevé.

### **I.7.3 Fissures de fatigue**

Les ruptures de pipeline de fatigue sont orientées perpendiculairement à la contrainte primaire. Les fissures se forment à la suite d'une contrainte ou d'un cycle de pression. La concentration des contraintes se produit au point où le défaut apparaît pour la première fois ou

à la pointe de la fissure en développement. Les surfaces des fissures peuvent avoir des "marques de plage" distinctives qui ont évolué à chaque étape du développement des fissures. La fissuration par fatigue dans les pipelines est généralement liée à des points de concentration de contraintes tels que des bosses et des défauts de soudure.

#### **I.7.4 Fissuration induite par l'hydrogène et par corrosion sous contrainte**

La fissuration interne dans les tuyaux peut également être favorisée par l'environnement. Ceux-ci sont le plus souvent observés dans les milieux aigres. De l'hydrogène atomique est produit et absorbé dans l'acier du tuyau à la suite de réactions de corrosion aqueuse sur la surface interne du tuyau en présence de H<sub>2</sub>S.

Lorsque l'hydrogène atomique est piégé dans des irrégularités dans l'acier du tuyau, telles que des inclusions inorganiques (soufre de manganèse), et qu'il se rassemble avec d'autres hydrogènes atomiques piégés, il forme de l'hydrogène moléculaire et provoque une accumulation de pression locale, entraînant des cloques à mi-paroi et des fissures parallèles au mur.

Les fractures du pipeline peuvent se connecter à différents niveaux à travers la paroi du tuyau pour former des fissures à travers la paroi (Cracking Step-Wise – SWC). Les cloques superficielles peuvent présenter des fissures. Contrainte Orienté HIC est une variante du mécanisme HIC (SOHIC). Contrainte Orienté

Simultanément, une fois que l'hydrogène atomique est absorbé à l'intérieur de la microstructure, il peut diffuser dans une solution solide, produisant une fragilisation locale des cristaux et, par la suite, une fissuration par corrosion sous contrainte en présence de contraintes de traction résiduelles ou appliquées. Ce processus est connu sous le nom de fissuration par corrosion sous contrainte sulfurée (SSCC).

#### **I.7.5 Laminage**

Les stratifications sont des discontinuités indésirables parallèles à la surface du tuyau qui sont généralement indiquées par une concentration de matériau non métallique. Ils sont causés par le roulement d'inclusions, d'évents ou de canalisations dans le matériau parent. Les couches sont souvent sans importance, bien qu'elles puissent cacher des fractures.

Les stratifications de rupture de surface peuvent initier des fissures de fatigue et des fissures d'hydrogène dans le corps du tuyau. Lorsque les deux se rencontrent, comme les déchirures à

chaud dans les soudures SAW dues à la stratification, les stratifications peuvent créer des caractéristiques plates nuisibles et des fissures dans les soudures.

### **I.7.6 Les fractures en crochet**

Les fractures en crochet se développent en conjonction avec des inclusions ou des stratifications non métalliques dans les marges de la bande de soudure ERW. Pendant le processus de formage, ces caractéristiques sont partiellement intégrées dans la soudure sous forme de discontinuités alignées, ce qui donne l'aspect typique du crochet.

### **I.7.7 L'absence de fusion**

L'absence de fusion est une discontinuité plane (c'est-à-dire semblable à une fissure) dans laquelle il y a un manque d'union entre le métal fondu et le métal de base ou le métal fondu.

### **I.7.8 Manque de fusion**

Le manque de fusion peut être causé pendant la fabrication par un certain nombre de facteurs associés aux paramètres du procédé de soudage, à la contamination et à une mauvaise qualité et contrôle qualité.

### **I.7.9 Caractéristiques planaires des tubes soudés par ERW et HFI**

L'absence de fusion dans le tuyau ERW se traduit par une discontinuité axiale au centre de la ligne de soudure, semblable à une fissure. Selon ses propriétés, il est également appelé soudage à froid, pénétrateur ou couture. Comme pour les soudures SAW, cela peut être produit par une variété de variables telles que les conditions de processus, les contaminants, etc.

### **I.7.10 Fissuration de soudure**

Les fissures dans le métal en fusion dans les soudures par fusion (telles que les soudures SAW et les soudures circulaires multiples) peuvent être à la fois chaudes et froides. Les fissures à chaud causées par les processus de solidification peuvent être à la fois longitudinales et transversales, ainsi que "fissurées". Pour les soudures continues, ces fractures sont généralement créées dans le tube, tandis que les soudures circulaires sont générées lors de la construction du pipeline.

Le craquage à froid dans le métal liquide nécessite la présence d'hydrogène, une microstructure importante et une tension du métal en fusion, ainsi des fractures se développent souvent dans le sens longitudinal. Alors que la fissuration à froid se produit généralement pendant ou peu de temps après le processus de soudage (elle peut être retardée), la fissuration assistée par l'environnement peut également se produire dans le métal en fusion.

Dans la plupart des situations, la « fissure » dans une soudure EFW ou ERW sera placée au milieu de la ligne de liaison. Bien que de telles caractéristiques soient liées à la fusion, le mot fissuration est toujours utilisé (par exemple, fissure à crochet), et les soudures à froid, les joints et les pénétrateurs sont tous évalués comme des fissures du point de vue de l'intégrité.

### **I.7.11 Fissures aux pieds**

En raison des microstructures présentes dans la ZAT, ainsi que du changement de forme, les pointes des soudures par fusion sont particulièrement vulnérables à la fissuration à froid. Cette discontinuité de profil fonctionne comme un amplificateur de contrainte pendant la formation pour augmenter localement la contrainte appliquée ou comme un concentrateur de contrainte plus tard en service pour la fissuration par fatigue et autres.

La fracture peut rester dans la ZAT ou s'étendre dans le métal de base ou le métal fondu selon la position des orteils et la forme de la soudure sous-jacente.

La fissuration des orteils est, bien entendu, limitée aux soudures par fusion puisque seules celles-ci ont la géométrie avec les orteils. En conséquence, la fissuration des orteils ne se produit pas dans les tuyaux EFW ou ERW.

### **I.7.12 Porosité**

La porosité est une discontinuité en forme de cavité produite lors de la solidification par le piégeage de gaz dans le métal en fusion. Il peut apparaître sous forme de pores uniques, de nombreux pores regroupés ou de cavités allongées appelées trous de ver. Il ne s'agit pas d'un type de fissuration, bien qu'il puisse compliquer l'inspection des soudures.

### **I.7.13 Manque de pénétration**

Le manque de pénétration est défini comme une discontinuité plane (semblable à une fracture) dans laquelle toute l'épaisseur du joint n'est pas soudée. Un manque de pénétration se produit entre les passes de soudure intérieure et extérieure dans une soudure SAW double face.

### **I.7.14 Fissuration par corrosion sous contrainte circonférentiel**

Le SCC circonférentiel (pH élevé ou presque neutre) se produit lorsque les conditions environnementales sont idéales et que la contrainte maximale du tuyau est axiale. Les tensions axiales sont généralement produites en pliant le tuyau pour suivre le profil du sol ou par des pressions supplémentaires imposées par le mouvement du sol (glissements de terrain, affaissement, etc.).

### **I.7.15 Fissure circonférentielle dans la soudure circulaire**

#### **I.7.15.1 Fissure à froid**

Il nécessite la présence d'hydrogène diffusible, de contraintes et d'une microstructure métallique sensible lors du soudage, et est également connu sous le nom de fissuration à froid induite par l'hydrogène, fissuration à l'hydrogène et fissuration retardée.

#### **I.7.15.2 Fissuration à chaud**

Les mécanismes de fissuration à chaud, également connus sous le nom d'éclatement à chaud, de fissuration de l'axe central et de déchirure à chaud, sont généralement influencés par trois facteurs : un apport insuffisant de métal liquide au front de solidification en raison de la fusion des impuretés à basse température, une contrainte de retrait à travers la soudure en cours de solidification et taille de la soudure (rapport profondeur/largeur).

### **I.7.16 Caractéristiques planaires de soudure de sangle**

#### **I.7.16.1 Fissure à froid**

La fissuration à froid dans la ZAT ou le métal en fusion peut se produire à la fois à la racine et au sommet du cordon de soudure. La fissuration à froid commence fréquemment dans la ZAT de racine et de coiffe car ces zones sont plus sensibles en termes de microstructure et de concentration de contraintes.

### I.7.16.2 Manque de pénétration à la racine

Cela se produit lorsque la passe de racine n'atteint pas la zone de racine de la préparation de soudure, également connue sous le nom de manque de pénétration de racine dans les soudures circulaires multi-passes.

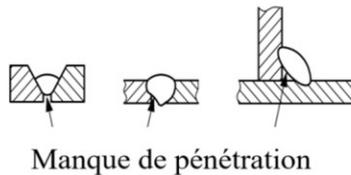


Figure I.17 Manque de pénétration à la racine

### I.7.16.3 Manque de fusion

Dans les soudures circulaires, le manque de fusion est causé par une non-union entre le métal de soudure et le matériau de base ou par des passes de soudure antérieures. Selon l'emplacement, plusieurs formes d'absence de fusion existent dans les soudures circulaires. Ceux-ci incluent l'absence de fusion radriculaire, de fusion de paroi latérale et de fusion inter-séries, entre autres [30].

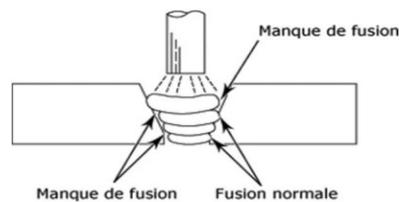


Figure I.18 Manque de fusion

**CHAPITRE II : NOTIONS SUR  
LA MÉCANIQUE DE LA RUPTURE**

## II.1 Introduction

L'objectif de la mécanique de la rupture est d'anticiper le comportement des ruptures dans la grande majorité des composants industriels exposés à des contraintes mécaniques. Léonard de Vinci a montré que la résistance à la traction d'un fil change en raison inverse de sa longueur. Ce constat révélait auparavant que les défauts du matériau régulaient sa résistance : plus le volume (longueur du fil de fer) était important, plus la survenue d'une rupture était probable [30]. Vers 1920, Griffith a publié un article dans lequel il expliquait en détail la mécanique de la rupture [31]. Plus précisément, comment définir le champ de contraintes, la taille de la fracture et la résistance à la fissuration du matériau sont deux facteurs importants à considérer. En 1940, Westergaard a développé les premières avancées théoriques dans l'étude des champs de déplacement, de déformation et de contrainte au voisinage d'une fracture, qui ont ensuite été confirmées expérimentalement. Une hypothèse alternative de rupture basée sur la stabilité de rupture qui ne tient pas compte de la perte d'énergie de rupture due à la plastification et n'est valable que pour les matériaux fragiles est décrite ci-dessous. C'est en 1948 qu'Irwin proposa une modification de la théorie de Griffith [7] qui incorporait l'énergie résultant de la plastification dans le bilan énergétique, rendant ainsi la technique de Griffith applicable pour la première fois aux matériaux ductiles.

En utilisant l'idée de Griffith comme point de départ, un groupe de chercheurs a formalisé la notion de taux de libération d'énergie sous une forme qui pourrait être facilement utilisée par les concepteurs de structures et étudié la résistance des matériaux à la propagation des ruptures en 1956 [8]. En se basant sur les travaux de Westergaard [32], Irwin [33] a démontré en 1957 que la méthode énergétique est égale à un paramètre,  $K$ , où la défaillance se produit lorsque la distribution de contrainte critique est atteinte.

Entre 1960 et 1980, il y a eu une augmentation significative de la quantité d'études effectuées sur la rupture entre deux écoles rivales. C'était une bataille entre les partisans de la méthode de la mécanique de la rupture linéaire et d'autres qui étaient principalement concernés par la plastification qui se produit à la fin d'une fissure d'une part, et d'autre part, l'approche de la mécanique de la rupture non linéaire. Afin de rendre compte de l'influence de cette plastification sur les champs de contraintes et de déplacements en fin de fracture, divers auteurs, dont Barenblatt [34] ont proposé ce que l'on appelle une correction de zone plastique en fin de fissure. Afin de déterminer les champs de contraintes élastiques spécifiés par le FIC, la taille de la fissure est augmentée par la zone plastique. Plus tard, Hutchinson, Rice et Rosengren (HHR) [35] ont conçu un nouveau paramètre appelé intégral  $J$ , qui a été utilisé pour

la première fois en 1968. Appliquée aux zones plastifiées, cette mesure capture avec précision la distribution des contraintes (champ HHR).

Nous avons vu l'avènement de la mécanique de la rupture d'entaille à la fin du XXe siècle, avec les premiers articles publiés en 1995, "The Use of Notch Stress Intensity Factor as a Fatigue Crack Initiation Parameter". "Engineering Fracture Mechanics, Vol.52, No.3, pp.503-512, 1995." Cela a permis une approche cohérente des défaillances causées par des fissures ou des encoches. Cette méthode permet de mesurer la ténacité sur des éprouvettes entaillées et non pré-fissurées de manière plus efficace et plus économique.

### **II.2 Mécanique linéaire, et non-linéaire de la rupture**

Il a été montré que la transmission de force d'un atome à un autre dans un matériau homogène exposé à une contrainte uni axiale se produit en suivant des lignes de force parallèles. Lorsqu'une rupture se produit dans un matériau, les lignes de force doivent être dirigées autour de la fissure, ce qui entraîne une concentration de ces lignes vers la pointe de la fissure et, par conséquent, une concentration de contraintes dans cette zone, appelée la tête ou le point de fissure. Il y'a deux types de rupture [36] :

#### **II.2.1 Rupture fragile**

L'absence de déformation plastique et le potentiel de propagation rapide des fissures définissent la rupture fragile, elle est contrôlée par la contrainte normale ou la contrainte de clivage (mécanique linéaire de la rupture). Les contraintes de fracture, l'énergie et le faciès de fracture sont tous différents pour ces divers types de fractures. De même, les contraintes extérieures imposées auront un impact sur le mode de rupture. Le clivage est la séparation des plans atomiques, d'un grain à l'autre, le plan de fendage préféré est orienté différemment, provoquant une fracture à facettes, ces dernières sont plates et donc de bons réflecteurs de la lumière incidente, bientôt, les surfaces deviennent ternes à cause de l'oxydation.

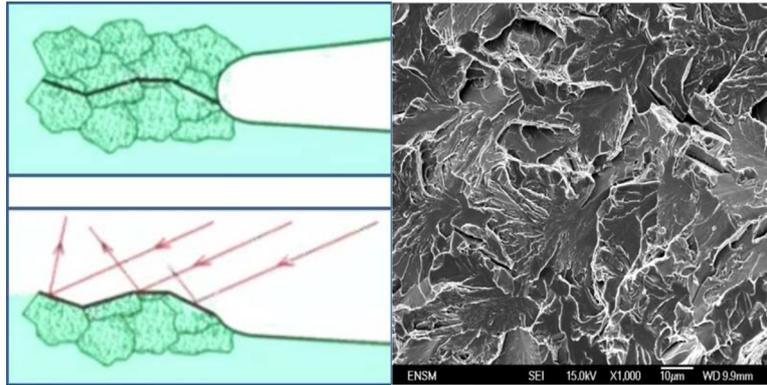


Figure II.1 Rupture fragile [37,38]

Il existe deux types de fractures :

**-Trans granulaire**

- La plupart des métaux échouent par rupture Trans granulaire.
- La fracture se produit à l'intérieur du grain selon un plan cristallographique faible.

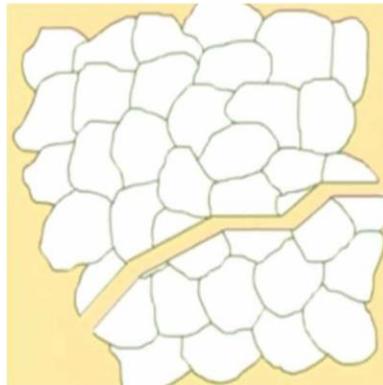


Figure II.2 Rupture Trans granulaire [37]

**- Inter granulaire**

- Dans la plupart des métaux, la rupture intergranulaire est une exception plutôt que la règle sous un chargement monotone.
- La rupture se produit le long des joints de grains.
- Elle est généralement favorisée par un environnement agressif et des températures élevées.

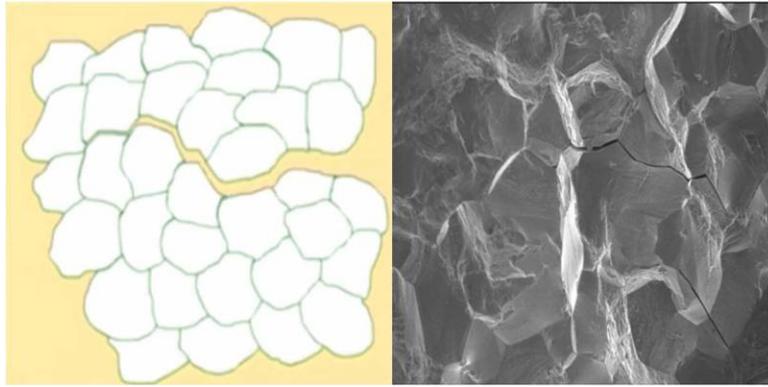


Figure II.3 Rupture Inter granulaire [37,38]

## II.2.2 Rupture ductile

Se produit en raison d'une déformation plastique importante à la pointe de la fissure plus il est possible de distinguer les cas de plasticité limitée et de plasticité étendue dans cette situation, en fonction de la taille de la zone plastique au point de fissure.

Tout d'abord, de grosses particules se détachent ou se cassent, formant des trous largement espacés près de la pointe de la fissure, enfin. des trous se forment au niveau de myriades de particules plus petites. Ces trous ou vides se rejoignent pour compléter la fracture, à cause de son irrégularité. La surface de fracture diffuse la lumière et semble gris terne.

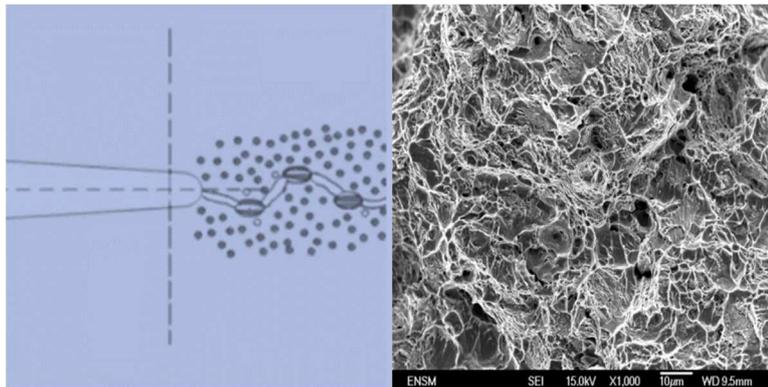


Figure II.4 Rupture ductile [37, 38]

Selon les principes mécaniques, trois zones successives peuvent être distinguées dans un matériau fracturé, ce qui peut être schématisé comme (figure II.5).

- Une zone d'élaboration située près du fond de fissure ; sa taille est souvent assez modeste.

- Une zone singulière, où les composantes du champ de contraintes convergent vers l'infini à mesure que l'on s'approche du fond de la fissure. Dans un matériau élastique linéaire, la singularité est en  $1/\sqrt{r}$ .
- La zone des champs lointains, qui occupe le reste de l'espace.

Il est plus précis de dire qu'il existe une singularité dans la fonction ( $1/\sqrt{r}$ ) dans un matériau élastique linéaire. La forme de la zone plastique est déterminée par le fait que le matériau a une limite élastique. Comme le matériau a une limite élastique, il existe un rayon  $r_p$  autour du fond de fissure. Si  $r_p$  est minuscule, on dira que la fracture est cassante ; s'il est haut, on dira que la rupture est ductile. En raison de l'importance de cette différenciation faite sur la base du paramètre  $r_p$ , il est nécessaire de considérer la validité de la théorie employée :

- La Mécanique Linéaire de la Rupture pour les ruptures fragiles.
- La Mécanique Non Linéaire de la Rupture dans le cas de zone plastique non négligeable (rupture ductile).

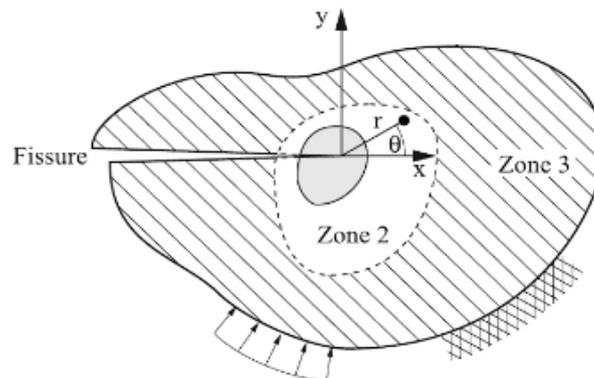


Figure II.5 Zone délimitant le voisinage d'une pointe de fissure [39]

### II.3 Les trois modes de rupture

- En **Mode I**, les lèvres des fissures se déplacent perpendiculairement à la direction de propagation.
- **Mode II** le mode de cisaillement. Les déplacements aux lèvres de la fissure sont parallèles à sa direction de propagation
- Dans le **Mode III**, les déplacements aux lèvres de la fissure sont parallèles à son fond, c'est un mode de cisaillement hors du plan.

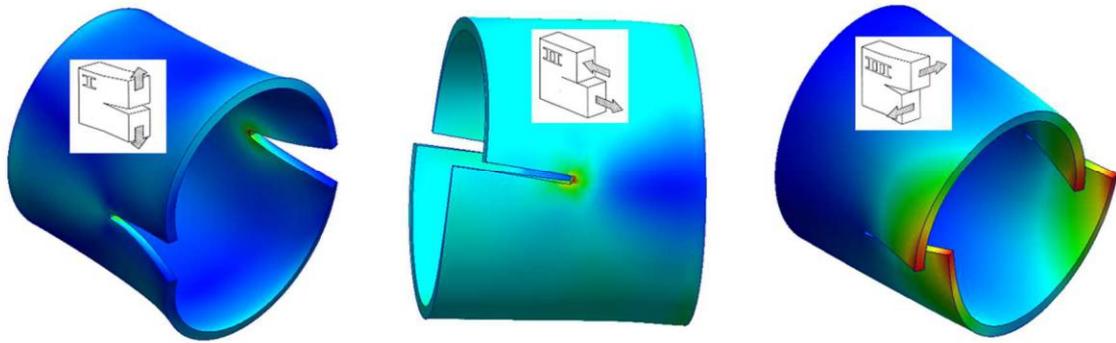


Figure II.6 Les 3 modes d'ouverture

Lorsque ces deux modes sont combinés (mode 1 et 2), nous obtenons ce qu'on appelle « le mode mixte ».

Dans les trois modes, la symétrie est utilisée comme guide. Bien que le Mode I soit le plus néfaste en termes d'extension de fissure, la fracture a tendance à se ramifier et reste donc rarement rectiligne (en 2D) ou plane (en 3D).

## II.4 Critères de rupture et de propagation

Afin de prévoir l'évolution d'une fissure existante dans un matériau, il est nécessaire de définir un critère de rupture pour le matériau en considération. Dans le cas des matériaux fragiles, la propagation de la rupture peut toujours être estimée à l'aide de  $K_{Ic}$ . Griffith [31] a défini ces matériaux comme ayant une caractéristique quasi-linéaire. Pour les matériaux ductiles qui peuvent être déformés, il existe une variété de considérations. En ce qui concerne le risque d'amorçage, le  $K_{Ic}$  est l'équivalence la plus souvent utilisée.

### II.4.1 Démarche de Griffith

Un modèle brillant construit par Griffith [31] basé sur les deux prémisses suivantes :

- Les fissures ont une énergie de surface qui leur est liée, et cette énergie de surface est directement proportionnelle à la taille de la fracture.
- Ce critère précise qu'une fissure se propage lorsqu'elle reçoit suffisamment d'énergie du milieu environnant pour compenser sa création, et que si cette restitution est insuffisante, la fissure ne se propage pas. En revanche, la fissure ne se propage pas lorsqu'elle ne reçoit pas assez d'énergie du milieu environnant.

Selon [31], la libération d'énergie  $G$  est la vitesse à laquelle l'énergie potentielle  $P$  d'une structure change en raison de l'augmentation de la surface libre d'une fissure.

$$G = \lim \frac{\Delta \Pi}{\Delta a} = \frac{\partial \Pi}{\partial a} \quad (\text{II.1})$$

Avec :  $\Pi = U - F$  l'énergie potentielle,  $F$  le travail des forces extérieures et  $U$  l'énergie de déformation élastique du solide.

#### II.4.2 Facteur d'intensité de contraintes

Le facteur d'intensité de contrainte (*FIC*)  $K$  est le seul paramètre significatif, ce qui permet de déterminer l'état de contrainte et de déformation à chaque pointe de fissure [40]. Irwin illustre que le champ de contrainte à l'extrémité de la fracture est spécifié par une quantité connue sous le nom de "facteur d'intensité de contrainte", noté  $K_I$ . La rupture se produit lorsque  $K_I$  dépasse une valeur critique,  $K_c$ , caractéristique du matériau et qualifié de "ténacité". Le *FIC* s'exprime en mode I sous la forme [41] :

$$K_I = Y \sigma_0 \sqrt{\pi a} \quad (\text{II.2})$$

Où  $a$  est la longueur initiale de la fissure,  $\sigma_0$  est la contrainte uniforme appliquée et  $Y$  est un facteur géométrique (Coefficient de correction). Irwin a postulé que la condition  $K \geq K_c$  représentait un critère de rupture.

#### II.4.3 Facteur de concentration de contraintes

Il existe des zones critiques de concentration de contraintes dans une structure sollicitée cycliquement qui sont créées par des discontinuités géométriques (telles que des trous, des congés, des encoches, etc.). Il s'avère que lorsqu'une structure comme celle-ci est exposée à une charge, le niveau de contrainte local est évidemment plus grand que le champ à l'infini (ou très loin de la discontinuité). Premièrement, il est important de déterminer le coefficient de concentration de contraintes  $K_T$  de la discontinuité (sans dimension). Le facteur de concentration de contrainte élastique est lié à la contrainte nominale  $\sigma_{nom}$  par l'équation suivante [42] :

$$K_T = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad (II.3)$$

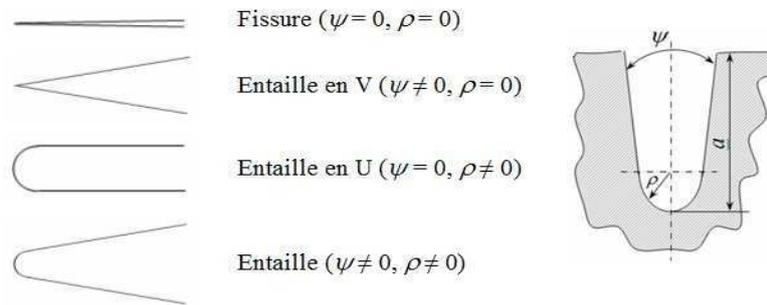


Figure II.7 Paramètres géométriques des discontinuités de matière (défauts)

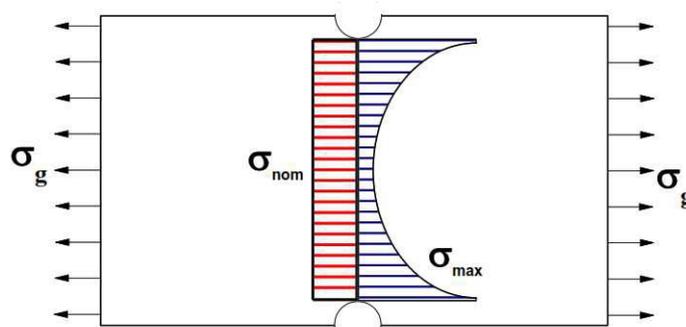


Figure II.8 Définition de la contrainte globale, maximale et nominale [43]

La figure II.8 [43] montre les définitions de la contrainte maximale, de la contrainte globale et de la contrainte nominale.

Le facteur de concentration de contrainte peut être résumé comme suit [43]:

$$K_T = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_g} \quad (II.4)$$

- ( $K_T$ ) le facteur de concentration des contraintes
- ( $\sigma_{max}$ ) les contraintes élastiques maximales
- ( $\sigma_g$ ) les contraintes totales

A l'aide d'éléments finis ou de photoélasticimétrie,  $\sigma_{max}$  et  $\tau_{max}$  peuvent être calculées. Les formules de résistance des matériaux sont utilisées pour calculer  $\sigma_{nom}$  et  $\tau_{nom}$ . Les formules mathématiques issues des travaux de Neuber [44] (formule de Peterson) définissent ces

restrictions. Smith, (1978) [45] déclare que la contrainte nominale est tout ce qui est nécessaire pour contrôler le développement de la fracture.

Il y a un petit volume de tension dans une fissure qui ne se propage pas, donc le *FIC* associé à cette fracture ne facilite pas sa propagation. La contrainte normale et la netteté de l'entaille influencent la propagation d'une fracture. Plus le  $K_T$  est élevé, plus la contrainte de début doit être élevée.

#### II.4.4 Distribution des contraintes en fond d'entaille

Irwin recommande d'utiliser la relation suivante pour caractériser la répartition des contraintes admissibles au voisinage du front d'une fracture [33] :

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (\text{II.5})$$

$K_I$  représente l'amplitude de la distribution de contraintes. Les paramètres  $r$  et  $\theta$  définis dans la figure II.9, sont les coordonnées polaires de la zone mesurée à partir du fond d'entaille. Irwin démontre que connaître uniquement la composante d'intensité de contrainte lui permet d'expliquer la répartition des contraintes autour de la pointe de la fracture.

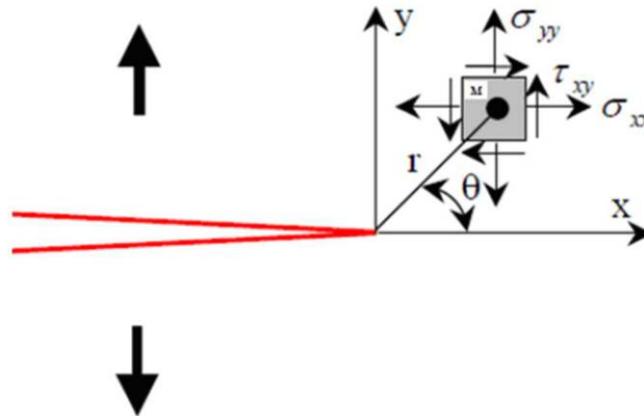


Figure II.9 Contraintes en un point près de l'extrémité d'une fissure

La figure II.9, représente les contraintes sur un élément centré sur un point  $M$ , indiqué par les coordonnées polaires  $r$  et  $\theta$  par rapport à une extrémité d'une fracture sollicitée en mode I. Les limitations de champ sont écrites au format suivant :

$$\sigma_{xx}(\theta) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \quad (\text{II.6})$$

$$\sigma_{yy}(\theta) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \quad (\text{II.7})$$

$$\sigma_{xy}(\theta) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(\sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \quad (\text{II.8})$$

### II.4.5 La méthode de Cherepanov et Jim Rice

L'intégrale  $J$  (intégrale curviligne) est une méthode d'estimation du taux de relaxation de la déformation ou du travail (énergie) par unité de surface d'une zone brisée dans un matériau. Cherepanov et Jim Rice ont créé séparément l'idée théorique de l'intégrale  $J$  en 1967 et 1968, respectivement. Ces études révèlent que le contour délimitant la zone plastique près du front de rupture (surnommé  $J$ ) est indépendant du profil (contour) de la fissure.

Pour les matériaux isotropes présentant une transition ductile / fragile marquée, l'intégrale  $J$  peut être directement liée au mode de rupture ductile. Dans le cas d'une déformation plane dans les conditions de chargement correspondant au mode I, II et III les relations sont données par :

$$J_{IC} = G_{IC} = K_{IC}^2 \left( \frac{1 - \nu^2}{E} \right) \quad (\text{II.9})$$

$$J_{IIC} = G_{IIC} = K_{IIC}^2 \left[ \frac{4(1 - \nu^2)}{3E} \right] \quad (\text{II.10})$$

$$J_{IIIC} = G_{IIIC} = K_{IIIC}^2 \left( \frac{1 - \nu}{E} \right) \quad (\text{II.11})$$

### II.4.6 La méthode volumétrique

La technique des éléments finis peut être utilisée pour examiner les problèmes de rupture élastique en utilisant l'approche volumétrique, c'est une méthode semi-locale. Le LFM de l'Université de Metz (France) utilise exclusivement. Un volume physique de distance effective  $x_{eff}$  est supposé nécessaire au développement des phénomènes de rupture. Une contrainte

moyenne pondérée basée sur la distribution des contraintes à l'intérieur de cette zone de développement de rupture existe dans ce volume.

Kuguel [46] a été le premier à proposer cette théorie. Bien que la contrainte de surface maximale (point chaud) soit importante, cet expert recommande également de prendre en considération au moins 95 % de cette contrainte en volume du métal sous-jacent. Les auteurs ont souvent exploité le corollaire de cette proposition : un accent de profondeur distinct. Neuber [47] et Buch [48] montrent que les gradients de contrainte à une profondeur particulière [49] Brand Ritchie et ses collègues estiment qu'une fracture provoquera un volume de développement de rupture avec un diamètre d'environ la taille d'un grain, qu'ils appellent « distance caractéristique ».

Le volume de production a été supposé être un facteur dans la détermination d'une charge de rupture critique [50]. En utilisant cette technique, Bareson et al. [51], ainsi que Clark [52], ont considéré que la distance typique est de l'ordre de grandeur du rayon de l'entaille. Des travaux antérieurs [53, 54] ont révélé que cette distance n'est pas associée à la forme de l'entaille, mais plutôt à sa répartition des contraintes. La distance  $x_{eff}$  du fond de l'entaille correspond à une zone de pseudo-singularité de contrainte. Il convient également de noter que c'est exactement le temps qu'il faut pour que le processus de rupture se développe. Par conséquent, il est essentiel de prendre en considération tous les aspects qui influencent la défaillance structurelle dans les structures entaillées, y compris les gradients de contrainte et les effets de zone endommagée et de relaxation tels que la contrainte effective et la distance effective, selon ces auteurs. L'amplitude de la contrainte effective est inférieure à l'amplitude de la contrainte maximale, selon les recherches de [55]. De plus, les effets de la relaxation plastique doivent être pris en considération lors du calcul de cette amplitude de contrainte. Pour rappel, les anciennes techniques (point chaud) utilisées pour calculer l'amplitude de contrainte effective à partir d'un point ne permettent pas d'expliquer le mode de chargement ou l'influence de l'échelle [56]. Ceci explique pourquoi un volume appelé "volume de développement de la rupture" doit être utilisé pour calculer l'amplitude de la contrainte.

Ces facteurs doivent être pris en considération lors de la détermination des niveaux de contraintes effectives dans les zones de formation de fractures. Ce gradient a été largement reconnu pour avoir une fonction dans le début de la rupture [57]. Il y a beaucoup de promesses dans la technique volumétrique développée par [55], qui utilise la contrainte effective  $\sigma_{eff}$  et la distance effective  $x_{eff}$ .

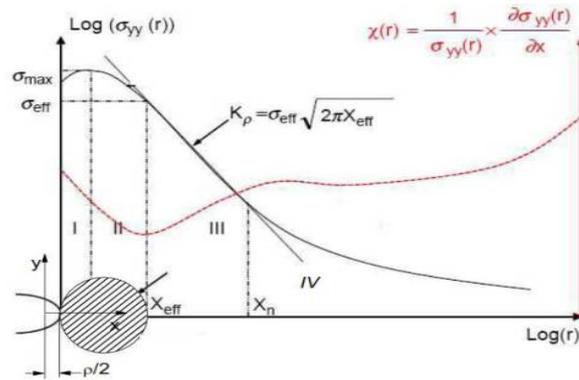


Figure II.10 Le diagramme représente la distribution des contraintes sous une forme bi logarithmique, la longueur du ligament et la gradation de tension étant liées. [58]

Le diagramme bi logarithmique de la figure II.10 dessine la distribution des contraintes basée sur des calculs par éléments finis et représente la contrainte élastique (contrainte d'ouverture de rupture) et le gradient de contrainte. Il y a quatre aspects principaux à considérer :

- ✓ **Zone I** : La tension élastique à la pointe de la fissure augmente jusqu'à ce qu'elle atteigne sa contrainte maximale au site de départ. Il est important de noter que la contrainte n'est pas à son plus haut point au bas de l'encoche, mais est plutôt poussée vers le haut.
- ✓ **Zone II** : Au moins jusqu'à la distance effective  $x_{eff}$ , la contrainte élastique diminue.
- ✓ **Zone III** : La figure logarithmique montre une progression linéaire de la contrainte élastique. Une loi de puissance peut être utilisée pour représenter ceci :

$$\sigma_{ij} = \frac{K_\alpha}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^\alpha(\theta) \quad (II.12)$$

Où  $K_\alpha$  : facteur d'intensité de contraintes,  $(r, \theta)$  coordonnées polaires du point considéré par rapport à l'origine de l'axe se situant à  $\rho/2$  du fond d'entaille.

- ✓ **Zone IV** : Cette partie de l'encoche est éloignée du fond et n'a aucune incidence sur la rupture de la membrane.

Pour illustrer l'impact des points de contrainte sur une position de départ, seul le gradient sur la distance  $x$  est pris en considération. Voici un exemple d'expression du dégradé :

$$grad \sigma = \frac{d\sigma}{dx} \quad (II.13)$$

Qylafku [59] a utilisé un gradient de contrainte relatif  $\chi(x)$ , défini comme :

$$\chi = \frac{1}{\sigma(x)} \frac{d\sigma(x)}{dx} \quad (II.14)$$

$\chi$  : Gradient relatif de contrainte ( $\text{mm}^{-1}$ ),

$x$  : Distance (mm)

$$\frac{d\chi}{dx} = \frac{\sigma''}{\sigma} - \left(\frac{\sigma'}{\sigma}\right)^2 = \frac{\sigma''}{\sigma} - \chi^2 \quad (II.15)$$

La fonction  $\sigma = \sigma(x)$  a un point d'inflexion pour  $x = x_{eff}$  et :

$$\chi \leq \chi_{eff} \rightarrow \frac{d\chi}{dx} \leq 0 \quad (II.16)$$

$$\chi \geq \chi_{eff} \rightarrow \frac{d\chi}{dx} \geq 0 \quad (II.17)$$

Une distance effective  $x_{eff}$  correspond à la fonction gradient de contrainte minimale. Elle est moins élastique que la distance effective, qui est plus grande que le diamètre de la zone plastique.

La zone II, la zone de « pseudo-singularité », a sa limite la plus basse à la distance effective. La moyenne pondérée des contraintes dans le volume de rupture constitue la contrainte effective ( $\sigma_{eff}$ ). Plusieurs méthodes ont été présentées pour déterminer cette contrainte :

1. Directement sur la répartition des contraintes, sélectionnez sa valeur.
2. Sur la distance  $x_{eff}$ , choisissez la valeur moyenne.

$$\sigma_{eff} = \frac{1}{\chi_{eff}} \int_0^{\chi_{eff}} \sigma_{ij}(1 - x\chi) dx \quad (II.18)$$

A la rupture, le FIC maximum est déterminé par :

$$K_{I_{max}} = \sigma_{eff} \sqrt{2\pi x_{eff}} \quad (II.19)$$

### II.4.7 Démarche à deux paramètres

Une seule métrique, telle que le facteur d'intensité de contrainte (*FIC*), caractérise le comportement de défaillance. C'est ainsi que les fractures commencent et se propagent dans les matériaux fragiles. Alors que la pertinence physique du deuxième paramètre de rupture, la contrainte  $T$ , reste incertaine, il est utile de comprendre l'influence de la structure et du chargement au fond de fissure. Comme le montre Williams [60], les champs de contraintes au fond de fissure peuvent être décrits à l'aide d'une série infinie en puissance  $r$ , où le premier terme correspond à la singularité en  $1/r$ . Le deuxième terme est constant et le troisième terme est proportionnel à  $r^{1/2}$ . Le terme singulier est fréquemment ignoré dans la théorie classique de la mécanique de la rupture. En revanche, si les termes au-delà du deuxième terme s'annulent à la fin de la fissure, la constante du deuxième terme conserve sa valeur. Ce mot peut affecter la forme de la zone plastifiée et les tensions à l'intérieur de celle-ci. Les deux premiers termes de la formule (II.19) pour une rupture continue dans un matériau élastique et isotrope sont :

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + T \delta_{xi} \delta_{xj} \quad (\text{II.20})$$

$f_{ij}$  : Fonction de l'angle  $\theta$ ,

$K_I$  : Facteurs d'Intensité de Contraintes

$\delta_{xi}$ ,  $\delta_{xj}$  : Symboles de Kronecker.

$T$  : la contrainte transversale de traction-compression.

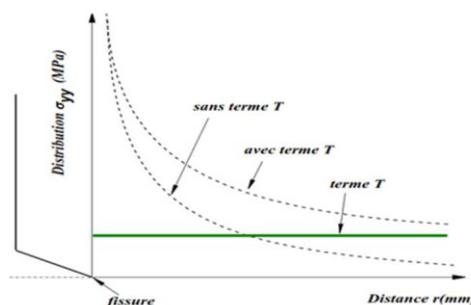


Figure II.11 Champ de Contraintes contenant le terme  $T$  à l'extrémité d'une fissure [60]

Selon Williams [60], constante, parallèle à la propagation de la fissure, la contrainte  $T$  est définie comme une contrainte continue qui s'active le long du trajet de la fissure (figure II.11).

Voici ce qui se passe lorsque (II.23) se développe dans le plan  $(x, y)$  :

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{1}{2} \theta (1 - \sin \frac{1}{2} \theta \sin \frac{3}{2} \theta) + T + O(r^{\frac{1}{2}}) \quad (\text{II.21})$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{1}{2} \theta (1 + \sin \frac{1}{2} \theta \sin \frac{3}{2} \theta) + O(r^{\frac{1}{2}}) \quad (\text{II.22})$$

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yx} = \tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{1}{2} \theta \sin \frac{1}{2} \theta \sin \frac{3}{2} \theta + O(r^{\frac{1}{2}}) \quad (\text{II.23})$$

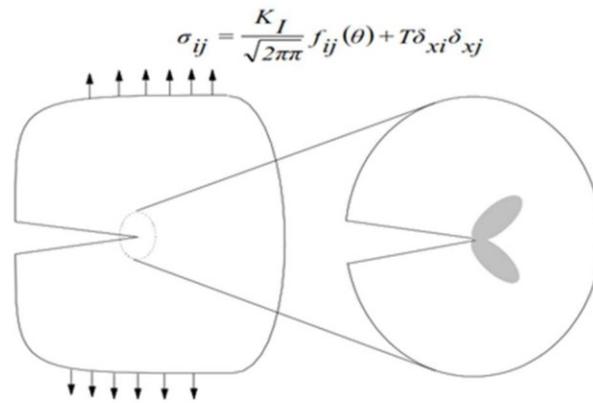


Figure II.12 Conditions limites pour le modèle circulaire

Dans le cas particulier de la fissure de Griffith,  $T$  est défini par :

$$T = \lim_{r \rightarrow 0} (\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \quad (\text{II.24})$$

Il est nécessaire de construire un modèle circulaire de base autour de la terminaison de la fissure afin d'évaluer l'impact de la contrainte  $T$ . La Figure II.12 montre les conditions aux limites sur les bords du disque. Le modèle circulaire sera désormais le nom donné à ce modèle.

En conséquence de cette relation, un champ de contrainte est généré le long de la bordure découpée du disque à l'extrémité terminale de la fissure. Il existe une zone plastifiée au niveau d'un site de fracture, mais elle est limitée à l'intérieur du disque afin de maintenir la validité de la solution élastique. Le modèle circulaire peut simuler les circonstances à la fin d'une fracture quelle que soit la forme de la structure lorsqu'il est utilisé en conjonction avec un régime de plasticité restreint.

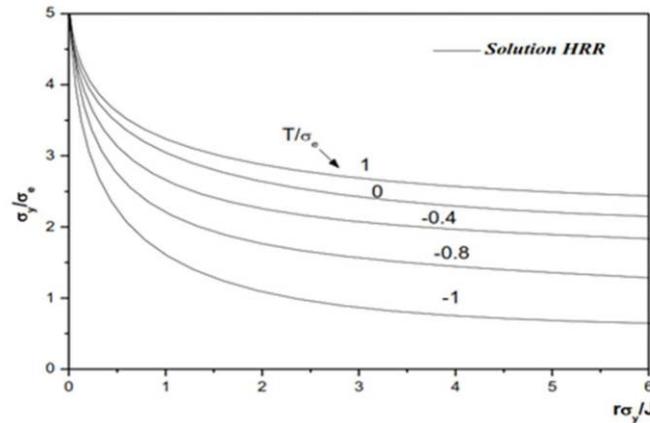


Figure II.13 Répartition des contraintes à l'extrémité de la fissure ( $\theta=0$ ) [30]

La figure II.13, montre les résultats *MEF* (\*) pour un modèle circulaire. Pour des valeurs variées de  $T/\sigma_e$  ( $\sigma_e$  : limite d'élasticité), ces résultats montrent comment la contrainte  $T$  dans la zone plastifiée affecte les résultats. Le terme de singularité caractérise les champs à la fin du régime de plasticité limitée dans le cas de  $T = 0$ . Les contraintes de compression avec des valeurs de  $T$  négatives ont un impact sensiblement plus important sur la distribution des contraintes que celles avec des valeurs de  $T$  positives.

Afin d'éviter toute confusion, il est important de comprendre que la réponse de *HRR* n'est pas  $T = 0$ . Une série entière de  $r$  dont le premier terme correspond à la solution de *HRR* (\*) peut être utilisée pour décrire le champ de contraintes en profondeur et à l'intérieur de la zone plastifiée. Dans le cas de  $T = 0$ , comme le montre la figure II.13, les impacts des autres termes ne sont pas négligeables.

Comme le montrent les travaux de [61] et [62], " $T$ " qui désigne la contrainte élastique linéaire non singulière activée parallèlement à la fissure, décrit le champ de contraintes locales à sa pointe pour les matériaux élastiques linéaires et élasto-plastiques.

La direction de propagation et la stabilité de la fissure, la répartition des contraintes à la pointe de la fissure et la ténacité à la rupture sont tous influencés par la contrainte  $T$  [63,64].

## II.4.7.1 La détermination de la Contrainte T

### II.4.7.1.1 Méthode d'extrapolation

Afin de calculer la contrainte  $T$ , Maleski et al [65] ont présenté une technique de mesure qui applique le même concept de différence de contrainte qu'en mode I. Selon la définition, la contrainte agissant sur la voie idéale de propagation de la fissure est supposée être une

contrainte continue. La contrainte  $T$  et le facteur d'intensité de contrainte sont calculés à l'aide d'une simulation par éléments finis.

Dans La direction  $xx$  ont détermine le terme de la contrainte  $T$  par :

$$T = \sigma_{xx} - \sigma_{yy} = T_0 + \lambda \left( \frac{x}{a} \right) \quad (\text{II.25})$$

### II.4.7.1.2 La Méthode SDM

Yang et al. [66] ont introduit le concept de différences de contrainte. L'analyse par éléments finis de base est utilisée directement dans cette approche. En comparant  $(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})$  à un emplacement en avant de la pointe de la fissure, il est capable de déterminer rapidement et correctement la contrainte  $T$ . Essentiellement, l'objectif est de tracer le changement des valeurs d'erreur numériques de la pointe de la fissure à  $x$ , la distance de la pointe de la fissure. De la même manière, les erreurs efficaces doivent être éliminées par cette variation.

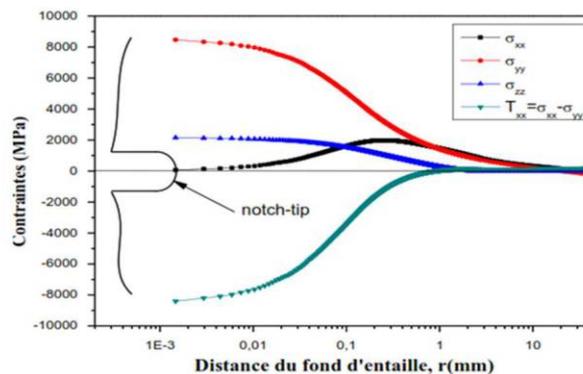


Figure II.14 Un exemple de progression des contraintes le long du ligament ( $a/t = 0,2$ )

La contrainte  $T$  est déterminée pour un matériau homogène en utilisant la différence des contraintes le long du ligament et pour  $\theta = 0$ . En utilisant une éprouvette  $CT$  exposée à une tension de traction, la Figure II.14 montre comment les différences de contraintes le long d'un ligament évoluent dans le temps.

En termes de contrainte en fond de fissure,  $T$  peut s'écrire comme suit :

$$T = (\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \quad r = 0, \theta = 0 \quad (\text{II.26})$$

En raison de la récupération des contraintes se produisant si près de la pointe de la fracture, l'utilisation de cette approche peut entraîner de grandes imprécisions numériques. L'expansion de contrainte asymptotique de la mécanique de la rupture élastique commence par la contrainte  $T$ , qui est un terme non singulier. La restriction  $\sigma_{xx}(r, \theta)$  est écrite avec ce mot à l'esprit. En raison du fonctionnement de la fissure dans la loi de Griffith,  $T$  est défini comme :

$$T = (\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \quad (\text{II.27})$$

Le facteur d'intensité de contraintes est défini par :

$$K_I = \sqrt{\pi a} \quad (\text{II.28})$$

Lorsque le premier terme singulier de  $\sigma_{xx}$  tend vers 0 ou peut être mis à zéro par superposition avec  $\sigma_{yy}$ , la contrainte  $T$  peut être estimée dans n'importe quelle direction le long du ligament. Il est basé sur l'angle de la pointe de la fissure, qui a un certain nombre d'angles distincts.

La contrainte  $T$  dans les fissures est supposée être une valeur fixe, active dans la direction de propagation, et constante. Lorsque le différentiel de contraintes le long du ligament s'est stabilisé, cette valeur est prise.

## II.5 Critère de plastification

Le critère de plasticité qui détermine les contraintes au début de la déformation plastique est donné par l'équation suivante :

$$f(\sigma_{ij}) = K(k) \quad (\text{II.29})$$

$f$  : est une fonction et  $K$  un paramètre qui dépend du matériel

### II.5.1 Critère de Tresca

Le critère de Tresca s'exprime par :

$$f = \max_{i \neq j} (\sigma_i, \sigma_j) - k = 0 \quad (\text{II.30})$$

$K = \sigma_e$  Où elle est exprimée par :

$$f = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 = (\sigma_x - \sigma_z) = \sigma_e \quad (\text{II.31})$$

- En traction pure :  $\sigma_y = \sigma_z = 0$  et  $\sigma_x = \sigma_e$

- En cisaillement pur :  $\sigma_y = 0$  et  $\sigma_z = -\sigma_x$

L'état des contraintes planes :

$$\begin{aligned} \tau_{yz} = \tau_{xz} = \sigma_z = 0 \\ \sigma_i - \sigma_j = \sigma_e \end{aligned} \tag{II.32}$$

La surface frontière du domaine est un prisme de génératrice parallèle, à la direction  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$  (à l'axe 1,1,1) et de section droite constituée par un hexagone régulier de côté égal

à :  $\frac{\sigma_e \sqrt{6}}{3}$

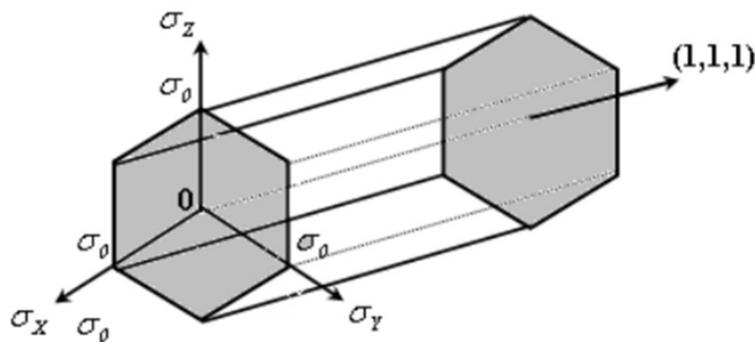


Figure II.15 Représentation géométrique du critère de Tresca [67]

## II.5.2 Critère de Von mises

Un corps plastiquement isotrope peut utiliser ce critère, mais l'omission du troisième invariant entraîne un faible seuil de plasticité. L'énergie élastique de cisaillement est une mesure de la plasticité. Donc la fonction d'écoulement s'exprime par :

$$f(J_2, k) = 0 \tag{II.33}$$

$$k = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_e \tag{II.34}$$

Les axes principaux :

$$f = [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] = 2\sigma_e^2 \tag{II.35}$$

Dans l'espace des contraintes principales, la frontière du domaine d'élasticité est un cylindre de section circulaire de rayon  $\sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_e$  et de génératrice parallèle à la direction  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$

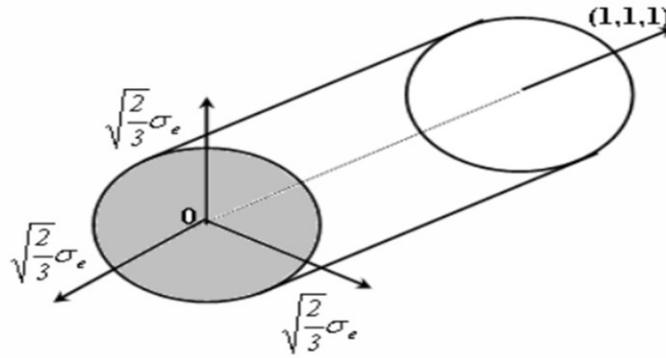


Figure II.16 Représentation géométrique du critère de Von Mises [67]

- En traction pure :  $\sigma_y = \sigma_z = 0$  donc  $\sigma_x = \sqrt{3k} = \sigma_e$
- En cisaillement pur :  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{xz} = 0$  donc  $\tau_{xy} = k = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}}$

L'état des contraintes planes :

$$\begin{aligned} \sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{xz} &= 0 \\ f = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x\sigma_y &= 3k^2 = \sigma_e^2 \end{aligned} \tag{II.36}$$

## II.6 La Fatigue

Pour éviter la défaillance soudaine d'un matériau, la mécanique de la rupture tient compte des défauts du matériau qui peuvent se développer pendant la fabrication. Les charges maximales qu'une structure peut supporter et les tailles de défauts critiques peuvent être déterminées en fonction de la ténacité du matériau. En conséquence, les bâtiments ne sont plus dimensionnellement surdimensionnés au-delà de ce qui est spécifié [68,69].

La plupart des défaillances structurelles, en revanche, sont causées par la fatigue en service due à des charges mécaniques, thermiques et autres variables, plutôt que d'être la conséquence d'une charge statique ou monotone. Il est rare qu'un défaut matériel provoque une rupture [70].

Cela inclut les contraintes de base, couplées (flexion-torsion) et plus compliquées (frottement, contacts thermomécaniques) qui se produisent lors d'opérations externes sur les structures. Comme on peut le voir sur la Figure II.17 [69], les composantes du tenseur des contraintes générées dans une structure varient dans le temps et appartiennent à l'une des classes de signaux suivantes :

- **Signal simple d'amplitude constante**, tels que les signaux périodiques « sinusoïdaux », « triangles », « carrés », ...
- **Signal constitué de deux blocs de charge d'amplitude constante**, le deuxième bloc étant appliqué jusqu'à rupture.

- **Signal constitué de plusieurs blocs d'amplitude constante**, l'exemple le plus connu est la méthode des blocs programmés de Gassner [70].
- **Signal d'amplitude variable**, il s'agit de signaux réels relevés en service. Ce dernier type constitue dans le cas général le signal à amplitude aléatoire. Cet aspect est lié pour sa part à la nature imprévisible des sollicitations.

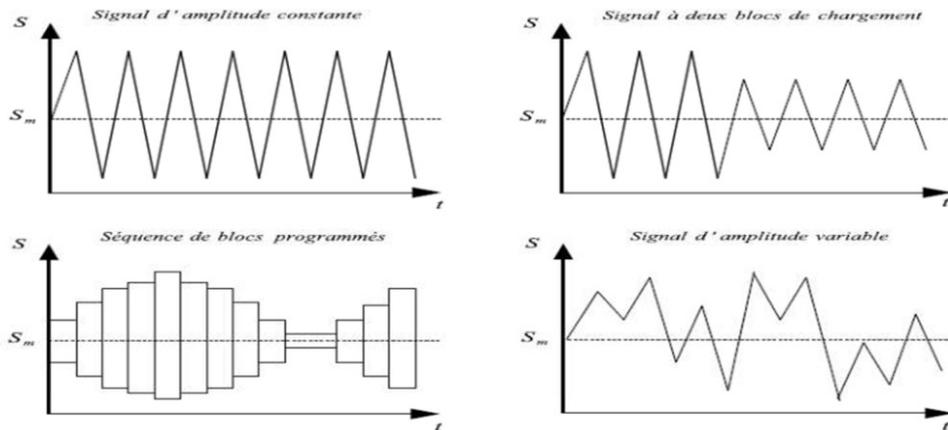


Figure II.17 Différents types de signaux de chargements [42]

Selon leur fréquence dans le temps, les sollicitations peuvent être qualifiées de constantes ou de variables [70]. La succession des contraintes imposées dans le temps est ce que nous entendons par cycle. La figure II.18 montre comment les essais de fatigue sont effectués en laboratoire en utilisant des charges de base (sinusoïdales ou triangulaires). Plus précisément, voici les caractéristiques du test :

- Les contraintes maximales  $s_{max}$  et minimale  $s_{min}$
- L'amplitude de contrainte  $s_a$
- La contrainte moyenne  $s_m$
- Le rapport des contraintes  $R$
- La période  $T$  (ou la fréquence  $f = 1/T$ )

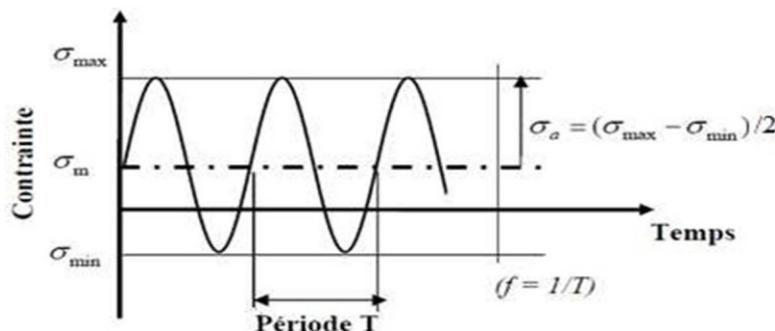


Figure II.18 Représentation schématique d'un chargement de fatigue [69,71]

Les sollicitations périodiques peuvent être, figure II.19 :

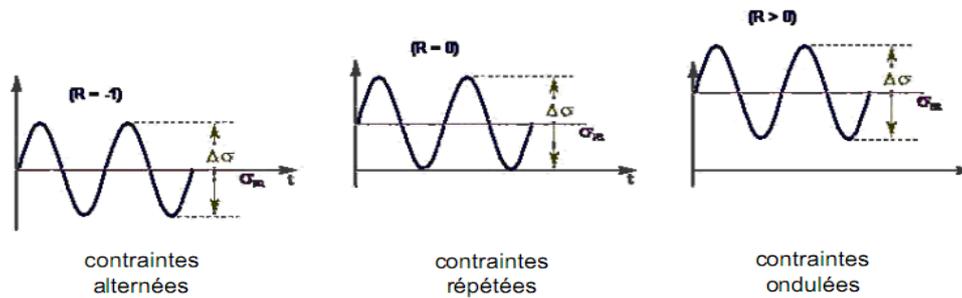


Figure II.19 Représentation schématique des sollicitations périodiques [72]

1. **Alternées**, lorsque les valeurs qu'ils adoptent fluctuent entre deux bornes fixes de signes opposés Ils peuvent être soit symétriques ( $R = -1$ ) soit asymétriques
2. **Répétées**, lorsque les valeurs qu'ils prennent fluctuent, chacune entre zéro et une valeur prédéterminée ( $R = 0$  ou  $\pm\infty$ ) ;
3. **Ondulées**, lorsque le signe des valeurs extrêmes qu'ils adoptent est le même ( $R > 0$ ) ;

Un cycle quelconque peut être représenté par la superposition de la contrainte moyenne  $\sigma_m$  et d'une contrainte symétrique d'amplitude  $s_a$  [70]

### II.6.1 Courbes de Wöhler

Les dommages de fatigue se produisent lorsqu'un matériau est soumis à plusieurs reprises à des amplitudes de contraintes cycliques avec des niveaux de contrainte inférieurs à sa limite élastique. La courbe de Wöhler, ou courbe d'endurance, est un graphique représentant le nombre de cycles jusqu'à la rupture du  $N_R$  en fonction de l'amplitude de la contrainte en abscisse (Figure II.20). Il existe un certain nombre d'échantillons dans un lot qui sont soumis à la même force  $\Delta\sigma$  et à la même fréquence, la rupture se produisant après un nombre prédéterminé de cycles. Dans chaque échantillon, un point sur le plan  $(\Delta\sigma, N_R)$  est identifié. La figure II.20 montre que la rupture se produit après un certain nombre de cycles, et ce nombre augmente à mesure que la tension diminue. Les résultats des essais de fatigue sont distribués statistiquement, ce qui permet d'utiliser l'amplitude de contrainte et le nombre de cycles pour générer des courbes correspondant à certaines probabilités de rupture.

Les tests traditionnels de détermination des courbes de Wöhler donnent une image globale de l'endurance d'un matériau : l'apparition des fissures de fatigue et leur évolution vers la rupture. Cette courbe peut généralement être décomposée en trois zones distinctes :

- **Zone de fatigue plastique oligocyclique**, Dans ce cas, le matériau est soumis à des contraintes supérieures à sa limite élastique  $\sigma_E$ . Il n'y a qu'une poignée de cycles de l'ordre de  $\frac{1}{4}$  cycle à environ  $10^4$ -  $10^5$  cycles avant qu'une rupture ne se produise. Une déformation plastique importante et une rupture subséquente de l'échantillon peuvent être remarquées très bientôt dans cette région.
- **Zone de fatigue ou d'endurance limitée**, La rupture se produit après un nombre prédéterminé de cycles, qui augmente au fur et à mesure que la contrainte diminue (entre  $10^5$  et  $10^7$  cycles). A l'échelle semi-logarithmique, cette zone est linéaire.
- **Zone d'endurance illimitée ou zone de sécurité**, Sous faible contrainte, un certain nombre de cycles ( $10^7$  voire  $10^8$ ) avant que la panne ne se produise, ce qui est supérieur à la durée de vie estimée du composant. [42]

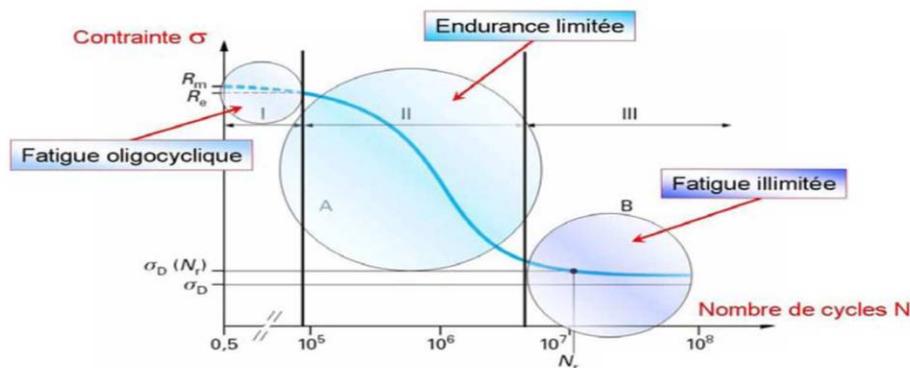


Figure II.20 Courbe de Wöhler définissant les trois domaines de la fatigue des matériaux [73]

## II.6.2 Les courbes de propagation de fissures

A partir de cette taille critique de fissure, qui est influencée par le niveau de contrainte le plus élevé obtenu tout au long des cycles, et au-delà duquel la propagation serait irréversible et conduirait à la rupture, l'interprétation de la courbe d'endommagement est fondée.

Nous voulions voir comment les fissures progressaient sous l'effet de la fatigue, alors nous sommes lancés dans cette démarche. Il est possible de les voir à une distance de 0,01 à 0,1 millimètre, selon la précision du système de suivi, tant qu'ils émergent à la surface. [42], la longueur des fissures.

À mesure que le nombre de cycles augmente, la profondeur des fissures augmente également, ce qui en fait l'approche la plus simple pour montrer l'évolution des fractures.  $N$  peut avoir un très grand nombre de cycles (jusqu'à quelques millions), il est donc représenté à l'aide d'une échelle logarithmique. Ce type de courbe est illustré schématiquement à la Figure II.21.

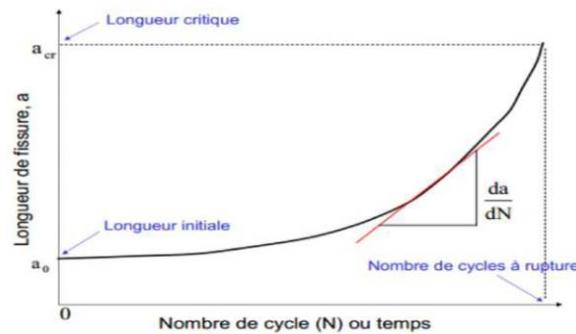


Figure II.21 Longueur de fissure en fonction du nombre de cycle [74]

Vous pouvez afficher  $da/dN$  en fonction de la vitesse de fissuration  $da$  ainsi qu'un paramètre de chargement (par exemple, contrainte alternée  $\sigma a$  ou déformation totale par cycle  $\epsilon \sqrt{a}$ ) à partir des relevés de longueur de fissure ( $a$ ) en fonction du nombre de cycles  $N$

La mécanique de la rupture a permis de mieux quantifier les phases de propagation progressive et de propagation brutale des ruptures de fatigue, dues en partie à l'utilisation du facteur d'intensité de contrainte *FIC* désigné  $K$ .  $K$  a une valeur directement proportionnelle à  $\sigma a \sqrt{a}$ . La propagation des fissures de fatigue peut être décrite à l'aide d'une technique *FIC* si la plastification du fond de fissure ne s'étend pas au-delà d'une zone limitée par rapport à la fois à la longueur de fracture et aux dimensions de la structure endommagée.

Les données expérimentales obtenues par cette approche révèlent que les évolutions du taux de fissuration en fonction de l'amplitude du *FIC* présentent, sur une échelle bi-logarithmique, l'allure représentée sur la Figure II.22 :

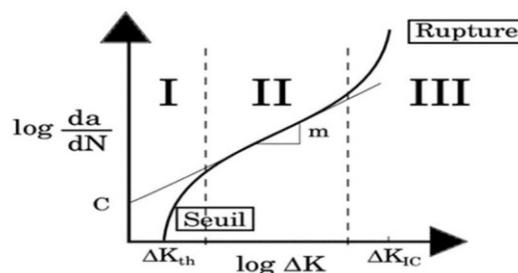


Figure II.22 Courbe de propagation de fissure [75]

# **CHAPITRE III : SIMULATIONS SUR LES PIPELINES**

### III.1 Introduction

La simulation numérique est le processus servant à calculer le fonctionnement d'un système qui a déjà été caractérisé par un ensemble de modèles. Il est basé sur des mathématiques précises et des programmes informatiques. La phase principale de la recherche en simulation numérique est commune à de nombreux secteurs de la recherche et de l'industrie, y compris l'énergie nucléaire, l'aérospatiale et l'automobile. Un dispositif numérique analogique numérique se compose d'un ensemble de programmes d'ordinateur en cours d'exécution sur un ordinateur. Un logiciel de codage ou de calcul est un algorithme numérique qui transforme les formules mathématiques et les modèles physiques à la demande.

Pour exécuter des simulations sur les canalisations, il faut d'abord prendre en compte tous les paramètres pertinents afin d'anticiper un modèle numérique des zones critiques sous différents chargements.

Tant qu'il y'a un changement sur le champ de contraintes au voisinage d'une fissure spécialement les facteurs d'intensité de contraintes qui caractérise la fissure, n'est pas constant sur toute la longueur de la tête de fissure. Le but étant de déterminer la réaction de défaut lorsqu'on change des paramètres comme le dimensionnement la géométrie (la section des pipelines) le matériau de fabrications ainsi que l'orientation d'initiations de fracture.

La première étape concerne l'étude statique à court terme sur plusieurs modèles (des plaques et des canalisations) sans défaut, sous un chargement mécanique à amplitude constante. L'objectif étant de déterminer les zones critiques et l'influence de différentes singularités sur son comportement et les influences de matériau utilisé pour la fabrication.

Alors que la deuxième étape concerne l'étude statique à long terme dans les mêmes conditions pour les mêmes modèles après l'enlèvement de matière et l'initiation de défaut avec plusieurs manières. Les résultats obtenus montrent que la forme, les dimensions ainsi que l'orientation affectent directement la stabilité des fissures et la structure en générale.

Les résultats obtenus, après les tests et les modifications, ont bien montrés l'efficacité de cette nouvelle conception en termes de déformations.

### III.2 Notions sur les éléments finis

L'approche basée sur les éléments finis est une méthode d'approximation des équations différentielles dirigeant d'un système utilisant un ensemble d'équations algébriques avec un nombre limité de variables. Ces techniques sont courantes parce qu'elles sont faciles à

programmer. Des techniques d'éléments finis ont d'abord été créées pour répondre aux défis structurels, mais sont actuellement utilisées pour résoudre un large éventail de problèmes de terrain. Le solide est divisé en éléments géométriques de base avec des côtés et des sommets communs ou des nœuds qui agissent comme des jonctions. Ce sont les nœuds dans lesquels des efforts internes ou externes seront déployés et le maillage c'est l'opération de décomposition.

Nous utilisons en général un maillage carré ou triangulaire, mais rien ne nous empêche d'utiliser des maillages plus compliqués. Il n'est pas non plus nécessaire que le maillage soit régulier, et on préfère resserrer le maillage près des points d'intérêt (par exemple, là où l'on croit que la solution varierait beaucoup), mais il faut veiller à avoir des composantes faiblement déformées (proche à un polygone régulier). Plus la taille du maillage est petite, plus la solution générée par la technique des éléments finis sera précise et sera proche de la solution "réelle" de l'équation aux dérivées partielles.

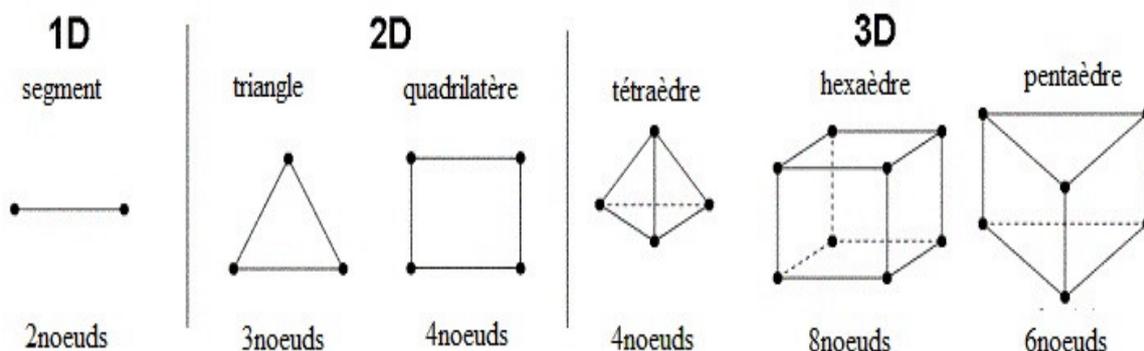


Figure III.1 Exemple d'éléments finis en 1, 2 et 3 dimensions [76]

### III.3 Description du code de calcul

Il existe maintenant une variété de codes tridimensionnels industriels conviviaux disponibles sur le marché, notamment ABAQUS, ADINA, ANSYS, ASTER (open source depuis l'automne 2001), MSC/NASTRAN, SYSTUS, DYNA3D, LS-DYNA, et bien d'autres. L'objectif de cette dernière section est de souligner l'efficacité et la précision des approches numériques établies en dynamique des structures pour la complexité dite de type industriel.

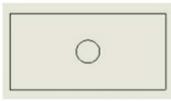
La qualité des réponses découvertes lors d'une simulation numérique est fréquemment appréciée sur la base d'une technique analytique et/ou de données de laboratoire. Dans certaines circonstances, et notamment en l'absence de référence analytique ou expérimentale, les résultats seront comparés à ceux obtenus à partir de modèles d'éléments finis révisés.

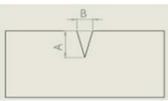
Les secteurs de la construction de machines, de l'énergie, de l'automobile, du ferroviaire, de l'aérospatiale, du médical, de la microtechnique, de la microélectronique et des produits de consommation sont parmi ceux qui utilisent ANSYS, est un programme de simulation FEM leader sur le marché, utilisé dans le développement de produits industriels. Il comprend tous les aspects de la simulation, y compris le traitement géométrique, le maillage, la solution, le traitement des résultats et l'optimisation. ANSYS fournit une plateforme de calcul multi-physique qui intègre la mécanique des fluides et des structures, l'électromagnétique, la thermodynamique et la modélisation des systèmes et des circuits.

Le logiciel d'analyse structurelle ANSYS simule tous les aspects structurels d'un produit, de l'analyse statique linéaire, qui fournit simplement des contraintes ou des déformations, à l'analyse modale, qui détermine les caractéristiques de vibration, aux phénomènes non linéaires transitoires avancés impliquant des effets dynamiques et des comportements complexes, dans cette thèse ce solveur est largement utilisé pour traiter des essais spécialement à court terme et pour bien étudié l'influence de défaut parce qu'il fournit une liste d'outils spécifiquement pour faire des analyses sur des défauts initié d'une façon avancé. Les solutions logicielles d'analyse dynamique explicite d'ANSYS sont capables de résoudre des problèmes de courte durée, de grande déformation, de fracture, de rupture complète de matériau et de structure avec des interactions de contact complexes, mais dans ce chapitre, nous l'utilisons uniquement pour mentionner les étapes de déformation jusqu'à la rupture complète d'une plaque.

### III.4 Les essais préliminaires

Tableau III.1 Les différents types des plaques réalisées

<p>Plaque sans défaut</p> 	<p>Dimensions des prototypes</p>	<p>Matériau</p>
	<p>100x50x1 mm</p>	<p>Acier standard</p>
<p>Plaque avec un défaut circulaires</p> 	<p>Dimensions des cercles</p>	<p>Matériau</p>
	<p>10 mm 15 mm 20 mm</p>	<p>Acier standard</p>
	<p>Dimensions de l'ellipse</p>	<p>Matériau</p>

Plaque avec un défaut elliptique verticale 	15 mm 10 mm 25 mm 10 mm	Acier standard
Plaque avec un défaut elliptique horizontale 	Dimensions de l'ellipse	Matériau
	10 mm 15 mm 10 mm 25 mm	Acier standard
Plaque avec un défaut V 	Dimensions $A_{mm} \times B_{mm}$	Matériau
	2.5 x 0.5 5 x 0.5 10 x 0.5 2.5 x 1 5 x 1 10 x 1 2.5 x 1.5 5 x 1.5 10 x 1.5	Acier standard

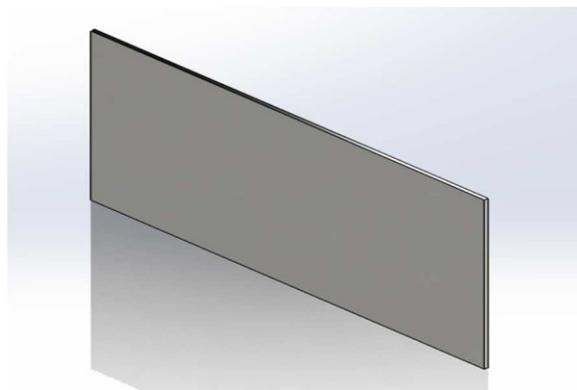


Figure III.2 Vue isométrique de model importé (la plaque sans défaut)

### III.5 Simulation statique des plaques

Maintenant et après la conception ont va transférer l'article ver le simulateur ANSYS WORKBENCH pour faire une analyse statique essai de traction, cette dernière demande des entrés importante tel que la définition de matériau, le type de maillage, l'endroit de fixations et le chargement tous cela pour bien étudier la répartition des contraintes ainsi que l'effet de chargement.

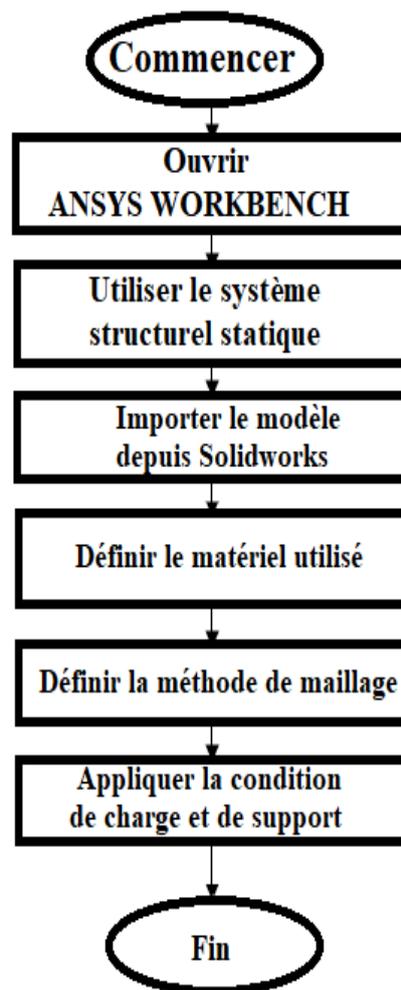


Figure III.3 Procédure de la simulation sur structure statique

Dans cette partie nous utilisons l'acier standard on change la pression chaque fois pour définir l'effet de chargement sur la structure, nous extrayons des valeurs de déplacements de déformations et les contraintes de Von mises.

Tableau III.2 Propriétés mécanique de l'acier standard

Propriété	Valeur	Unité
Densité	7850	Kg <sup>m</sup> <sup>-3</sup>
Module de Young	2E+05	MPA
Coefficient de Poisson	0.3	
Coefficient de résistance cyclique	1000	MPA
Coefficient de résistance	920	MPA
Exposant de résistance	-0.106	
Coefficient de ductilité	0.213	
Exposant de ductilité	-0.47	
Constante de vitesse de déformation	0.014	
Exposant d'érouissage cinématique cyclique	0.2	
Module de masse	1.66E+05	MPA
Module de cisaillement	76923	MPA
Limite d'élasticité en traction	250	MPA
Résistance ultime à la traction	460	MPA

L'élément hexaèdre tridimensionnel de la bibliothèque ANSYS a été utilisé pour la simulation (maillage) et il est utilisé pour simuler des structures définies comme des corps tridimensionnels. L'élément est défini par huit nœuds, chacun avec trois degrés de liberté et de traduction dans les sens x, y et z du cadre de référence.

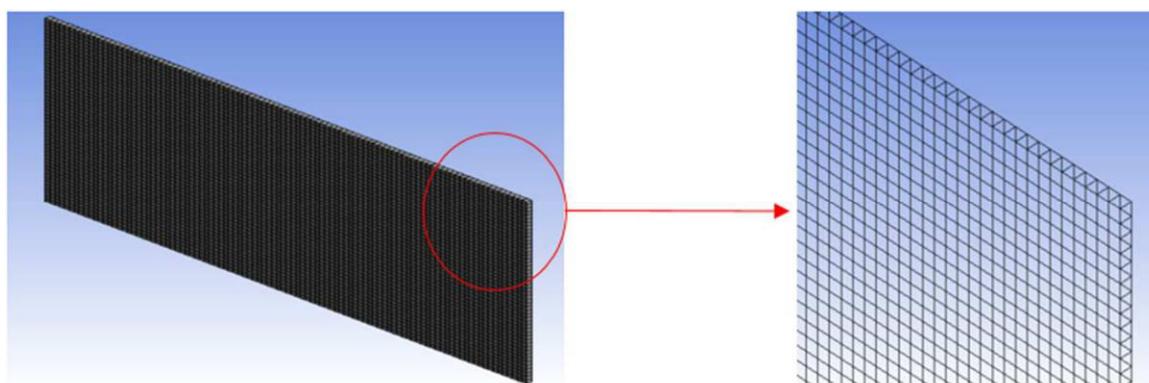


Figure III.4 Maillage automatique contrôlé de la plaque sans défaut



Figure III.5 Fixation et l'application de la charge

Supposent qu'il y a 4 différentes forces (5KN, 7.5KN, 10KN, 11.5KN) qui sont appliquées sur les plaques proposées (plaque sans défaut, plaque avec un défaut circulaire, plaque avec un défaut elliptique verticale, plaque avec un défaut elliptique horizontale, plaque avec un défaut en V) nous avons obtenus les résultats suivants :

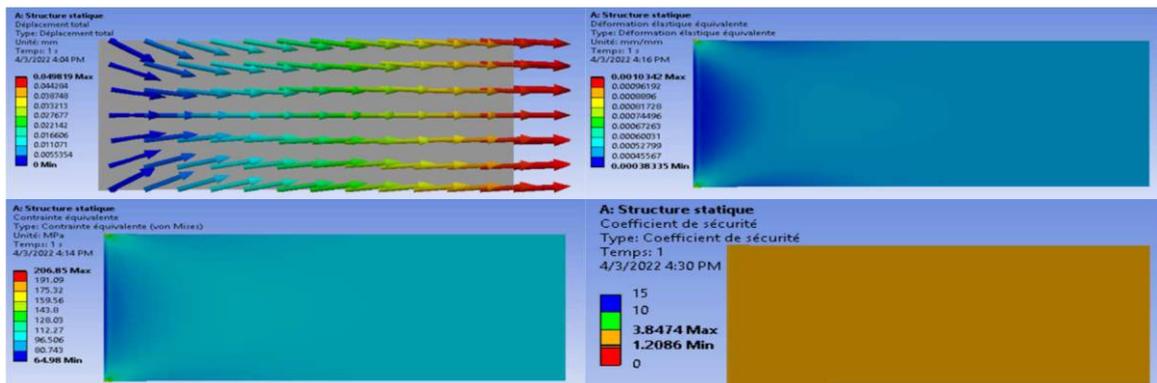


Figure III.6 Les résultats Déplacements, Déformations et les contraintes (F = 5 KN)

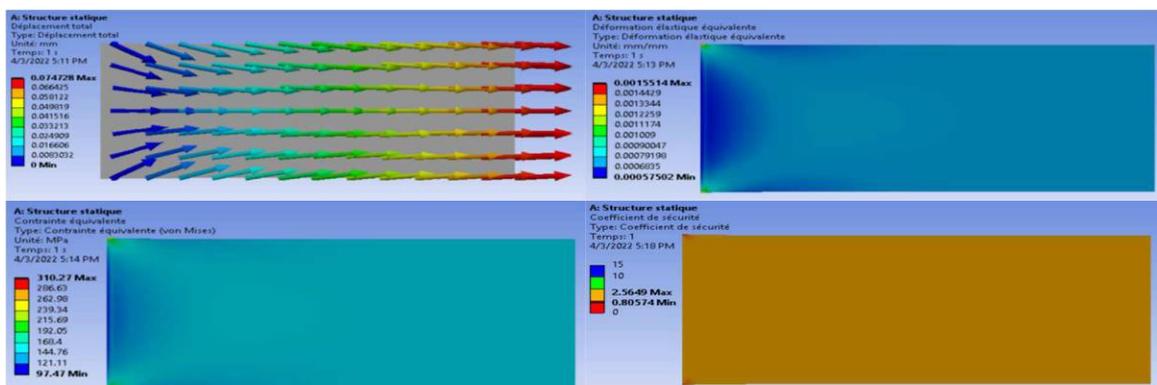


Figure III.7 Les résultats Déplacements, Déformations et les contraintes (F = 7.5 KN)

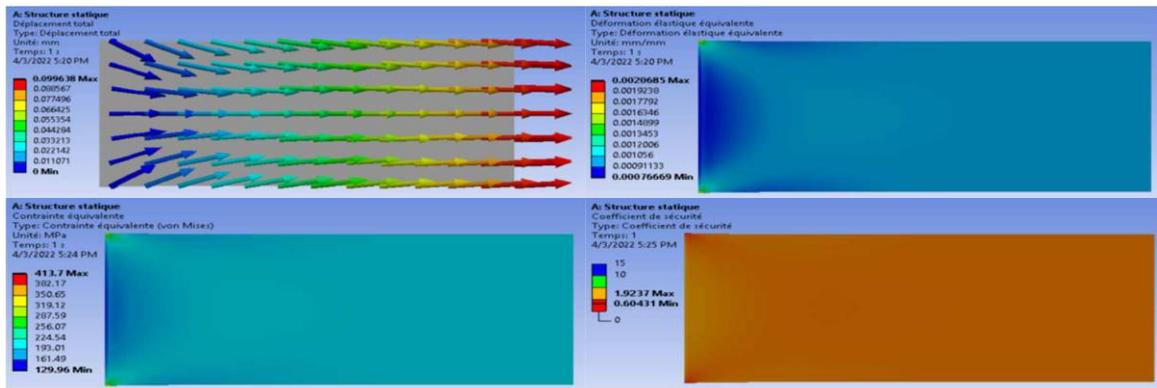


Figure III.8 Les résultats des Déplacements, des Déformations et des contraintes (F = 10 KN)

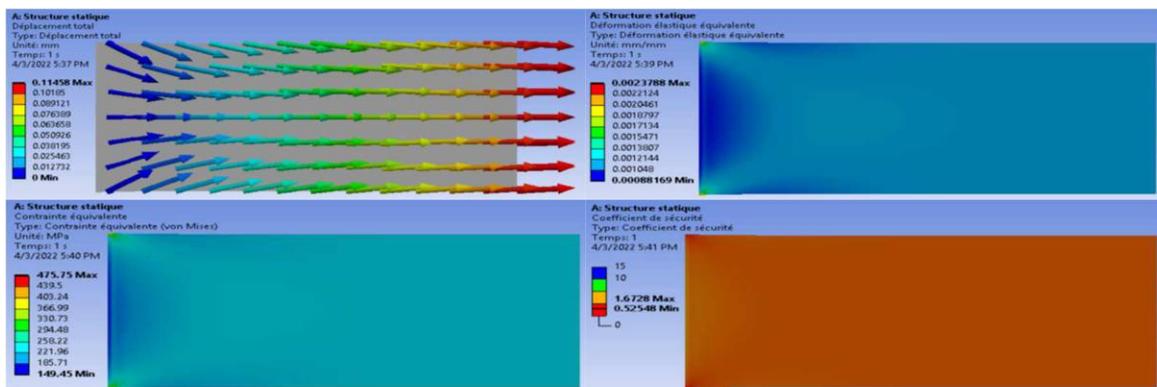


Figure III.9 Les résultats Déplacements, Déformations et les contraintes (F = 11.5 KN)

Les Figures III.6, III.7, III.8, III.9 montre que les maximums des valeurs changent sa position, les déplacements max par exemple sont près à l'extrémité d'application de la force, pour les déformations max et les contraintes max sont près à l'extrémité de fixation.

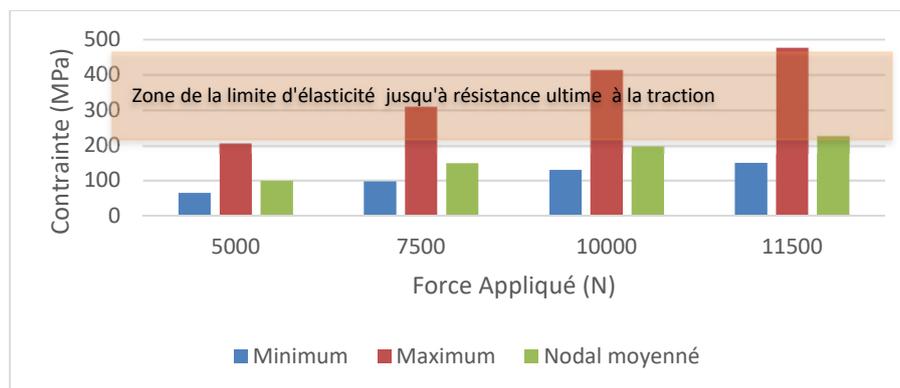


Figure III.10 Le récapitulatif des contraintes de Von Mises pour 4 différentes forces

Nous remarquons que les contraintes maximales dépassent la limite élastique du matériau pour les cas où nous avons appliqué les forces 7, 10 et 11.5 KN

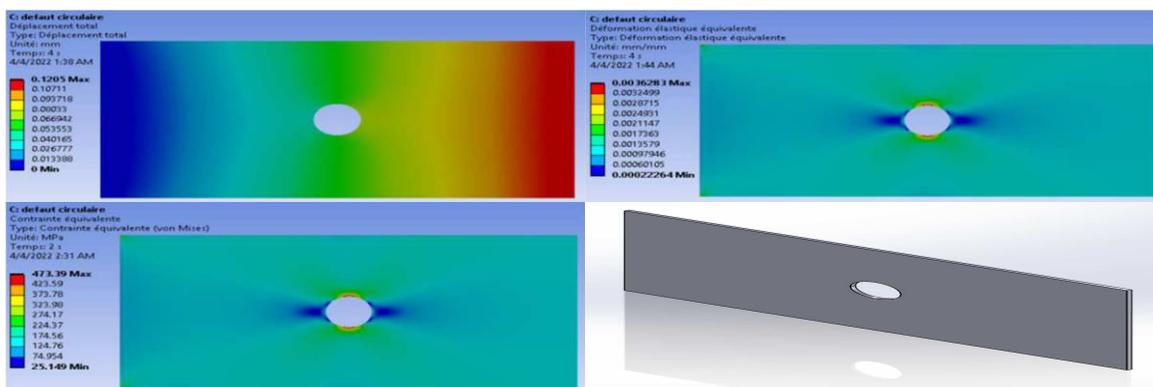


Figure III.11 Les résultats d'une plaque avec un défaut circulaire  $\text{Ø}=10$  mm (force = 7.5 KN)

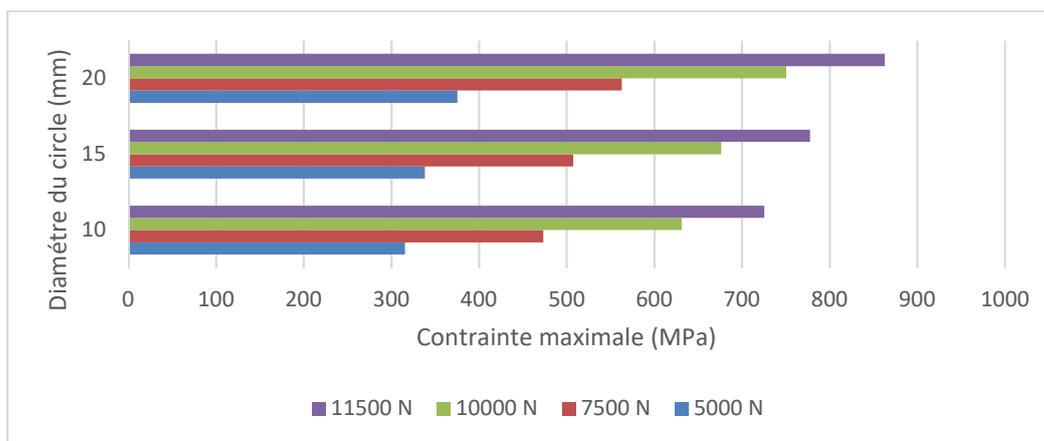


Figure III.12 Récapitulatif des contraintes de V.M pour une plaque avec un défaut circulaire

D'après les deux figures III.11 et III.12 on peut constater que les déformations et les contraintes max se situent autour du défaut circulaire et chaque fois le diamètre du défaut augmente la contrainte augmentée également.

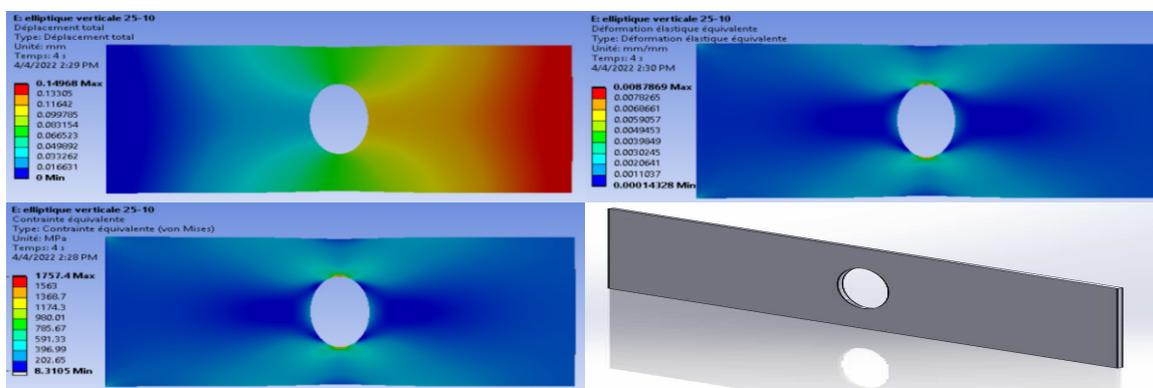


Figure III.13 Les résultats d'une plaque avec un défaut elliptique verticale (25 x 10) (force = 11.5KN)

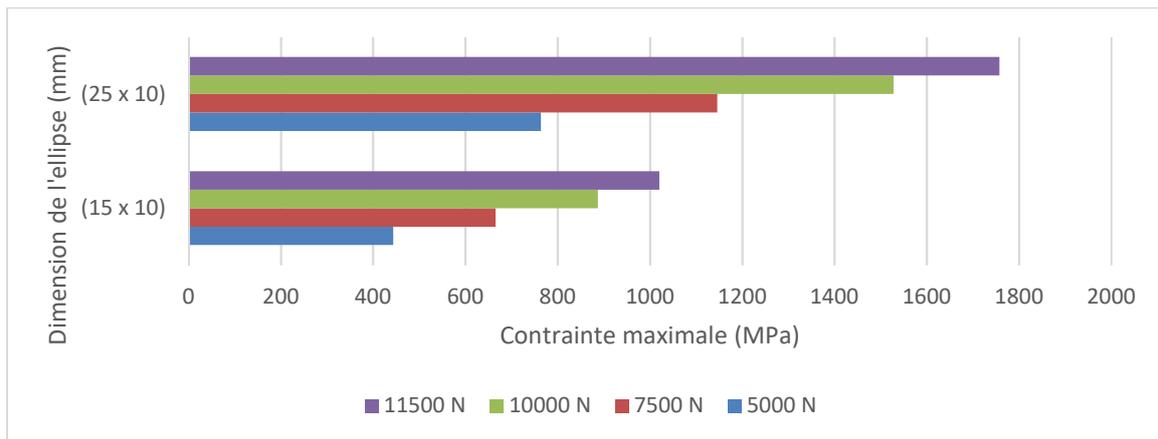


Figure III.14 Récapitulatif des contraintes de V.M pour une plaque avec un défaut elliptique verticale

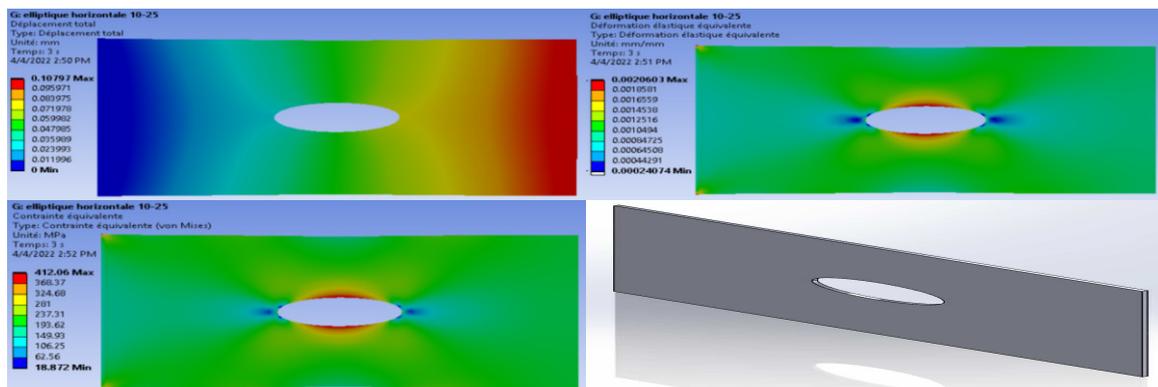


Figure III.15 Les résultats d'une plaque avec un défaut elliptique horizontal (10 x 25) (force = 10KN)

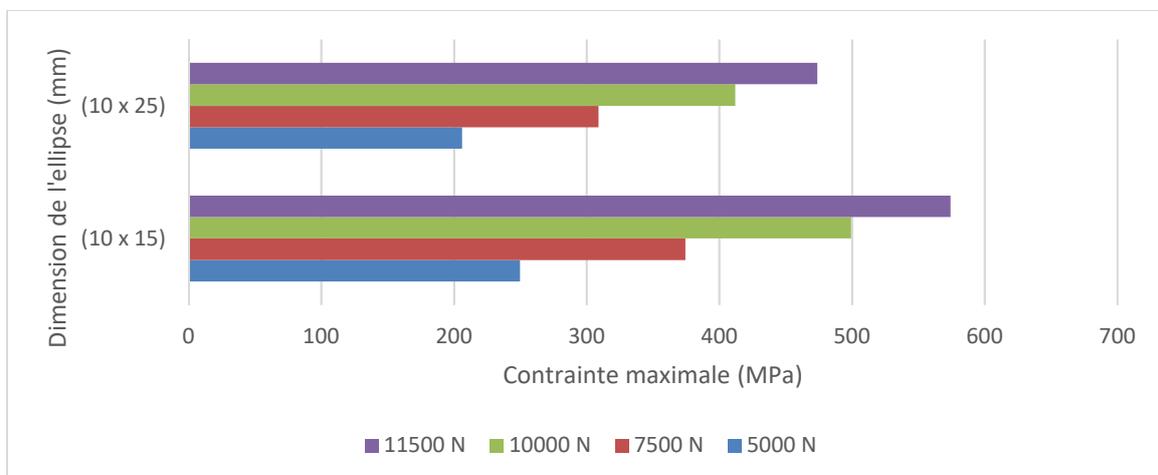


Figure III.16 Récapitulatif des contraintes de V.M pour une plaque avec un défaut elliptique horizontal

Nous constatons que les contraintes maximales lorsque nous appliquons 4 différentes forces diminuées après avoir augmenté les dimensions du défaut ça c'est juste pour le cas d'une plaque avec le défaut elliptique horizontale, d'autre part le défaut elliptique horizontale suit la même loi du défaut circulaire « lorsque les dimensions du défaut augmentes les valeurs des contraintes augmentes ».

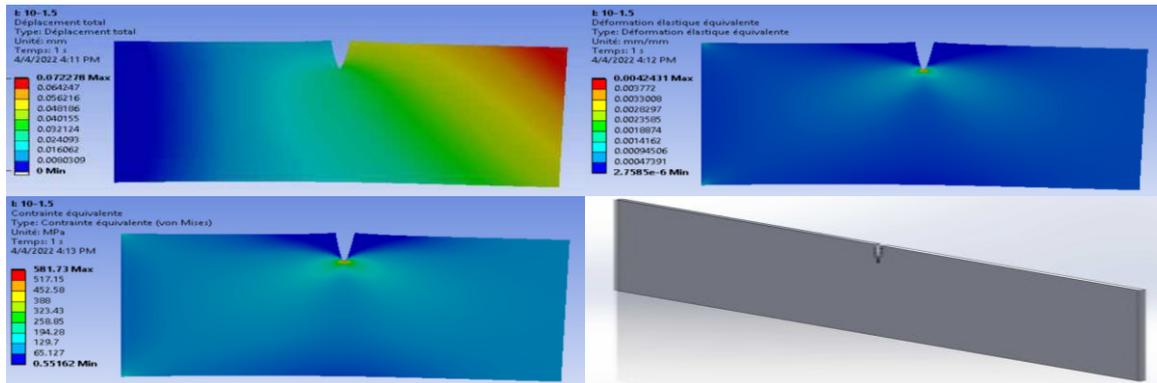


Figure III.17 Les résultats d'une plaque avec un défaut en V (10 x1.5) (force = 5KN)

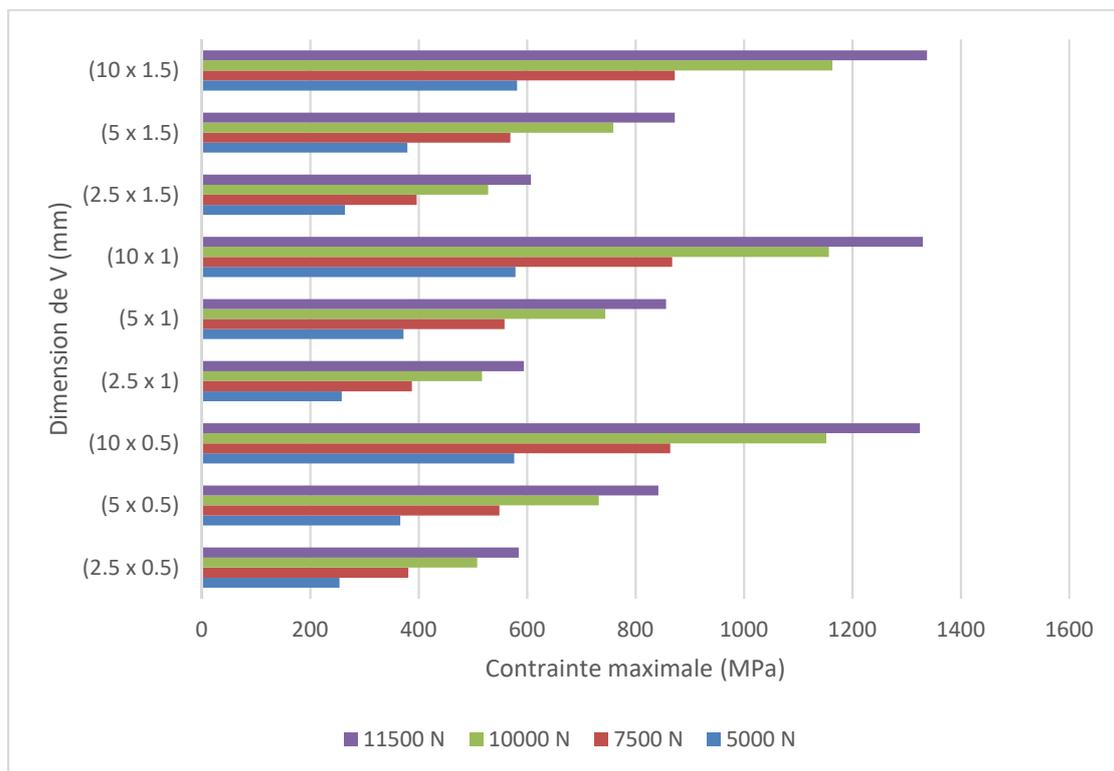


Figure III.18 Le récapitulatif des contraintes de V.M pour une plaque avec un défaut en V

La figure III.17 illustre que les déplacements max positionné au coin de la plaque, ce qui concerne les contraintes sont augmenté en parallèle de la dimension du V (figure III.18).

### III.6 Simulation dynamique explicite d'une plaque

Gardant la même géométrie de la plaque sans défaut tout en utilisant l'acier 4340 comme matériau ses propriétés sont illustrées dans le tableau ci-dessous:

Tableau III.3 Propriétés mécanique de l'acier 4340

Propriété	Valeur	Unité
Densité	7830	Kg <sup>m</sup> <sup>-3</sup>
correction du taux de déformation	1 <sup>ère</sup> Ordre	
limite d'élasticité initiale	792	MPa
Module de cisaillement	81800	MPa
Constante de durcissement	510	MPa
Constante de vitesse de déformation	0.014	
Module de masse	1.59E+05	MPa
Exposant de durcissement	0.26	

Le maillage linéaire est utilisé avec la taille d'élément égale à 1 mm avec une discrétisation de 10302 nœuds et 5000 éléments.



Figure III.19 Maillage linière de la plaque sans défaut

Avant l'exécution de la simulation on a défini le chargement comme un déplacement avec une grande valeur jusqu'à 10000 mm dans le sens inverse de fixation et pour le code de calcul doit prendre le point 0.005 s pour visualisé les résultats.

Les figures suivantes représentent la distribution des contraintes de V.M de l'apparaitre du défaut jusqu'à la rupture totale.

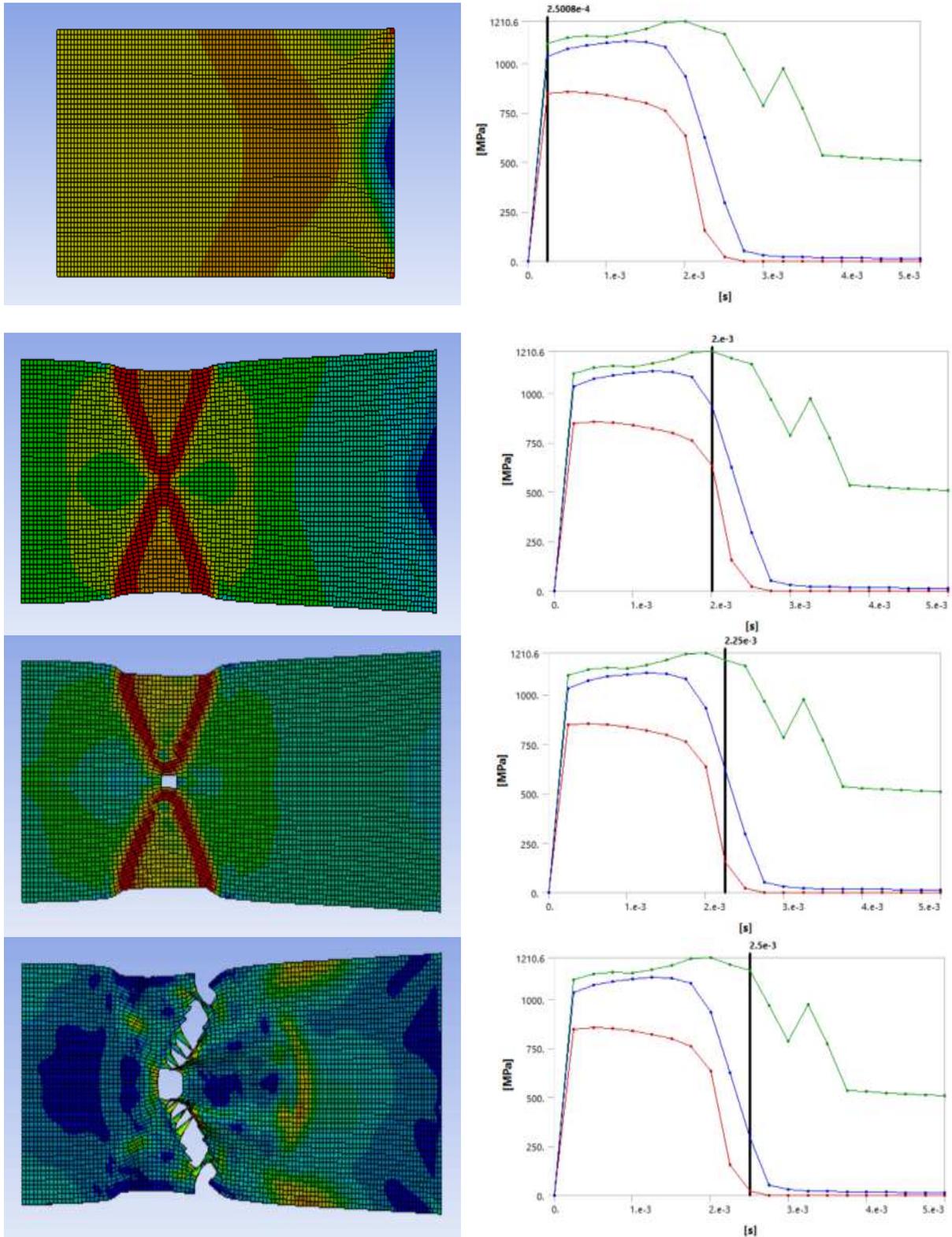


Figure III.20 Le déroulement de la simulation : les contraintes de V.M par rapport au temps

Lorsque l'on augmente le déplacement, les contraintes provoquent un changement de positionnement et la plaque commence à se rétrécir en diminuant la largeur à cause de la traction. À la fin, on remarque le diagramme X en rouge, qui représente la région la plus importante où les contraintes de Von Mises prennent les valeurs maximales, ce qui se traduit par l'apparition d'une fissure et discontinuité du matériau.

### III.7 Simulation statique sur les pipes en acier

Nous considérons les données du Tableau III.4 qui représentent, les caractéristiques spécifiques de l'API X80M pour la fabrication des pipelines ; les valeurs ci-dessous sont des valeurs indicatives

Tableau III.4 Propriétés mécaniques de l'acier ISO 3183 X80M

Propriétés	MPa
Limite d'élasticité (YS)	568
Résistance à la traction (TS)	686
YS/TS (%)	83
Allongement (%)	44
Micro-dureté moyenne (HV0.2)	235

Pour étudié les contraintes longitudinales nous appliquons des charges de traction à l'extrémité d'une canalisation de 722 mm de diamètre intérieur, d'une épaisseur de 10 mm et d'une longueur de 1000 mm, nous avons appliqué quatre pressions différentes (5, 6, 7 et 8 MPa).

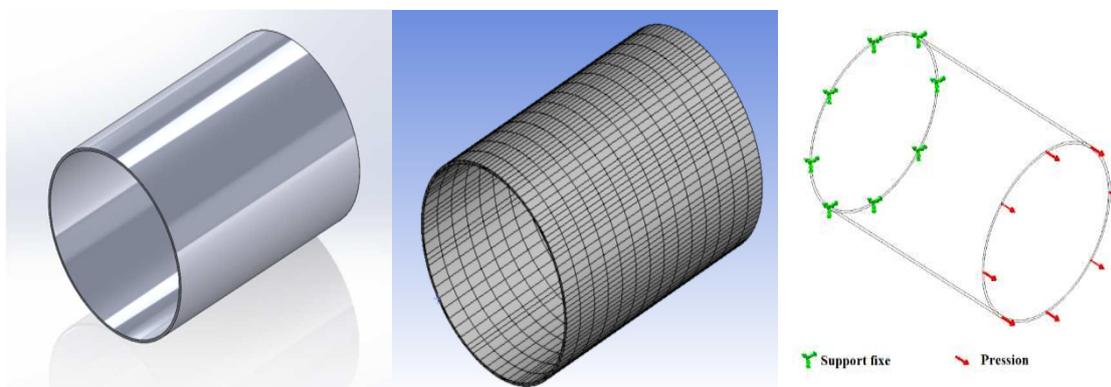


Figure III.21 La géométrie, maillage, l'endroit de fixations et l'applications de la charge

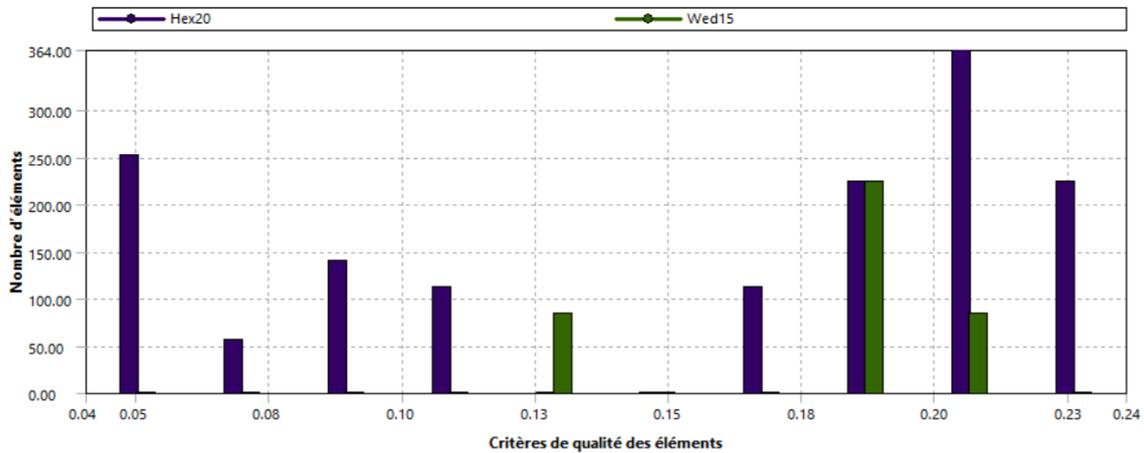


Figure III.22 Affichage métrique de qualité de l'éléments de maillage

Les bandes vertes montrent les endroits mal maillés où il y a maillage non conforme ça nous demande de faire des améliorations ou un taillage des éléments.

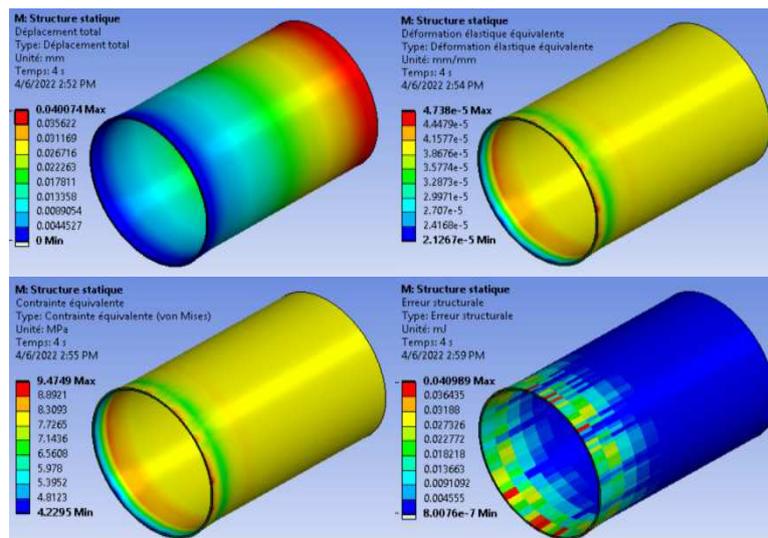


Figure III.23 Les résultats d'un pipe soumis à la traction sous pression de 8 MPa

Comme la Figure III.23 illustre les contours des déplacements, déformations et des contraintes, elle montre aussi les erreurs structurales ce qui représente les endroits mal traité par les algorithmes du solveur

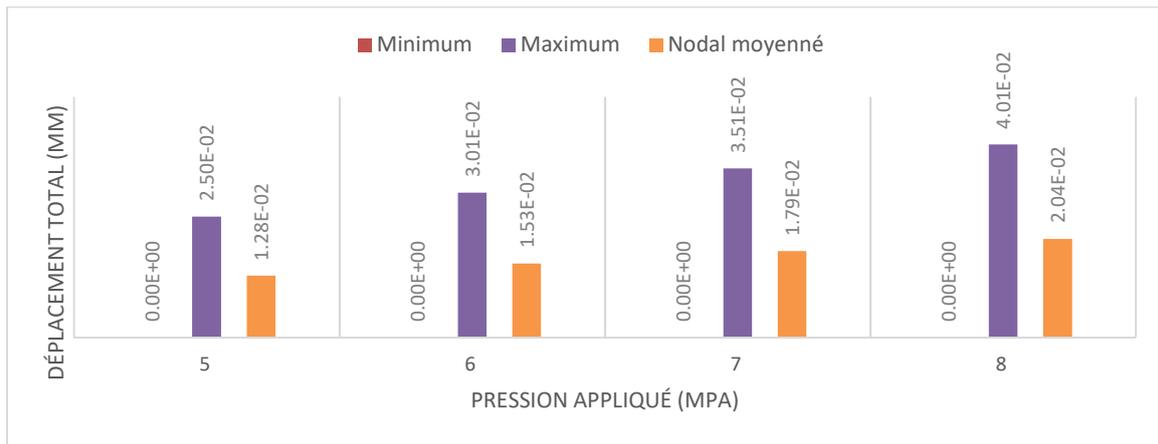


Figure III.24 Le récapitulatif des déplacements totaux pour 4 différents pressions

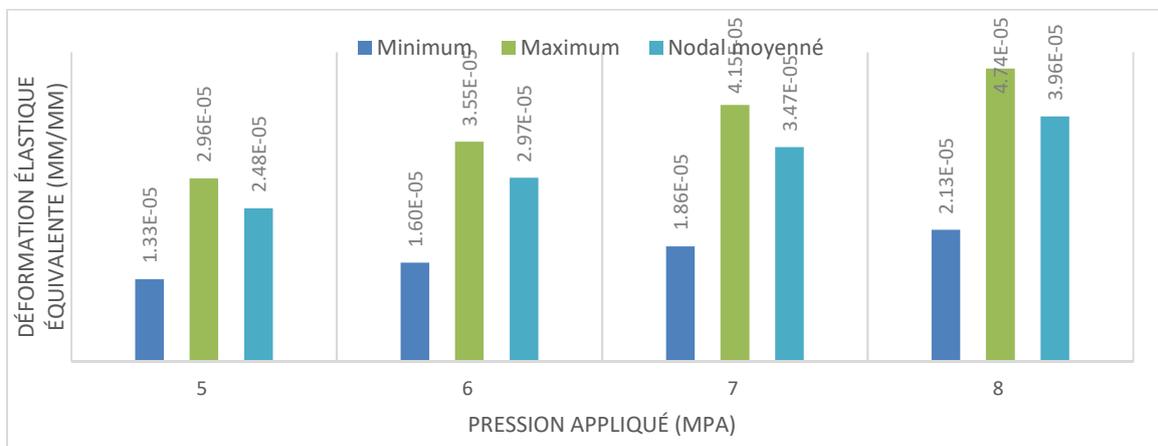


Figure III.25 Récapitulatif des déformations pour 4 différentes pressions

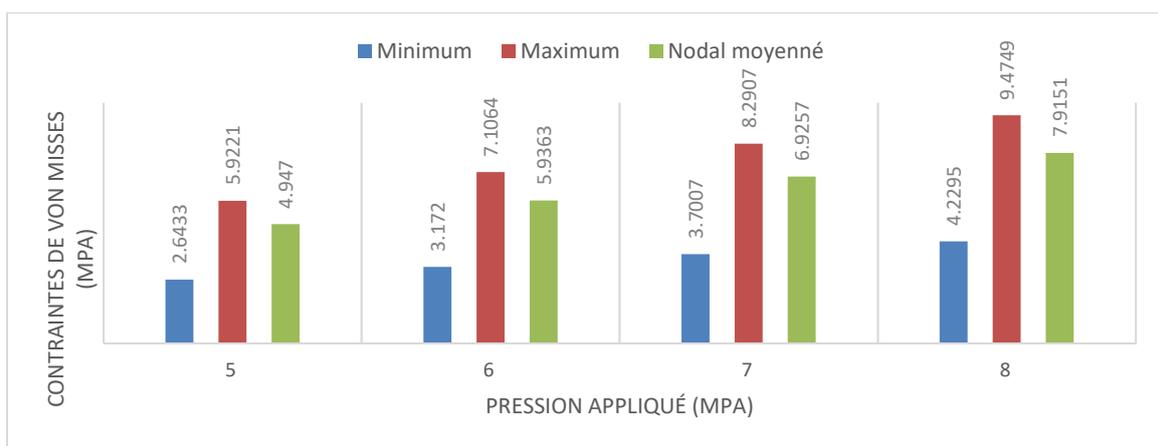


Figure III.26 Le récapitulatif des contraintes de Von Mises pour 4 différentes pressions

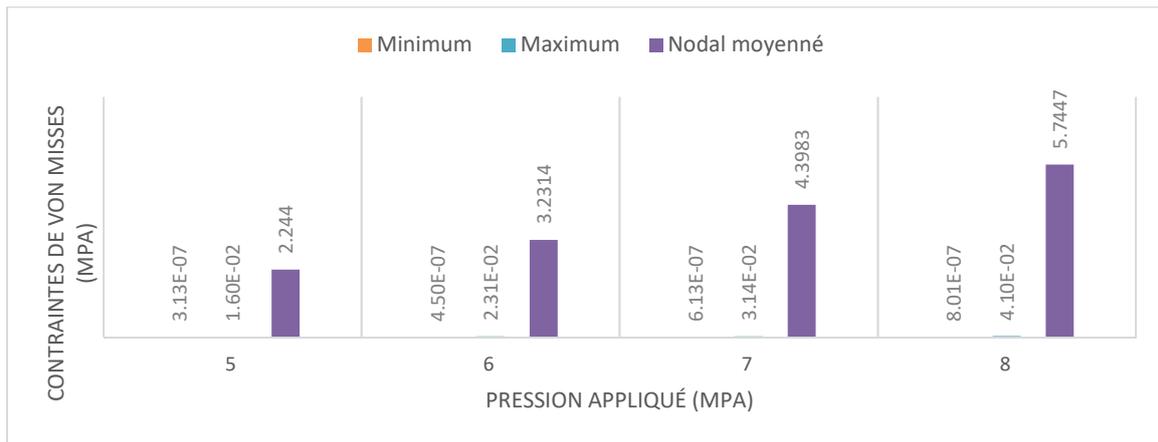


Figure III.27 Le récapitulatif des erreurs structurales pour les 4 différents pressions

A l'intérieure canalisation de 722 mm de diamètre intérieur, d'une épaisseur de 10 mm et d'une longueur de 1000 mm, nous avons appliqué quatre pressions différentes (5, 6, 7 et 8 MPa).

Pour obtenir le maximum de nombre des nœuds et des éléments ça veut dire des résultats plus précis nous utilisons l'outil de taillage de corps « Dimensionnement » à cause de la longueur de notre pipe nous choisissons la taille de l'élément égale à 10 mm.



Figure III.28 L'ajout d'un outil de dimensionnement

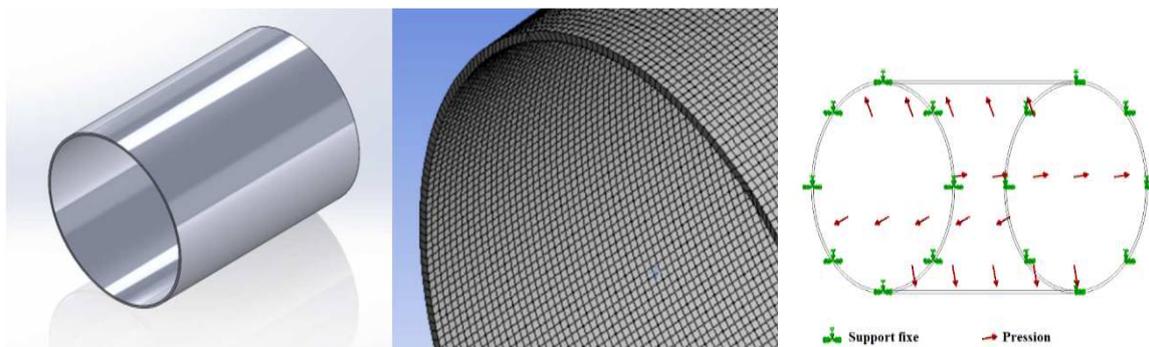


Figure III.29 La géométrie, maillage, fixations et l'applications de la charge

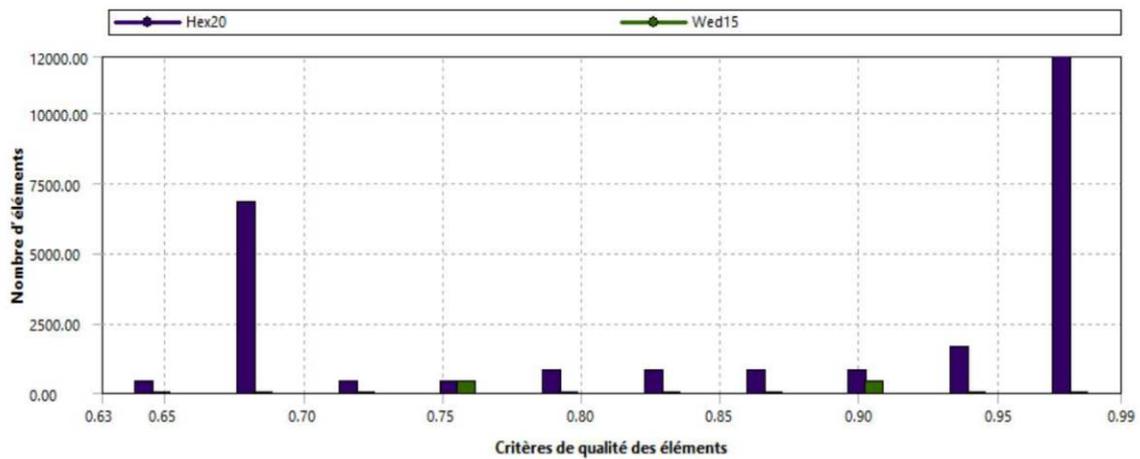


Figure III.30 Affichage métrique de qualité de l'éléments de maillage

Nous testons "L'indépendance du maillage" pour trouver une taille de maille appropriée, comme le montre la Figure III.31.

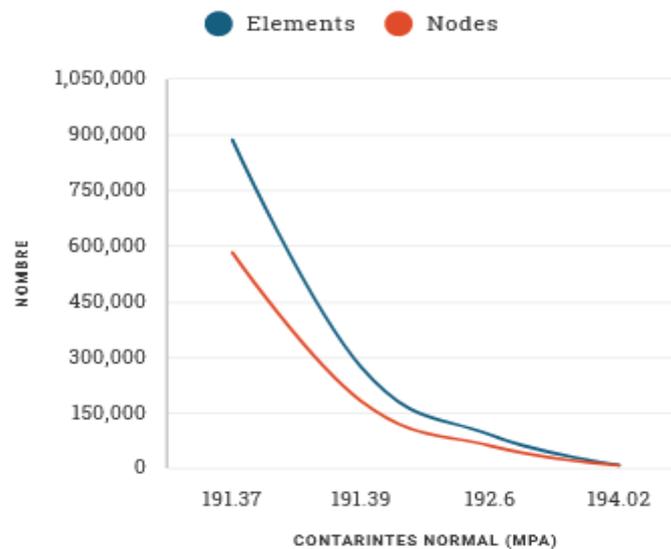


Figure III.31 L'indépendance du maillage

- La ligne de résultats de contra inte devient horizontale, ce qui montre l'indépendance du maillage.
- Modification autorisée inférieure à 1 %.
- Augmentation du nombre d'éléments en fonction de la contrainte normale et du nombre de nœuds.

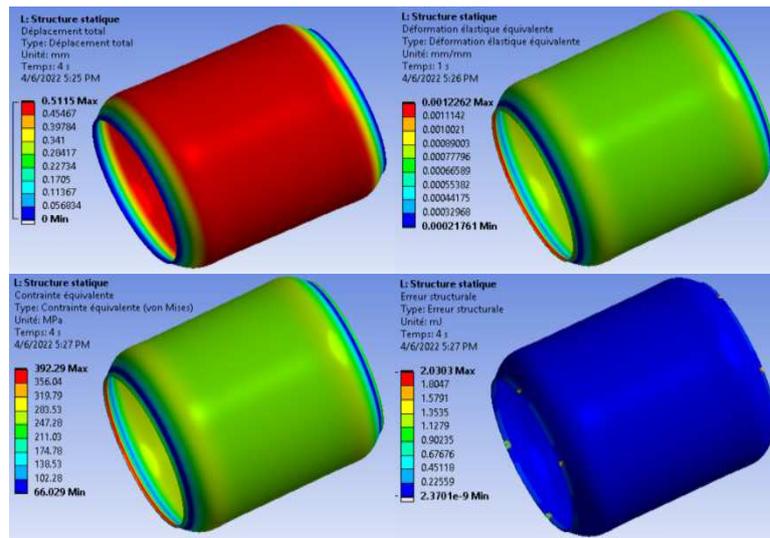


Figure III.32 Les résultats d'un pipe soumis à une pression interne de 8 MPa

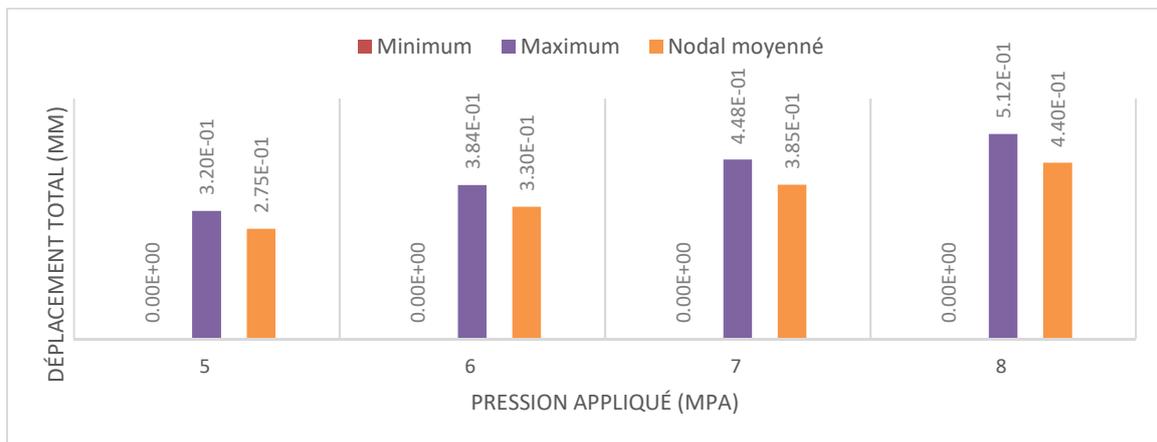


Figure III.33 Le récapitulatif des déplacements totaux pour 4 différents pressions

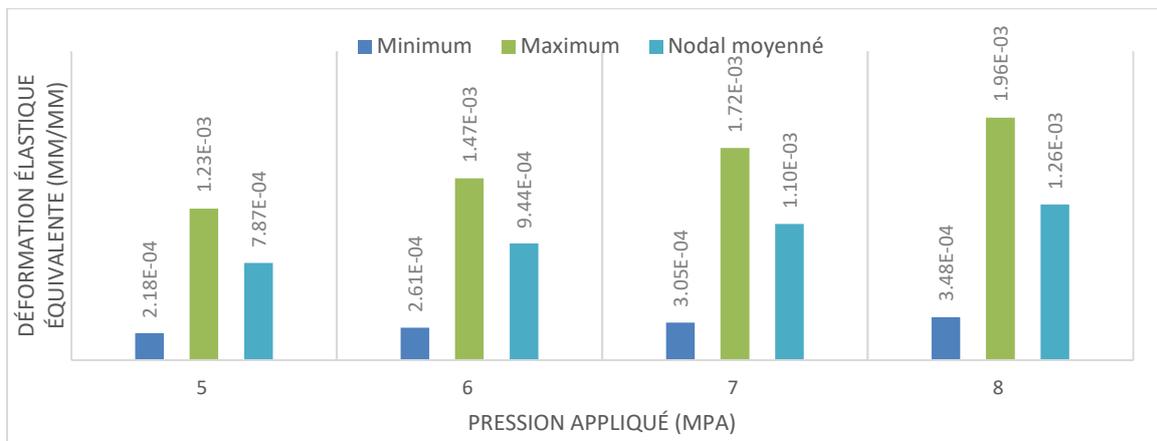


Figure III.34 Le récapitulatif des déformations pour 4 différents pressions

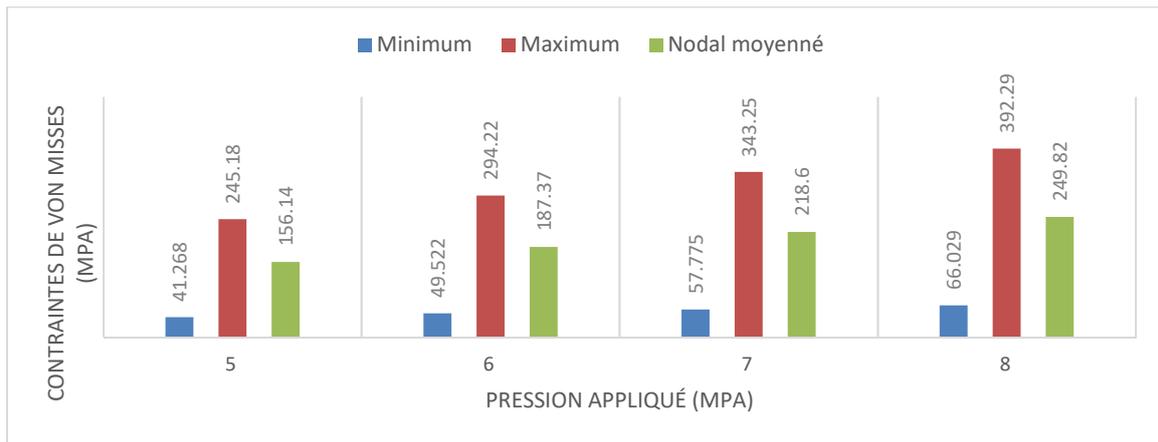


Figure III.35 Le récapitulatif des contraintes de Von Mises pour 4 différents pressions

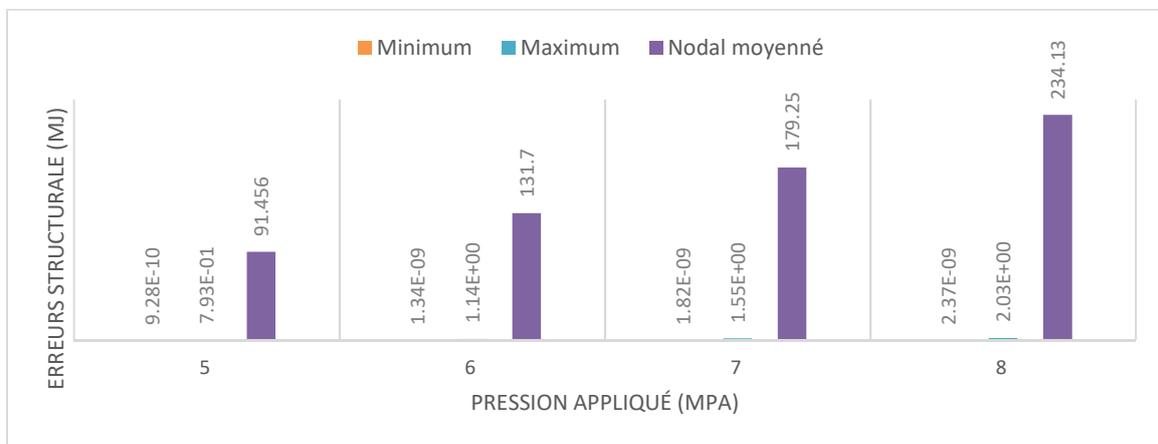


Figure III.36 Le récapitulatif des erreurs structurales pour 4 différents pressions

### III.8 Simulation statique sur un assemblage soudé

L'assemblage des pipes en acier par soudage provoque de nouvelle distribution des contraintes aux niveaux de la structure globale pour cela notre prochaine simulation sur le manque de pénétration de soudage tout en utilisant un modèle différent de tubes soudé soit au niveau du matériau ou le dimensionnement de la structure.

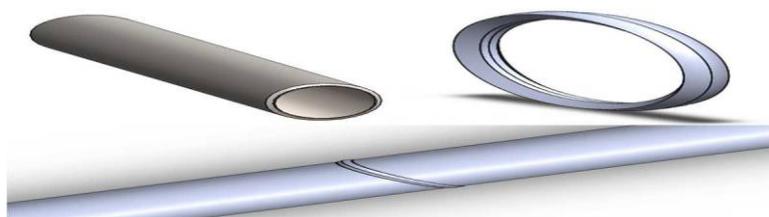


Figure III.37 La géométrie de pipe, cordon de soudure et l'assemblage

Pièce	$D_{ext}$ (mm)	$D_{in}$ (mm)	$E_p$ (mm)	Chanfrein ( $^{\circ}$ )
Pipe	63	54.40	8.6	30
Cordon	63+0.7	55	11	30

Tableau III.5 Les dimensions de pipe et le cordon de soudure

Pour créer notre défaut, nous allons jouer sur la surépaisseur de joint de soudure (Figure III.38).

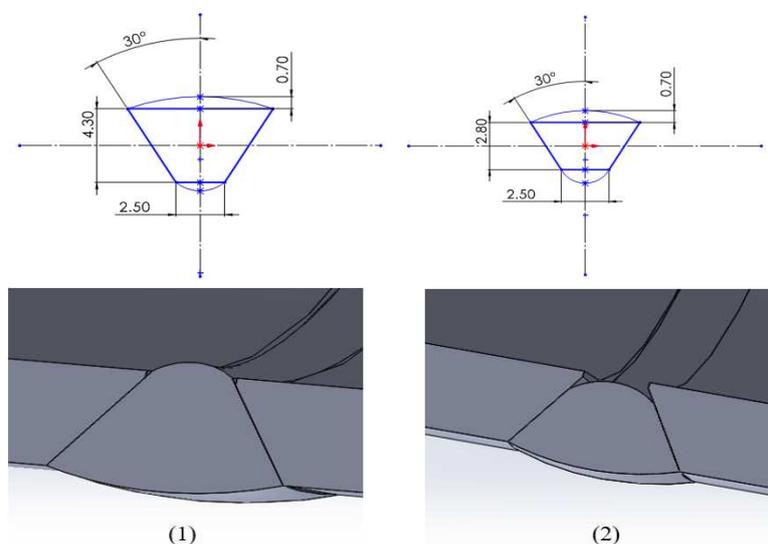


Figure III.38 Le joint soudé (1) le joint parfait (2) le joint défectueux

Nous intégrons les propriétés de l'acier API 5L X52 a la table des matériaux ANSYS WORKBENCH pour identifier tous les pièces lorsque nous exécute la simulation voire tableau

Tableau III.6 Les propriétés de MB, ZAT, Cordon de soudure

	E (MPa)	$\sigma_{ys}$ (MPa)	$\sigma_{UTS}$ (MPa)
Métal de base	206.850	391.97	591.02
Zone affectée par la chaleur	206.850	363.01	616.20
Cordon de soudure	206.850	385.83	601.15

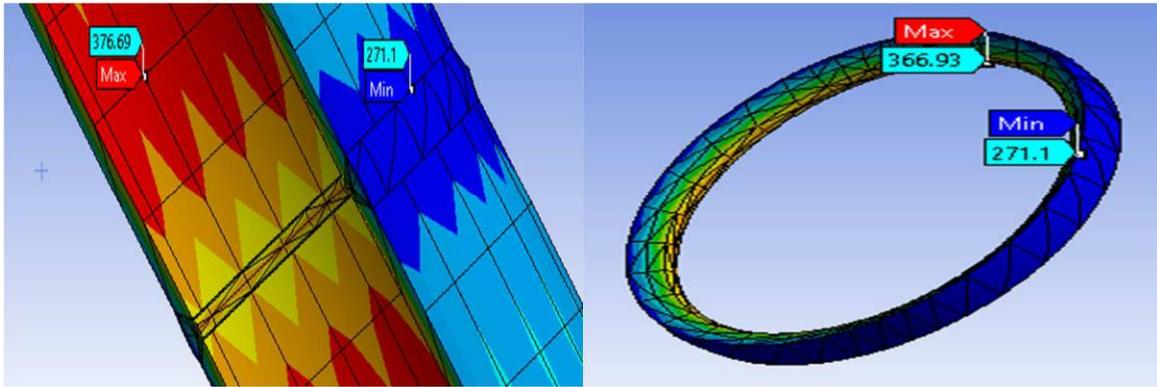


Figure III.39 Les résultats de  $\sigma_{max}$  et  $\sigma_{min}$  pour le modèle 1 sous pression interne 50 MPa

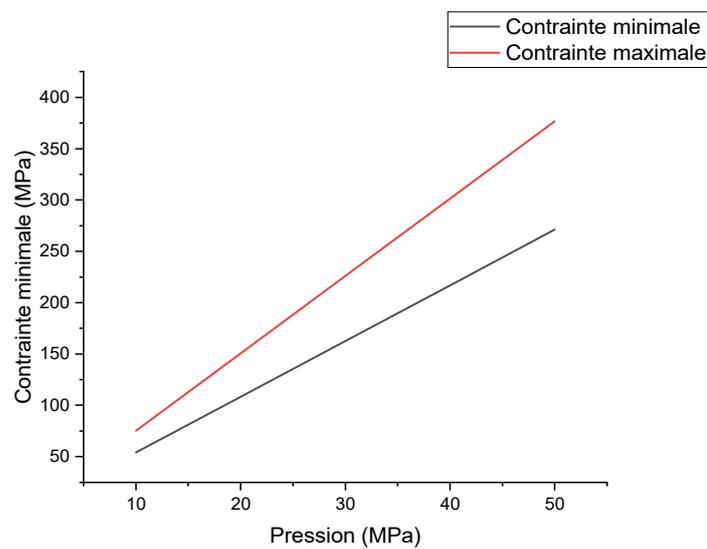


Figure III.40 Les résultats des contraintes sous différentes pressions (cas de joint parfait)

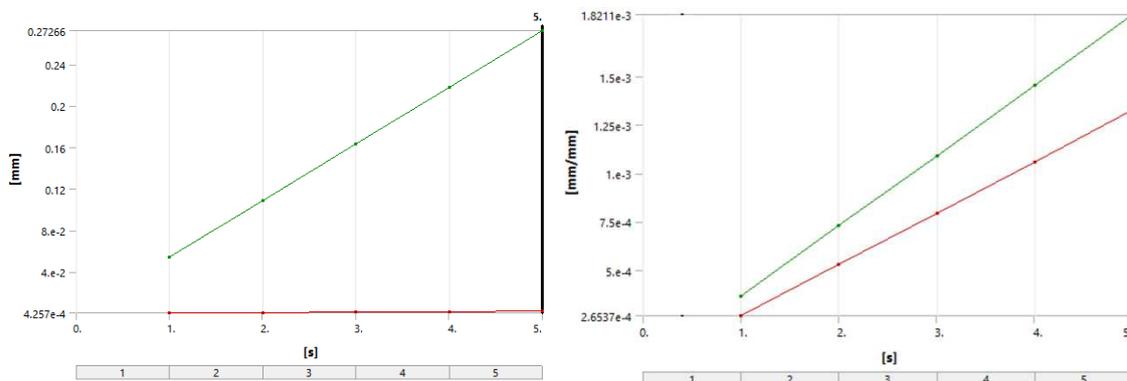


Figure III.41 Les résultats des déplacements et des déformations (Modèle 1)

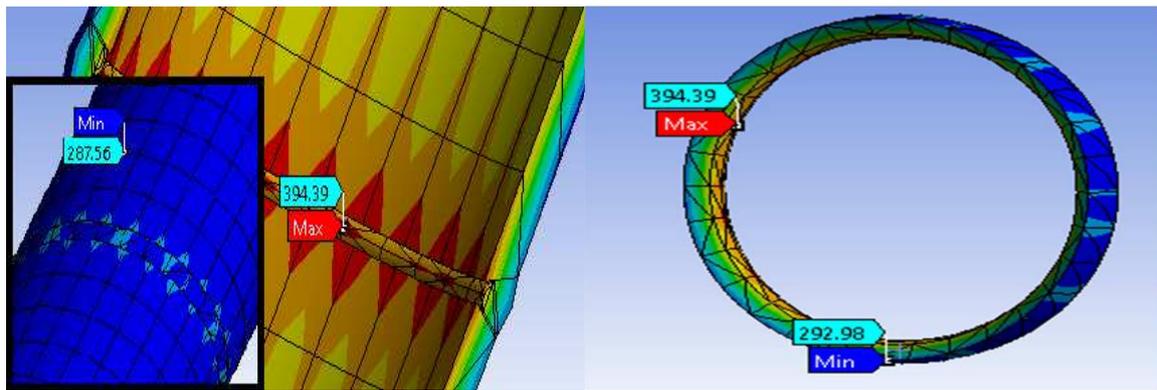


Figure III.42 Les résultats de  $\sigma_{max}$  et  $\sigma_{min}$  pour le modèle 2 sous pression interne 50 MPa

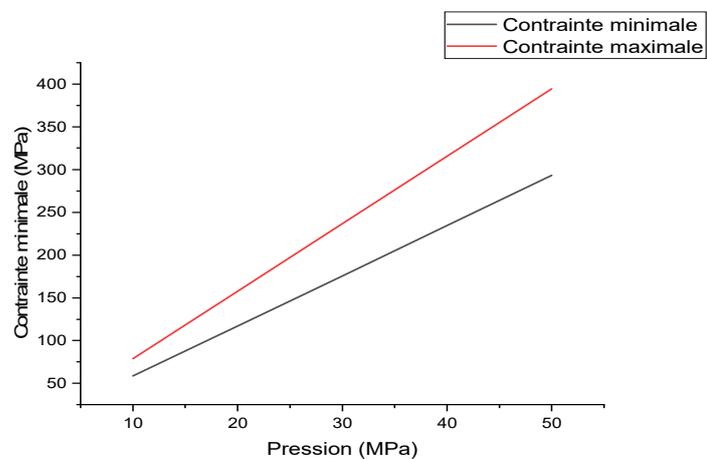


Figure III.43 Les résultats des contraintes pour différents pressions (cas de joint défectueux)

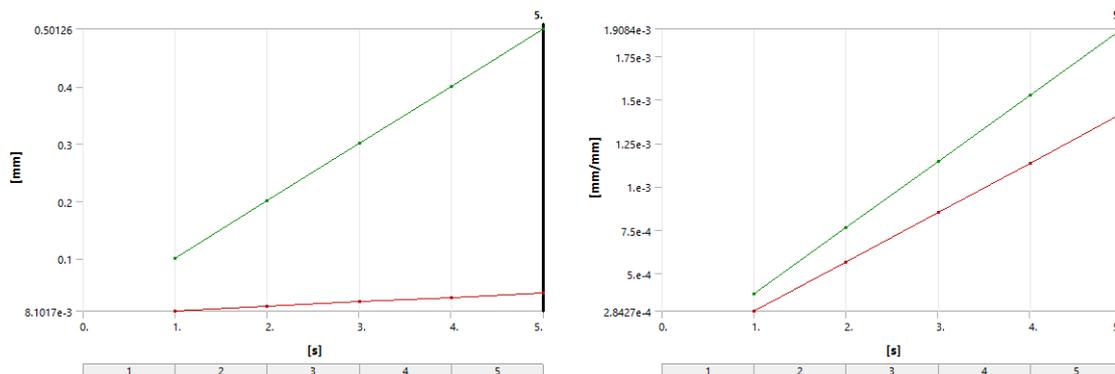


Figure III.44 Les résultats des déplacements et les déformations (Modèle 2)

D'après les résultats précédents de simulation [101], le premier modèle montre que lorsque nous effectuons une bonne pénétration, le point de contrainte maximal sur le tuyau, c'est-à-dire le métal de base et donne 376,69 MPa, cette valeur inférieure à notre limite d'élasticité

maximale de matériau, alors cela nous permet de dire que la soudure est acceptable, sans oublier certains chiffres qui disent qu'il existe une relation de corrélation directe, la première entre les pressions et le déplacement jusqu'à 0,27 mm, la deuxième entre les cinq pressions appliquées et la déformation, mais en ce qui concerne le 2<sup>ème</sup> modèle (manque de pénétration), la zone critique sur le joint de soudure, nous enregistrons dans cette zone 394,39 MPa de contrainte, cette dernière est supérieure à la limite d'élasticité maximale du matériau pour les trois zones de l'API 51 X52, sans oublier l'incrément de déformation et de déplacement.

### III.9 Simulation statique sur les pipes en PEHD

La différence la plus importante entre PE63, PE80 et PE100 est la résistance minimale requise (MRS). MRS est la contrainte de traction circonférentielle calculée (circulaire) dans la paroi du tuyau lorsque le tuyau se rompt 50 ans après avoir été appliqué en continu sur la paroi du tuyau en résine de polyéthylène. La prochaine étape c'est de simuler 2 classes de pipes en polyéthylène PE80 et PE100 [102], dans le but de définir le parcours de développement de ce type de pipes et est d'évaluer les contraintes circonférentielles dans les pipes.

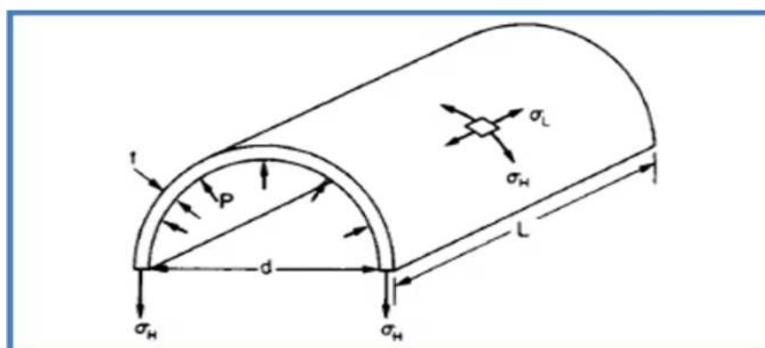


Figure III.45 Les contraintes longitudinales et circonférentielles dans une canalisation

Tableau III.7 Propriétés mécanique de PE80 et PE100

Propriété	Unités	PE80	PE100
Densité	kg/m3	950	960
Résistance à la traction	MPa	20	23
Allongement au rendement	%	10	8
Module de traction – court terme	MPa	700	950
Module de traction – long terme	MPa	200	260
Résistance à la traction ultime	MPa	26.4	30.36

Pour concevoir un tuyau avec l'épaisseur requise pour une pression et un diamètre donnés, par exemple, la formule suivante s'applique :

$$\sigma = MRS/C \tag{III.1}$$

$$\sigma = \frac{P(D - e)}{2e} \tag{III.2}$$

- $\sigma$  = tension de paroi, contrainte dimensionnelle
- $MRS$  = Il s'agit de la contrainte circonférentielle que peut supporter sans rupture un tube pendant 50 ans (eau à 20°C).
- $C$  = facteur de sécurité, typiquement 1,25 pour l'eau
- $p$  = pression interne du tuyau
- $D$  = diamètre extérieur du tuyau
- $e$  = épaisseur du tuyau

Tableau III.8 La dimension choisie selon les normes

Diamètre nominal DN (mm)	Épaisseur de la paroi (mm)	Diamètre intérieur (mm)	Poids (kg/m)	Longueur (mm)
63	8.6	45.80	1.56	100

On a Définis le *SDR* (Rapport de dimension standard) :

$$SDR = \frac{\text{Diamètre extérieur}}{\text{Épaisseur de la paroi}} = \frac{63}{8.6} = 7.4 \tag{III.3}$$

Dans cette étude, nous appliquons la *MOP*, la pression de service maximale qui a une relation avec la résistance minimale requise *MRS* de tuyau en PE et le rapport de dimension standard *SDR* du tuyau, ceci est indiqué dans la formule suivante reconnue et appliquée industriellement.

$$MOP = \frac{(20 \times MRS)}{(C \times (SDR-1))}$$

$$MOP (PE80) = \frac{(20 \times 8)}{(1.25 \times (7.4-1))} = 20 \text{ bar} = 2 \text{ MPa} \tag{III.4}$$

$$MOP (PE100) = \frac{(20 \times 10)}{(1.25 \times (7.4-1))} = 25 \text{ bar} = 2.5 \text{ MPa}$$

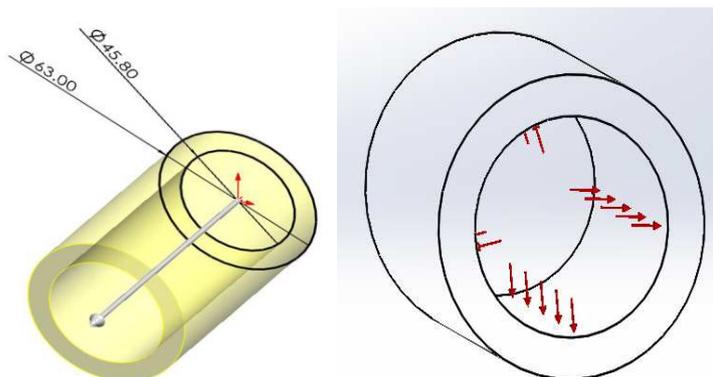


Figure III.46 Conception 3D, l'application de pression

Pour évaluer les contraintes longitudinale et circonférentiel dans le pipe en va appliquer un maillage de faces au section de la pipe pour éviter le maximum d'erreurs structurales.

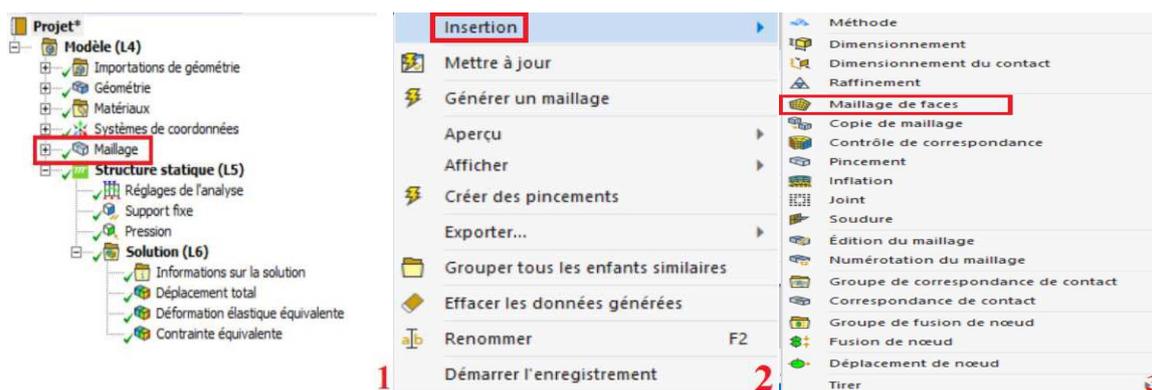


Figure III.47 L'ajout d'un outil de maillage de faces

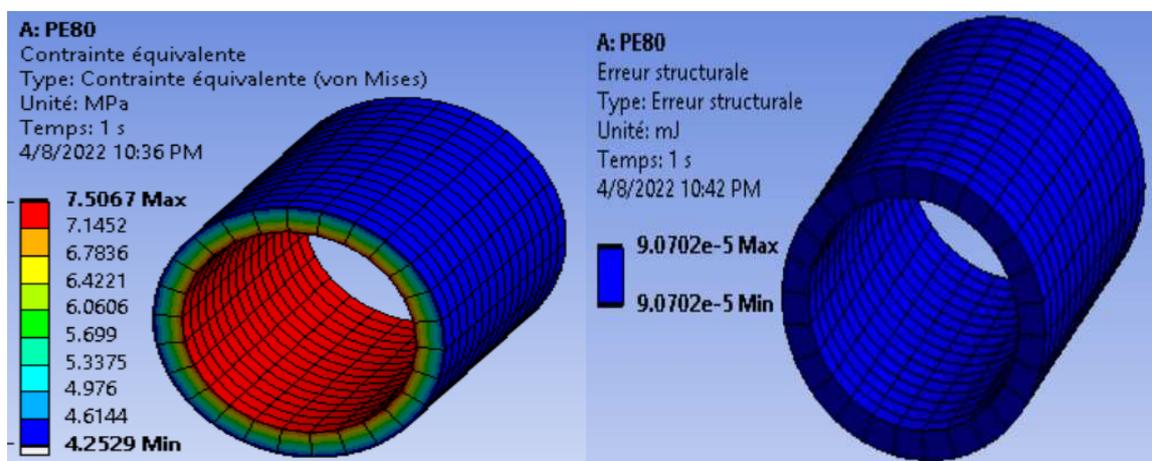


Figure III.48 Les résultats d'un pipe en PE80 soumis à une pression interne de 2 MPa

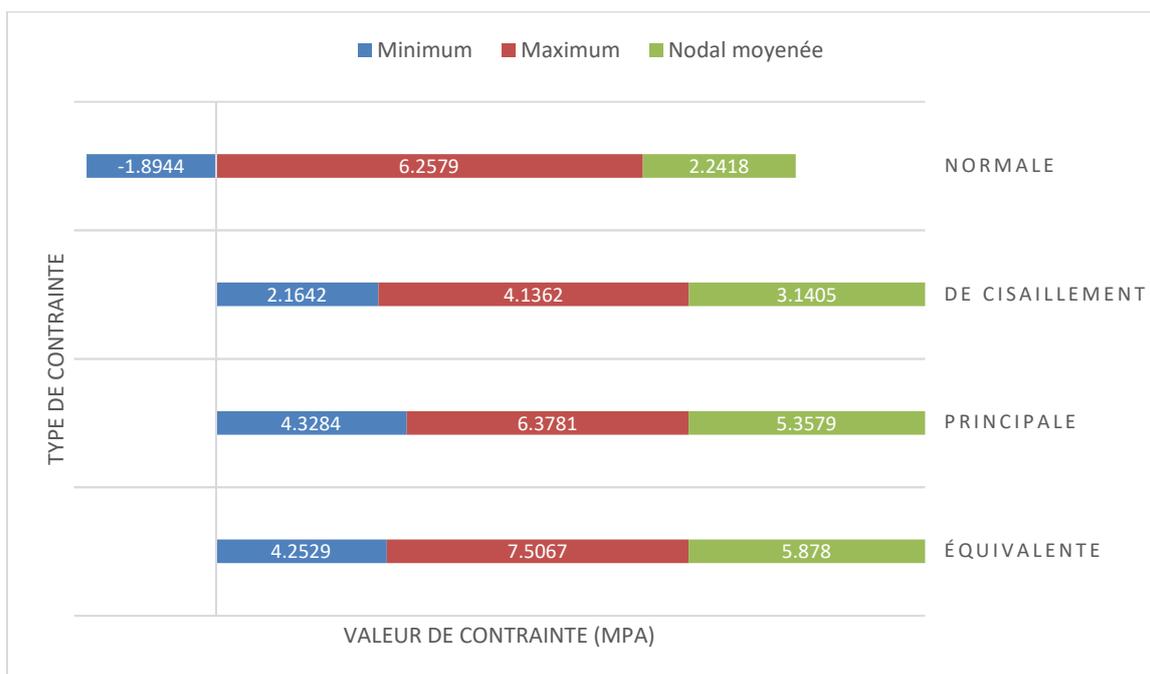


Figure III.49 Le récapitulatif des contraintes de PE80 sous pression interne 2 MPa

Les contraintes maximales équivalentes sont de 7.5067 MPa et sont inférieures à la limite élastique de notre matériau qui est égale à 20 MPa, sans oublier les contraintes normales (circonférentielle) avec une valeur maximale de 6.2579 MPa, cette dernière est inférieure à la résistance minimale requise de PE80 qui est égale à 8 MPa.

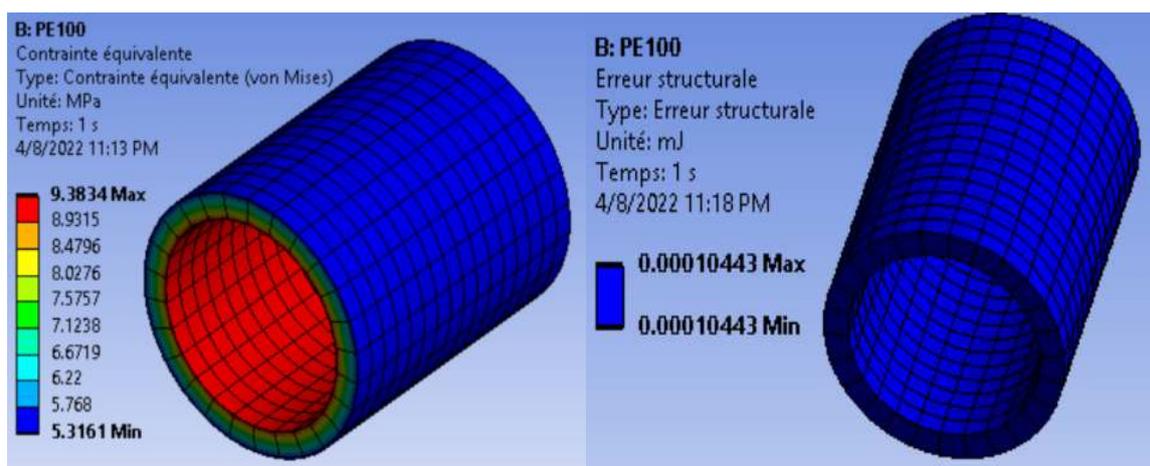


Figure III.50 Les résultats d'un pipe en PE100 soumis à une pression interne de 2.5 MPa

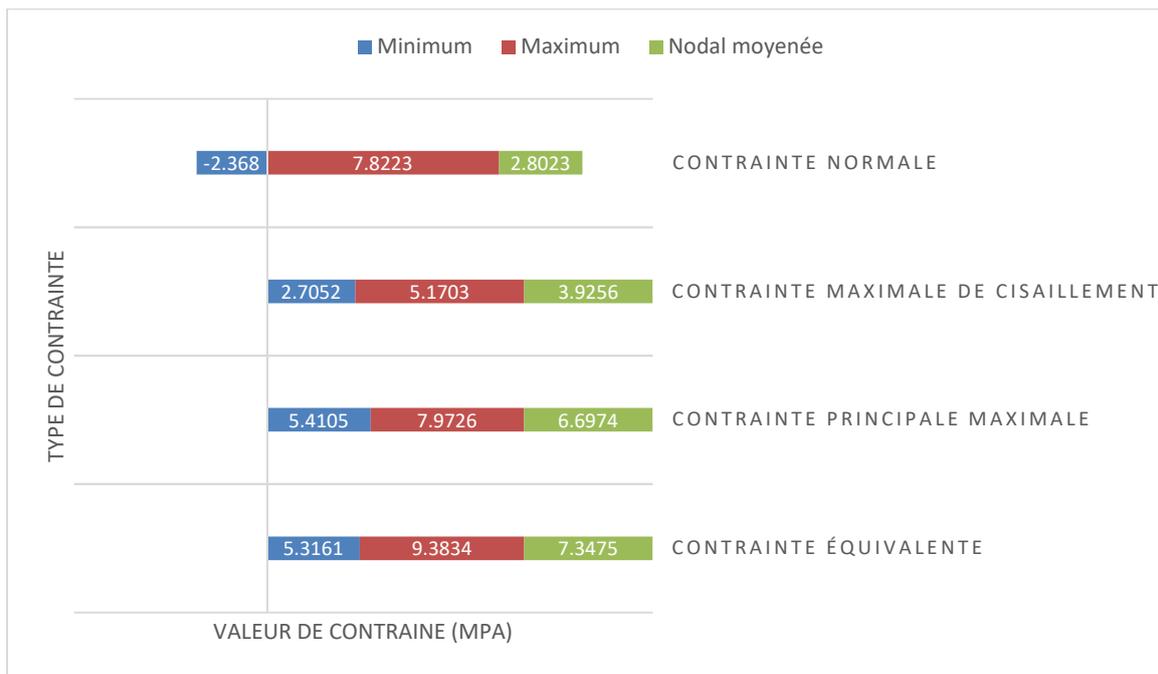


Figure III.51 Le récapitulatif des contraintes de PE100 sous pression interne 2.5 MPa

Les contraintes maximales équivalentes sont de 9.3834 MPa et sont inférieures à la limite élastique de notre matériau qui est égale à 23 MPa, avec les contraintes normales (circonférentielle) qui donnent une valeur maximale de 7.8223 MPa, cette dernière est inférieure à la résistance minimale requise de PE100 qui est égale à 10 MPa.

Les résultats de simulation montre qu'il y a une différence importante entre les deux générations des pipes en PE80 et PE100 premièrement la pression admissible entre les deux c'est pas la même malgré qu'on a pris les mêmes dimensions, c'est à cause du *MRS* qui représente la résistance des pipes pour 50 ans donc si nous appliquons le PE80 à une pression de 2.5 MPa ça peut affecter sa durée de vie, deuxièmement les graphiques affirment que notre structure est sécurisée sous les pressions admissibles

### III.10 Proposition des nouvelles formes de section des pipelines

Maintenant, nous considérons la forme normale des pipelines comme référence pour la suite de l'étude lorsque nous supposons un nouveau type de formes de sections de pipelines (Figure III.52).

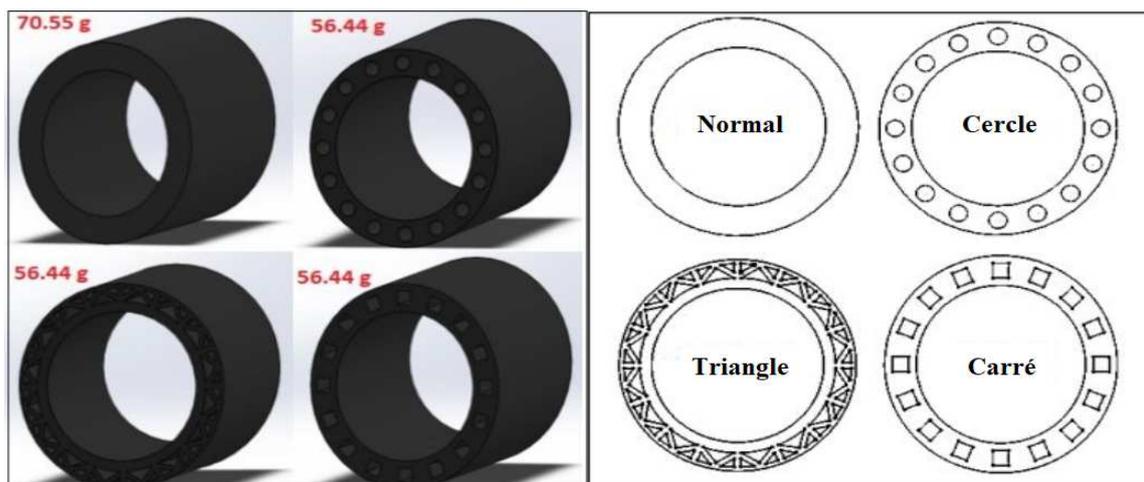


Figure III.52 Section de canalisations utilisée et valeur massique de chaque échantillon

L'idée ici est de prélever près de 15% de matières premières sans changer le diamètre extérieur et l'épaisseur de paroi qui nécessite de prendre en considération le même *SDR* (7.4), car enlever de la matière du matériau de la section transversale surmonte les coûts de fabrication du tuyau avec une nouvelle structure du section (triangle, cercle, carré) comme nous l'avons mentionné dans Figure III.52. 70.55 g la masse de pipe avant l'enlèvement de matière, quand on enlève 15% de matière la masse sera 56.44 g, la longueur des tuyaux 50 mm pour faire un maillage avancé. Il est bien connu que des éléments tétraédriques peuvent être utilisés pour générer pratiquement n'importe quelle structure compliquée, en matière de définitions les conditions initiales les deux côtés du tuyau sont fixés, l'application d'une pression interne calculée à l'aide de la formule *MOP* et comme le PE100 est notre choix la pression est égale à 2,5 MPa, c'est une étude comparative à court terme entre les quatre formes, qui nous permet de choisir la forme la mieux convergente et la plus sécurisée du tube normal.

Pour contrôler les types d'algorithme et de maillage nous avons utilisé le module Méthode pour choisir le maillage Tétraèdres.

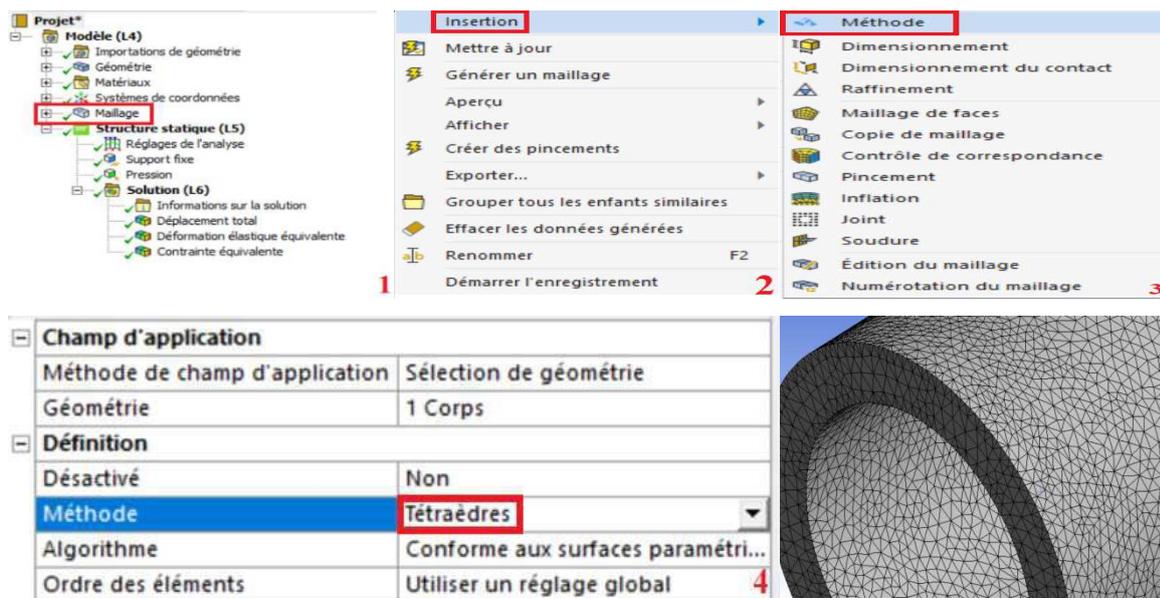


Figure III.53 La définition de maillage tétraédrique

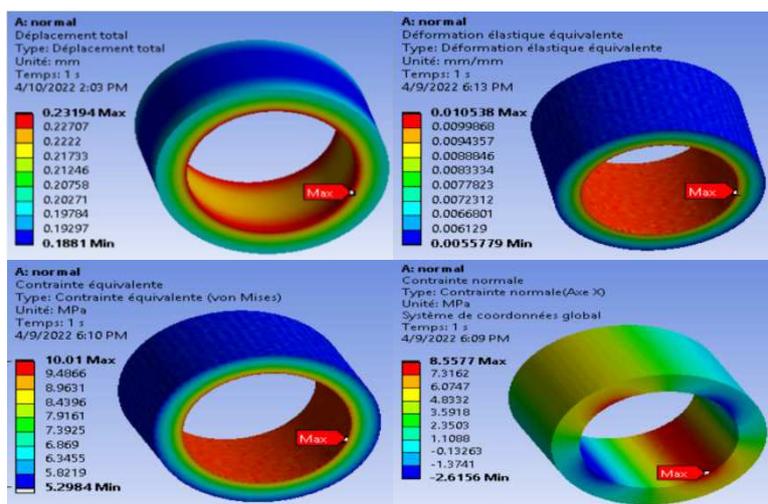


Figure III.54 Les résultats du PE100 idéal soumis à une pression interne 2.5 MPa

Selon les résultats les maximums des déplacements, déformations et les contraintes visées la face intérieure de pipe précisément l'extrémité, comme les valeurs des contraintes équivalentes ne dépasse pas la limite élastique du matériau (23MPa) et le maximum des contraintes normales ne dépasse pas la limite de MRS (10MPa), peut dire que la simulation est acceptable et on peut la citer comme référence.

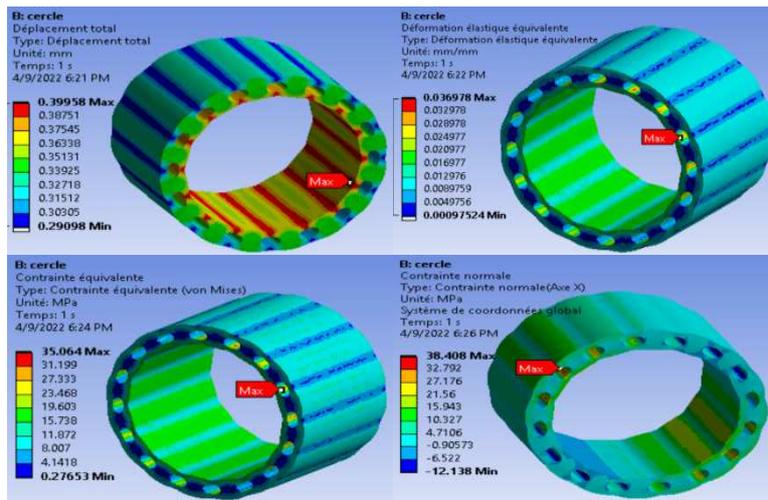


Figure III.55 Les résultats pour le cas cercle soumis à une pression de 2.5 MPa

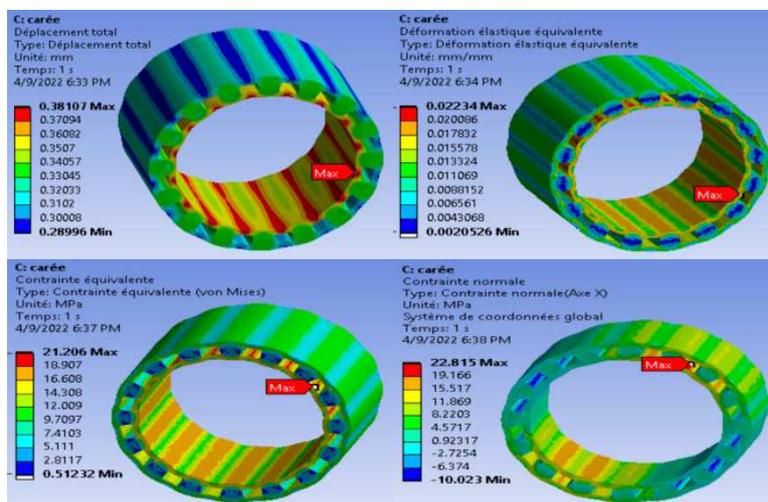


Figure III.56 Les résultats pour le cas carrée soumis à une pression de 2.5 MPa

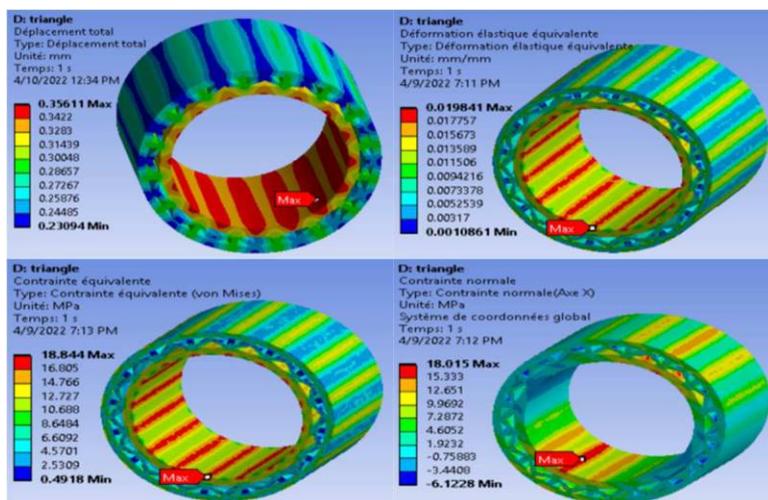


Figure III.57 Les résultats pour le cas triangle soumis à une pression de 2.5 MPa

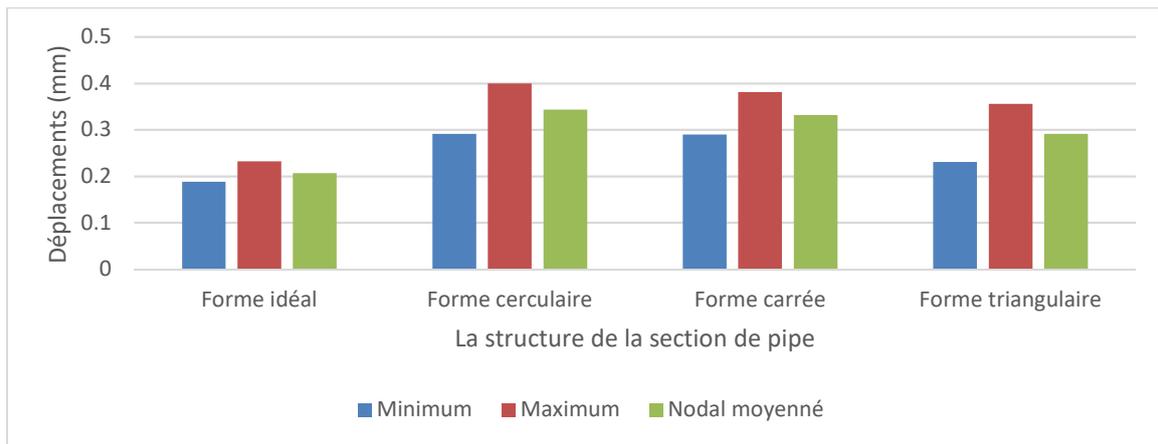


Figure III.58 Le récapitulatif des déplacements pour les 4 formes

Le récapitulative des déplacements montre qu'il ya des grands déplacements pour les 3 nouvelles formes spécialement pour les deux formes circulaire et carrée.

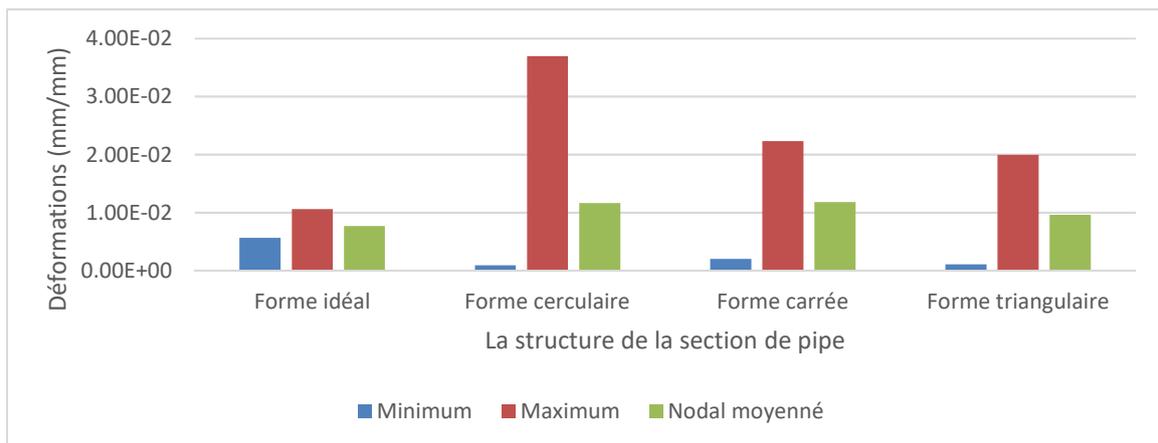


Figure III.59 Le récapitulatif des déformations pour les 4 formes

Le récapitulative des déformations affirme que la forme circulaire est la plus critique avec une valeur maximale de 3.70E-02 après la forme carrée avec une valeur maximale de 2.23E-02 dans l'ordre, nous enregistrons la valeur 2.00E-02 et 1.06E-02 pour les forme triangulaire et idéal.

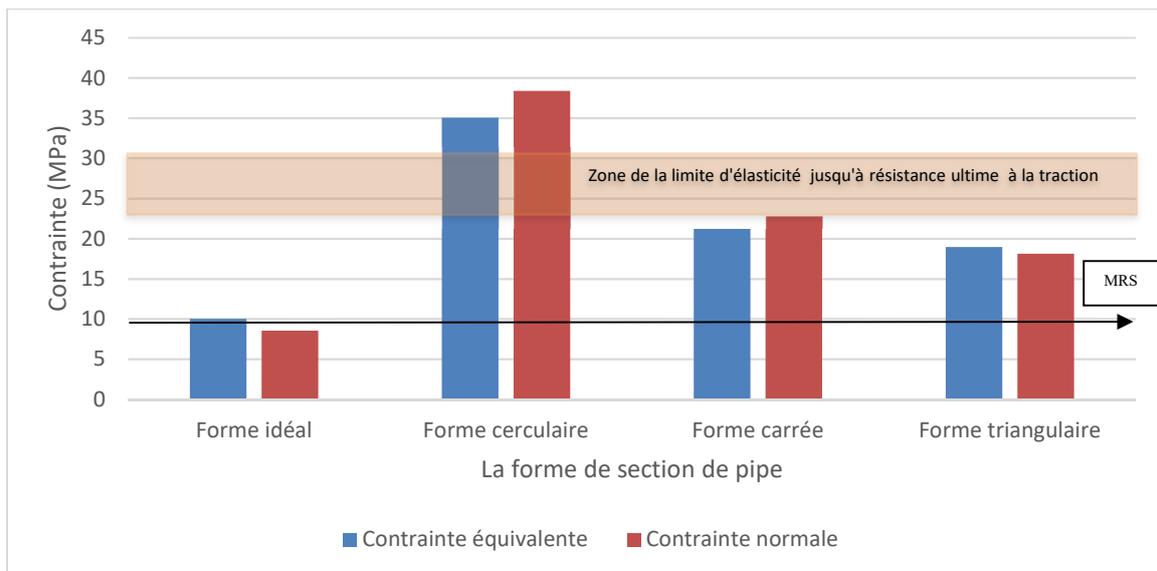


Figure III.60 Le récapitulatif des contraintes pour les 4 formes

Le récapitulative des contraintes pour les 4 formes illustre que les contraintes circonférentielles maximales dépassent les contraintes équivalentes de Von Mises pour les deux formes circulaire et carrée, alors que c'est l'inverse pour la forme idéal et triangulaire. Ajoutant à cela les contraintes maximales équivalentes pour les trois formes idéale, carrée et triangulaire sont inférieurs de la limite d'élasticité du matériau (23 MPa), car la forme circulaire prouve l'échec et casse la limite élastique et la résistance ultime avec une valeur maximale de 35.064 MPa sans oublier que les contraintes normales pour les trois nouvelles formes cassaient la valeur de *MRS* de pipe standard (10 MPa), donc la durée de vie sera inférieure de 50 ans.

### III.11 Les essais de fatigue

D'après les résultats des dernières simulations la section de forme triangulaire est la plus proche de la structure normale de pipe [103] mais cette structure ne donne pas les mêmes résultats à long terme, c'est convenu pour le normale pipe de polyéthylène 3eme génération a résisté pendant 50 ans, pour cela dans les prochaines simulation en va faire des tests de fatigue pour avoir une approximation sur la durée de vie de notre nouvelle structure (pipe avec section triangulaire).

S'appuyant sur les tests de [77] l'analyse de fatigue a été effectuée après avoir obtenu une tendance presque linéaire entre le logarithme de la contrainte appliquée avec le logarithme du nombre de cycles en utilisant Basquin [78] voir [79,80] et [81] comme le montre l'équation III.5 :

$$\log \sigma = -0.0728 \log Nf + \log 33.5 \quad (\text{III.5})$$

Où Basquin [78] a proposé une fonction puissance reliant le niveau  $\sigma$  et le nombre de cycles comme indiqué ci-dessous Équation III.6 :

$$\sigma = A.N^b \quad (\text{III.6})$$

Ainsi,  $A$  et  $b$  sont des constantes matérielles ou les paramètres de Basquin du PE100 étudié sont 33,5 [MPa] et -0,0728 pour  $A$  et  $b$ , respectivement.

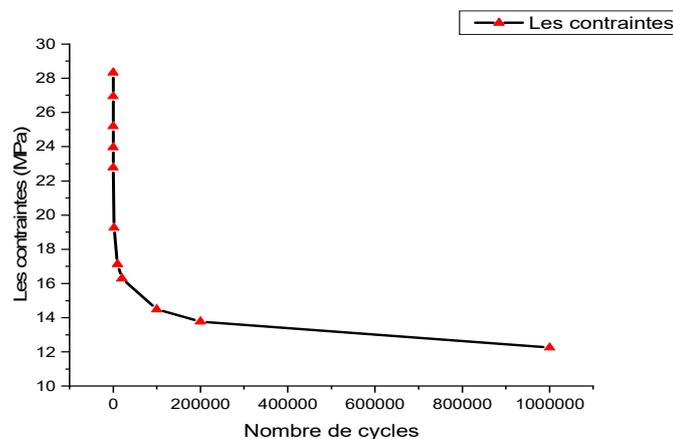


Figure III.61 Courbe de Wöhler pour le matériel d'étude (PE-100) intégré au logiciel

Même si de nombreuses pièces peuvent fonctionner correctement au début, elles font souvent défaut en service à cause d'une rupture par fatigue causée par des charges cycliques répétitives. L'analyse en fatigue a pour objectif de caractériser la capacité d'un matériau à résister aux nombreux cycles que peut rencontrer un composant au cours de sa durée de vie. En général, il existe trois approches de base pour l'analyse de la fatigue : la durée de vie sous déformation, la durée de vie sous contrainte et la mécanique de rupture, dont les deux premières sont fournies dans le module de fatigue ANSYS ce qui est utilisé dans la prochaine simulation est la durée de vie sous contrainte. En gardant les mêmes conditions au limites nous obtenons les résultats suivants :

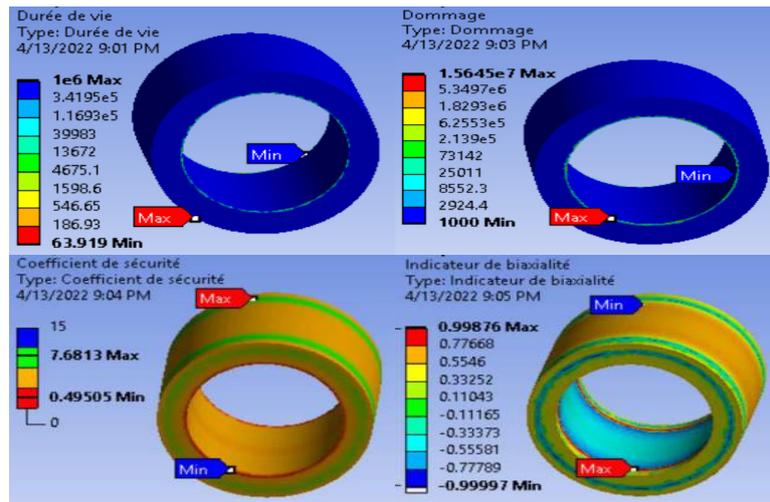


Figure III.62 Les résultats de fatigue de PE100 avec section normale

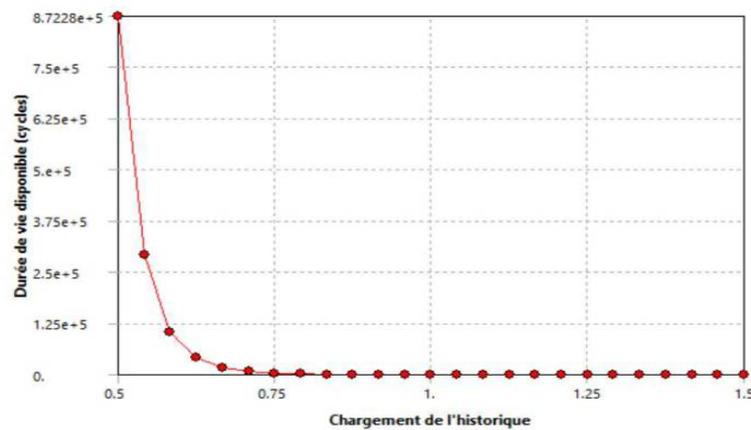


Figure III.63 Sensibilité de la durée de vie pour le pipe normale d'une borne de charge <50% et >150%

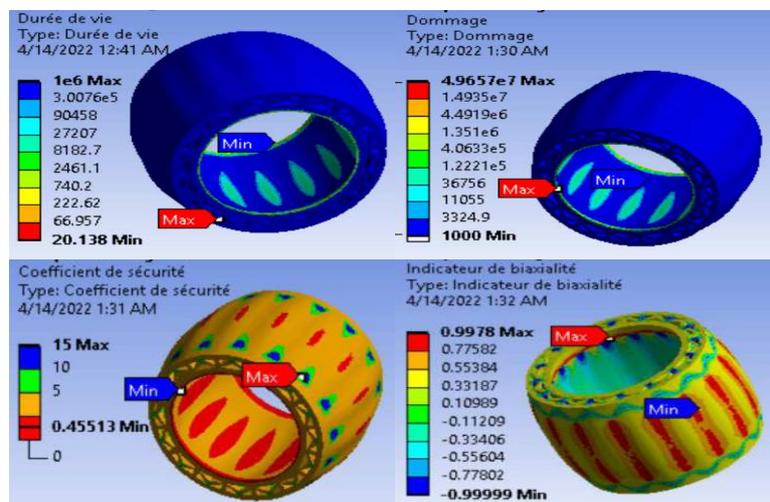


Figure III.64 Les résultats de fatigue PE100 avec section triangulaire

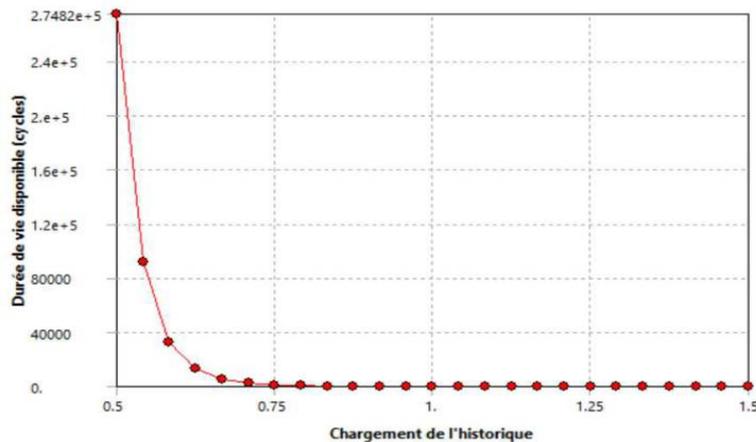


Figure III.65 Sensibilité de la durée de vie pour le pipe modifié d'une borne de charge <50% et >150%

Les résultats de durée de vie des deux formes de sections transversales montrent l'écart de valeurs entre les deux prototypes avec un pourcentage de 68 %, ce qui signifie que la nouvelle structure peut survivre pendant 16 ans sous une pression nominale continue de PE100, d'autre part, nous sommes d'accord que les dommages du nouveau tuyau sont plus haut mais nous assurons que la défaillance ne se produira pas avant que la durée de vie de conception ne soit atteinte.

La vitesse de dégradation de la durée de vie avec l'historique des charges pour les deux formes lorsque les charges FE étaient de 50 % de la charge actuelle jusqu'à si la charge était de 150 % de 2,5 MPa.

L'indicateur de bi axialité nous donne une idée de l'état de contrainte sur le modèle, une bi axialité de 0 correspond à une contrainte uni axiale, une valeur de -1 correspond à un cisaillement pur, et une valeur de 1 correspond à un état bi axial pur, dans cette étude la majorité de ce modèle est sous la contrainte uni axiale.

Il est vrai que la nouvelle structure a une durée de vie inférieure à 50 ans, mais nous devons mentionner qu'il y a 2 parois et d'après les analyses précédentes, la valeur de durée de vie minimale est située sur la paroi interne, donc si une fissure se produit, le fluide sera arrêté par les barres internes. Entre les deux murs si ce dernier n'a pas non plus pu résister, il y a un deuxième mur (mur extérieur), tout cela a amélioré les résultats et donné plus de vie à notre nouvelle structure.

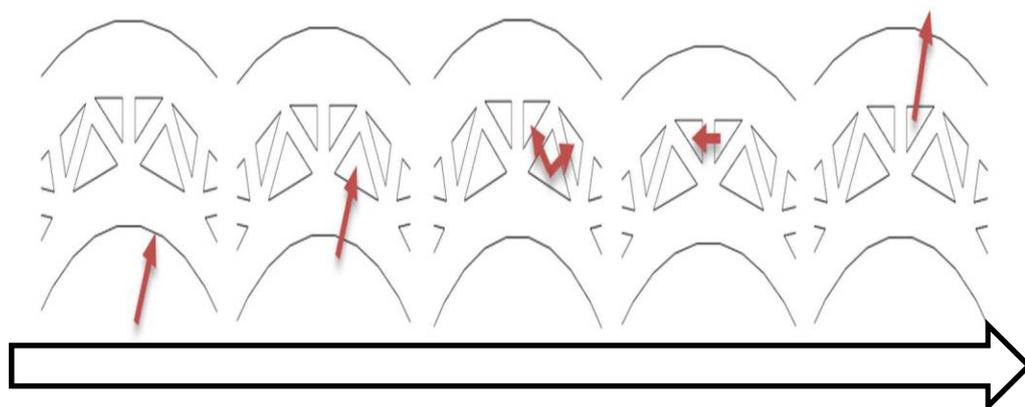


Figure III.66 Parcours de fluide

### III.12 Initiation du défaut

Des études ont été réalisées [104] dans le but de déterminer le niveau de nocivité d'un défaut par rapport à un autre provoqué par une agression extérieure, comme l'enfoncement, l'éraflure et la combinaison de ces deux. En se basant sur ces dernières et pour arriver à connaître la réaction de la fissure sur la nouvelle géométrie, nous devons traiter le test suivant [100] qui a été appliqué sur le tuyau idéal pour prédire l'influence de la dimension et de l'orientation de la fissure semi-elliptique initiée sur la paroi externe du tuyau PE100. De plus la structure a été importée dans ANSYS Workbench, la géométrie de la structure est représentée schématiquement avec un défaut initial dans deux orientations différentes :

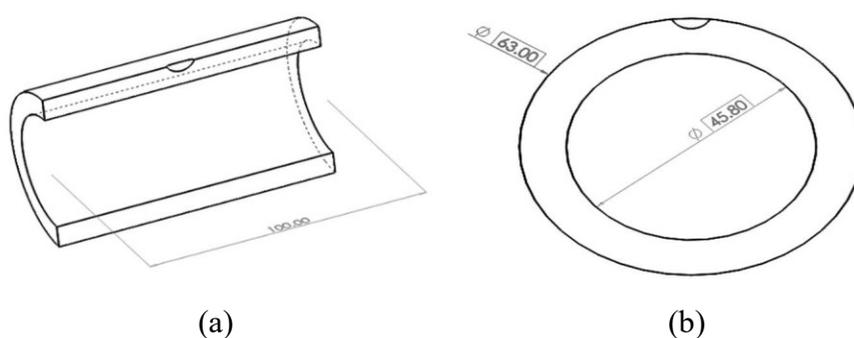


Figure III.67 Dimensions du tube et orientation des fissures

Cela nécessite de définir les conditions aux limites ; l'une des extrémités du tuyau est fixe. Le maillage automatique des éléments hexaédriques est utilisé, mais pour la fissure, il est de notoriété publique que les composants tétraédriques peuvent combiner presque toutes les

structures complexes. Une pression de fonctionnement interne ou nominale constante est appliquée (2,5 MPa).

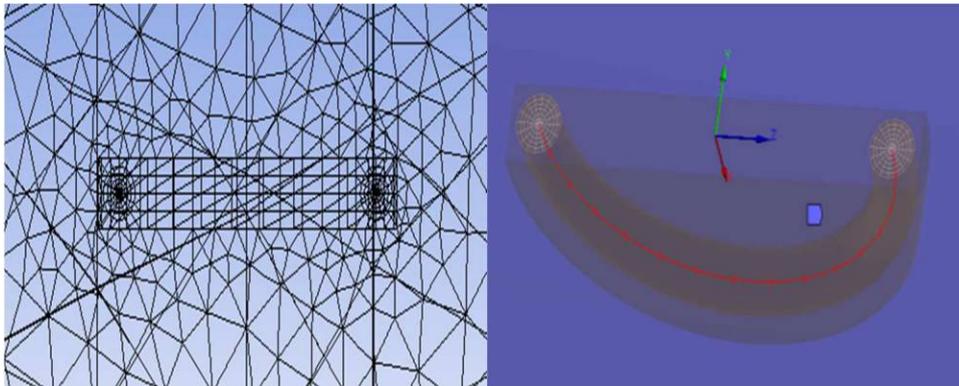


Figure III.68 Maillage tétraédrique et présentation des contours

L'objectif est de faire varier les rayons ( $M_i$ ) mineur et ( $M_a$ ) majeur et le plus grand rayon de contour (LCR) de la fissure à chaque fois pour prédire quel facteur est le plus important en comparant les contraintes maximales et les déplacements et déformations (tableau III.9), montrer toutes les possibilités testées.

Tableau III.9 Paramètres initiaux de dimension de fissure et toutes les possibilités

	Rayon mineur [mm]	Rayon majeur [mm]	le plus grand rayon de contour [mm]
1	2	3	0.25
2	3	3	0.75
3	3	2	0.25
4	2	2	0.75
5	2	2	0.25
6	2	3	0.75
7	3	3	0.25
8	3	2	0.75

Dans cette section, nous mentionnons tous les résultats pour chaque cas de défaut transversal et longitudinal en utilisant la méthode inverse pour l'optimisation.

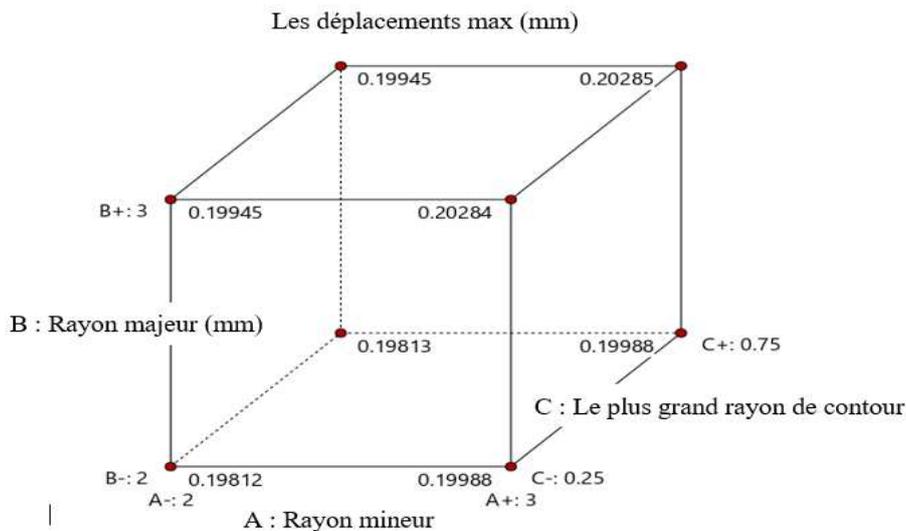


Figure III.69 Résultat des déplacements totaux maximaux pour la fissure transversale

(Figure III.69) montrent que le cas le plus dangereux est lorsque nous avons le plus grand rayon mineur et majeur ( $M_i=3$  mm;  $M_a=3$  mm) et donnons une valeur maximale de déplacement  $\delta$  égale à 0,20285 mm, ensuite nous définissons un autre valeur critique lorsque ( $M_i =3$  mm ;  $M_a =2$  mm) avec une valeur de déplacement maximale de  $\delta =0,19988$  mm, ces deux dernières sont calculées pour deux facteurs de LCR différents (0,25 & 0,75) qui donnent les mêmes résultats qui convergent.

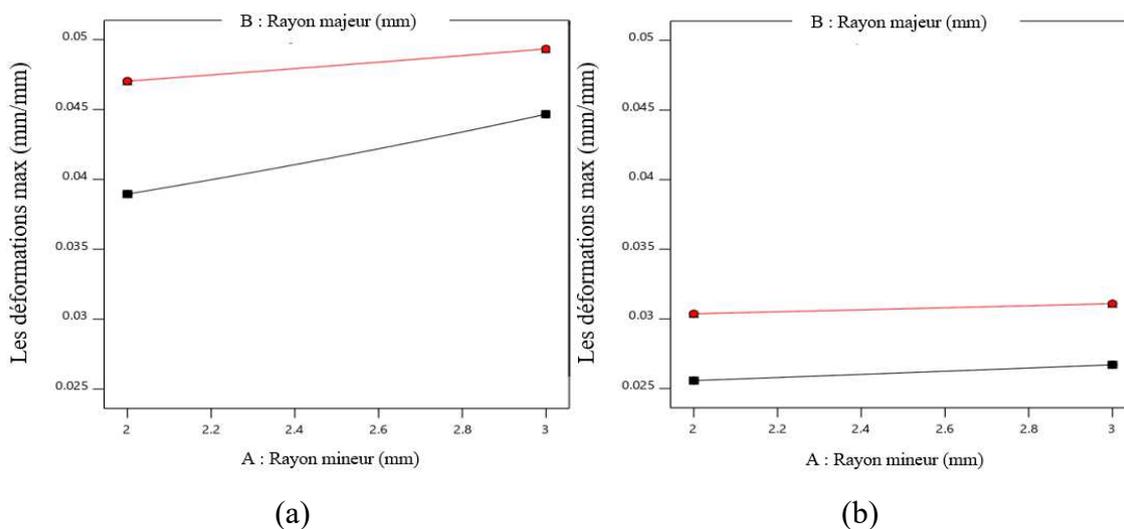


Figure III.70 Résultats de la déformation élastique maximale pour la fissure longitudinale (a) LCR = 0,25 ; (b) LCR = 0,75

Une valeur de déformation élastique maximale jusqu'à 0,049336 mm/mm a été illustrée sur la (Figure III.70.a) lorsque le ( $M_i = M_a = 3$  ;  $LCR = 0,25$ ), avec les mêmes dimensions juste en changeant le LCR à 0,75, nous notons une diminution importante de la déformation  $\epsilon$  à 0,031094 mm/mm illustrée par (Figure III.70.b).

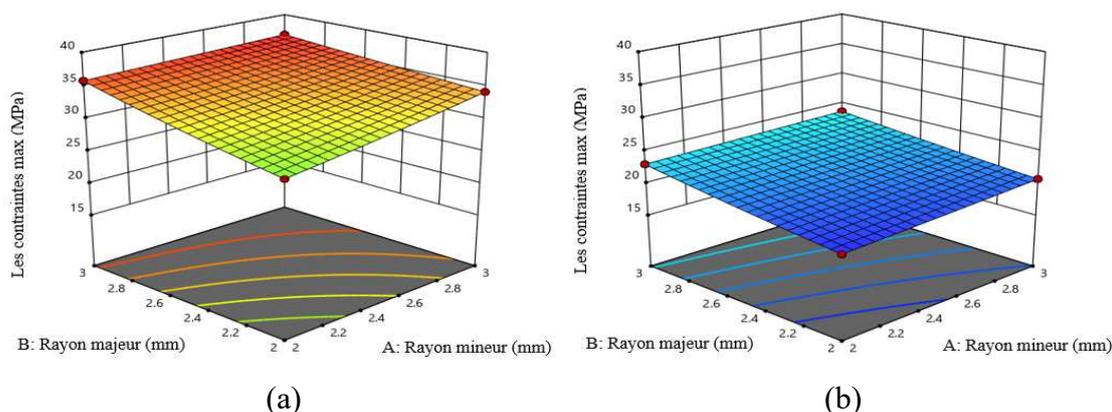


Figure III.71 Résultats de contrainte maximale pour la fissure transversale

Pour évaluer les résultats de contrainte, (Figure III.71) expriment l'effet de la variation du LCR sur la fissure transversale (0.25 & 0.75), testant toutes les possibilités de dimension nous fait observer le point de contrainte le plus critique lorsque ( $M_i=M_a=3$  ;  $LCR=0.25$ ) suivi du cas où ( $M_i = 2$  ;  $M_a = 3$  ;  $LCR = 0,25$ ) jusqu'à 35,8 MPa. Après on a le cas de ( $M_i=3$  ;  $M_a=2$  ;  $LCR=0.25$ ) avec valeur max = 34.136 MPa et le dernier pour  $LCR = 0.25$  c'est quand  $M_i$  et  $M_a$  prennent le minimum et la même dimension 2mm, avec un minimum de valeur de contrainte et selon ce facteur 29,687 MPa.

Comme nous ne pouvons pas négliger les trois autres tests lorsque  $LCR = 0,75$  (Figure III.71.b) qui nous ont montré le même ordre de variation  $M_i$  et  $M_a$  à partir de la valeur de contrainte maximale ( $M_i=M_a=3$  ;  $LCR=0,75$ ) = 23,677 MPa et la valeur maximale suivante est de 23,033 MPa déplaçant les 20,717 MPa vers la dernière qui est de 19,265 MPa.

Le nombre d'essais étant limité pour chaque orientation, et comme l'étude précédente, la fissure transversale est adaptée au cas le plus dangereux [82]. Une large interprétation a été faite, pour cette raison, une analyse complémentaire est effectuée pour vérifier les résultats de la fissure longitudinale. Une large interprétation a été faite, pour cette raison; une analyse complémentaire est effectuée pour vérifier les résultats de la fissure longitudinale.

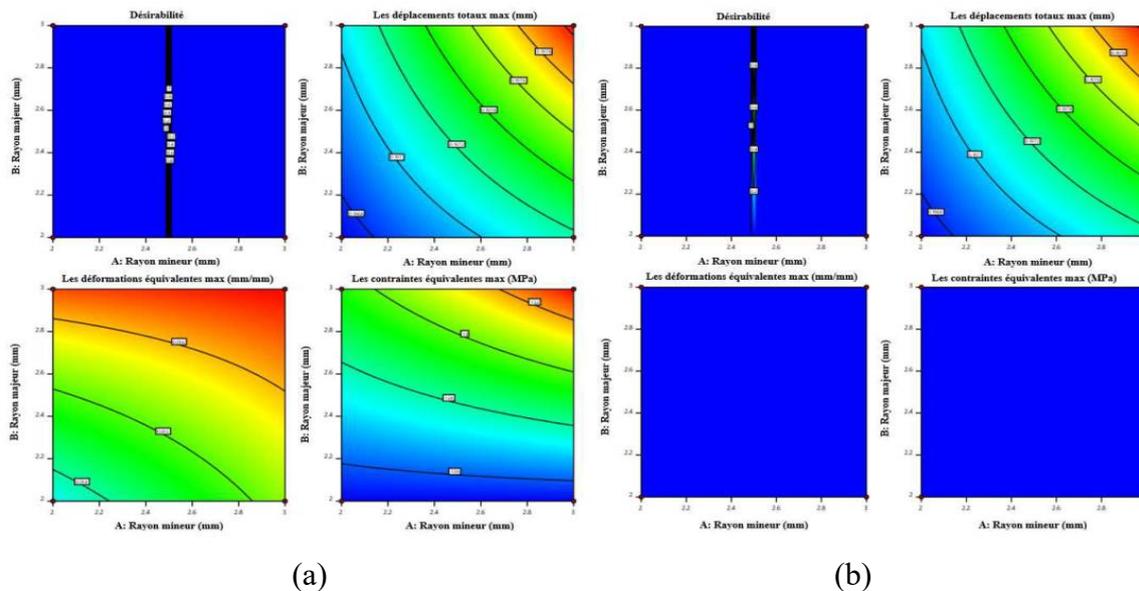


Figure III.72 Résultats pour la fissure longitudinale (a) LCR = 0,25 ; (b) LCR = 0,75

(Figure III.72.a) montre que la fissure longitudinale se produit lorsque LCR = 0,25 mm. Ce chapitre de tests résume les observations suivantes :

- La région rouge donne les valeurs extrêmes  $\delta=0,19804$  mm,  $\varepsilon=0,016767$  mm/mm, et  $\sigma=13,322$  MPa que lorsque l'on a ( $M_i=M_a=3$  mm).
- La même figure indique la valeur la plus critique suivante lorsque nous avons ( $M_i=2$  ;  $M_a=3$ ) avec des valeurs maximales  $\delta=0,19704$  mm,  $\varepsilon=0,016459$  mm/mm et  $\sigma=12,948$  MPa.
- Une nette diminution lorsque ( $M_i=M_a=2$ ) en  $\delta$ ,  $\varepsilon$  et  $\sigma$  rend ce type de changement de dimensions le plus sûr.

Dans le cas du plus grand rayon de contour = 0,75 pour le défaut longitudinal (Figure III.72. b), il apparaît :

- Il existe une disparité de déformation qui n'est pas dans le même ordre que la fissure transversale.
- ( $M_i=3$  ;  $M_a=2$ ) serait plus grave que ( $M_i=2$  ;  $M_a=3$ ) également pour cette situation.
- La couleur bleue signifie que max  $\sigma$  et  $\varepsilon$  sont constants pour toutes les dimensions ( $M_i=3$  ;  $M_a=3$ ), ( $M_i=2$  ;  $M_a=3$ ) et ( $M_i=3$  ;  $M_a=2$ ), pour préciser  $\sigma=12,528$  MPa,  $\varepsilon=0,012537$  mm/mm.

Revient à notre nouvelle structure de pipe avec une section triangulaire et après avoir défini les mêmes conditions aux limites, la pression interne pour cet essai également 2,5 MPa, des fissures seront initiées à l'extérieur et à l'intérieur des murs dans différentes zones, pour évaluer la zone la plus critique et la stabilité de fracture. Nous choisissons des dimensions aléatoires pour la raison de la fissure initiée car il s'agit d'une étude comparative et ne nécessite pas de mesures spécifiques comme le type de fissure est semi-elliptique (rayon majeur = 1 mm, rayon mineur = 0,5 mm). Les éléments tétraédriques sont utilisés comme méthode de maillage avec le plus grand rayon de contour = 0,5 mm, la méthode de résolution choisit les contours de maillage correspondant.

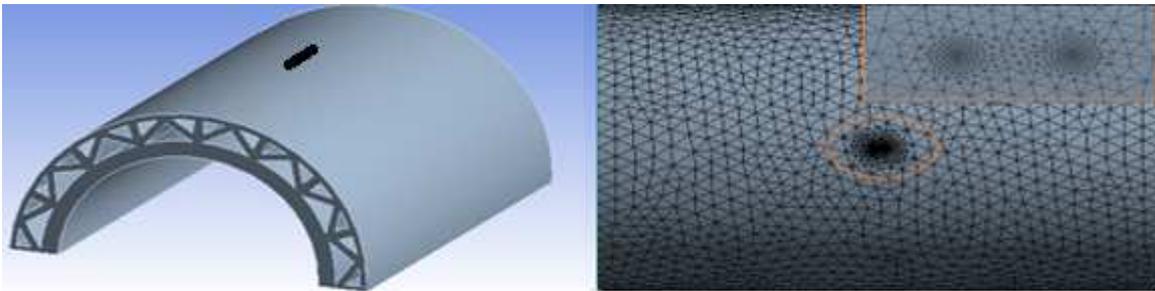


Figure III.73 Le maillage d'une fissure initié à la paroi extérieure du pipe



Figure III.74 Amorçage de fissure externe dans différentes zones. (a) zone I ; (b) zone II

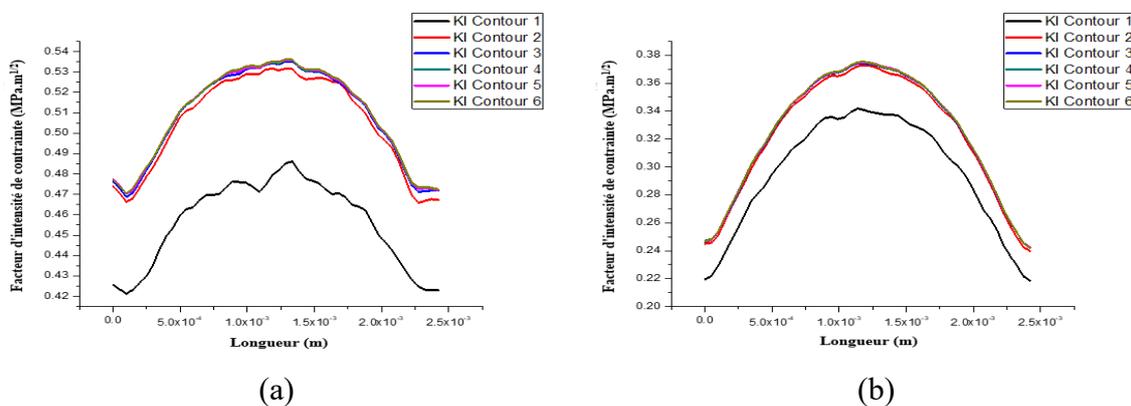


Figure III.75 Les valeurs de FIC avec longueur de fissure. (a) zone I ; (b) zone II

La figure III.75 montre les six contours des données de facteur d'intensité de contrainte obtenues après la création d'une fissure externe sur la paroi du tuyau dans deux zones différentes. Il est intéressant de noter que la valeur FIC est plus élevée en zone I pour atteindre la valeur crête de  $0,536 \text{ Mpa.m}^{1/2}$  et le maximum de la zone II est de  $0,375 \text{ Mpa.m}^{1/2}$ .

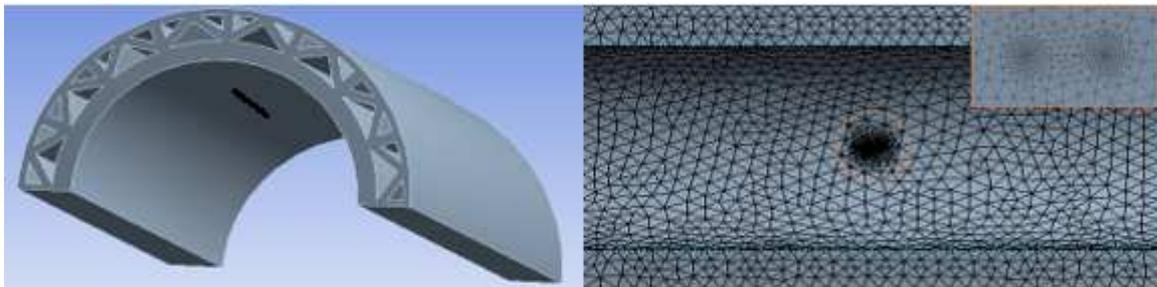


Figure III.76 Le maillage d'une fissure initié à la paroi intérieure du pipe

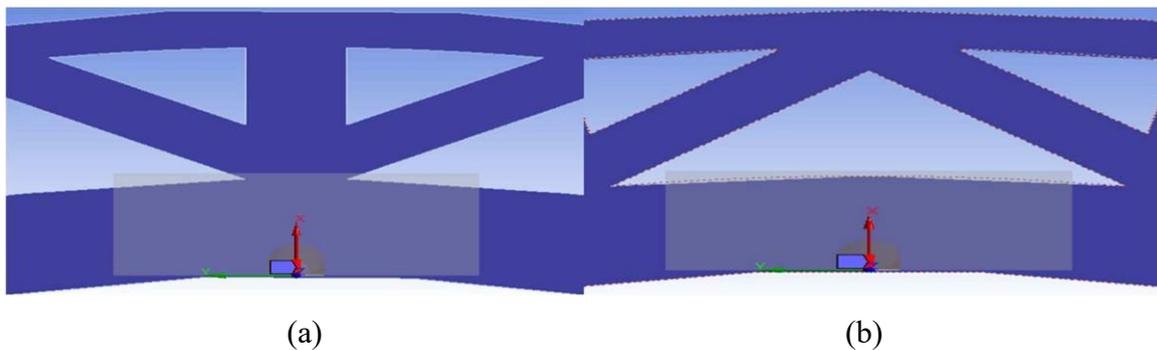


Figure III.77 Amorçage de fissure interne dans différentes zones. (a) zone I ; (b) zone II

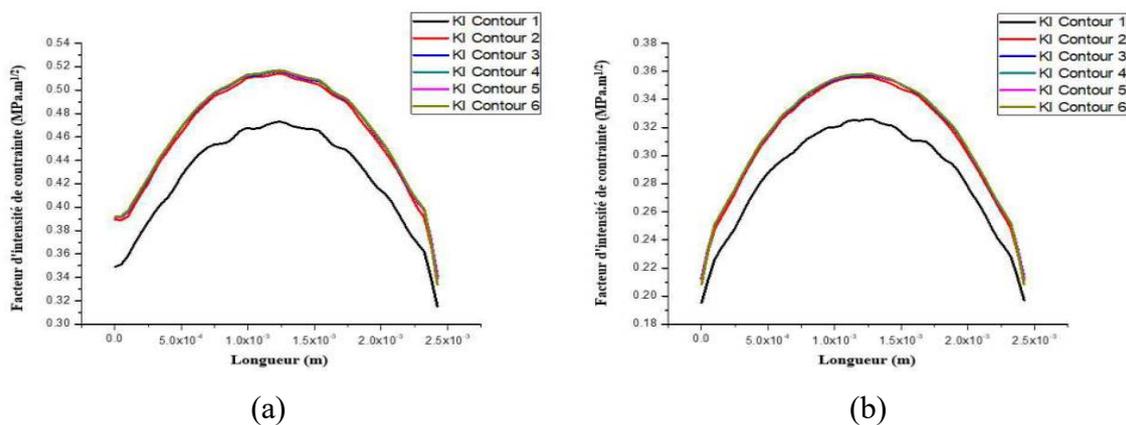


Figure III.78 Les valeurs de FIC avec longueur de fissure . (a) zone III ; (b) zone IV

A propos du deuxième cas où l'on a une fissure interne, les résultats des données *FIC* obtenues illustrées à la Figure III.78, il est si clair que la zone III donne une valeur plus importante  $0.516 \text{ Mpa.m}^{1/2}$  par contre  $0.358 \text{ Mpa.m}^{1/2}$  pour la zone numéro IV.

Les courbes tracées expriment que la valeur *FIC* maximale est toujours inférieure à la limite de ténacité à la rupture, ce qui confirme que de petits incréments d'extension de fissure se produisent pendant la croissance de la fissure de fatigue (croissance lente de la fissure) au niveau de la paroi du tuyau jusqu'à ce que la longueur de la fissure atteigne  $2,5 \times 10^{-3}$  m. En supposant qu'un chargement de pression supplémentaire peut progressivement développer une fissure jusqu'à la rupture finale, se produit en dépassant la ténacité à la rupture.

En théorie, tous les contours devraient produire la même valeur puisque l'intégrale est indépendante du chemin. Cependant, dans la pratique (dans un cadre *MEF*), ces résultats seront affectés par la qualité du maillage, comme dans les contours Figure III.75 et Figure III.78, 2-6 ont un résultat très similaire, ce qui indique que le problème de fissure lui-même est bien posé et le maillage est acceptable. Le premier contour a généralement le plus d'erreurs puisqu'il s'agit du contour le plus proche de la singularité du fond de fissure.

# **CHAPITRE IV : INSPECTION ET SIMULATION DE RÉPARATION**

## IV.1 Introduction

Nous avons discuté des généralités des pipelines et des principes de la mécanique des ruptures dans les deux premiers chapitres, les ruptures constituant un danger pour l'intégrité structurelle en raison de la répartition des contraintes dans la région des fissures. Le diagnostic de ce dernier, ainsi que le traitement rapide du problème, sont par conséquent critiques afin d'éviter des calamités économiques ou environnementales. Il existe des moyens ou des stratégies pour détecter ces défauts et de multiples approches de réparation, pour se faire.

## IV.2 Techniques d'identification des défauts de pipeline par CND

Il existe différents types de contrôles non destructifs. Le CND le plus fréquemment utilisé comprend les tests par ultrasons (UT), les tests radiographiques (RT), les tests électromagnétiques (ET), les tests de particules magnétiques (MT), les tests par ressuage (PT), les tests visuels (VT), les courants de Foucault et l'identification positive des matériaux. D'autres techniques incluent les tests d'émission acoustique (AE), les tests d'ondes guidées (GW), les méthodes de test laser (LM), les tests de résonance acoustique (ART), les tests de fuite (LT), les fuites de flux magnétique (MFL), l'analyse des vibrations (VA) et test infrarouge (IR).

### IV.2.1 Détection visuel

Il est à noter que cette détection visuelle peut s'effectuer selon un calendrier préétabli, communément appelé plan de maintenance préventive, et qu'elle intègre la stratégie préventive de l'entreprise. Toutes les surfaces extérieures du tube sont inspectées par une équipe d'inspecteurs experts. Ils signalent tout changement d'apparence ou de forme qui peut être fait.

Multiple Compagnies propose une variété de chenilles d'inspection de pipeline robustes pour l'inspection visuelle à distance et les opérations à distance dans de longs pipelines aussi courts que 50 millimètres (2 pouces). Les chenilles d'inspection de pipelines sont également le support robotique approprié pour les sondes et les capteurs pour un examen complet de l'intégrité structurelle des pipelines dans tous les secteurs.



Figure IV.1 Inspection visuelle à distance [83]

### IV.2.2 Détection par ressuage

Ce processus est utilisé pour identifier les discontinuités en développement sur la surface telles que les fissures, les collages, les porosités, les piqûres, les marques de retrait de fin de passe, les inclusions, les gouttières, etc. aux endroits qui ne peuvent pas être vérifiés par rayons X et/ou sur le bout souder les joints en cas de doute ou à la demande du client.

Elle s'applique à la fois aux inspections de préfabrication et d'assemblage. Tous les bossages et taraudages seront inspectés à 100 % par ressuage.

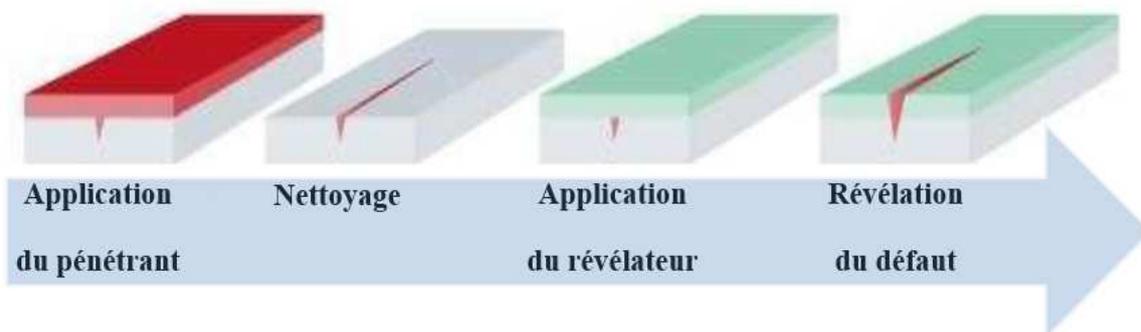


Figure IV.2 Contrôle par ressuage

### IV.2.3 Détection par ultrasons

Parce qu'il implique l'accès à un seul côté du matériau à évaluer, le test par ultrasons de contact est fréquemment utilisé lorsque l'inspection radiographique n'est pas possible. Les tests par ultrasons permettent d'inspecter des objets volumineux, de forme irrégulière ou non portables en raison de la mobilité de l'équipement et des nombreuses méthodes disponibles.

Des entreprises également développées ont créé leurs propres systèmes à ultrasons automatiques enregistrables (AUT) qui permettent de réaliser le contrôle en série de soudures de lignes de canalisations, ainsi que des réparations, points spéciaux, etc...couvrant ainsi toutes les exigences de l'inspection des pipelines.



Figure IV.3 Inspection par ultrasons avancés [84]

#### IV.2.4 Détection radiographique

Utilisant la propriété des rayons X ou des faibles longueurs d'onde capables de traverser le matériau, cette approche détecte la corrosion interne ou externe des canalisations calorifugées ou non et recherche les blocages dans les canalisations ou les accessoires. L'intensité du rayonnement varie selon qu'il traverse la matière sonore ou les défauts inclus ; en effet, un récepteur de rayons X placé derrière l'objet enregistre les variations du faisceau émergent, résultant en une image ou un film avec des différences de densité ou de contraste qui permettent à l'observateur de distinguer l'imperfection. [85].



Figure IV.4 Inspection par radiographie [84]

### IV.2.5 Détection par raclage

Le raclage est une technique d'inspection en ligne dans laquelle des dispositifs connus sous le nom de "porcs" sont placés dans les pipelines pour les nettoyer et les vérifier. Le raclage peut être effectué sur une large gamme de diamètres de pipeline sans interrompre le flux de matériau à travers la ligne.

Le raclage a traditionnellement été utilisé uniquement pour nettoyer les tuyaux. Le racleur était simplement inséré à une extrémité d'un pipeline et déplacé à travers celui-ci par le flux de produit. En se déplaçant, il raye les parois du tuyau, éliminant la saleté et les débris.

Les outils intelligents peuvent être équipés de divers dispositifs d'évaluation non destructifs capables de scanner le tuyau dans lequel ils se déplacent pour inspection. Ceux-ci sont communément appelés "cochons intelligents". Il existe différentes sortes d'outils intelligents utilisés dans les activités SG, chacune avec son propre ensemble d'avantages et d'inconvénients. En fonction de leurs capacités NDE, certains réussissent mieux à détecter des formes spécifiques de corrosion ou de dommages dans divers types de tuyaux. Cependant, plusieurs fabricants ont récemment combiné les nombreuses fonctionnalités de ces instruments individuels en un seul. En conséquence, un seul outil peut désormais être utilisé pour identifier plusieurs types de dommages, ce qui le rend plus efficace et efficient.

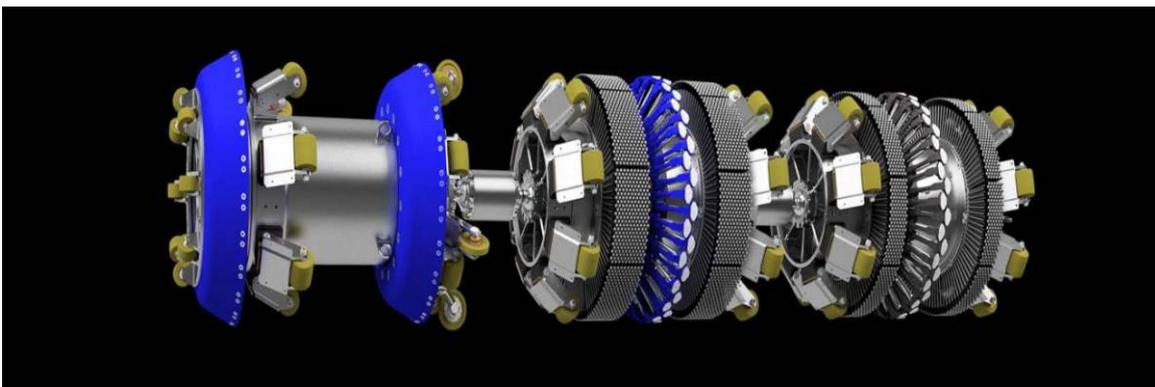


Figure IV.5 Ultra-Inspection, outil longitudinal HR [86]

L'outil Smart-Ball de Pure Technologies, Ltd. Est l'une des technologies ILI les plus récemment créées [87,88]. La figure IV.6 représente une Smart-Ball de Pure Technologies. Le noyau en aluminium instrumenté dans une coque en polyuréthane et un ensemble d'instruments intégrant un système de collecte de données acoustiques composent le gadget.



Figure IV.6 Pure Technologies, Ltd, Balle intelligente pour l'inspection des pipelines [87]

### IV.3 Méthodes de réparation des pipelines

Les seuls traitements viables pour les tuyaux cassés depuis de nombreuses années étaient de les remplacer par des neufs ou de souder une nouvelle pièce. Ces processus nécessitent généralement des arrêts de production. De plus, la main-d'œuvre à chaud requise lors du remplacement exclut son emploi dans des régions dangereuses. Enfin, les problèmes métallurgiques induits par le soudage contribuent aux inconvénients de cette approche complexe et coûteuse. Les dommages aux pipelines peuvent être réparés de diverses manières, selon la nature et l'ampleur des dommages. Cette section décrit les nombreux types de procédures de réparation conventionnelles pour les tuyaux brisés qui sont maintenant disponibles, quelques exemples de méthodes de raccommodage : patch en composite, demi-coquille soudée, perçage, coupe et remplacement après vidange, ré-enrobage, meulage.

#### IV.3.1 Réparation par patch composite

Pour réparer les structures de canalisations endommagées, les patches composites sont largement utilisés, suivent les normes techniques mondiales et offrent une solution conçue, éprouvée et durable. Ce qui permet de retarder la propagation des fractures et, par conséquent, d'augmenter la durée de vie des structures fixées. Dans la plupart des recherches, l'effet de divers facteurs sur le comportement de propagation des fissures a été étudié en profondeur. Dans la littérature récente, par exemple, l'influence de la taille du patch composite [89], du nombre de plis [90], de la dissymétrie de la structure réparée [91], de la mise en tension du composant avant collage du patch composite [92], la plasticité [93], le collage imparfait du patch composite [94] ou les contraintes résiduelles [95] ont été étudiées.

### IV.3.1.1 Le choix d'adhésif

La pâte, la mousse, et les films sont les trois types d'adhésifs. Les pâtes sont souvent vendues en deux combinaisons, qui doivent être minutieusement préparées. Parce qu'ils peuvent être produits à température ambiante, ils ont l'avantage d'être simples à utiliser. Ils présentent cependant des porosités qui peuvent gêner l'adhérence. Les mousses se dilatent tout au long du processus de collage et sont couramment utilisées pour couvrir les fissures et autres trous. Le meilleur choix sont les films. Ils ont la plus grande endurance et résistance. Ils ont également une adhérence de surface supérieure.

### IV.3.1.2 Le choix de composite

Les tensions appliquées au système pipe-adhésif-patch entraînent des contraintes de cisaillement dans les lignes de liaison. De même que l'ajout du patch provoque un déplacement de l'axe neutre, entraînant des efforts de flexion aux bords de patch, il faut s'assurer que les rigidités des membrures soient les plus proches possibles en y ajoutant pour faire le bon choix de patch, les lois de l'analyse linéaire ne doivent être appliquées que lorsque les déformations restent dans le domaine élastique, effectuer une analyse de tolérance stricte, et une évaluation parfaite des contraintes auxquelles le patch est soumis.



Figure IV.7 Banks Industrial Group, Revêtements protecteurs et réparation par composites époxy [96]

### IV.3.2 Réparation par demi coquille

Procédé de réparation de canalisations véhiculant des hydrocarbures en charge par insertion de demi-coquilles soudées à encerclement total. Les demi-coquilles soudées à encerclement

complet renforcent la zone problématique et limitent les fuites potentielles, et sont donc utilisées pour réparer les défauts axiaux ou circonférentiels ouverts ou non. La géométrie des demi-coquilles est visible dans l'image ci-dessous.



Figure IV.8 Réparation par demi coquille soudée [97]

Nous avons choisi ces deux méthodes de réparation pour faire une étude comparative et bien validé leur efficacité.

#### IV.4 Simulation comparative

##### IV.4.1 Pipe avec une fissure semi elliptique

Sur le pipeline précédent en API X80M, nous avons généré une fracture externe semi-elliptique dont les paramètres et les caractéristiques sont présentés dans le tableau ci-dessous:

Tableau IV.1 Informations sur la fissure semi-elliptique

Définition	
La forme	Semi-Elliptique
Rayon Majeur	5. mm
Rayon Mineur	3. mm
Méthode de Maillage	Tétraédrique
Plus grand rayon de contour	1. mm
Taille de l'élément	0.10071 mm
Contours de maillage	6

Nous avons utilisé les mêmes pressions qui ont été testées (5, 6, 7, et 8 MPa) dans le même tube en API X80M et la même géométrie. Le but de cette méthode est de déterminer l'impact de la pression la plus élevée à laquelle notre conduite fracturée peut résister. La contrainte de Von-Mises et le facteur d'intensité de contrainte sont deux critères importants.

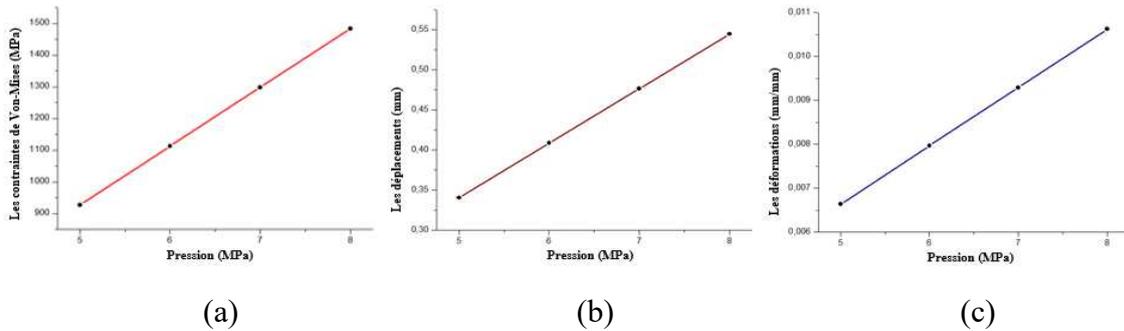


Figure IV.9 Les Résultats (a) Contraintes; (b) Déplacements; (c) Déformations

Avec la présence de fracture et en considérant la Figure IV.9, nous pouvons voir que la contrainte de Von Mises a augmenté de manière significative et maintenant elle est supérieure à la limite d'élasticité pour la pression la plus basse (5MPa), et comme il y a un incrément de la pression appliquée, on a une augmentation au niveau des valeurs de déplacements et de déformations; Nous pouvons supposer que la fracture continue de se propager.

Les figures ci-dessous représentent les six contours des facteurs d'intensité de contraintes  $K_I$ ,  $K_{II}$ ,  $K_{III}$  et  $J$  intégrale sur le fond de fissure lorsqu'on applique la pression nominale (5 MPa).

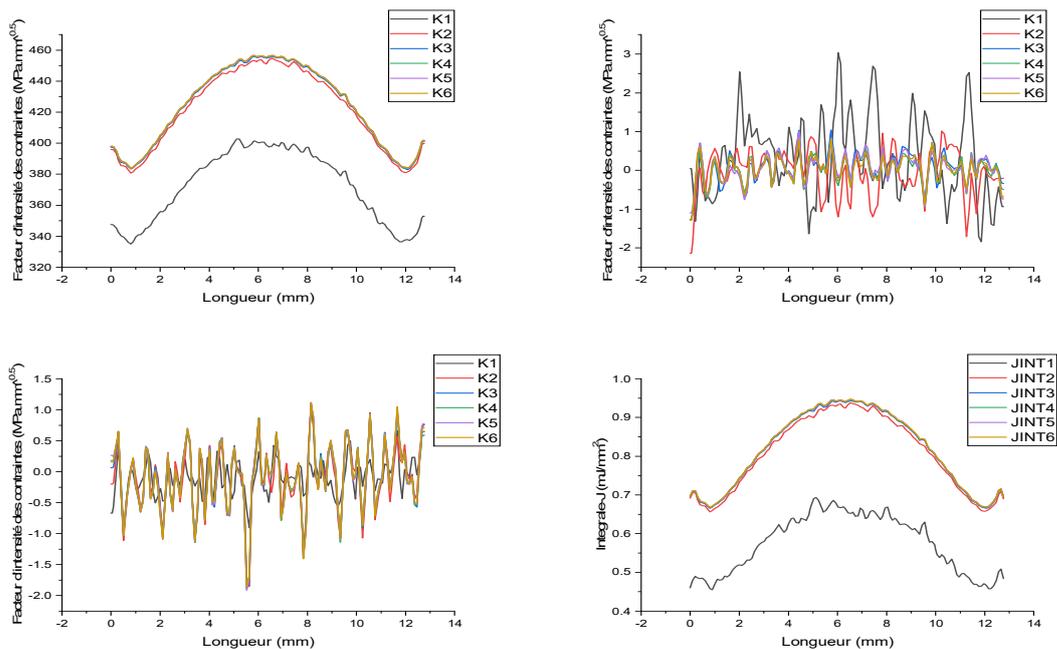


Figure IV.10 Résultats du 1<sup>er</sup> cas, pipe fissuré sans réparation

Sur la base des résultats obtenus lors des tests précédents, on peut déduire qu'une réparation est nécessaire en cas de pression minimale (5 MPa). Nous proposerons deux méthodes de réparation, et les résultats nous permettront de sélectionner la méthode de réparation la plus efficace [105].

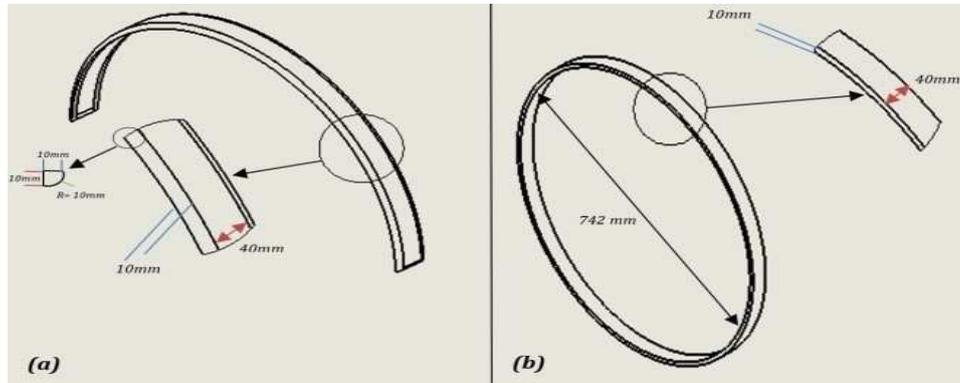


Figure IV.11 Géométrie des deux méthodes de réparation  
 (a) Réparation par demi-coquille. (b) Réparation par patch composite

#### IV.4.2 Réparation par demi-coquille

Dans cette partie de notre travail, nous avons effectué une réparation à l'aide d'une demi-coquille du même matériau X80M que la canalisation, soudée avec un cordon de soudure AA R610, les caractéristiques mécaniques sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.2 Propriétés mécaniques de l'AA R610 [98]

Propriétés	Valeurs	Unité
Limite d'élasticité	620	MPa
Résistance à la traction	680	MPa
Module d'Young	200000	MPa
Coefficient de Poisson	0.3	
Module de masse	166670	MPa
Module de cisaillement	76923	MPa

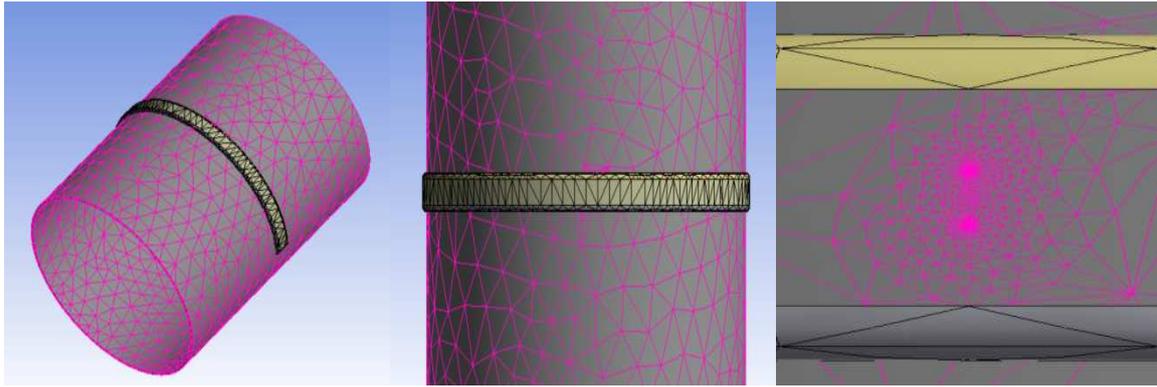


Figure IV.12 Le maillage global Tétraèdre de structure  
(Pipe + demi coquille + cordon de soudage + fissure)

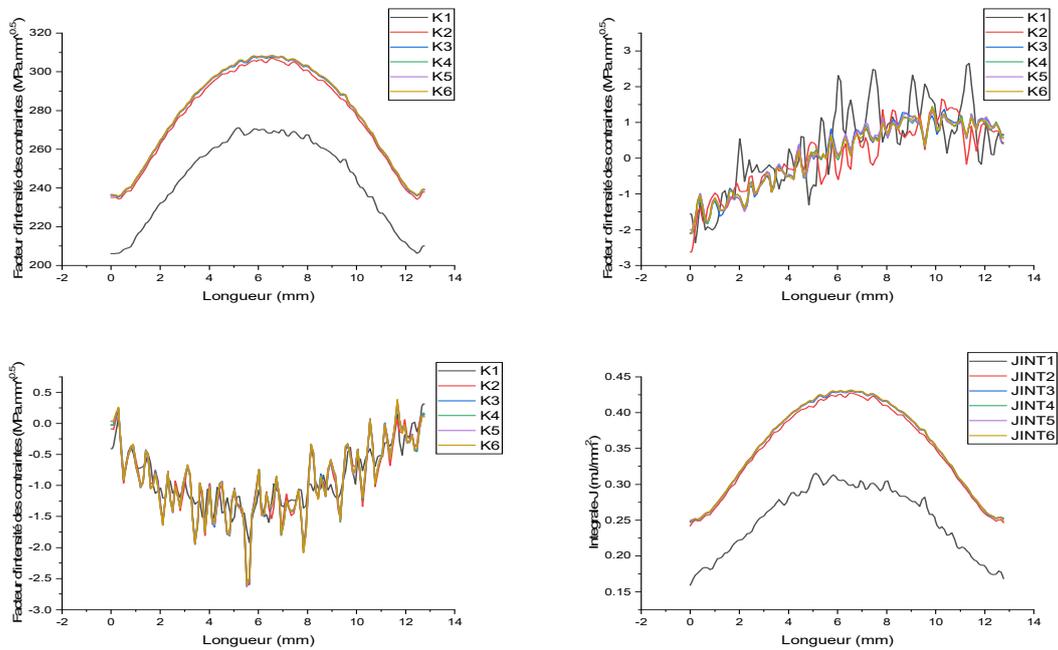


Figure IV.13 Résultats pour le 2<sup>ème</sup> cas, pipe réparé avec demis coquille

L'allure des courbes KI et JINT, dans ce cas, est quasiment identique à l'allure des courbes dans le cas d'une canalisation fissurée, d'après les diagrammes de 2<sup>ème</sup> cas et par rapport au 1<sup>er</sup> cas :

- $K_{I \max}$  diminue de 456,04 MPa à 308,46 MPa
- $K_{II \max}$  diminue de 3,08 MPa à 2,65 MPa
- $K_{III \max}$  diminue de 1,11 MPa à 0,38 MPa
- $JINT_{\max}$  diminue de 0.94435 mJ/mm<sup>2</sup> à 0,43183 mJ/mm<sup>2</sup>

### IV.4.3 Réparation par patch composite

Nous avons sélectionné du carbone époxy pour la réparation de patch composite, et ses propriétés sont les suivantes :

Tableau IV.3 Propriétés mécaniques du carbone époxy [99]

Module d'Young Direction X (MPa)	Module d'Young Direction Y (MPa)	Module d'Young Direction Z (MPa)
1.34e+005	10300	10300
Coefficient de Poisson XY	Coefficient de Poisson YZ	Coefficient de Poisson XZ
0.33	0.33	0.53
Module de cisaillement XY (MPa)	Module de cisaillement YZ (MPa)	Module de cisaillement XZ (MPa)
5500	5500	3200

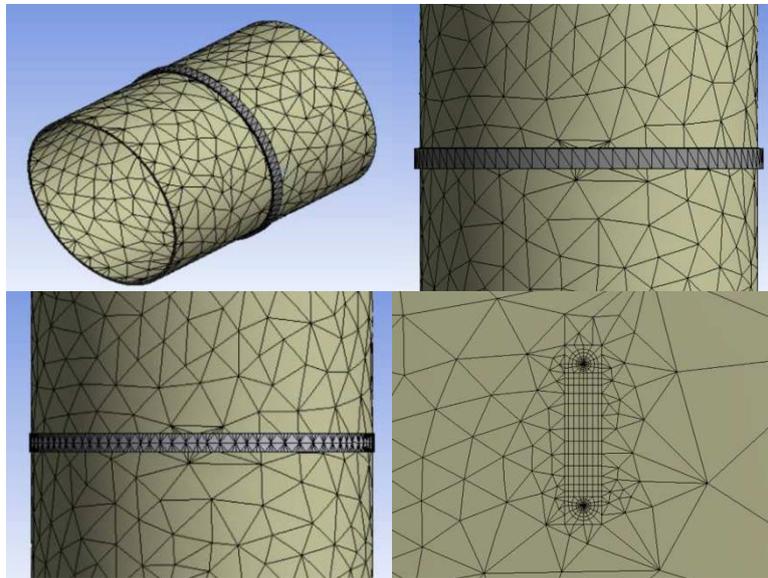


Figure IV.14 Le maillage global Tétraèdre de structure  
(Pipe + patch composite + joint adhésif + fissure)

Après la simulation, nous avons les résultats suivants :

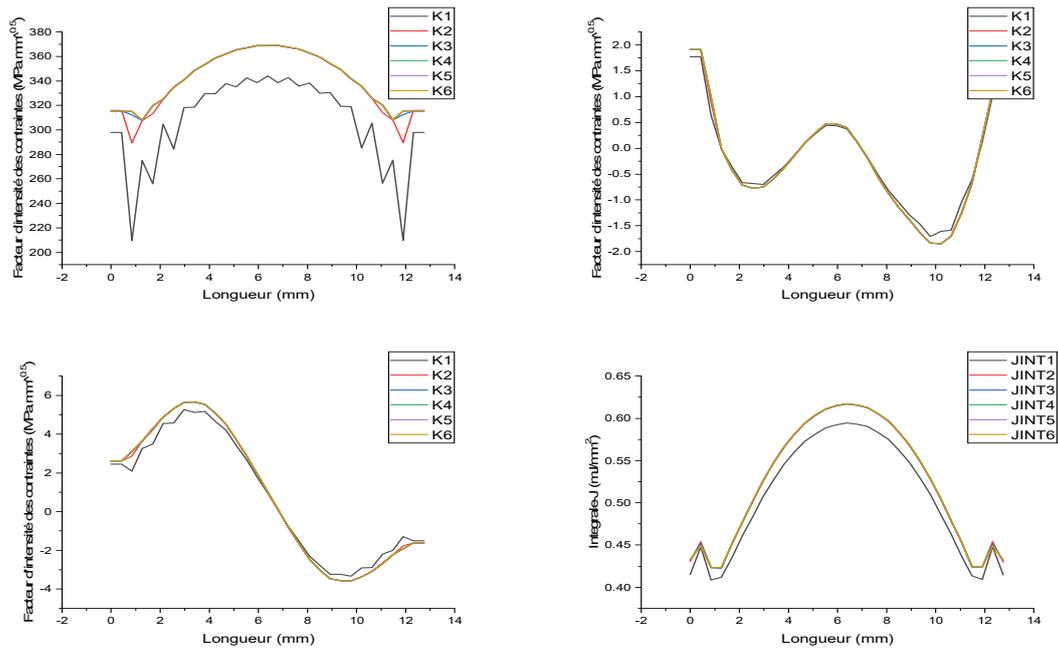


Figure IV.15 Résultats du 3<sup>ème</sup> cas, pipe réparé avec patch composite

L'allure des courbes KI et JINT, dans ce cas, est quasiment identique à l'allure des courbes dans le cas d'une canalisation fissurée, d'après les diagrammes de 2<sup>ème</sup> cas et par rapport au 1<sup>er</sup> cas :

- $K_{I \max}$  diminue de 456,04 MPa à 369.03 MPa
- $K_{II \max}$  diminue de 3,08 MPa à 1.9117 MPa
- $K_{III \max}$  augmente de 1,11 MPa à 5.6619 MPa
- $JINT_{\max}$  diminue de 0.94435 mJ/mm<sup>2</sup> à 0,61734 mJ/mm<sup>2</sup>

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Les canalisations sont soumises à des contraintes mécaniques donnant lieu à des contraintes longitudinales et circonférentielles, qui conduisent à l'apparition de fissures provoquant leurs dommages. Réparer ces tuyaux peut réduire la vitesse ou ralentir la croissance des fissures.

Les recherches préliminaires sur les plaques ont donné les résultats suivants :

- La variation de la charge a un impact direct sur les résultats des contraintes, des déplacements et des déformations, la hausse est donc parallèle pour les deux.
- Pour toutes les pièces, les valeurs maximales de déplacement sont plus proches de la région d'application de la force.
- La distribution des contraintes et déformations critiques se situe au niveau de la fixation pour la plaque sans défaut, alors que la zone rouge est proche du défaut pour les autres sections.
- Lorsque la taille du défaut augmente, les niveaux de contrainte augmentent également ; cependant, dans le cas du défaut elliptique horizontal, l'inverse est vrai, ce qui démontre la pertinence de l'orientation de la discontinuité du matériau.
- La fissure en V démontre qu'il existe une symétrie dans la distribution des contours de déformation et de contrainte, et à partir de cette forme, nous pouvons estimer des directions limitées de propagation, que nous comparons à la limite élastique du matériau pour avoir une meilleure idée de la façon dont cette fissure préliminaire se développera dans le futur.

Nous avons recueilli les données suivantes à la suite des simulations des pipes :

- Nous avons étudié les contraintes dans les tuyaux axiaux et longitudinaux en effectuant des essais de traction, en variant l'emplacement des applications de charge et des fixations, et en faisant varier les pressions appliquées. Le tuyau X80M est sûr par rapport à la limite élastique du matériau, malgré le fait que les pressions appliquées dépassent la pression de travail selon les normes (5 MPa), avec des contraintes axiales maximales de 9,47 MPa et une pression interne de 392,29 MPa.

- Nous concluons qu'une pénétration adéquate de la soudure est nécessaire car elle joue un rôle important dans toutes les géométries, notamment les tuyaux. Nous discutons de l'aspect sécurité, par exemple de la façon dont une soudure défectueuse provoque une minuscule fracture au fil du temps, causant des fuites ou des dommages structurels. Les résultats de cette série de simulations révèlent que les contraintes dans le premier modèle ne dépassent pas la limite élastique de base de l'API 5L X52, cependant les contraintes dans le second modèle sont supérieures à la limite élastique du cordon de soudure (385,83 MPa) avec une valeur de 394,39 MPa.
- Nous comparons deux générations de tuyaux en polyéthylène haute densité, PE80 et PE100, dans la simulation suivante. Les contraintes maximales des deux sont inférieures à la limite élastique des matériaux (20 MPa 23 MPa), et les contraintes normales (circonférentielles) sont inférieures à la résistance minimale requise du PE80 (8 MPa) et du PE100 (10 MPa), avec des améliorations du côté de la résistance pour des pressions de service de 2 à 2,5 MPa, et le tuyau survit pendant plus de 50 ans dans les deux cas.
- La section triangulaire est la solution la plus convergente du tuyau idéal, les contraintes équivalentes pour le cas du tuyau à section circulaire dépassent la limite élastique du PE100, la section de forme carrée atteint également la limite de la limite élastique du matériau, et toutes les propositions dépassent la limite du MRS, donc aucune de ces formes ne survit plus de 50 ans.
- Les tests de fatigue montrent que la nouvelle construction peut résister à une pression constante de PE100 pendant 16 ans, ce qui suggère une dégradation considérable par rapport à la conduite idéale, qui peut durer jusqu'à 50 ans. Cependant, même si la paroi intérieure se brise, le tuyau reste fonctionnel, et les premières investigations montrent que le fluide sera empêché par les barres (voire Figure III.67), et enfin, la paroi extérieure qui forme le tuyau peut résister aux agressions extérieures.
- Pour reconnaître l'effet du type de fissure le plus nuisible sur le comportement de la conduite. La variation du grand rayon du contour ainsi que du petit rayon nous a permis de voir leur effet sur le comportement de la conduite. Si le rayon du contour est petit, les dommages sont plus importants. Le deuxième facteur le plus influent est le petit

rayon pour les deux orientations qui nous a permis d'observer les valeurs de déplacement, de déformation et de contrainte les plus élevées dans le cas de la fissure transversale en raison de la forme circulaire du tuyau et de la distribution de la pression interne appliquée. On peut définir la direction de propagation de la fracture à partir des valeurs de contraintes centrées sur les bords de la fissure qui représentent les centres du contour de la maille.

- D'après les essais de rupture, le lieu du défaut joue un rôle important, surtout lorsque nous avons une continuité du matériau (zones I et III), ce qui nous permet de contrôler, c'est-à-dire de limiter la nocivité des contraintes, et de proposer des solutions pour développer la structure du tuyau à moindre coût, sans oublier la faible sensibilité de la zone discontinue aux fissures et à l'intensité des contraintes en général (zones II et IV).

Nous nous sommes intéressés à la résistance du pipeline aux fluctuations de pression en termes de propagation de la fissure initiale, d'une part, et à l'intérêt d'une réparation, qu'il s'agisse d'un patch ou d'une demi-coquille, d'autre part les discussions suivantes illustre l'importance de ces méthodes de réparations :

- Dans le mode d'ouverture (Mode I), les valeurs sont les plus élevées mais ne dépassent pas la limite critique de ténacité  $K_{IC}$ , ce qui nous permet de déclarer que la fracture est stable même avant la réparation et, finalement, nous obtenons des longueurs constantes et extrêmement petites.
- Une baisse considérable des valeurs de  $K_I$ ,  $K_{II}$ ,  $K_{III}$  et  $J_{INT}$  après la réparation ; néanmoins, lorsqu'une réparation avec un patch composite est effectuée, le  $K_{III}$  augmente, indiquant que la réparation précédente était insuffisante lorsqu'on parle du mode mixte.
- Le soudage en demi-coquille et la réparation par patch composite (époxy carbone) sont de bonnes procédures pour réparer les fractures semi-elliptiques ; ces méthodes de réparation augmentent la résistance du pipeline pour une durée de vie supplémentaire importante.

## RÉFÉRENCES

- [1] Van Den Brand, NV Nederlandse, "Safety in European gas transmission pipelines." Report of the European Gas Pipeline Incident Group, IGU paper, 2009.
- [2] Adam C, "L'inspection des pipelines par racleurs instrumentés." Association française des techniciens et professionnels du pétrole, Paris France, 2001.
- [3] Maire Alain, "Le transport par pipeline: aspects économiques et environnementaux." Editions Technip, France, 2011.
- [4] Benoit L, "Current and future state of oil and gas pipeline and refining capacity in Canada." Report of the Standing Committee on the Natural Resources, Parliament of Canada, Ottawa, Ontario, Canada, 2012.
- [5] Mohitpour Mo, Kamal Kamel Botros, Thomas Van Hardeveld, "Pipeline pumping and compression systems: a practical approach." ASME Press, 2008.
- [6] Medjdoub Sidi Mohamed, "Comportement en rupture des pipelines sous pression interne réparés par des matériaux composites," Thèse de doctorat, université Djillali Liabes, Sidi Bel Abbes, 2019.
- [7] Irwin G R, Fracture Dynamics, Fracturing of Metals. American Society for Metals, Cleveland, 147-166, 1948.
- [8] Kies Joseph A, "The resistance of materials to fracture propagation and gunfire damage." Naval research lab washington dc, 1956.
- [9] Tricarico L, et al, "FEM analysis of the forming operations in the production of large diameter welded tubes." Proceedings of the V Convegno AITEM, Polytechnic of Bari italy, 2001.
- [10] Anne-Sophie, et al, "Estimation du risque de rupture fragile de soudures de pipelines en aciers à haut grade: caractérisation et modélisation." Thèse de doctorat, Paris, 2007.
- [11] Michel Fontanille, Yves Gnanou, Jean-Luc Six, "Chimie et physico-chimie des polymères." Vol. 386, Paris: Dunod, 2002.
- [12] Ehrenstein Gottfried W, Fabienne Montagne, "Matériaux polymères: structure, propriétés et applications." Hermès science publications, 2000.
- [13] Règles de sécurité pour les canalisations de transport de gaz combustibles, [http://www.mem-algeria.org/fr/legis/contl\\_secu\\_rgl\\_secu3.pdf](http://www.mem-algeria.org/fr/legis/contl_secu_rgl_secu3.pdf), Septembre 1991.
- [14] Règles de sécurité pour les canalisations de transport d'hydrocarbures liquides, [http://www.mem-algeria.org/fr/legis/contl\\_secu\\_rgl\\_secu2.pdf](http://www.mem-algeria.org/fr/legis/contl_secu_rgl_secu2.pdf), , Octobre 1991.

- [15] Bettayeb Mourad, "Contribution à l'étude de la fiabilité en présence de défauts de joints de soudures et de corrosion, dans les canalisations de transport d'hydrocarbures." Thèse de doctorat, Université M'Hamed Bougara, 2016.
- [16] Office national de l'énergie. "Enquête publique sur la fissuration par corrosion sous tension des oléoducs et des gazoducs canadiens, MH-2-95." Rapport de l'enquête, novembre 1996.
- [17] Bucu Jasmin, "Analyse et modélisation du comportement mécanique des conduites enterrées." Revue Européenne de Génie Civil, 2006.
- [18] Paul Chi Fai Ng, "Behavior of buried pipelines subjected to external loading." Doctor of Philosophy Thesis, University of Sheffield, November 1994.
- [19] George A, "Piping and pipeline engineering: design, construction, maintenance, integrity, and repair." CRC Press, 2003.
- [20] Association canadienne de normalisation, Norme CAN/CSA Z662-94. "Réseaux de canalisations de pétrole et de gaz." clause 9.2.8.1, 1994.
- [21] U.S. Department of Transportation, "Pipeline safety regulations, CFR Parts 192 and 195; Institute of Gas Engineers." Steel Pipelines for High Pressure Gas Transmission, Edition 3, October 1994.
- [22] Bouziane, Abdelkader, "Contribution à la détermination des critères de qualité des tubes soudés soumis à une pression intérieure." Thèse de doctorat, Boumerdes, Université M'hamed Bougara, 2008.
- [23] Ghomri.A, Hassaine.A, "Etudes des effets de surcharge sur la propagation de fissure de fatigue." Thèse d'ingénieur en GM, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, 2010/2011.
- [24] Vincent-Genod, "Le transport des hydrocarbures liquides et gazeux par canalisation." Vol. 1. Éditions Technip, 1980.
- [25] Bellahcene Tassadit, "Etude de la nocivité des défauts dans les canalisations sous environnement hydrogène." Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri, 2012.
- [26] Fitness-for-Service, "API Recommended Practice 579, 1st ed." American Petroleum Institute, January 2000.
- [27] Mayfield M E, Maxey W A, Wilkowski G M, "Fracture initiation tolerance of line pipe." No. CONF-7910293-, American Gas Association, Arlington, VA, USA, 1979.
- [28] Trenchless Rehabilitation, Explains Cracks, <https://www.trenchlesspedia.com/definition/2477/cracks>, December 9 2017.
- [29] Rosen-group global solutions, pipeline cracks, <https://www.rosen-group.com/global/solutions/services/pipeline-cracks#girthweldplanarfeatures>, 2022.

- [30] Zeghloul A, "Concepts fondamentaux de la mécanique de la rupture." Cours, Université de Metz, 2016-2017.
- [31] Griffith Alan Arnold, "The phenomenon of rupture and flow in solids." Phil. Trans. Royal Soc. London, A 221, 1920.
- [32] Westergaard Harold M, "Bearing pressures and cracks: Bearing pressures through a slightly waved surface or through a nearly flat part of a cylinder, and related problems of cracks.", 1939.
- [33] Irwin George R, "Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate." 1957.
- [34] Barenblatt Grigory Isaakovich, "The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture." Advances in applied mechanics 7, 1962.
- [35] Hutchinson JW, "Singular behaviour at the end of a tensile crack in a hardening material." Journal of the Mechanics and Physics of Solids 16.1, 1968.
- [36] Bouchard Pierre Olivier, "Contribution à la modélisation numérique en mécanique de la rupture et structures multimatériaux." Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2000.
- [37] Ramesh K, "E-Book on engineering fracture mechanics." India: IIT Madras, 2007.
- [38] Claude Robin, "Mécanismes de rupture et de croissance de fissures." Ecole des Mines de Douai, Mai – décembre 2010.
- [39] Nassima Aissaoui, "Apport de la modélisation mésoscopique dans la prédiction de la fissuration des structures en béton: Aspects énergétiques et effets d'échelle." Thèse de doctorat, Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid, 2018.
- [40] Fiordalisi Saverio, "Modélisation tridimensionnelle de la fermeture induite par plasticité lors de la propagation d'une fissure de fatigue dans l'acier 304L." Thèse de doctorat. Chasseneuil-du-Poitou, Ecole nationale supérieure de mécanique et d'aérotechnique, 2014.
- [41] Aït Hocine Nourredine, "Approche globale de la mécanique de la rupture appliquée aux élastomères: validation expérimentale et numérique d'une expression de l'intégrale J sous une forme multiplicative d'une fonction de la densité d'énergie de déformation et d'une fonction de géométrie." Thèse de doctorat. Lille 1, 1996.
- [42] Alaoui Aboulghit El Malki, "Influence du chargement sur la propagation en fatigue de fissures courtes dans un acier de construction navale." Thèse de doctorat. Université de Metz, 2005.
- [43] Peterson Rudolph Earl, "Stress concentration factors: Charts and relations useful in making strength calculations for machine parts and structural elements (Book)." New York, Wiley-Interscience, 1974.

- [44] Neuber H, et al, "Effect of stress concentration and cracks on fatigue strength." Metal Fatigue, London: Oxford University, 1974.
- [45] Smith R, Miller K. J, "Prediction of fatigue regimes in notched components." International Journal of Mechanical Sciences 20.4, 1978.
- [46] Kuguel R, "A relation between theoretical stress concentration factor and fatigue notch factor deduced from the concept of highly stressed volume." proc. ASTM, Vol. 61, 1961.
- [47] Neuber Heinz, "Theoretical determination of fatigue strength at stress concentration." Technische hochschule munich (west germany) institut fuer technische mechanik, 1967.
- [48] Buch A, "Analytical approach to size and notch-size effects in fatigue of aircraft material specimens." Materials Science and Engineering, 1974.
- [49] Brand Alain, "Calcul des pieces a la fatigue: methode du gradient." 1980.
- [50] Bermin F M, "Metall. Transaction." Vol.14A, 1983.
- [51] Barsom J M, McNicol R C, "Effect of stress concentration on fatigue-crack initiation in HY-130 steel." ASTM International, 1974.
- [52] Clarck Jr, "Evaluation of the fatigue crack initiation properties of type 403 stainless steel in air and stress environments." Fracture toughness and slow-stable cracking. ASTM STP 559, 1974.
- [53] Kadi N, Azari Z, Pluvinage G, "Brittle fracture meaning from notches, relationship between effective distance and microstructure." Laboratoire de fiabilité mécanique-Université de Metz, 1999.
- [54] Pluvinage G, "Notch effect and effective stress in high-cycle fatigue." Présenté par le laboratoire de fiabilité mécanique, Université de Metz ,1999.
- [55] Pluvinage G, "Rupture and fatigue initiated from notches. Application of the notch intensity factor." Revue Francaise de Mecanique 1, 1997.
- [56] Qylafku G, "Effet d'entaille en fatigue de grand nombre de cycles effet du gradient. 7 Mémoire de thèse doctorat d'université de Metz. " 2000.
- [57] Peterson R E, "Notch Sensitivity, Metal Fatigue, G. Sines, J. Lwaisman." New York: McGrawrHill, 1959.
- [58] Adib-Ramezani H, Jeong J, Pluvinage, G. "Structural integrity evaluation of X52 gas pipes subjected to external corrosion defects using the SINTAP procedure." International Journal of Pressure Vessels and Piping 83.6, 2006.
- [59] Qylafku G, et al. "Application of a new model proposal for fatigue life prediction on notches and key-seats." International Journal of fatigue 21.8, 1999.

- [60] Williams J G, Ewing P D, "Fracture under complex stress—the angled crack problem." *International Journal of Fracture Mechanics* 8.4, 1972.
- [61] Toshio Nakamura, David M Parks, "Determination of elastic T-stress along three-dimensional crack fronts using an interaction integral." *International journal of solids and structures* 29.13, 1992.
- [62] Smith D J, Ayatollahi M R, Pavier M J, "The role of T-stress in brittle fracture for linear elastic materials under mixed-mode loading." *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 24.2, 2001.
- [63] Cotterell B, "Notes on the paths and stability of cracks." *International Journal of Fracture Mechanics* 2.3, 1966.
- [64] O'dowd N P, Fong Shih C, "Family of crack-tip fields characterized by a triaxiality parameter—I. Structure of fields." *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 39.8: 989-1015, 1991.
- [65] Maleski M J, Kirugulige M S, Tippur H V, "A method for measuring mode I crack tip constraint under static and dynamic loading conditions." *Experimental mechanics* 44.5: 522-532, 2004.
- [66] Yang B, Ravi-Chandar K, "Evaluation of elastic T-stress by the stress difference method." *Engineering Fracture Mechanics* 64.5: 589-605, 1999.
- [67] François D, Pineau A, Zaoui A, "Comportement mécanique des matériaux." Edition Lavoisier, 2009.
- [68]
- [69] Jabbado Mohamad, "Fatigue polycyclique des structures métalliques: durée de vie sous chargements variables." Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique X, 2006.
- [70] Bahuaud J, Boivin M, "Introduction au calcul des structures soumises à la fatigue." I.N.S.A, de Lyon, 1969.
- [71] Dorlot J M, Baïlon J P, Masounave J, "Des matériaux." 2e édition, Ecole polytechnique de Montréal, Montréal, Canada, 1986.
- [72] Degallaix S, Ilschner B, "Caractérisation expérimentale des matériaux I, Propriétés physiques, thermiques et mécaniques." Presses polytechniques et universitaires romandes, 2007.
- [73] Milesi Marc, "Impact des caractéristiques microstructurales des pièces forgées sur leur tenue en fatigue à grand nombre de cycles: Modélisation multi-échelles et validation expérimentale." Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2009.

- [74] Kebir Tayeb, "Influence de l'écrouissage des matériaux sur la propagation de fissure de fatigue." Thèse de Doctorat, 2018.
- [75] Hosdez J, "Fissuration par fatigue de fontes à graphite sphéroïdal et vermiculaire: caractérisation des effets de la plasticité et d'un vieillissement thermique." Thèse de Doctorat, Centrale Lille, p 35, 2017.
- [76] Torleiv Rike Haugsjå, "Finite element method as a tool for preliminary steel weight estimation." Master's thesis in Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology, "www.illustrations.marin.ntnu.no" (webographie), June 2019.
- [77] Bourchak M, Aid A, "PE-HD fatigue damage accumulation under variable loading based on various damage models." Express Polymer Letters 11.2, 2017.
- [78] Basquin O. H, "The exponential law of endurance tests." Proc Am Soc Test Mater. Vol. 10, 1910.
- [79] Nayyar M L, "Piping Handbook." Seventh Edition, McGraw- Hill, Singapore, 2000.
- [80] Pinter Gerald, Lang R W, "Effect of stabilization on creep crack growth in high-density polyethylene," Journal of applied polymer science 90.12: 3191-3207, 2003.
- [81] Berrehili A, Castagnet S, Nadot Y, "Multiaxial fatigue criterion for a high-density polyethylene thermoplastic." Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures 33.6: 345-357, 2010.
- [82] Zitouni T A, Labeled Z, "Modélisation d'une fissure dans un pipeline sous pression interne." 5th International Conference On Energy Materials Applied Energetics And Pollution : CIEMEAP'2019, Constantine, Algérie, ISBN 978-9931-9229-8-8: 22-24, Octobre (2019) .
- [83] Eddyfi site officiel, "Technologies Eddyfi pour les applications d'inspection des pipelines", "<https://www.eddyfi.com/fr/application/pipelines>" 2019 – 2022 .
- [84] Contrôles Appliqués à Pipelines et aux Grands Réservoirs De Stockage, <https://www.scifrancesa.fr/essais-non-destructifs/tests-appliques-aux-pipelines-et-reservoirs/>, Burdeaux, France.
- [85] Michael Ashby, "Choix des matériaux en conception mécanique." DUNOD, 1997.
- [86] HR Transversal Tool, "<https://ultra-global.com/Ulta-Inspection.html>", Russian Federation, Ekaterinburg.
- [87] Fletcher Richard, Muthu Chandrasekaran, "SmartBall™: a new approach in pipeline leak detection." International Pipeline Conference. Vol. 48586. 2008.
- [88] Ariaratnam Samuel T, Muthu Chandrasekaran, "Development of a free-swimming acoustic tool for liquid pipeline leak detection including evaluation for natural gas pipeline applications." 2010.

- [89] Chung Ki-Hyun, Won-Ho Yang, "A study on the fatigue crack growth behavior of thick aluminum panels repaired with a composite patch." *Composite Structures* 60.1:1-7, 2003.
- [90] Hosseini Toudeshky H, Sadeghi Gh, Daghyani H R, "Experimental fatigue crack growth and crack-front shape analysis of asymmetric repaired aluminium panels with glass/epoxy composite patches." *Composite structures* 71.3-4: 401-406, 2005.
- [91] Seo Dae Cheol, Jung Ju Lee, "Fatigue crack growth behavior of cracked aluminum plate repaired with composite patch." *Composite Structures* 57.1-4: 323-330, 2002.
- [92] Blehaut Hervé, et al, "Characterisation of the effects of grinding on residual stresses." *Materials science forum*, Vol. 404, Trans Tech Publications Ltd, 2002.
- [93] Bruneaux M A, "Durabilité des assemblages collés : modélisation mécanique et physico chimique." Thèse de doctorat, école nationale des ponts et chaussées, 2004.
- [94] Naboulsi , Mall S, "Fatigue crack growth analysis of adhesively repaired panel using perfectly and imperfectly composite patches." *Theoretical and applied fracture mechanics* 28.1: 13-28, 1997.
- [95] Sabelkin V, et al, "Investigation into cracked aluminum plate repaired with bonded composite patch." *Composite Structures* 79.1: 55-66, 2007.
- [96] Banks Industrial Group official website, "<https://www.banksindustrial.com/repair-compounds-protective-coatings>", 2004–2021.
- [97] Taberkokt A, "Réhabilitation du gazoduc  $\Phi$  20." RELIZANE – MAGHNIA ; sonelgaz-xg, ALGERIA.
- [98] Huissen TG, "Material list AA R610, The ASME classification is carried out based on a weld metal according to ISO standards 6851 (NL)." CEWELD Certilas Nederland BV, Gloxinialaan 2, Janvier 2018.
- [99] Abdelouahed E, Benzaama H, Aour B, Mokhtari M, Tadjeddine A A, "Réparation par patch composite des pipelines sous charge de la pression interne." 24ème Congrès Français de Mécanique, 2019.
- [100] Zitouni T A, Labeled Z, "Numerical Study on Dimensions and Orientation Effect of Semi-Elliptical Cracks in PE100 Pipelines." *International Journal of Applied Mechanics and Engineering* 26.3: 198-207, 2021.
- [101] Zitouni T A, Labeled Z, "Lack of Penetration of Welded Pipe and Stress Behavior." sixth International Conference on Advances in Mechanical Engineering: ICAME 2021, Istanbul, Turkey, ISBN 978-975-461-599-9, 20-22 October 2021.

- [102] Zitouni, T A, Labed Z, "Etude De La Résistance Des Pipelines En PE Sous Pression Interne." 7<sup>ème</sup> Congrès Algérien De Mécanique : CAM 2019, Ghardaïa, Algérie, 23-26 Février 2020.
- [103] Zitouni T A, Labed Z, "Comparative Study ON HDPE Pipes." Fifth International Conference on Advances in Mechanical Engineering: ICAME 2019, Istanbul, Turkey, ISBN 978-605-9546-16-4, 17-19 December 2019.
- [104] Zitouni T A, Labed Z, "Simulation of Scratch and Dent Defects in Gas Pipelines." third International Conference on Tribology: Turkeytrib'20, Istanbul, Turkey, ISBN 978-605-9546-18-8, 17-19 December 2020.
- [105] Khireche A, Zitouni T A, Labed Z, "Numerical Study of A Cracked Pipe Before and After Using Two Different Repair Methods" Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, Vol.43, No.3, 2022.