

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



Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Domaine : TECHNOLOGIE  
Filière : GENIE MECANIQUE  
Spécialité : CONSTRUCTION MECANIQUE  
**Thème**

**Comportement en rupture d'une fissure  
circonférentielle dans un pipeline soumis au chargement  
mixte (Pression, moment et traction)**

**Présenté Par :**

- 1) MEDJDOUB Meriem
- 2) ERROUANE Houria

**Devant les jurys composés de :**

Belhamiani Mohamed	Docteur	C.U.B.B (Ain Témouchent)	<b>Président</b>
Oudad Wahid	Professeur	C.U.B.B (Ain Témouchent)	<b>Encadrant</b>
Bouafia. F	Professeur	C.U.B.B (Ain Témouchent)	<b>Examineur</b>

Année universitaire 2019/2020

## Remerciement :

Avant toute choses, nous remercions Allah le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de faire ce travail.

Le présent mémoire n'a jamais peut être mené à terme sans notre encadreur monsieur **Oudad Wahid** professeur à centre universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain Témouchent pour ses conseils et tout l'encouragement et son aide pendant toute la durée de ce travail.

C'est un honneur pour nous que monsieur **Belhamiani Mohamed** docteur au centre universitaire d'Ain Témouchent qui à accepter de présider le jury.

Nous remercions également madame **Bouafia** professeur au centre universitaire d'Ain Témouchent pour l'intérêt qu'elle a donné à notre travail en acceptant de l'examiner.

Nous adressons aussi l'expression de nos sincères remerciements à Monsieur **Sadaoui Hamid** et la sœur **Medjdoub Wahiba** pour leurs participations à la réussite de ce travail.

**Dédicace :**

A ma chère et douce mère et mon cher père,

A mes sœurs et mon frère,

A ceux qui ont cru en moi,

A ceux qui croient en moi,

Et à ceux qui croirons toujours en moi.

Meriem...

## Résumé :

Le transport du gaz et pétrole s'effectue par des pipelines généralement enterrés recouvertes d'un revêtement intérieurement et extérieurement fabriqués par un acier avec des propriétés mécaniques élevés.

Ces pipelines sont exposés à différents effets qui dussent à leur défaillance mécanique qui influent souvent à la rupture, la mécanique de la rupture permet de connaitre le comportement en rupture par le facteur d'intensité des contraintes.

L'augmentation des fissurations est un problème très grave c'est pour ça, il est nécessaire de faire une étude approfondie durant la durée de service de ces pipelines. Les calculs se faites par une simulation numérique pour avoir des résultats très précise difficilement accessible expérimentalement et ces résultats obtenus aide d'avoir des solutions fonctionnels il faut les prendre en considération dans l'avenir.

**Les mots clés :** Pipelines, mécanique de la rupture, fissure, simulation numérique, Facteur d'intensité de contrainte.

## المخلص

تتم عملية نقل الغاز والبتترول عبر خطوط الأنابيب المصنوعة من الحديد والصلب ذو الخصائص الميكانيكية العالية، التي غالبا ما تكون محمية تحت الأرض داخليا وخارجيا.

الأنابيب معرضة لعدة عوامل تتسبب في تعبها الميكانيكي الذي يؤدي غالبا إلى الكسر. ميكانيك الكسر تساعد على معرفة محتوى هذه الأنابيب التي تعرضت للتشقق عبر عامل قياس شدة الضغط. زيادة التشققات مشكل خطير لأجل هذا يجب إجراء دراسة معمقة طوال فترة عمل الأنابيب. تتم التحاليل عبر محاكاة رقمية من اجل نتائج دقيقة. النتائج المحصل عليها تساعد في الحصول على حلول عملية يجب العمل بها مستقبلا. **الكلمات المفتاحية :** خطوط الأنابيب ، ميكانيك الكسر، التشقق ، محاكاة رقمية، عامل قياس شدة الضغط.

## Abstract:

The transport of gas and oil is carried out by generally underground pipelines covered with a coating internally and externally made of steel with high mechanical properties.

These pipelines are exposed to various effects due to their mechanical failure which often influence failure, failure mechanics allows us to know the failure behaviour by the stress intensity factor.

Increased cracking is a very serious problem and that is why it is necessary to do a thorough study during the service life of these pipelines. The calculations are made by a numerical simulations to have very precise results which are difficult to access experimentally and these results obtained help to have functional solutions which is must be taken into consideration in the failure.

**The keywords:** Pipelines, failure mechanics, cracking, numerical simulation, stress intensity factor.

## Liste des figures

---

<b>Liste des figures :</b>	<b>Page</b>
<b>Chapitre I :</b>	
<b>Figure I.1 :</b> Pipeline pour le transport de pétrole.....	4
<b>Figure I.2 :</b> Étapes de fabrication des aciers propre, en parallèle avec les Objectifs métallurgiques.....	7
<b>Figure I.3 :</b> Relation entre la teneur en carbone et le grade de l'acier.....	8
<b>Figure I.4 :</b> Sens longitudinale et transversale de tube.....	9
<b>Figure I.5 :</b> Microstructure de l'acier API 5L X65.....	11
<b>Figure I.6 :</b> Technique de fabrication des tubes soudés en spirale.....	12
<b>Figure I.7 :</b> Croquage d'un pipeline.....	13
<b>Figure I.8 :</b> Formage sous forme U et O.....	13
<b>Figure I.9 :</b> Soudage manuel et automatique des tubes.....	14
<b>Figure I.10 :</b> Expansion et calibrage.....	14
<b>Figure I.11 :</b> Obtention des tubes sans soudure.....	15
<b>Figure I.12 :</b> Procédure de revêtement extérieur d'un pipeline.....	16
<b>Chapitre II :</b>	
<b>Figure II.1 :</b> Différents modes de rupture.....	21
<b>Figure II.2 :</b> Exemple de rupture fragile.....	22
<b>Figure II.3 :</b> Quelques exemples de ruptures.....	24
<b>Figure II.4 :</b> Rupture ductile d'un tuyau de diamètre moyen sous l'effet de la pression interne.....	25
<b>Figure II.5 :</b> Répartition des contraintes élastiques et élastoplastique dans le plan de la fissure.....	27

## Liste des figures

---

<b>Figure II.6</b> : Sollicitation d'un pipeline à une pression interne.....	29
<b>Figure II.7</b> : Principe de la corrosion par piqûres.....	32
<b>Figure II.8</b> : Fissure dans les joints de soudure.....	34
<b>Figure II.9</b> : Géométrie d'un tube avec une fissure circonférentielle.....	34
<b>Figure II.10</b> : Défaut de type éraflure.....	35
<b>Figure II.11</b> : Défaut de type enfoncement.....	36
<b>Figure II.12</b> : Contraintes mécaniques exercés sur les conduites.....	37
<b>Chapitre III :</b>	
<b>Figure III.1</b> : Étapes à suivre pour la programmation.....	41
<b>Figure III.2</b> : Géométrie de pipe.....	42
<b>Figure III.3</b> : Propriétés de pipe.....	42
<b>Figure III.4</b> : Créations des divisions.....	43
<b>Figure III.5</b> : Déclarations des interactions.....	43
<b>Figure III.6</b> : Déclarations des conditions aux limites.....	44
<b>Figure III.7</b> : Maillage du modèle géométrique.....	44
<b>Figure III.8</b> : Géométrie de la fissure.....	45
<b>Figure III.9</b> : Chargement mixte (pression-moment(1)).....	46
<b>Figure III.10</b> : Distribution du facteur d'intensité de contrainte $K_1$ pour une compression et pour un mixte (pression –moment1).....	46
<b>Figure III.11</b> : Variation du facteur d'intensité de contrainte $K_1$ en fonction de la pression pour un déplacement constant.....	47
<b>Figure III.12</b> : Variation de $K_1$ max en fonction de la pression (A: $K_1$ max, B: $K_1$ min).....	48

## Liste des figures

---

<b>Figure III.13</b> : Variation du facteur d'intensité de contrainte $K_I$ en fonction du moment (1), $P = 70\text{bar}$ .....	49
<b>Figure III.14</b> : Chargement mixte pression-moment (2).....	49
<b>Figure III.15</b> : Variation du facteur d'intensité $K_I$ en fonction du moment (2), $P=70\text{bar}$ .....	50
<b>Figure III.16</b> : Chargement mixte pression-traction.....	50
<b>Figure III.17</b> : Variation du facteur d'intensité de contrainte $K_I$ en fonction de la pression pour un déplacement constant.....	51
<b>Figure III.18</b> : Variation du FIC $K_I$ en fonction de la pression (A : $K_{I\text{max}}$ , B : $K_{I\text{min}}$ ).....	51
<b>Figure III.19</b> : Variation du FIC le long du front de fissure en fonction de la traction, ( $P=70\text{bar}$ ).....	52
<b>Figure III.20</b> : Variation du FIC $K_{I\text{max}}$ en fonction des combinaisons des chargements .....	53
<b>Figure III.21</b> : Géométrie de la fissure.....	53
<b>Figure III.22</b> : Variation du facteur d'intensité du contrainte $K_I$ pour un pipeline soumis à un moment constant avec une pression variable (A), pression constante et moment variable (B).....	54
<b>Figure III.23</b> : Variation du facteur d'intensité de contrainte $K_I$ pour un pipeline soumis à une pression constante et un moment variable.....	55
<b>Figure III.24</b> : Variation du facteur d'intensité du contrainte $K_I$ pour un pipeline soumis à une traction constante avec une pression variable (A), pression constante et traction variable (B).....	55

## Liste des tableaux

---

### Liste des tableaux :

<b>Chapitre I :</b>	<b>Page</b>
<b>Tableau I.1 :</b> Caractéristiques mécaniques par (N/mm <sup>2</sup> ) (Tubes de conduites PSL1)....	10
<b>Tableau I.2 :</b> Composition chimique de l'acier X65.....	10
<b>Chapitre III :</b>	
<b>Tableau III.1 :</b> Caractéristiques géométriques du pipeline.....	41
<b>Tableau III.2 :</b> Caractéristiques mécaniques de l'acier API 5L X65.....	42



## Liste des abréviations

---

### Liste des abréviations:

**API:** American Petroleum Institute

**HSLA:** High Strength Low Alloy Steels

**XL:** Spécification pour les pipelines

**X :** Désignation de catégorie pour le pipeline de haute résistance

- Le chiffre après le “ X ” correspond à la valeur de la limite d'élasticité minimale

**PSL1 :** Pipe Steel Line (tube de conduite)

**PSL2 :** Pipe Steel Line (tube de produit)

**ZAT :** Zone affectée thermiquement

**FBE:** Fusion Bonded Epoxy

**FIC:** Facteur d'intensité de contrainte

**ASME:** American Society of Mechanical Engineers, États-Unis

**DNV:** Det Norske Veritas

**AFNOR :** Association Française de normalisation

## Liste des symboles

---

### Liste des symboles :

#### Chapitre I :

CFC : Cubique à faces centrés

Fe-C : Fer-carbone

Mpa : Méga pascal

C : Carbone

Ni : Nickel

Mn : Magnésiums

Cu : Cuivre

Si : Silicium

Cr : Chrome

Mo : Molybdène

Ti : Titane

V : Vanadium

Nb : Niobium

Al : Aluminium

B : Bore

S: Soufre

P: Phosphore

" : Pouce

N/mm<sup>2</sup> : Newton par millimètre carré

B : Largeur de la bande

D : Diamètre extérieur de tube formé

## Liste des symboles

---

$\beta$  : L'angle d'introduction de la bande par rapport à l'axe symétrique ( $\Delta$ )

### Chapitre II :

$T_{\text{fusion}}$  : Température de fusion

$G$  : Le taux de restitution d'énergie potentielle

$G_c$  : La densité surfacique d'énergie de fissuration effective

$\Pi$  : L'énergie potentielle

$F$  : Le travail des forces extérieurs

$U$  : L'énergie de déformation

$\gamma_p$  : Énergie plastique de déformation

$\sigma$  : Contrainte appliqué

$\sigma_n$  : Contrainte normale

$E$  : Le module de Young

$b_0$  : Paramètre caractéristique du défaut

$r_p$  : Rayon de la zone plastifié

$r_e$  : Rayon de la zone élastique

$a$  : Longueur de la fissure

$K$  : Facteur d'intensité de contrainte

$K_I$  : Facteur d'intensité des contraintes en mode I

$K_c$  : Facteur d'intensité des contraintes critique

$\varepsilon$  : Déformation

$J$  : L'intégral de contour

$P$  : Pression

$F_t, F_b$  : Facteurs géométriques

## Liste des symboles

---

$W$  : L'énergie potentielle totale

$W_e$  : Énergie de déformation élastique

$W_{ext}$  : Énergie potentielle de forces extérieures

$b$  : Épaisseur de la fissure

$\Delta a$  : Variation de la longueur de fissure

$T$  : Vecteur de contrainte

$U$  : Vecteur déplacement

# Sommaire

---

## Sommaire

Remerciements.....	I
Dédicace.....	II
Résumé.....	III
Liste des figures.....	IV
Liste des tableaux.....	VII
Liste des abréviations.....	VIII
Liste des symboles.....	IX
Sommaire.....	XII
Introduction générale.....	1

### **Chapitre I** : Généralités sur les pipelines

Introduction.....	3
I.1. Définition des pipelines.....	3
I.2. Les gazoducs.....	4
I.3. Les oléoducs.....	5
I.4. Histoire et technologie des pipelines.....	5
I.5. Les aciers pour tubes .....	6
I.5.1. De la chimie, avec le dosage des éléments d'alliage.....	6
I.5.2. Les éléments d'alliage dosés.....	6
I.5.3. Spécification et normes (Norme API).....	8
I.5.4. Propriétés et caractéristiques mécaniques des aciers.....	9
I.6. Présentation de l'acier API 5L X65.....	10
I.6.1. Composition chimique.....	10
I.6.2. Microstructure.....	11
I.7. Procédés des fabrications des tubes.....	11
I.7.1. Les tubes soudés sous forme spirale.....	11
I.7.2. Les pipelines soudés sous forme longitudinale.....	12
I.7.2.1. Croquage et formage.....	12
I.7.2.2. Soudage.....	14
I.7.2.3. Expansion et calibrage.....	14
I.7.3. Les tubes sans soudure.....	14

## Sommaire

---

I.8. Revêtement des tubes .....	15
I.8.1. Revêtement extérieur.....	15
I.8.1.1. Revêtement Fusion Bonded Epoxy.....	15
I.8.1.2. Revêtement extérieur polyoléfine 3 couches.....	15
I.8.1.3. Revêtement par l'émail de goudron (Coal tar enamel coatings).....	16
I.8.1.4. Revêtement par bande (Tape coatings) .....	16
I.8.1.5. Revêtement par un plastic rétractable a la chaleur (Heat-Shrinkable plastic coatings).....	17
I.8.2. Revêtement intérieur.....	17
I.8.2.1. Revêtement pour l'amélioration du débit.....	17
I.9. Soudage.....	17
I.9.1. Définition du soudage.....	17
I.9.2. Préparation des joints de soudures.....	17
I.9.3. La soudabilité.....	18
Conclusion.....	18

## **Chapitre II** : Comportement en rupture dans les pipelines

Introduction.....	20
II.1. La mécanique de la rupture.....	20
II.2. Modes de rupture.....	21
II.3. Rupture fragile et ductile.....	22
II.3.1. Rupture fragile.....	22
II.3.1.1. Rupture fragile trans granulaire (à clivage).....	23
II.3.1.2. Rupture fragile inter granulaire.....	23
II.3.2. Rupture ductile.....	25
II.4. Les critères les plus utilisés dans la mécanique de la rupture.....	26
II.4.1. Critère de taux de restitution d'énergie.....	26
II.4.2. Critère d'Irwin.....	26
II.5. Contraintes mécanique.....	28
II.5.1. Contraintes mécaniques et déformations.....	28
II.5.2. Contraintes résiduelles.....	29
II.5.3. État de contrainte.....	29
II.6. Étude d'un milieu fissuré.....	30
II.7. Endommagement des pipelines.....	30
II.7.1. La corrosion.....	31
II.7.1.1. Définition de la corrosion.....	31
II.7.1.2. Types de corrosion.....	32
II.7.1.2.1. Corrosion uniforme.....	32
II.7.1.2.2. Corrosion par piqûres.....	32

## Sommaire

---

II.7.1.2.3. Corrosion fissurante.....	32
II.7.1.2.4. Corrosion sélective.....	33
II.7.2. Les fissures.....	33
II.7.2.1. Définition d'une fissure.....	33
II.7.2.2. Les différents types de fissure.....	34
II.7.2.2.1. Fissuration longitudinale dans un tube.....	34
II.7.2.2.2. Fissuration circonférentielle dans un tube.....	34
II.7.3. Éraflure.....	35
II.7.4. Enfoncement.....	35
II.7.5. Endommagement combiné (éraflure + enfoncement).....	36
II.8. Paramètres pour étudier le comportement en rupture.....	36
II.8.1. Le facteur d'intensité de contrainte K.....	36
II.8.2. Le taux de restitution d'énergie G.....	38
II.8.3. L'intégrale J.....	39
<b>Chapitre III : Analyses et résultats</b>	
Introduction.....	40
III.1. Présentation de code de calcul Abaqus/ CAE™.....	40
III.2. Modèle géométrique et conditions aux limites.....	41
III.3. Résultats et interprétations.....	45
III.3.1. Effet de chargement complexe sur le front (1) de la fissure.....	45
a) Chargement mixte pression –moment(1).....	45
b) Chargement mixte pression –moment(2).....	49
c) Chargement mixte pression –traction.....	50
d) Présentation comparative.....	52
III.3.2. Effet de chargement complexe sur le front (2) de la fissure.....	53
a) Chargement mixte pression –moment.....	54
b) Chargement mixte pression – moment.....	54
c) Chargement mixte pression –traction.....	55
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>57</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>59</b>

## Introduction générale

---

Le pétrole et le gaz sont la base de l'économie mondiale, leurs utilisations est augmenté dans nos jours parce qu'ils jouent un rôle important dans la vie humaine.

Dans l'industrie pétrolière, le transport du gaz et pétrole sur des grandes distances se réalise par un réseau de tuyaux qui s'appelle pipelines. Ces pipelines sont fabriqués par des aciers API 5L pour tube, soudé bout à bout. Aujourd'hui, la technologie des pipelines à été révolutionné à cause de la grande demande des hydrocarbures ce qui nécessite d'utiliser des tubes de grands diamètres avec une pression interne élevée qui constitue une source de contrainte qui s'exerce sur les parois des conduites ce qui sert à prendre en considération tous les effets effectives sur les tubes en service qui dûent à leurs défaillance.

Donc, puisque ces pipelines sont dans la nature, ils sont exposés à plusieurs agressions telles que des agressions mécaniques extérieures par des travaux d'engins et des endommagements (corrosion, fissuration, éraflure, enfoncement....)

La présence d'une fissure dans un tube est un risque permanant qui peut provoquer des éclatements et des dégâts très graves dans les canalisations parce qu'elle provoque un affaiblissement de la résistance mécanique de tube et lui met très sensible lorsqu'il est en service.

L'évaluation de la nocivité de la fissure est très importante et la mécanique de la rupture est la science qui permet de caractériser le comportement à la fissuration des structures mécaniques.

Cette rupture peut simuler en 3D par le code de calcul des éléments finis Abaqus/CAE<sup>TM</sup> qui permette de résoudre des problèmes mécaniques et déterminer le facteur d'intensité des contraintes.

L'objectif de ce mémoire intitulé « Comportement en rupture d'une fissure circonférentielle dans un pipeline soumis au chargement mixte (pression, moment et traction)» est d'étudier le comportement en rupture d'une fissure circonférentielle et dans son voisinage par détermination d'un paramètre K appelé facteur d'intensité des contraintes dans un pipeline en service par une pression interne variable et un moment et un effet de traction.



## Introduction générale

---

Ce manuscrit est composé de trois chapitres :

Le premier chapitre “ Généralités sur les pipelines ” contient une étude bibliographique sur les pipelines.

Le second chapitre à pour “ Le comportement en rupture dans les pipelines ”, dans ce chapitre on va parler sur la mécanique de la rupture qui sert à caractériser le comportement en rupture en fissuration des pipelines et on a rappelé les paramètres de la mécanique de la rupture ainsi quelques critères utilisés.

Le troisième chapitre est réservé aux analyses et résultats à la base de code de calcul Abaqus/CAE™.

# **Chapitre I :**

## **Généralités sur les pipelines**

**Introduction :**

Les pipelines sont des moyens de transport des hydrocarbures, soit sous sol ou sous marin sur des longues distances. Ils sont fabriqués généralement par les aciers, construits par des tubes soudés bout à bout qui forment un réseau.

La nuance d'acier et le procédé de fabrication jouent un rôle important sur la structure du pipe et même la technique de soudure et dans ce chapitre on va détailler tous ces points.

**I.1. Définition des pipelines : [1]**

Un pipeline (originaire de l'anglais) est une canalisation formée par un ensemble de tubes en acier soudés bout à bout, destiné à l'acheminement d'un endroit à un autre de matières gazeuses ou liquides; Ces tubes sont souvent revêtus extérieurement et voir même intérieurement et presque toujours enterrés sauf dans certaines régions.

Un pipeline permet l'échange de produits entre raffineries, dépôts pétroliers et installations portuaires. Sa longueur peut varier de quelques kilomètres, voir des milliers de kilomètres. Très souvent les pipelines sont interconnectés entre eux pour former un réseau parfois très dense, formant une sorte de « toile d'araignée ».

Ces réseaux mettent en communication différents points d'entrée des produits avec différents points de sortie permettent de diversifier les sources d'approvisionnements aux meilleures conditions économiques possibles et avec un maximum de sécurité de livraison en temps voulu.

Selon le produit transporté, les pipelines sont nommés différemment. Leurs techniques de construction et d'exploitation différente en fonction de certaines réglementations.

Les principaux systèmes de transport par pipeline concernant :

- Les gazoducs pour le transport du gaz naturel.
- Les oléoducs pour les transports du pétrole et des hydrocarbures liquides.
- Les aqueducs, conduites ou émissaires utilisés pour l'eau douce et l'irrigation.



**Figure I.1 :** Pipeline pour le transport de pétrole [3]

## **I.2. Les gazoducs : [2]**

La majorité des gazoducs acheminent du gaz naturel entre les zones d'extractions et les zones de consommation ou l'exportation. On estime la longueur totale des gazoducs dans le monde à un million de kilomètres, soit plus de 25 fois la circonférence terrestre. Les gazoducs sont en majorité terrestre, soit enfouis à environ un mètre de profondeur dans les zones habitées, soit posés à même le sol en zone désertique, ou en zone à sol dur. Leur diamètre varie entre 50mm (2 pouces) et 1400mm (56 pouces) pour les plus importants. Toutefois, le tarissement des sources de proximité et l'éloignement croissant des zones d'exploitation ont conduit à l'établissement de gazoducs sous marins. Selon leur nature d'usage, les gazoducs peuvent être classés en trois familles principales :

- Gazoducs de collecte : Ramenant le gaz sorti des gisements ou des stockages souterrains vers les sites de traitement.
- Gazoducs de transport ou de transit : Acheminant sous haute pression le gaz traité (déshydraté, désulfuré...) aux portes des zones urbaines ou des sites industrielles de consommation.
- Gazoducs de distribution : Répartissant le gaz à basse pression au plus près des consommateurs domestiques ou des petites industries.

**I.3. Les oléoducs : [3]**

L'oléoduc (du latin *olium*, huile, et *ducere*, conduire) est une canalisation de grandes dimensions destinée au transport du pétrole brut ou raffiné. Elle peut amener le pétrole du forage à la raffinerie, depuis une zone de forage jusqu'à des régions éloignées.

**I.4. Histoire et technologie des pipelines : [1]**

C'est aux États – Unis en 1865 que fut utilisée, pour la première fois, une conduite pour évacuer la production d'un gisement. Depuis, l'emploi de ce mode de transport des hydrocarbures liquides ou gazeux s'est généralisé, d'abord aux États- Unis puis dans le reste monde. En 1964-65, étaient inaugurés les premiers transports réguliers de gaz naturel liquéfié entre l'usine de liquéfaction d'Arzew (Algérie) et les terminaux méthaniers de Canvey Island (Royaume- Uni) et du Havre(France).

En 1933, les principaux pays exportateurs étaient l'ex-URSS (29% du commerce international), le Canada (18%), les Pays-Bas (13%), l'Algérie (10%), l'Indonésie (9%) et la Norvège (7%). Les principaux pays importateurs étaient l'Allemagne (19%), Les États- Unis (18%), le Japon (15%), l'Italie (10%), la France (9%), la Tchécoslovaquie (4%) et la Belgique (4%).

A partir des sites de traitement des gisements ou des stockages, le gaz est transporté à haute pression, (de 16 jusqu'à plus de 100 bars), dans des réseaux de grand transport dont les gazoducs constituent les principaux maillons.

En Afrique, l'Algérie possède un important réseau de gazoducs destiné principalement à évacuer le gaz du gisement de Hassi R'Mel vers les usines de liquéfaction situées sur les côtes méditerranéennes ainsi que vers l'Italie via la Tunisie (Système TransMed).

Des progrès technologiques énormes ont été réalisés dans tous ces domaines, surtout depuis 1950. Les coûts de transport ont été réduits partout mais certaines méthodes restent toujours beaucoup plus chères que d'autres.

La technologie des tuyauteries a été révolutionnée, surtout par les progrès de la soudure. Ils sont acheminés sur place et mis dans des tranchées ou sur des supports par des grues spéciales. Des systèmes permettent d'emboîter les tuyaux avec précision. Les tubes soudés peuvent suivre le relief du terrain sans qu'il y ait de fuites malgré que les pressions internes peuvent dépasser 10 bars.

Les points de pressions causés par des coups de bélier ou autres peuvent être importants. La structure, les parois et les soudures doivent résister à des pressions très élevées, de l'ordre de 100 bars. Des stations de pompage sont installées tous les 40 km.

Elles comprennent des pompes centrifuges de grande puissance, des valves commandées à distance et des réservoirs préfabriqués isolées pour vérification, nettoyage ou réparation. Des chariots robots circulent dans les pipelines pour les inspecter ou les nettoyer.

## **I.5. Les aciers pour tubes :**

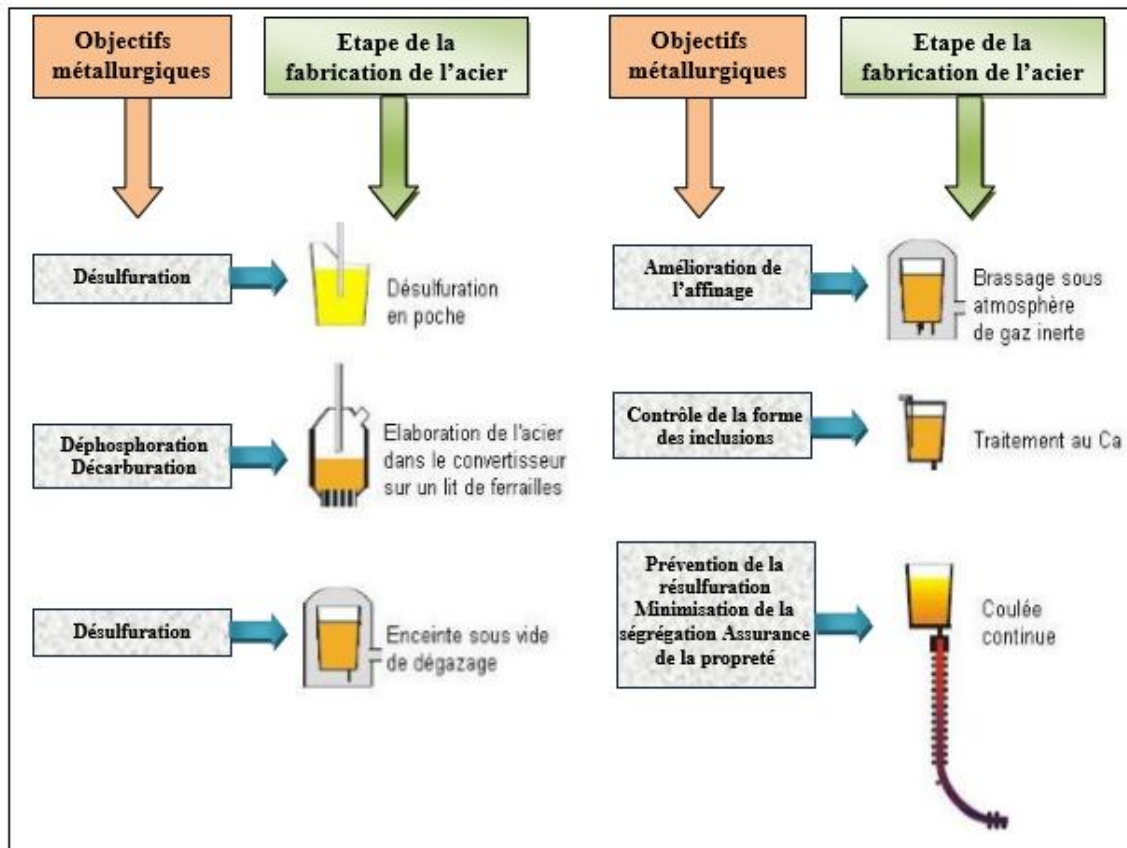
### **I.5.1. De la chimie, avec le dosage des éléments d'alliage : [4]**

On appelle un acier un alliage de fer et de carbone dont la teneur en carbone est inférieure à 2% massique. Cette teneur limite vient de la limite de solubilité du carbone, à haute température, dans la phase cubique à faces centrés (CFC) du fer, appelée austénite. Le dosage en carbone a l'effet le plus prononcé sur les caractéristiques du métal. Des éléments d'alliages sont généralement ajoutés à un alliage Fe-C afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques et les propriétés des aciers. Si l'on ajoute plus de 0.5% d'éléments d'alliage à l'acier, on parle d'acier allié. Si la proportion d'éléments d'alliage est inférieure à ce chiffre, on parle d'acier non allié, ou sa densité varie donc autour de celle du fer (7.32 à 7.86), ils ont un module de Young d'environ 210000 Mpa, indépendamment de leur composition. Les autres propriétés varient énormément en fonction de leur composition, du traitement thermomécanique et des traitements de surface aux quels ils ont été soumis.

### **I.5.2. Les éléments d'alliages dosés :**

La fabrication d'un acier pour tube passe par un dosage des éléments chimiques pour obtenir des propriétés mécaniques qui dépend de ces éléments.

La figure suivante présente les six étapes nécessaires à l'obtention d'un acier propre par coulée continue. [1]



**Figure I.2 :** Étapes de fabrication des aciers propre, en parallèle avec les objectifs métallurgiques. [1]

Les éléments d'alliage utilisés se répartissent selon 5 familles : [4]

1. Les éléments gamma gènes : (Ni, Mn, Cu), élargissent le domaine de stabilité de l'austénite, abaissent les températures de transition (gamma, alpha...)
2. Les éléments alpha gènes : limitent ou empêchent la formation de l'austénite et élèvent les températures de transformation (Si, Cr, Mo, Ti).
3. Les graphitisants : Si, Ni, Cu...(ne forment pas des carbures, ils se retrouvent en solution dans la ferrite).
4. Les carburigènes : Cr, Mn, Mo, W, V, Ti, Nb... ce sont des éléments qui forment dans les alliages Fe-C des carbures particulièrement stable, étant donné que le fer lui-même forme avec le carbone un carbure( cémentite) on obtient selon la nature de l'élément d'alliage et selon la quantité ajouté.
5. Les désoxydants : Mn, Si, Al, Ti, Nb pour fixer l'oxygène dissous dans le métal liquide.

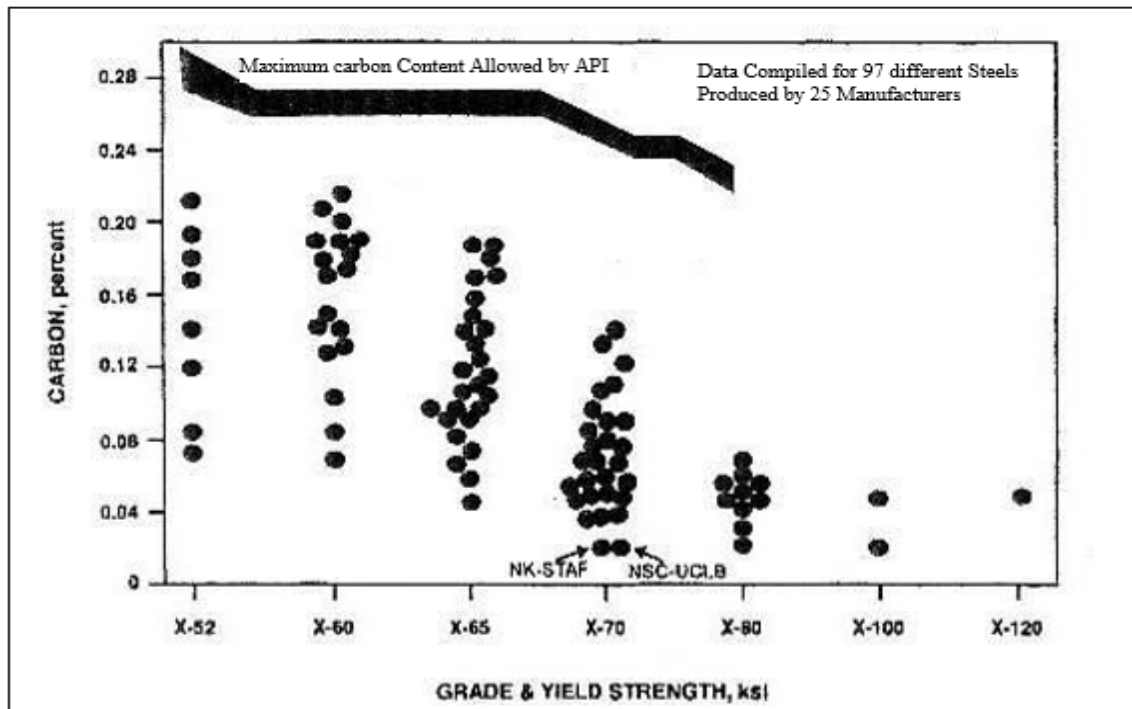
**I.5.3. Spécification et propriétés (Norme API) :**

L'une des exigences du cahier des charges que doit remplir l'acier pour pipeline est la réconciliation des propriétés d'emploi, une limite d'élasticité maximale, une bonne ténacité, ainsi qu'une bonne soudabilité, une bonne résistance à la corrosion et un faible coût de revient. Pour répondre à ces exigences, la classe des aciers dits(HSLA) (Haigh Strength Low Alloy Steels) a été développée au fil des quarante dernières années. 95% des aciers utilisés pour pipeline sont des aciers micro alliés à haute résistance (HSLA).

Des aciers à hautes résistances, X42 à X65 qui pour des prix à la tonne très peu différents, permettent d'effectuer de très importantes économies de métal.

Les spécifications américaines API STD et 5LX fixent pour chaque diamètre l'épaisseur standard et leurs tolérances de fabrication.

Pour les tubes de diamètres inférieurs ou égaux à 18", soudés ou étirés, les tolérances sont de +15% à 12.5%. Pour les tubes de diamètres supérieurs à 18", en ce qui concerne les tubes étirés sans soudure, les tolérances vont de 17.5% à 10% et pour les tubes soudés longitudinalement de 19.5% à 8%. [5]



**Figure I.3 :** Relation entre la teneur en carbone et le grade de l'acier. [1]



Les normes de l'API définissent un taux maximal de carbone, mais la teneur exacte peut varier de 0.2 points en fonction des éléments d'alliage utilisés. Le grade de l'acier est obtenu principalement grâce aux micro-alliages utilisés et au procédé de mise en forme. [1]

#### I.5.4. Propriétés et caractéristiques mécanique des aciers : [9]

L'acier est un alliage essentiellement composé de fer, sa densité varie donc autour de celle du fer (7.32 à 7.86), suivant sa composition chimique et ses traitements thermiques. La densité d'un acier inox austénitique est typiquement un peu supérieure à 8; en raison de la structure cristalline. Ils ont un module de Young d'environ 210000 Mpa, indépendamment de leur composition. Les autres propriétés varient énormément en fonction de leur composition, du traitement thermo-mécanique et des traitements de surface aux quels ils ont été soumis. Le traitement thermo-mécanique est l'association :

- d'un traitement thermique, sous la forme d'un cycle chauffage-refroidissement (trempe – revenu...)
- d'un traitement mécanique, une déformation provoquant de l'écroutissage (laminage, forgeage, tréfilage...)

Les aciers de transport des hydrocarbures sont des aciers faiblement alliés qui doivent présenter des propriétés à l'amorçage de rupture d'une part vis-à-vis de la propagation de l'arrêt des fissures lors de rupture fragile par clivage. D'autre part, ils présentent également une limite d'élasticité élevée due à la recherche d'une rentabilité accrue et une bonne soudabilité. Par conséquent concilier une haute limite d'élasticité et une bonne ténacité est exigé pour la fiabilité des aciers.

Les essais mécaniques sur les aciers sont réalisés dans les deux sens : longitudinale et transversale.

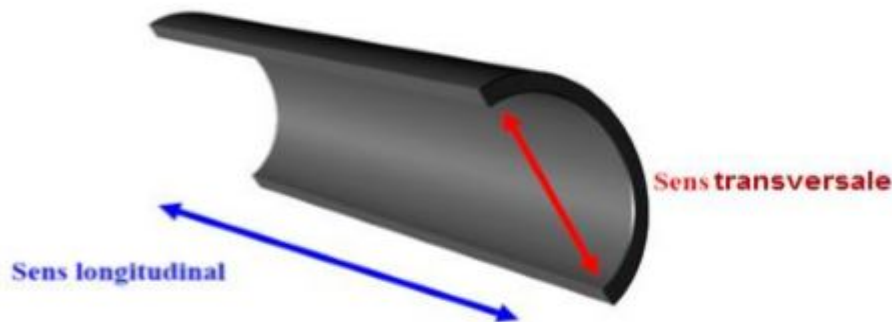


Figure I.4 : Sens longitudinale et transversale de tube. [9]

Le tableau suivant signifie les caractéristiques mécaniques de l'acier API 5L, tubes de conduites PSL1 et PSL2 qui utilisé beaucoup dans l'industrie des pipelines, on remarque les valeurs de la résistance rupture et la limite élastique d'acier, cela est dû à les résultats des essais expérimental. Les caractéristiques mécaniques obtenues sont les suivantes :

API 5L-PSL1	Résistance à la rupture [N/mm <sup>2</sup> ]	Limite élastique [N/mm <sup>2</sup> ]
X42	414	290
X52	455	359
X60	517	414
X65	531	448
X70	565	483

**Tableau I.1 :** Caractéristiques mécaniques par (N/mm<sup>2</sup>) (Tubes de conduite PSL1) [5]

## I.6. Présentation de l'acier API 5L X65 :

### I.6.1. Composition chimique : [6]

L'acier X65 contient une faible teneur en carbone (0.09%). Il est micro-allié au niobium et au vanadium. Il est propre et ne présente qu'une faible teneur en soufre et phosphore. La présence de manganèse en quantité relativement importante compense la faible teneur en carbone et permet de préserver une bonne soudabilité.

La composition chimique est détaillée au tableau :

Élément	% en masse	Spécification
C	0.09	<0.18
S	0.008	0.030
P	0.03	0.035
Si	0.29	0.5
Cr	0.01	-
Ni	0.040	-
Cu	0.020	-
Mo	<0.01	-
Mn	1.59	0.7<%Mn<1.6
Nb	0.025	0.01<Nb<0.05
V	0.05	<0.06
Al	0.030	-

**Tableau I.2 :** Composition chimique de l'acier X65. [6]

### I.6.2. Microstructure : [6]

En raison du laminage, l'acier X65 présente une structure fine et très orientée en bandes alternées de ferrite et perlite. La taille de grain est en moyenne égale à  $11\mu\text{M}$ . La proportion de perlite est relativement élevée malgré la faible teneur en carbone. Ceci est dû essentiellement à l'addition d'éléments gammagènes tels que le manganèse. Le taux de carbone équivalent est de 0.37%.

La microstructure de la zone affectée thermiquement (ZAT) semble être à structure moins fine et à grains moins allongés.

Par ailleurs, des essais de microdureté ont été effectués dans le cordon de soudure afin de vérifier l'homogénéité de l'ensemble de la soudure et de caractériser les différentes structures rencontrées.

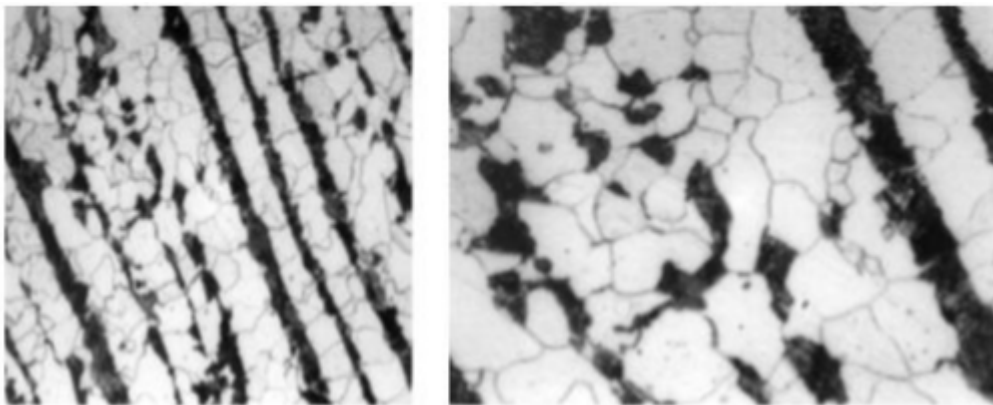


Figure I.5 : Microstructure de l'acier API 5L X65. [9]

### I.7. Procédés de fabrication des tubes : [7]

Des installations modernes sont utilisées pour la fabrication de tubes de grande qualité, notamment pour le secteur de haute pression, on trouve 3 types de conception des pipes :

- Les pipelines soudés sous forme spirale.
- Les pipelines soudés sous forme longitudinale.
- Les pipelines sans soudure.

#### I.7.1. Les tubes soudés sous forme spirale :

Les procédures de fabrication des tubes soudés en spirale sont faites par cintrage de bande de feuille d'acier de la forme d'un tuyau et la soudure ensemble. Cette technique de production passe par les étapes comme l'indique la figure (I.6). Le soudage se produit ici sur la production de tubes en spirale qui sont généralement fournis.

Le formage du tube en spirale se fait avec inclinaison de l'angle d'introduction de la bande qui se calcule par la relation suivante :

$$\beta = \arcsin \left[ \frac{B}{D_{\text{ext}} \cdot \pi} \right]$$

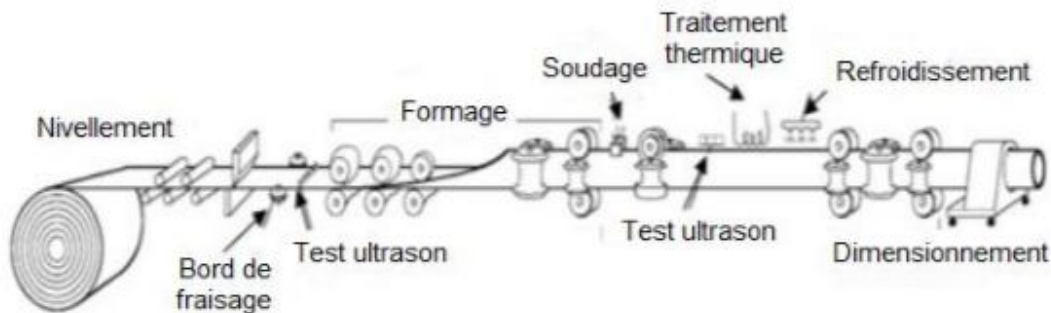
Avec:

B: la largeur de bande

D : le diamètre extérieur de tube formé.

$\beta$  : L'angle d'introduction de la bande par-rapport à l'axe symétrique ( $\Delta$ ).

Pratiquement, c'est très difficile de fabriquer les tubes avec un petit angle aigu, c'est pour cela, que les valeurs de l'angle se limitent en  $15^\circ$  et  $50^\circ$ .



**Figure I.6 :** Technique de fabrication des tubes soudés en spirale. [9]

### I.7.2. Les pipelines soudés sous forme longitudinale :

La technique de fabrication de tubes soudés sous forme longitudinale est généralement formée à froid de la plaque à travers le processus "UOE". Elle est spécifique aux tubes avec des diamètres plus que 406.4 mm (16"). Cette technique passe par trois étapes de formage :

#### I.7.2.1. Croquage et formage :

Cette étape où la plaque va être pliée au niveau de l'extrémité, l'objectif de cette opération est de faciliter le processus de pliage par les étapes suivantes, à partir de cela la tôle ou la plaque unitaire est pliée en deux types de presse : La première confère la plaque sous forme "U" et la seconde lui donne une forme "O", voir les figures(I.7) et (I.8).

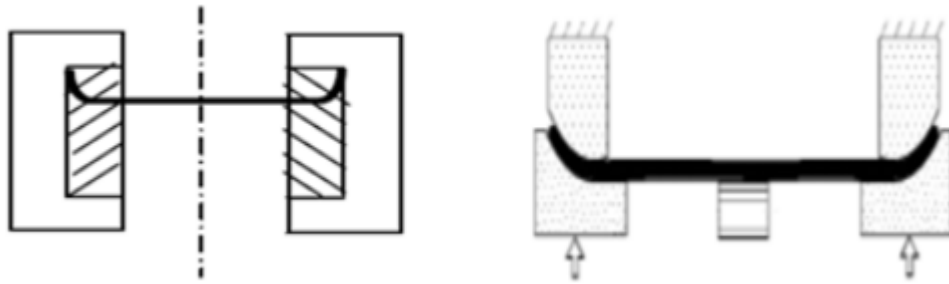


Figure I.7 : Croquage d'un pipeline. [9]

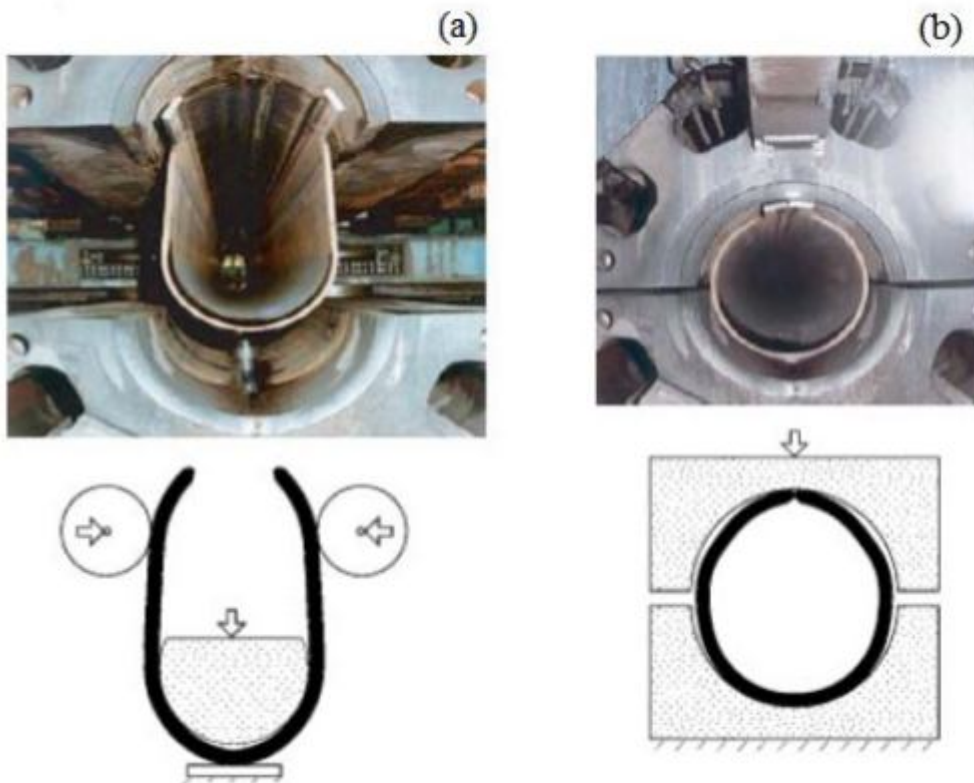


Figure I.8 : Formage sous formes "U" et "O". [7]

**I.7.2.2. Soudage :**

Le soudage dépend ici de la technique de soudage à l'arc sous flux à l'aide de tête soudeuse automatique, les soudures intérieures grandissent longitudinalement sur une trajectoire d'une ligne droite, généralement le cordon intérieur est réalisé le premier.



Figure I.9 : Soudage manuel et automatique des tubes. [9]

**I.7.2.3. Expansion et calibrage :**

L'objectif de cette opération est d'atteindre des tubes de section parfaitement circulaire, l'augmentation des diamètres ici est de plus jusqu'à 1.5 au maximum.

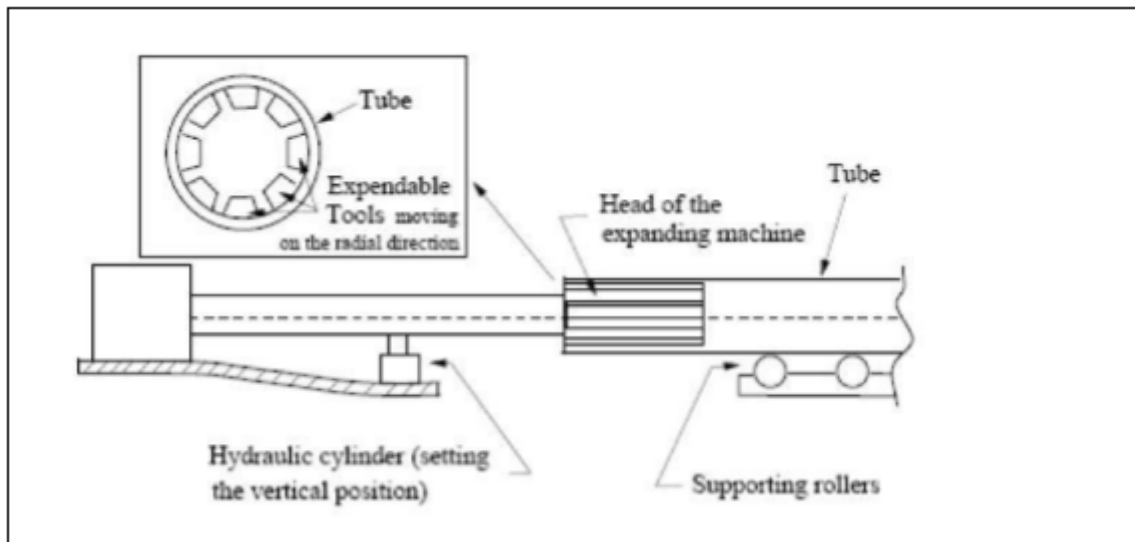


Figure I.10 : Expansion et calibrage. [1]

**I.7.3. Les tubes sans soudure :**

Les tubes formés sans soudure, sont généralement de petits diamètres et de longueur de moins de 9000 mm Les méthodes principales de fabrication de ce type de tube

comportent le métal contenu entre la filière et l'aiguille. On obtient un tube monobloc sans soudure. Il existe une variante dite filage sur nez d'aiguille où l'aiguille est fixe.

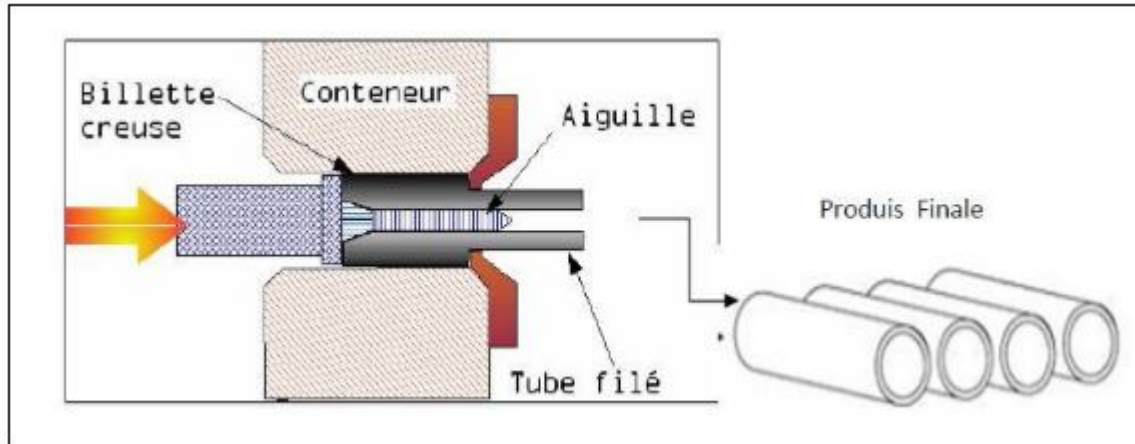


Figure I.11 : Obtention des tubes sans soudure. [1]

## I.8. Revêtement des tubes :

On utilise la technique de revêtement pour isoler les pipelines extérieurement et intérieurement et les protéger contre la corrosion et les endommagements.

### I.8.1. Revêtement extérieur :

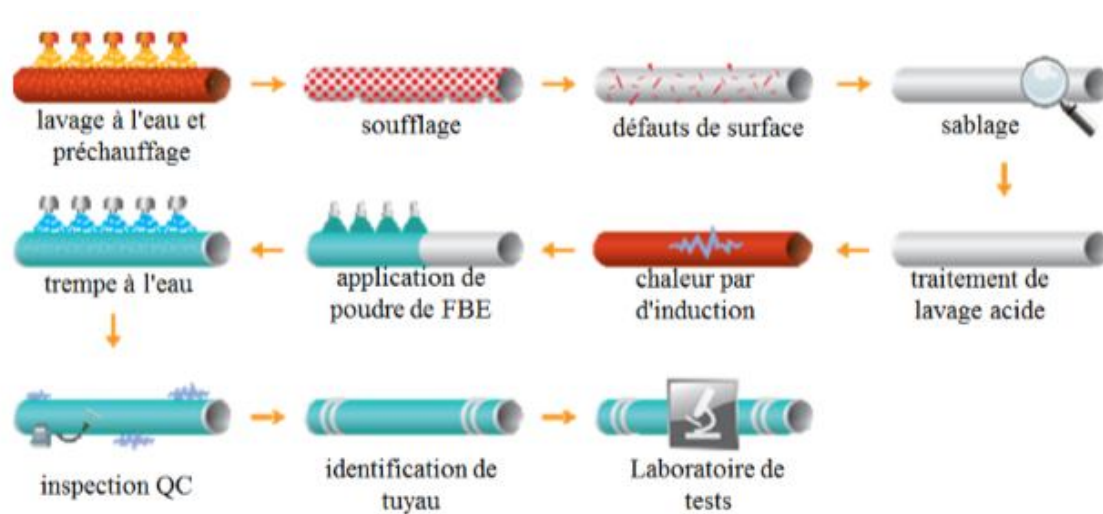
#### I.8.1.1. Revêtement Fusion Bonded Epoxy : [2]

Les revêtements FBE constituent des couches de résine durcissant thermoplastiques, qui ont apposées par un procédé thermostatique sur les tubes d'acier et les protègent de la corrosion.

Le FBE peut être utilisé à des températures d'exploitation allant jusqu'à 110 degré C. L'épaisseur typique est comprise entre 350 et 450 micromètres. Une deuxième couche entraîne une excellente résistance aux détériorations du pipeline, même dans les conditions environnementales les plus difficiles.

#### I.8.1.2. Revêtement extérieur polyoléfine 3 couches : [2]

Le revêtement polyoléfine 3 couches est une combinaison de résine thermoplastique durcissant, de couche d'adhérence copolymère et de thermoplastique apposé sur les tubes d'acier afin de garantir leur protection contre la corrosion et les détériorations mécaniques.



**Figure I.12 :** Procédure de revêtement extérieur d'un pipeline. [4]

### I.8.1.3. Revêtement par l'émail de goudron (Coal tar enamel coatings) : [8]

L'émail de goudron de houille et les couches de bitume étaient souvent utilisés sur beaucoup de pipelines plus vieux dans le monde entier. L'application est faite en emballant un tissu de fibre de verre autour de la pipe circonférence et le fait de saturer la couche avec un mélange fait fondre du bitume ou du goudron de houille. Les inconvénients de cette couche sont comme suit :

- C'est sensible aux changements de températures hauts ou bas.
- C'est susceptible au forçement en raison du soulignage de sol.
- La séparation de la couche se produit par le dommage d'impact ou de la pauvre préparation de surface sur la pipe.

### I.8.1.4. Revêtement par bande (Tape coatings) : [8]

Les couches de bande sont souvent utilisées pour réparer des sections de pipe qui ont été à fait des fouilles pour réparer des régions de couches endommagée existante. Les types les plus communs sont des bandes appliquées chaudes ou un tissu enduit avec le bitume est appliqué autour de la circonférence et chauffé. Sinon, le froid s'est appliqué les bandes incluent les faits du polyéthylène, qui ont une couche auto-adhésive. Pendant que la méthode de couche de bande est relativement bon marché, un inconvénient est cette bande les couches n'est pas tolérante au haut opérationnel les températures et peuvent être susceptibles au soulignage de sol.



**I.8.1.5. Revêtement par un plastic Rétractable à la chaleur (Heat-Shrinkable plastic coatings) : [8]**

Ce sont des manches essentiellement de plastique ou des draps qui sont sensibles chauffer. Quand ils sont placés autour de la circonférence de pipe et la chaleur est appliquée d'une lampe à souder, cela provoque le plastique se contracter et rétrécir sur la surface de pipe. La méthode est généralement utilisée pour les pipes d'un plus petit diamètre, particulièrement autour des assemblages d'assemblages / champ de pipe.

**I.8.2. Revêtement intérieur : [2]****I.8.2.1. Revêtement pour l'amélioration du débit :**

Une résine époxy liquide est pulvérisée sur la paroi interne des tubes dans une épaisseur typique de 60 à 100 micromètre. Il en résulte une amélioration de la capacité de transport du gaz, une minimisation des résistances de friction et donc une réduction des stations de compresseurs. La simplification du nettoyage et la protection temporaire contre la corrosion font du revêtement Flow Coating une solution unique et économique pour le transport du gaz.

**I.9. Soudage :****I.9.1. Définition du soudage : [5]**

Le soudage est une opération de micro-métallurgie consistant à exécuter un cordon fondu liant les bords de deux pièces ; il est dit homogène quand ces deux pièces, ainsi que le métal d'apport du joint, est une composition chimique identique ou voisine et hétérogène dans les autres cas. Il consiste un moyen privilégié d'assemblage pour toute construction faisant intervenir des matériaux métalliques. Il s'applique aussi dans une moindre mesure et de puis plus récemment aux matériaux thermoplastiques. Le soudage nécessite un apport de chaleur mobile. Les types de sources d'énergie utilisés sont généralement : chimique (flamme), lumineuse (laser), électrique (arc) ou mécanique.

**I.9.2. Préparation des joints de soudure : [5]**

Il existe plusieurs types de joints, les plus répandus dans la pratique sont les suivantes :

- Préparation bout à bout à bords droits.
- Préparation en V.
- Préparation en X.
- Préparation en U.
- Joint en T.
- Joint en T avec préparation en tulipe simple.
- Assemblage par recouvrement.

Le choix du type de soudure dépend du procédé de soudage utilisé, de la nature et de l'épaisseur du matériau. L'objectif est d'obtenir la meilleure résistance mécanique et meilleure qualité de soudure en limitant les coûts.

**I.9.3. La soudabilité : [8]**

La soudabilité décrit la facilité avec laquelle un métal peut être soudé à un niveau satisfaisant. Soudabilité pauvre implique que le processus qui peuvent être utilisés sont limités et que d'importantes compétences de soudure est nécessaire. Bonne soudabilité signifie qu'un grand nombre de processus peuvent être utilisés et que seul un niveau modéré de contrôle et de compétence est requise. Les aciers au carbone ont généralement une bonne aptitude au soudage et de l'acier inoxydable ont juste la soudabilité. Les propriétés de soudabilité de l'acier sont très importantes. Elles seront meilleures si la teneur de carbone est faible, le rôle des autres éléments d'alliages n'est cependant pas négligeable. Comme le stipule la relation suivante :

$$C_{\text{éq}} = C + \frac{Mn+Si}{6} + \frac{Ni+Cu}{15} + \frac{Mo+Cr+V}{5}$$

Ceci explique l'évolution des aciers pour tubes, constatée au cours des 40 dernières années. Aujourd'hui, la plus part des aciers utilisés pour fabriquer des tubes ont une teneur en carbone de l'ordre de 0.05%.

Une autre formule d'essence japonaise s'appliquerait à un large éventail de nuance d'acier à haut limite d'élasticité à plus bas carbone (cas des aciers pour tubes) :

$$P_{\text{cm}} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn+Cu+Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

La valeur Pcm est généralement définie comme un maximum de 0.18 à 0.2. La formule de Pcm est de plus en plus utilisée pour le bas moderne-alliage acier pipeline où la teneur en carbone est inférieure à 0.1%, tandis que la formule international est utilisée pour les aciers.

**Conclusion :**

Ce chapitre est une étude bibliographique sur les pipelines, on a présenté une définition claire sur les pipelines, puis on parlé sur les étapes suivies pour obtenir un acier pour tube de la chimie aux propriétés et caractéristiques mécaniques des aciers jusqu'à les types de conception des pipes.

Après, on a parlé sur la protection des pipelines contre les endommagements et on a cité les différents techniques de revêtement, ensuite on a défini la technique de soudage et l'importance de la bonne soudabilité.

D'après ça, on a constaté que les pipelines sont le moyen de transport des hydrocarbures le plus utilisé et le plus fiable dans le monde et l'obtention d'un acier API

passé par plusieurs étapes et d'après les techniques de fabrication des pipelines on a trouvé des tubes soudés et tubes sans soudure, ces tubes sont revêtus intérieurement et extérieurement pour les protéger et diminuer la nocivité et tout ça, ce fait à base des normes.

**Chapitre II :**  
**Comportement en rupture dans**  
**les pipelines**

**Introduction :**

Les pipelines sont exposées aux plusieurs effets et endommagements quel que soit l'endroit qu'elles traversent, ces effets sont multiples et varient selon la nature et les conditions de service comme la pression interne et les chargements variables.

Dans ce cas, il faut caractériser le comportement en rupture dans les pipelines, ce comportement se produit soit par des fissurations ou par d'autres endommagements et la mécanique de la rupture à pour le but d'étudier ces phénomènes.

**II.1. La mécanique de la rupture : [10]**

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

En 1956, un groupe de chercheurs de la marine américaine, ont été développé le concept du taux de restitution d'énergie à partir de la théorie de Griffith sous une forme facilement exploitable par les concepteurs de structures. En 1957, s'appuyant sur les travaux de Westergaard, Irwin montra que les déplacements et les contraintes au voisinage de l'extrémité d'une fissure peuvent être décrits à l'aide d'un paramètre unique relié au taux de restitution d'énergie. Ce paramètre caractérise l'état de sollicitation dans la région dans laquelle la rupture se produit, il est appelé facteur d'intensité de contrainte (FIC).

La période s'étaler de 1960 à 1980 a vu une intensification des recherches sur la rupture avec deux écoles concurrentes. D'une part, les tenants de l'approche utilisant la mécanique linéaire de la rupture et d'autres part ceux qui s'intéressaient essentiellement à la plastification qui se développe à l'extrémité d'une fissure. Pour tenir compte de l'effet de cette plastification sur les champs de contraintes et de déplacements à l'extrémité d'une fissure, plusieurs auteurs comme Barenblatt proposèrent ce qu'on appelle une

correction de la zone plastique. La taille de la fissure est alors augmentée de cette zone plastique pour retrouver les champs de contrainte élastiques décrits par le FIC.

Plus tard, Hutchinson en 1968, Rice et Rosengren (HHR) développèrent un nouveau paramètre appelé intégrale J. Ce paramètre décrit parfaitement la répartition des contraintes dans les zones plastifiées (champ HHR).

## II.2. Modes de ruptures : [7]

Une fissure est définie comme la surface séparant localement un solide en deux parties. Le champ des déplacements est alors discontinu à travers cette surface et les trois composantes vectorielles de cette discontinuité forment les trois modes de rupture (figure II.1) : Le mode I pour une ouverture, le mode II pour un glissement plan et le mode III pour un glissement anti-plan. Le cas réel est une superposition de ces trois (3) modes, on parle alors de mode mixte.

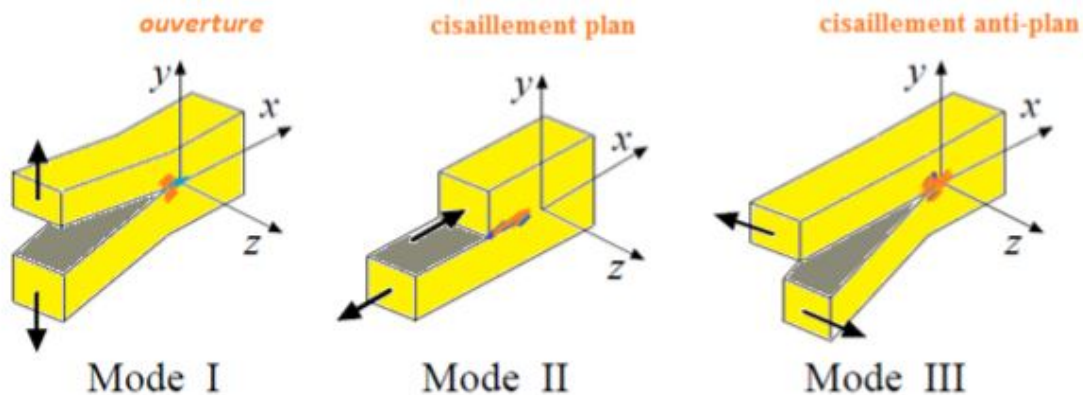


Figure II.1 : Différents modes de rupture. [7]

- **Mode I (mode par ouverture)** : Les lèvres de la fissure se déplacent dans des directions opposées et perpendiculairement au plan de la fissure.
- **Mode II (cisaillement plan)** : Les lèvres de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction perpendiculaire au front de fissure.
- **Mode III (cisaillement anti-plan)** : Les lèvres de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction parallèle au front de la fissure.

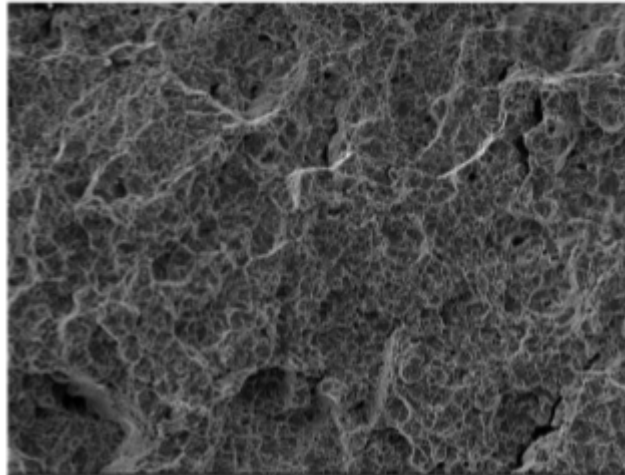
**II.3. Rupture fragile et ductile : [11]**

L'étude des mécanismes de rupture a pour but de comprendre les processus de rupture et de fournir le critère de rupture adéquat. Il existe deux types de ruptures, les ruptures fragiles et les ruptures ductiles.

**II.3.1. Rupture fragile :**

La rupture fragile est caractérisée par l'absence de déformation plastique macroscopique et donc par la propagation très rapide des fissures avec faible consommation d'énergie. Cette rupture intervient lorsque l'énergie de déformation locale due aux sollicitations extérieures devient égale à l'énergie nécessaire de décohésion atomique. La rupture par fissuration rapide peut aussi intervenir pour des conditions anormales à savoir :

- basse température relative.
- grandes vitesses d'application de la charge (choc).
- fatigue.
- défauts préexistants au créés en service (le critère de Griffith permet alors d'estimer la contrainte à a rupture).
- présence de l'hydrogène atomique fragilisant l'acier



**Figure II.2 :** Exemple de rupture fragile. [10]

Deux types de rupture fragile peuvent être trouvés :

**II.3.1.1. Rupture fragile transgranulaire (à clivage) :**

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

L'interaction de la fissure avec les défauts microstructuraux ou hétérogénéités du métal conduit à des microreliefs très caractéristiques : surfaces de clivage sous forme de traces et marches appelés rivières et languettes (tongues). Les rivières se forment par l'interaction du plan de clivage et de dislocations vis ou par la jonction de deux plans de clivage voisins et convergeant vers la direction du sens de propagation de la fissure. Lors d'un franchissement d'un joint de grain, soit les rivières se multiplient, soit il y aura un réamorçage dans le grain voisin et ceci selon la désorientation de la fissure qui est fonction de la taille du grain.

Cette rupture se manifeste surtout dans les structures des cristaux cubiques centrés tels que les aciers au carbone et elle est facilement amorcée à partir d'inclusions de sulfures elliptiques. Ce cas là peut être rencontré dans les gazoducs.

**II.3.1.2. Rupture fragile inter granulaire :**

La rupture suit les joints des grains, elle est caractérisée par une décohésion inter granulaire ; elle survient par accumulation d'impuretés ou d'inclusions qui sont à l'origine d'une fragilité introduite. Cette rupture présente deux aspects à l'échelle microscopique : aspect lisse, si la rupture suit les joints des grains avec déformation plastique réduite ; aspect de cupules. Dans ce cas là les critères de rupture adoptés sont les critères de contrainte critique (la rupture inter granulaire) et les critères d'allongement critique (rupture ductile).

La rupture inter granulaire se manifeste sous deux formes : Rupture fragile à basses températures quand les éléments d'impuretés ségrégués au joint du grain diminuent l'énergie de cohésion de ces joints ; et rupture inter granulaire par fluage aux températures moyennes et élevées ( $\geq 1/3 T_{\text{fusion}}$ ). Les défauts qui conduisent à ce type de rupture sont initialement des cavités puis leurs multiplications ou décohésion.

Le critère de Griffith (d'après Alan Arnold Griffith) désigne une contrainte maximale au - de là de laquelle un matériau fragile se rompt. La valeur de cette contrainte seuil s'exprime en fonction du module d'élasticité du matériau et de l'énergie nécessaire pour ouvrir la fracture. Le bilan d'énergie de Griffith définie que lorsque la fissuration évolue,



la structure restitue de l'énergie potentielle et crée effectivement de l'énergie de fissuration. Le principe de Griffith est de dire que toute l'énergie potentielle restituée est effectivement transformée en énergie de fissuration. Autrement dit, en supposant que l'évolution de la fissuration est continue en temps, le bilan d'énergie dit que l'on doit avoir :

$G = G_c$  quand la fissure se propage

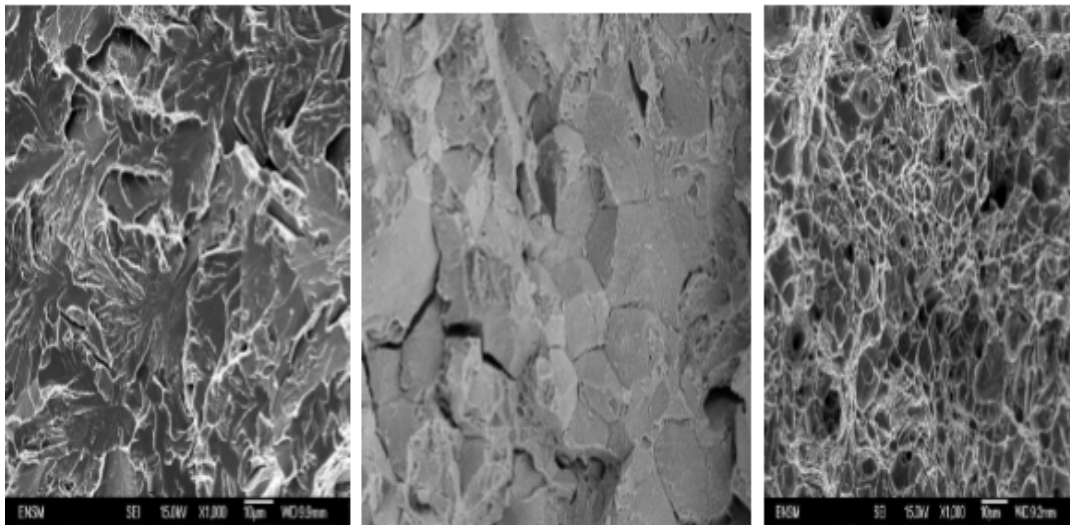
Où :

$G$  : représente le taux de restitution d'énergie potentielle.

$G_c$  : représente la densité surfacique d'énergie de fissuration effective.

En résumé, dans la théorie de Griffith de la rupture fragile, la propagation des fissures est régie par trois principes :

- Un principe d'irréversibilité disant que la fissuration ne peut pas croître.
- Un principe de stabilité disant que la fissure se propagera s'il existe une direction de propagation suivant laquelle la restitution d'énergie potentielle sera suffisante pour fournir l'énergie de fissuration correspondante.
- Un bilan d'énergie disant que lors de la propagation la restitution d'énergie potentielle est égal à la création d'énergie de surface.



**Figure II.3** : Quelques exemples de ruptures. [11]

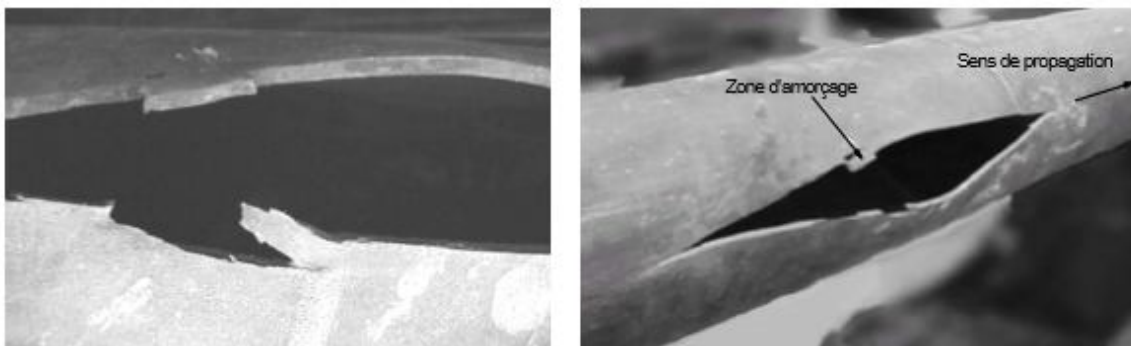
### II.3.2. Rupture ductile :

La rupture ductile se caractérise par une forte énergie de rupture, une importante déformation à rupture, un faciès mat et fibreux et par la possibilité de déformation plastique importante.

Le type le plus courant de rupture ductile est la rupture par traction avec apparition de striction.

La rupture ductile se manifeste essentiellement par la présence des inclusions ou précipités. Elle résulte de la naissance des cavités, d'allongement de ces cavités dans le sens de déformation et coalescence de celles-ci par striction ou cisaillement qui conduisent à la rupture finale. Les défauts responsables de l'amorçage dans la rupture ductile sont essentiellement les éléments d'addition dans les alliages, les inclusions, les précipités (par traitement thermique) et les joints de grain (points triples). A l'échelle macroscopique, on voit des micro-reliefs appelés cupules.

Dans les matériaux des gazoducs alliés, il existe des particules composées de différents éléments d'alliages très fragiles et ne peuvent accommoder la déformation plastique de la matrice. Comme ces particules ne peuvent pas se déformer aussi facilement que la matrice, elles perdent leur cohérence avec la matrice quand une déformation plastique intense se produit dans leur voisinage et permettent la formation de minuscules trous qui croissent par glissement et qui provoquent la rupture.



**Figure II.4 :** Rupture ductile d'un tuyau de diamètre moyen sous l'effet de la pression interne. [12]

## II.4. Les critères les plus utilisés dans la mécanique de la rupture : [13]

### II.4.1. Critère de taux de restitution d'énergie :

Ce critère a été établi par Griffith vers 1920, pour des matériaux fragiles. Son principe est que la rupture se produit lorsque l'énergie de l'extension de la fissure est supérieure à l'énergie nécessaire pour créer la surface relative à cette extension. De façon générale, on définit le taux de restitution d'énergie  $G$  par la variation de l'énergie potentielle  $\Pi$  stockée dans la structure lors de l'augmentation de la surface libre correspondant à l'extension de la fissure :

$$G = \lim_{\Delta a} \frac{\Delta \Pi}{\Delta a} = \frac{\partial \Pi}{\partial a}$$

Avec :

$\Pi = U - F$  l'énergie potentielle.

$F$  le travail des forces extérieures.

$U$  l'énergie de déformation élastique du solide.

Le critère de rupture fragile s'écrit sous la forme :

$$G \geq \gamma_s = G_{IC}$$

Irwin a généralisé l'approche énergétique de Griffith au cas des matériaux ductiles. Il a par conséquent ajouté une énergie plastique de déformation  $\gamma_p$  à l'énergie de surface introduite par Griffith. La rupture se produit donc pour une contrainte critique telle que :

$$\sigma_c = \sqrt{E} \cdot \frac{(\gamma_s + \gamma_p)}{b_0}$$

Où  $E$  est le module de Young,  $b_0$  est considéré comme un paramètre caractéristique du défaut. En prenant en considération les déformations plastiques, le critère de rupture est donné alors sous la forme suivante :

$$G \geq \gamma_s + \gamma_p = G_{IC}$$

### II.4.2. Critère d'Irwin:

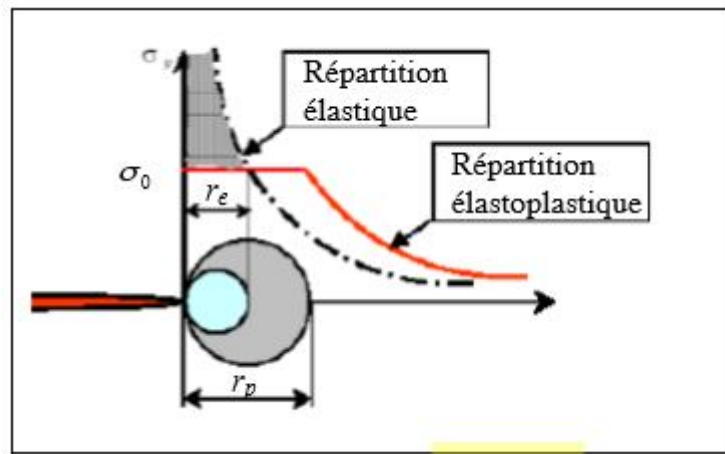
Dans le plan d'une fissure et en aval de l'extrémité de celle-ci, la contrainte normale  $\sigma_n$  lorsque la sollicitation est en mode I ( $\theta=0$ ) est donné par la relation :

$$\sigma_{\theta\theta} \cdot \sqrt{2} \cdot \pi r = K_I$$

Le critère de rupture proposé par Irwin est fondé sur le concept du facteur d'intensité de contraintes en mode I, en tenant compte de la présence d'une zone plastique supposée petite en comparaison avec la longueur de la fissure. Irwin suppose un accroissement de la fissure petit vis-à-vis de la taille de la zone plastique  $r_p \ll a$  et considère que la contrainte  $\sigma_{yy}$  obtenue dans cette zone ne dépasse pas la limite d'élasticité. Il considère en première approximation que la frontière entre les deux zones élastiques et plastiques correspond au lieu des points où les contraintes atteignent la limite d'élasticité du matériau.

La taille de la zone plastique est définie ainsi par le rayon  $r_p$  qui définit la distance du front de la fissure à la frontière sur l'axe ( $\theta=0$ ), on peut écrire alors  $\sigma_n = \sigma_y$  et on a :

$$r_p = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{K_I}{\sigma_y} \right]^2$$



**Figure II.5 :** Répartition des contraintes élastiques et élastoplastique dans le plan de la fissure. [13]

L'analyse est réalisée en faisant abstraction des forces non transmises représentées par l'aire hachurée de la figure (II.5). Pour tenir compte de ces forces, il convient d'assurer l'équilibre entre les deux répartitions élastique et élastoplastique des contraintes. L'équilibre des forces entre les deux configurations conduit à :

$$r_p = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{K_I}{\sigma_y} \right]^2 = 2 \cdot r_e$$

Ce critère n'est applicable qu'aux faibles niveaux de chargement. Il est donc illusoire de l'appliquer au-delà de la plasticité généralisée.

L'application de la mécanique de rupture dans le cas des canalisations avec défauts est essentiellement concentrée sur les tubes fissurés. Ces fissures sont souvent rencontrées dans les joints soudés.

## **II.5. Contraintes mécaniques : [9]**

Le terme contrainte, ou stress est employé couramment aujourd'hui, mais il possède un sens technique bien précis et il en est de même pour le terme déformation. La déformation est un effet qui résulte de la contrainte.

### **II.5.1. Contraintes mécaniques et déformation :**

Lorsqu'une charge ou une force est appliquée à un matériau, ce matériau est assujéti à une contrainte définie comme étant la force appliquée sur une unité de surface. (Cette notion nous permet d'ignorer la taille de l'unité de tout en examinant les effets de la force sur l'état physique de la pièce). Par exemple, une force externe due à la pesanteur est exercée sur tous les matériaux.

Il existe trois types de contraintes :

- Contrainte de traction qui tend à allonger un matériau.
- Contrainte de compression qui tend à comprimer un matériau.
- Contraintes de cisaillement qui résultent de l'application d'une charge transversale.

La déformation est l'effet résultant de la contrainte. Par exemple, la déformation est souvent mesurée comme étant le % d'allongement ou le chargement relatif de longueur d'une pièce sur laquelle une force de traction a été exercée. Dans de nombreux matériaux, les contraintes appliquées peuvent avoir un ou plusieurs des effets suivants, selon l'importance de la contrainte :

- Lorsqu'il est assujéti à une contrainte relativement faible, le matériau subit une déformation élastique, et retourne à son état initial après l'élimination de la contrainte.
- Lorsqu'il est assujéti à des niveaux de contraintes modérés, le matériau atteint sa limite d'élasticité, ou limite apparente d'élasticité et commence à subir une déformation plastique. Il ne retournera pas à son état initial, mais subira une déformation permanente.
- Lorsqu'il est assujéti à des niveaux de contraintes relativement élevés, le matériau connaît une défaillance ou une rupture parce que sa limite conventionnelle de proportionnalité a été dépassée.

**II.5.2. Contraintes résiduelles :**

Au cours de la fabrication, de l'installation ou de l'entretien, le matériau peut être laissé dans un état tel que des contraintes agissent de manière permanente à l'intérieur du matériau. La contrainte résiduelle est appliquée de manière continue à l'intérieur du matériau durant toute la durée de vie de l'équipement. On peut pratiquer des ouvertures à la perceuse, souder ou plier les pièces pour appliquer des contraintes résiduelles dans un matériau. Une définition plus officielle suivra. La contrainte résiduelle est une tension ou une compression qui existe dans le substrat du matériau en l'absence de l'application de charges externes (force appliquée, déplacement d'un gradient thermique).

**II.5.3. État de contrainte :**

On peut distinguer deux états particuliers de contraintes : l'état plan de contrainte et l'état plan de déformation.

On est en état plan de contraintes lorsqu'on a :

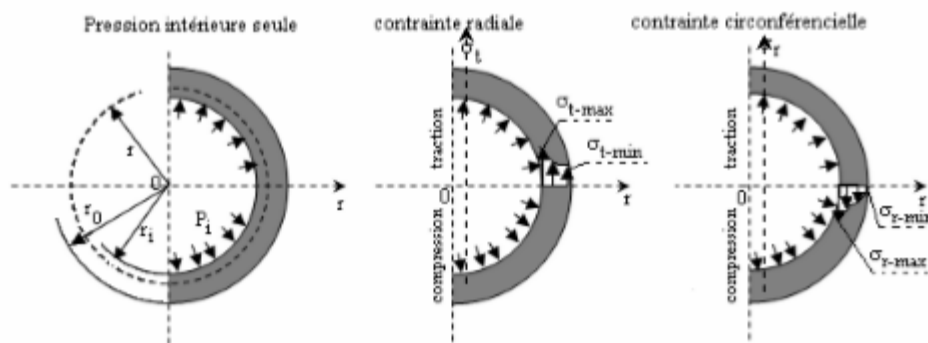
$$\sigma_{zz} = \sigma_{zx} = \sigma_{zy} = 0$$

On se trouve en état de contrainte, par exemple, dans le cas d'une tôle mince soumise à des efforts dans son plan. On est par contre en état plan de déformation lorsque :

$$\epsilon_{zz} = 0$$

$$\sigma_{zx} = \sigma_{zy} = 0$$

L'état plan de déformation peut avoir lieu au centre d'une pièce épaisse, où le triaxialité des contraintes est important.



**Figure II.6 :** Sollicitation d'un pipeline à une pression interne. [17]

## II.6. Étude d'un milieu fissuré : [10]

D'un point de vue mécanique, on peut distinguer schématiquement dans un milieu fissuré, trois zones successives :

**La zone d'élaboration 1 :** elle se trouve à la pointe de fissure et dans le sillage laissé par la fissure au cours de sa propagation. L'étude de cette zone est très complexe à cause des contraintes importantes qui ont fortement endommagé le matériau. Elle est discontinue au sens de la mécanique des solides. La théorie classique de la mécanique de la rupture réduit cette zone à un point pour les problèmes plans et à une courbe pour les problèmes tridimensionnels.

**La zone singulière 2 :** dans laquelle les champs de déplacements, déformations et contraintes sont continus et possèdent une formulation indépendante de la géométrie lointaine de la structure. On démontre que dans cette zone, les composantes des champs de contraintes sont infinies au voisinage du front de fissure ( $r \rightarrow 0$ ).

Plus exactement, la singularité est en  $(1/\sqrt{r})$  en milieu élastique linéaire. Le matériau ayant une limite élastique, il existe un rayon  $r_p$  autour de la pointe de fissure qui détermine la forme de la zone plastique. En fonction de la valeur de  $r_p$ , on dira que la rupture est fragile pour  $r_p$  petit et qu'elle est ductile pour  $r_p$  grand. Cette distinction sur la base du paramètre  $r_p$  est très importante car elle conditionne la validité de la théorie utilisée :

- 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).

**La zone des champs lointains :** Comprenant les champs lointains se raccordant d'une part à la zone singulière et d'autre part, aux conditions aux limites en charges et en déplacements. Dans cette zone, les champs de déplacements, déformations et contraintes varient peu et peuvent être approximés par des polynômes communément utilisés dans la méthode des éléments finis.

## II.7. Endommagement des pipelines : [11]

Les pipelines sont toujours exposés aux risques d'endommagement. Les causes de défaillances des canalisations sont de diverses natures. Elles peuvent se manifester soit par une rupture soit par une fuite dans les conduites. Les défauts à l'origine de ces défaillances peuvent être classés suivant quatre catégories :

- Les défauts de corrosion, causés par des piqûres de corrosion ou par des fissurations de corrosion sous contraintes.
- Les défauts de types éraflures.
- Les défauts de type enfoncement.
- Les défauts dans les soudures.

La plupart de ces défaillances sont causées par des piqûres de corrosions ou par des fissurations de corrosion sous contraintes, sans négliger les agressions mécaniques extérieures. Certains travaux d'excavation par des engins de chantier peuvent provoquer des endommagements ou perforations des canalisations.

Les problèmes d'amorçage des fissures et les ruptures émanent les concentrations de contraintes, sont à l'origine de plus de 90% des ruptures en service. La présence d'une discontinuité géométrique, telle qu'une entaille, provoque l'affaiblissement de la résistance à la rupture de la canalisation. Elle réduit la section du pipe en le rendant plus sensible à la pression de service et aux efforts causés par le mouvement des sols, ensuite l'effet de l'amplification locale de la contrainte accroît exponentiellement la nocivité du défaut.

Le contenu du gazoduc est sous pression. Cette pression constitue une source de contraintes s'exerçant sur la paroi de la conduite. Le sol autour du pipeline peut bouger et constitue une autre source de contraintes. Les procédés de fabrication des conduites tels que le soudage peuvent introduire des contraintes résiduelles.

La maîtrise de la propagation et de l'arrêt d'une fissure ainsi que la lutte contre la corrosion dans un gazoduc permet d'atteindre un niveau de fiabilité plus élevé et plus performant.

### **II.7.1. La corrosion :**

#### **II.7.1.1. Définition de la corrosion : [4]**

On définit la corrosion d'une manière générale, comme étant la destruction des métaux qui se produit sous l'effet de réaction chimique ou électronique lorsqu'ils sont en contact avec un milieu gazeux ou aqueux.

La corrosion est un phénomène naturel, les métaux élaborés industriellement à partir d'un minerai à la suite d'opération souvent complexes, ont tendance lorsqu'ils sont livrés à eux-mêmes à se transformer en composés chimiques de plus en plus stables.

L'immense majorité des problèmes de corrosion rencontrés est liés à la présence d'eau liquide au contact des métaux.



### II.7.1.2. Types de corrosion : [15]

On peut distinguer les types de corrosion suivant l'aspect, le mode d'action du milieu ou les phénomènes physiques concernés.

#### II.7.1.2.1. Corrosion uniforme :

Elle se traduit par une perte d'épaisseur régulière. Le phénomène se caractérise par la vitesse d'attaque qui se mesure soit en millimètres par an, soit en milligrammes par décimètre carré et par jour.

#### II.7.1.2.2. Corrosion par piqûres :

Elle correspond à une attaque limitée à des zones de très petite surface (environ  $1\text{mm}^2$ ), mais pouvons être assez profonde. C'est en particulier le cas des tuyauteries enterrés en acier non allié ou des tuyauteries en acier inoxydable en présence d'eau de mer.

Ce type de corrosion devient catastrophique si la profondeur des piqûres devient égale à l'épaisseur du tube. Cependant, très souvent, les conditions de l'attaque se modifiant en fond de piqûre, la corrosion se ralentit et même par fois cesse complètement; une sur épaisseur prévue à l'origine peut alors être une solution valable.

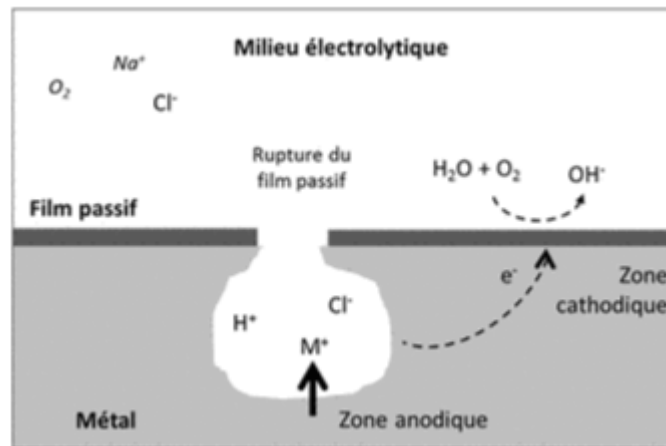


Figure II.7 : Principe de la corrosion par piqûre. [4]

#### II.7.1.2.3. Corrosion fissurante :

C'est une forme de corrosion d'autant plus dangereuse qu'elle peut passer inaperçue jusqu'à la fuite, ou même la rupture de la tuyauterie. Suivant la localisation des fissures à l'échelle microscopique, on distingue :

- La fissuration intergranulaire, ou les fissures cheminant entre les grains : c'est le cas de la corrosion des aciers au chrome-nickel type 18-8 non stabilisés, lorsqu'ils sont soumis à un milieu acide après sensibilisation.
- La fissuration transgranulaire, caractérisée par des fissures traversant les grains qui se manifeste principalement dans les cas de corrosion sous tension.

**II.7.1.2.4. Corrosion sélective :**

C'est le type de corrosion très dangereux parce qu'insoupçonnable : la pièce corrodée ne semble pratiquement pas concernée, alors que sa résistance diminue considérablement. Elle consiste en la dissolution sélective d'un élément d'un alliage, les autres éléments restant non attaqués. Le métal devient poreux et perd sa résistance.

Industriellement, ce phénomène concerne surtout les alliages contenant du zinc, tels que le bronze ou le laiton, où le zinc subit cette attaque sélective en milieu acide.

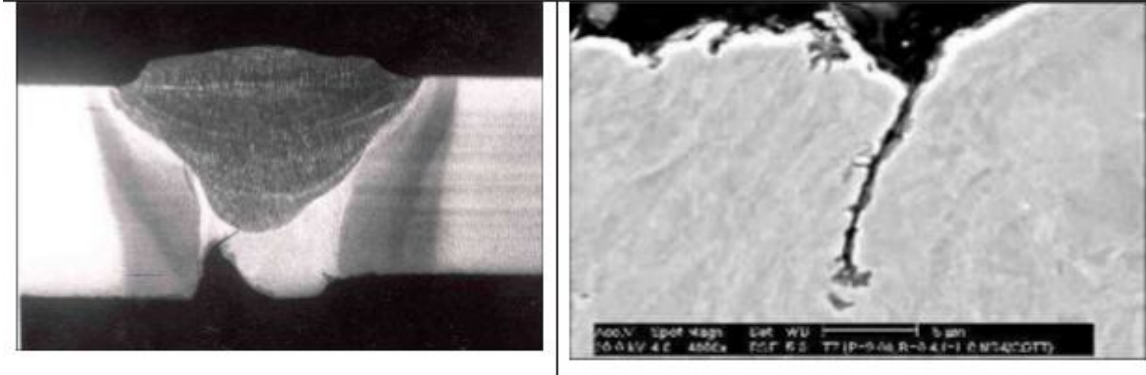
L'adjonction de petites quantités d'étain (environ 1%) et d'arsenic a permis de mettre au point des laitons insensibles à ce type de corrosion.

**II.7.2. Les fissures :****II.7.2.1. Définition d'une fissure :**

Une fissure est définie comme la surface séparant localement un solide en deux parties. Le champ des déplacements est alors discontinu à travers cette surface. L'objet de mécanique de la rupture est l'étude des évolutions de cette surface (propagation de la fissure) en fonction des chargements appliquées et des caractéristiques du matériau constituant. [9]

Les canalisations sont le plus souvent assemblées sur chantier à partir de la jonction de tubes d'acier soudés bout à bout (soudure de rabouillage). Les soudures longitudinales réalisées lors du formage du tube en usine sont contrôlées avant que le transport des tubes ne soit sur chantier. Par contre, les soudures réalisées sur chantier (soudage bout à bout) peuvent présenter des fissures car elles sont parfois réalisées dans des conditions difficiles.

Les défauts rencontrés dans les joints soudés sont généralement assimilés à des fissures, comme celles résultant d'un manque de pénétration de la matière. [10]



**Figure II.8 :** Fissure dans les joints de soudure. [13]

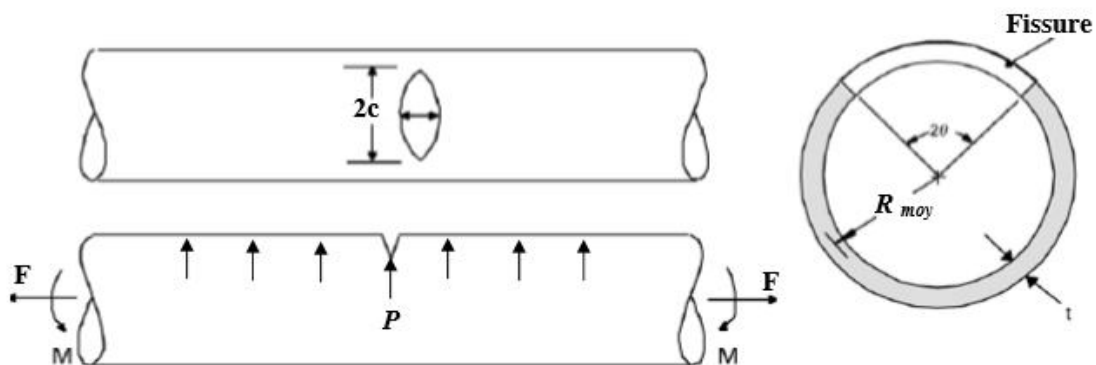
### II.7.2.2. Les différents types de fissure : [13]

#### II.7.2.2.1. Fissuration longitudinale dans un tube :

La fissuration longitudinale est un mode de rupture qui touche les conduites de grand diamètre et fragiles dans le cas par exemple de canalisations de distributions d'eau en fonte grise. La fissure se propage dans le sens longitudinal et la pression interne peut provoquer la rupture complète de la canalisation. Ces ruptures sont souvent causées par des augmentations subites et inhabituelles de pression et des coups de bélier.

#### II.7.2.2.2. Fissuration circonférentielle dans un tube :

Outre des fissures longitudinales on peut rencontrer dans les canalisations aussi des fissures circonférentielles. Ces dernières peuvent se propager sur toute l'épaisseur de la canalisation et sous les différentes sollicitations, elles conduisent à des ruptures brutales.



**Figure II.9 :** Géométrie d'un tube avec une fissure circonférentielle. [13]

**II.7.3. Éraflure : [10]**

Une éraflure est un endommagement superficiel de la surface dû à un contact avec un objet étranger qui provoque un enlèvement de matière.

Cette éraflure peut être considérée comme une entaille. Les dimensions d'une éraflure sont définies de façon que la longueur soit plus grande que la largeur.

L'outil de l'intervenant provoque un choc (coup de pic par exemple) ou un engin de chantier (choc d'une dent de godet par exemple) ; la plupart du temps, l'incident passe inaperçu ou n'est pas signalé tout simplement.



**Figure II.10 :** Défaut de type éraflure. [16]

**II.7.4. Enfoncement : [13]**

Un enfoncement dans un pipeline est une déformation plastique permanente de la section circulaire de la paroi du tube dû à un impact avec un corps étranger (exemple : le godet d'un engin en travaux pour les canalisations enterrées ou posées par terre, les ancrages des bateaux pour les pipelines immergés). Autrement dit un enfoncement est un changement de courbure de la paroi du pipeline sans changement d'épaisseur. La profondeur de cet enfoncement est définie comme la réduction maximale du diamètre du tuyau par rapport à son diamètre initial.



Figure II.11 : Défaut de type enfoncement. [16]

#### II.7.5. Endommagement combiné (éraflure+enfoncement) : [10]

Ce type d'endommagement est très dangereux car il résulte de la concentration des contraintes provoquée par l'agression externe (enfoncement) et la réduction de l'épaisseur du pipeline (éraflure) qui engendrent une diminution locale de la résistance mécanique. En conséquence, il est constaté une diminution locale de la résistance mécanique de la canalisation.

### II.8. Paramètres pour étudier le comportement en rupture:

En général, trois paramètres peuvent être utilisés pour étudier le comportement en rupture: le facteur d'intensité de contrainte  $K$ , le taux de restitution d'énergie  $G$  et l'intégral  $J$ .  $K$  est le paramètre de l'approche locale directe.  $G$  et  $J$  sont les paramètres de l'approche énergétique globale.

#### II.8.1. Le facteur d'intensité de contrainte $K$ : [7]

Irwin considère un solide de comportement élastique linéaire et comporte une fissure. Il montre que le champ des contraintes au voisinage de la fissure peut être défini uniquement par un paramètre  $K$  appelé facteur d'intensité de contrainte. La rupture peut intervenir lorsque  $K$  atteint une valeur critique  $K_c$ . En utilisant les fonctions de Westergaard, il est possible de décrire le champ de contraintes à une distance  $r$  de la pointe de la fissure. L'expression générale de ce champ est de la forme :

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

Où :  $r$  et  $\theta$  sont les coordonnées polaires du point considéré,  $K$  est le facteur d'intensité de contraintes, qui vaut ici :  $\sigma\sqrt{\pi a}$  et contient à la fois l'information sur le niveau de chargement et sur la dimension de la fissure.

Comme le facteur d'intensité de contraintes  $K$  définit le champ de contraintes au voisinage de la fissure, Irwin a postulé que la condition  $K > K_c$  représente un critère de rupture.

$K$  est donné par la relation suivante :

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

$\sigma$  : Est la valeur atteinte par la contrainte appliquée, et  $Y$  est un facteur géométrique (coefficient de correction) tient en compte les dimensions et la géométrie de l'éprouvette.

Dans une conduite, les contraintes s'exerçant dans deux directions, circonférentiellement (contrainte dite circonférentielle) et longitudinalement (contrainte dite longitudinale ou axiale).

Les différents sources de contraintes circonférentielles et longitudinales sont :

- La pression interne de service et la composante de contrainte la plus importante.
- La fabrication de la conduite induit des contraintes résiduelles.
- La pression interne, s'exerçant sur une conduite ovalisée, donne une contrainte de flexion.
- Les tassements et glissements de terrain induisent des contraintes secondaires.
- Les chargements de températures le long de l'axe du gazoduc.

$$\sigma_p = \frac{PR_m}{2t}$$

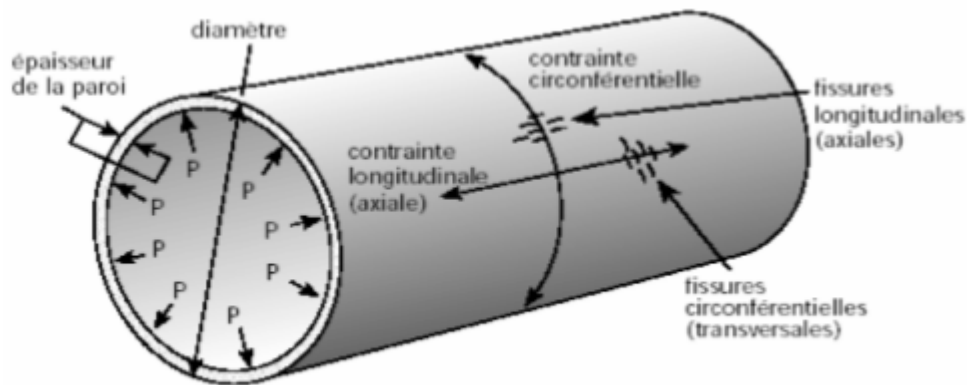


Figure II.12 : Contraintes mécaniques exercées sur les conduites. [7]

En outre des fissures longitudinales on peut rencontrer dans les canalisations, aussi des fissures circonférentielles. Ces derniers peuvent se propager sur toute l'épaisseur de la canalisation et sous les différentes sollicitations. Elles conduisent à des ruptures brutales.

Le facteur d'intensité des contraintes dans un tube soumis à une force de traction uniaxiale et un moment fléchissant est donné par la formule suivante :

$F_t$  et  $F_b$  sont les facteurs géométriques correspondants à  $\sigma_t$  et  $\sigma_b$  qui représentent le facteur d'intensité de contraintes normalisé :

$$K_{I=} (F_t \cdot \sigma_t + F_b \cdot \sigma_b) \sqrt{\pi} \cdot R_m \cdot \theta$$

Avec :

$$\sigma_t = \frac{F}{2\pi \cdot R_m \cdot t}$$

$$\sigma_t = \frac{M}{\pi \cdot R_m^2 \cdot t}$$

### II.8.2. Le taux de restitution d'énergie G : [14]

Griffith est le premier à aborder le problème des corps fissurés d'un point de vue énergétique. Par l'analyse du bilan énergétique, le taux de restitution d'énergie, noté G a été introduit. C'est l'énergie nécessaire pour faire progresser une longueur unitaire de la fissure. Elle correspond à la décroissance de l'énergie potentielle totale W du milieu fissuré pour passer d'une configuration initiale avec une longueur de fissure a, à une autre où la fissure se trouve augmentée d'une unité de longueur da :

$$G = - \frac{dW}{da}$$

Où:

$$W = W_e + W_{ext}$$

$W_{ext}$  : énergie potentielle des forces extérieures.

Avec :

$W_e = \int_v W_e \cdot dv$  : énergie de déformation élastique.

$W_e = \int_0^\epsilon \sigma_{ij} \cdot d \epsilon_{ij}$  : densité d'énergie de déformation élastique.

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

$$G = \frac{1}{b} \cdot \frac{dW}{\Delta a}$$

Avec :  $\Delta a$  la variation da longueur de fissure.

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

$$G = \frac{(K_{I2+} K_{II2+})}{E'} + \frac{K_{III2}^2}{2\mu}$$

Avec :

$E' = E$  en contrainte plane.

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

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

### II.8.3. L'intégrale $J$ : [7]

L'intégrale de contour  $J$ , utilisé comme paramètre caractéristique de l'état des contraintes au voisinage de l'extrémité d'une fissure dans les matériaux dont le comportement est non linéaire, a connu un grand succès. Car elle simplifie la description mathématique du comportement. Rice qui proposa ce paramètre, assimile en effet le comportement élastoplastique à un comportement élastique non linéaire. L'approche de Rice qui repose sur une telle hypothèse doit néanmoins être utilisée avec précaution lorsque la variation de la contrainte n'est pas monotone.

$$J = \int_T (W \cdot dy - T \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \cdot ds)$$

Où :  $J$  : un contour fermé quelconque entourant la pointe de fissure,  $T$  le vecteur contrainte ( $T_i = \sigma_{ij} n_j$ ),  $u$  : le vecteur déplacement,  $s$  : l'abscisse curviligne et  $W$  : la densité d'énergie de déformation :

$$W = \int_0^\epsilon \sigma_{ij} \cdot d\varepsilon_{ij}$$



# **Chapitre III :**

## **Analyses et résultats**

**Introduction :**

Le chapitre trois est consacré à la simulation numérique qui porte sur les chargements mixte de pression, moment et traction sur un pipeline.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier le comportement en rupture avec le facteur d'intensité de contraintes  $K_I$  dans un pipeline contient une fissure circumférentielle.

**III.1. Présentation de code de calcul Abaqus / CAE<sup>TM</sup> : [10]**

Abaqus/CAE<sup>TM</sup> est un code de calcul qui résout les problèmes de divers champs par la technique des éléments finis (MEF). Dans ce cadre, il présente un système complet intégrant non seulement les fonctions de calculs proprement dites mais également les fonctions de construction du modèle (pré-processeur) et les fonctions de traitement des résultats (post-traitement).

Abaqus/CAE<sup>TM</sup> est un programme qui traite des problèmes d'élasticité linéaire dans les domaines statiques et dynamiques, des problèmes non linéaire, des problèmes thermiques etc.....

La résolution complète d'un calcul numérique s'effectue après un passage successif dans les modules suivants :

Part, Property, Assembly, Step, Interaction, Load, Mesh, Job (pour lancer le calcul).

Dans le code de calcul Abaqus, le fichier des données décrit les géométries, les matériaux, les conditions aux limites avec une extension (.inp) et le fichier de résultats décrits les contours et les courbes résultats avec l'extension (.odb).

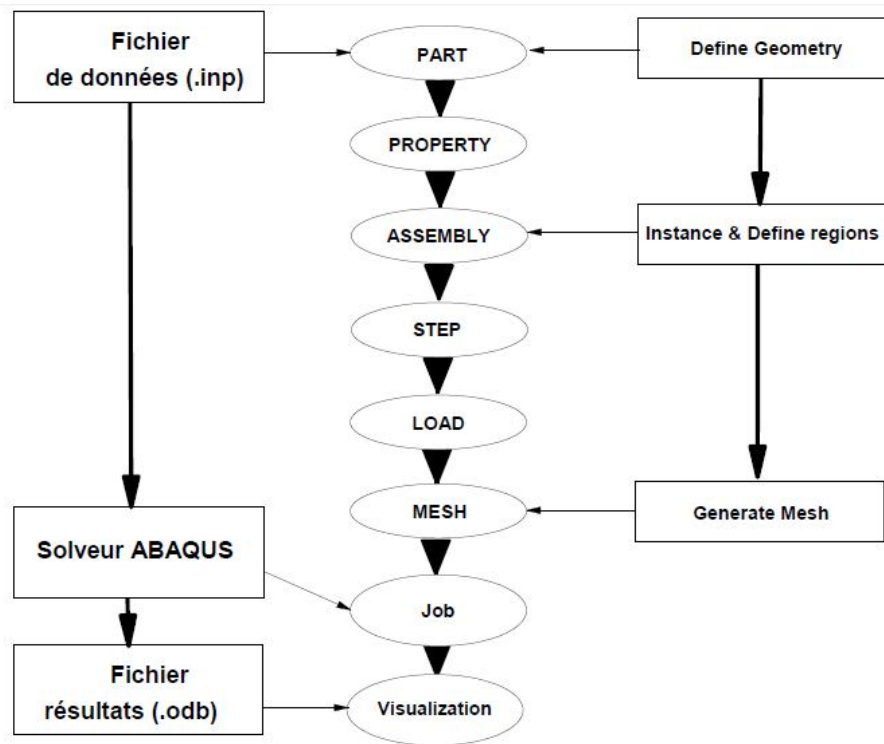


Figure III.1 : Étapes à suivre pour la programmation [10]

### III.2. Modèle géométrique et conditions aux limites:

Le modèle géométrique du pipeline est représenté sur la figure III.2. Le pipe en acier API 5L X65 est caractérisé par une longueur  $L=3000\text{mm}$ , un rayon extérieur  $r_{\text{ext}}=381\text{mm}$ , une épaisseur  $e_{\text{pipe}} : 17.5\text{mm}$ . Ce pipeline présente une fissure semi elliptique. Le pipeline est soumis à une pression de service interne de 70 bars selon la modélisation.

Le modèle étudié représente un pipeline en acier API 5L X65 comportant une fissure circonférentielle, les caractéristiques géométriques du pipeline sont représentées dans le tableau suivant :

Symbole	Valeur	Description
$D_{\text{ext}}$	762	Diamètre externe du pipeline (mm)
$D_i$	731	Diamètre interne du pipeline (mm)
T	17.5	Épaisseur du pipeline (mm)
L	3000	Longueur du pipeline (mm)

Tableau III.1 : Caractéristiques géométriques du pipeline.

Nous avons considéré aussi les caractéristiques et les propriétés mécaniques de l'acier API 5L X65 :

Module de Young (E)	20600 Mpa
Coefficient de poisson ( $\nu$ )	0.3
Densité	$1.78 \cdot 10^{-6}$
$\sigma_e$	415 Mpa

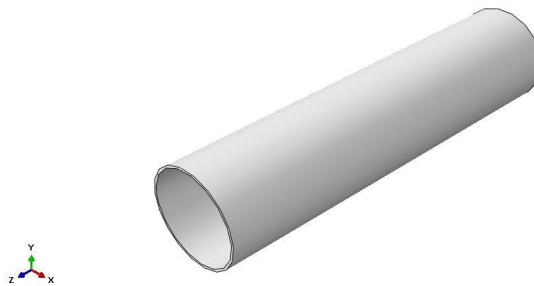
**Tableau III.2 :** Caractéristiques mécaniques de l'acier API 5L X65.

Tout calcul par éléments finis nécessite la définition des conditions aux limites, dans notre cas, on a appliqué les chargements : pression, moment et traction.

Et comme l'indique la figure (III.1), le calcul dans Abaqus passe par plusieurs modules :

- **Le module Part :**

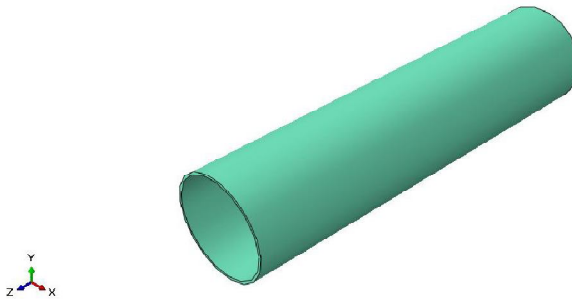
Il nous permet de créer notre model étudié.



**Figure III.2 :** Géométrie de pipe.

- **Le module Property :**

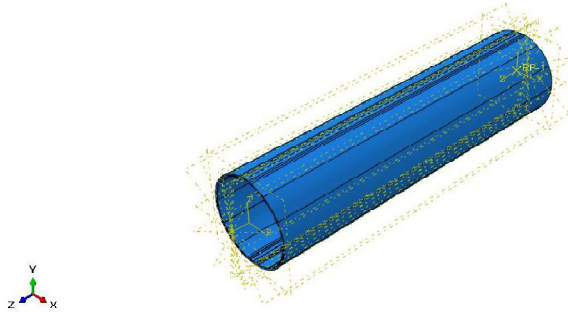
Il nous permet de définir les propriétés de pipe comme le montre le dessin suivant.



**Figure III.3 :** Propriétés de pipe.

- **Le module Assembly :**

Il nous permettra de créer des divisions (partition) sur notre modèle.



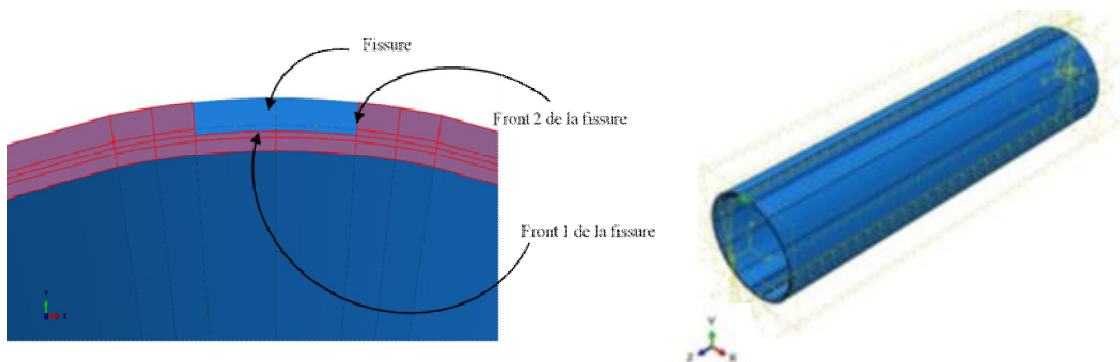
**Figure III.4 :** Créations des divisions.

- **Le module Step :**

Ce module permet de définir toutes les étapes pour le post de traitement.

- **Le module Interaction :**

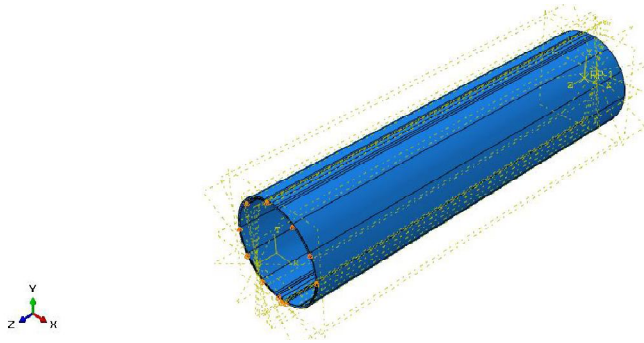
Dans ce module on a créé la fissure circumférentielle dans le pipe.



**Figure III.5 :** Déclaration des interactions.

- **Le module Load :**

Le module Load nous permettra de déterminer toutes les conditions aux limites, tel que la pression, les autres chargements et les encastremets suivant les différents axes.



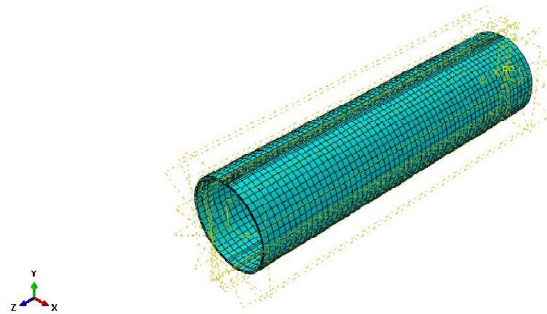
**Figure III.6 :** Déclaration des conditions aux limites.

- **Le module Mesh :**

Le module mesh nous permettra de générer un maillage en élément fini sur notre assemblage, le maillage est de type quadratique structuré C3D20R.

Le maillage utilisé est représenté par la figure III.7. Ce maillage reste le même tout au long du calcul afin d'éviter toute influence du maillage sur les résultats. A ce niveau précisons que le maillage est de type quadratique (hexaèdres).

La fissure dans le pipeline entraîne une singularité géométrique provoquant une concentration de contrainte. Par conséquent, un maillage raffiné est effectué autour de la fissure ou la taille des éléments au voisinage du front de la fissure est de 0,08mm. Le nombre total d'élément de la structure étant de 103202.



**Figure III.7 :** Maillage du modèle géométrique.

- **Le module Job :**

Une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser le module Job pour analyser ce module. Abaqus va alors réaliser tous les calculs nécessaires et tirer des résultats dans un fichier inp.

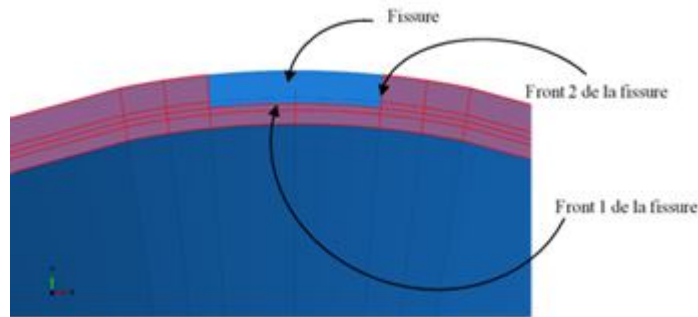
- **Le module Visualisation :**

Ce module permet de visualiser le modèle et les résultats obtenus, les concentrations de contraintes ainsi que les déformations.

### III.3. Résultats et interprétations :

#### III.3.1. Effet de chargement complexe sur le front (1) de la fissure :

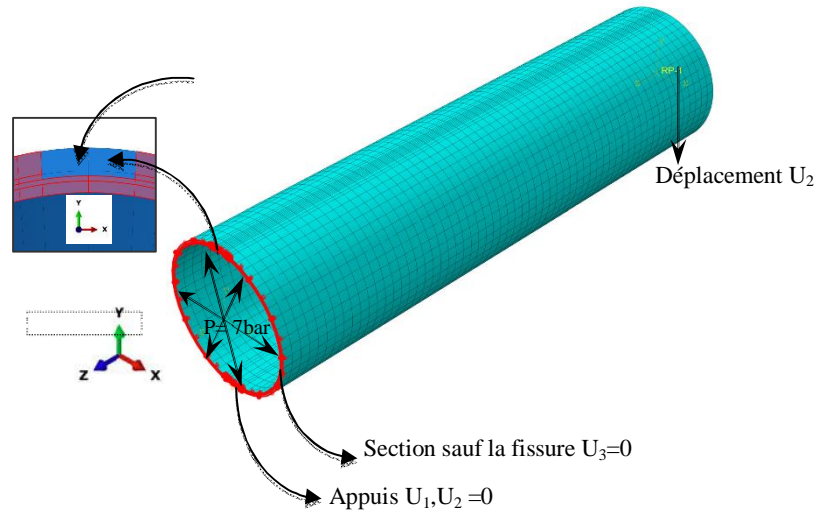
On se place dans le cas du front 1 (figure III.8) de la fissure circonférentielle, le type de chargement mixte est pris en considération à savoir :



**Figure III.8 :** Géométrie de la fissure

#### a) **Chargement mixte pression - moment (1) :**

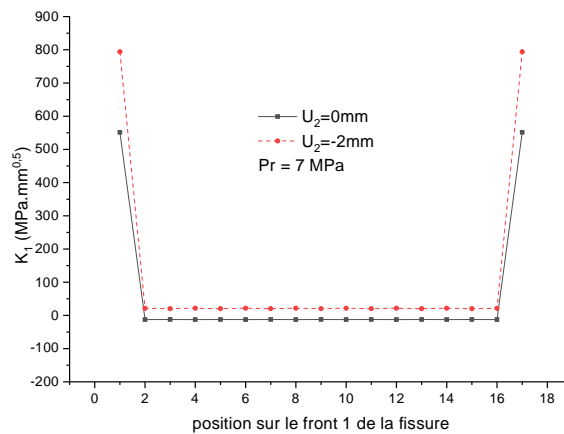
Théoriquement, les pipelines sont soumis à une pression interne mais les sollicitations externes existent aussi dans les cas réels, tel que les enfoncements et les éraflures causées par les engins lors des travaux de maintenances, aussi il y a les glissements du terrain qui peuvent engendrer des moments par rapport des appuis du pipe, dans cette vision se pose le modèle de sollicitations suivant qui suppose la présence d'un moment (1) par un déplacement de la surface extrême avec un déplacement  $U_2$  et une pression interne. Les conditions aux limites du modèle sont représentées sur la figure III.9.



**Figure III.9 :** Chargement mixte (pression - moment (1))

- **Pression variable avec un déplacement constant :**

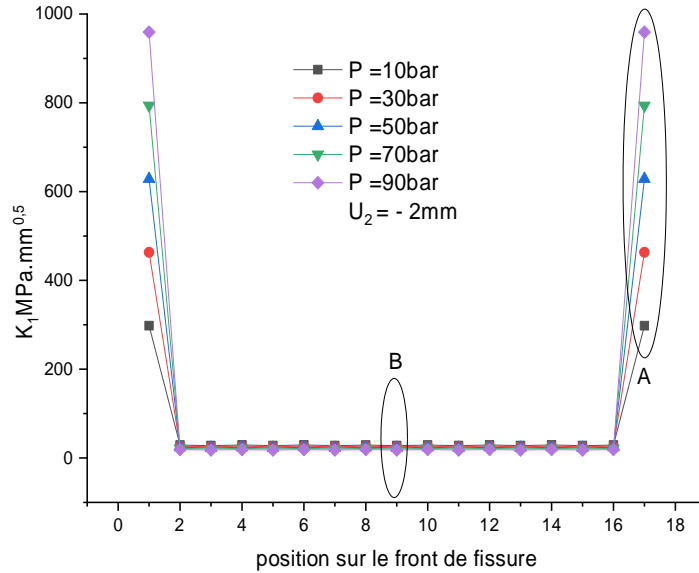
La figure III.10 présente la variation du FIC  $K_I$  le long de la ligne normalisée du front de fissure pour un pipe fissuré sollicité avec un moment et sans moment soumis seulement sous pression interne. Selon la position de la fissure interne le FIC  $K_I$  sur le front de fissure décrit un comportement non linéaire ou on peut distinguer deux pics maximums avec une régression au milieu du front.



**Figure III.10 :** Distribution du facteur d'intensité de contrainte  $K_I$  pour une compression et pour un chargement mixte (pression-moment1)

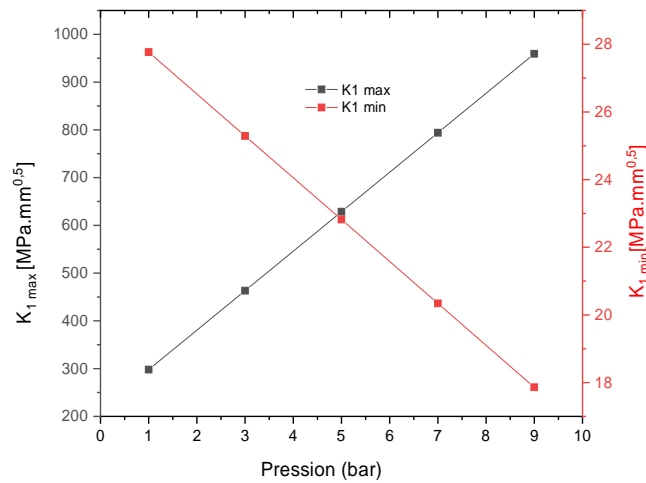


On note aussi qu'un chargement complexe augmente l'intensité du FIC  $K_I$  ce qui rend la structure vulnérable envers cette situation de chargement combiné et qui peut amplifier la tendance à la rupture du pipeline, pour faire sortir l'effet de la combinaison du chargement on a tracé la figure III.11.



**Figure III.11 :** Variation du facteur d'intensité de contrainte  $K_I$  en fonction de la pression pour un déplacement constant

La figure III.11 présente la variation des facteurs d'intensité de contrainte en mode I sur la ligne normalisée du front de fissure pour un pipe fissuré chargé avec des pressions variables et un moment constant par rapport à l'axe Z avec un déplacement de la surface extrême du pipe suivant l'axe (-Y). Le déplacement est constant  $U_2 = -2\text{mm}$ . On remarque que le comportement des FICs est non linéaire et donne lieu à la présence de trois zones. Deux zones présentent le FIC  $K_I$  maximal au bord extrême de la fissure donnant importance aux contraintes circonférentielles et la zone médiane présente le minimum du FIC  $K_I$ . On remarque aussi que l'augmentation du moment engendre systématiquement l'élévation du FIC qui garde son profil, pour quantifier cette élévation on a tracé la figure III.12 qui montre la variation du  $K_{I\max}$  et  $K_{I\min}$  pour les cinq sollicitations appliquer sur le pipeline.



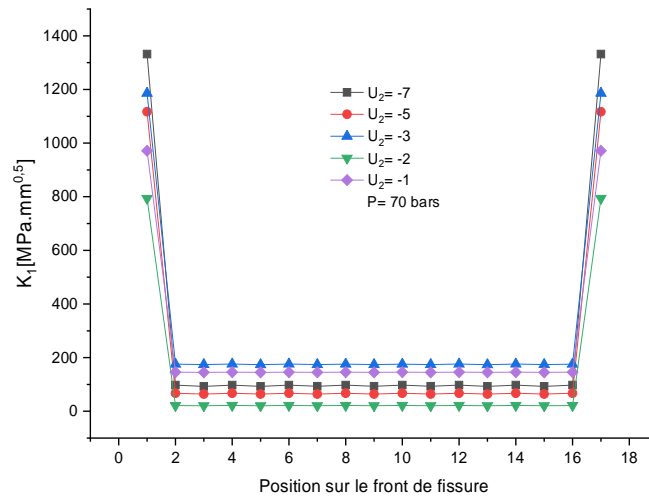
**Figure III.12 :** Variation de  $K_{1\max}$  en fonction de la pression (A :  $K_{1\max}$ , B :  $K_{1\min}$ )

Le facteur d'intensité de contraintes maximale en mode I est proportionnelle avec le chargement même en présence d'une sollicitation combinée entre une pression et un moment pour une fissure semi elliptique circonférentielle alors que le  $K_{1\min}$  est inversement proportionnelle à l'augmentation de la pression, ceci est dû à la relaxation du milieu du front de la fissure qui enregistre de faibles valeurs du FIC par rapport à l'extrémité du front (1).

- **Déplacement variable avec une pression constante :**

Dans cette partie la pression est maintenue constante  $P=70\text{bar}$ , le déplacement varie de  $U_2=-1\text{ mm}$  à  $U_2=-9\text{ mm}$ , sachant que la pression de service est de 70 bar.

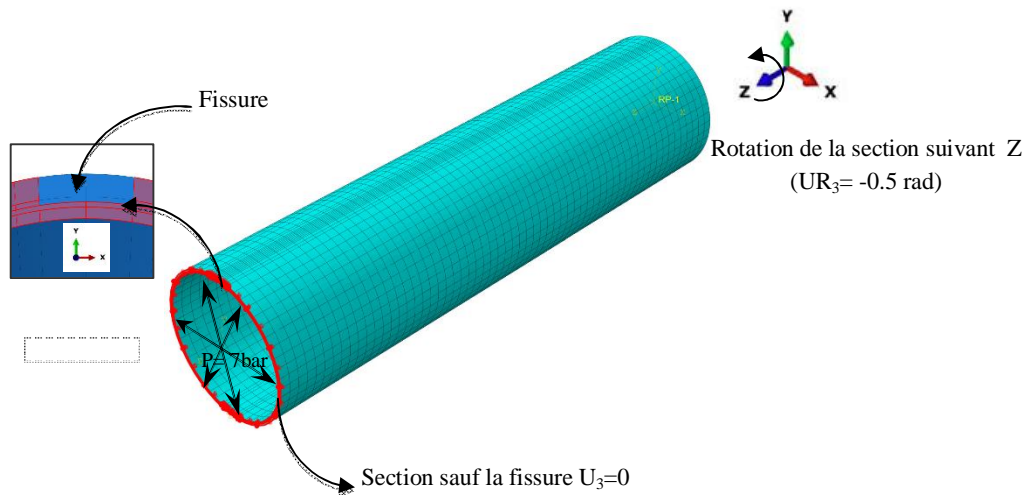
La figure III.13 représente la distribution du facteur d'intensité de contrainte en mode I le long du front de la fissure pour un pipe endommagé en fonction du moment (1), en effet le mode I est toujours dominant dans la zone médiane de la fissure mais avec des taux d'augmentation moins élevés par rapport aux augmentations des pressions remarqué a la figure (III.11). On note une augmentation du FIC  $K_{1\min}$  en fond de la fissure dans cette deuxième configuration.



**Figure III.13 :** Variation du facteur d'intensité de contrainte  $K_I$  en fonction du moment (1),  $P=70\text{bar}$ .

**b) Chargement mixte pression - moment (2) :**

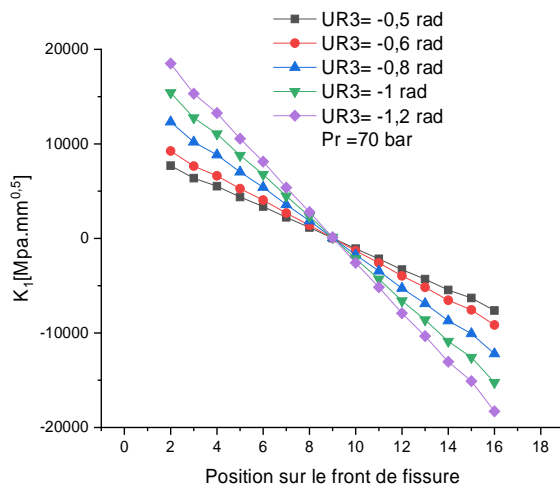
Dans cette configuration, le pipeline est soumis à un chargement mixte, une rotation de la surface extrême avec une rotation  $UR_3$  suivant l'axe Z et une pression interne toujours en présence d'une fissure circonférentielle semi-elliptique (Figure III.14).



**Figure III.14 :** Chargement mixte pression - moment (2)

La variation du FIC  $K_I$  sur le front de la fissure pour un pipe fissuré soumis à un chargement mixte est exposé sur la figure III.15. Il est visible que la distribution du FIC

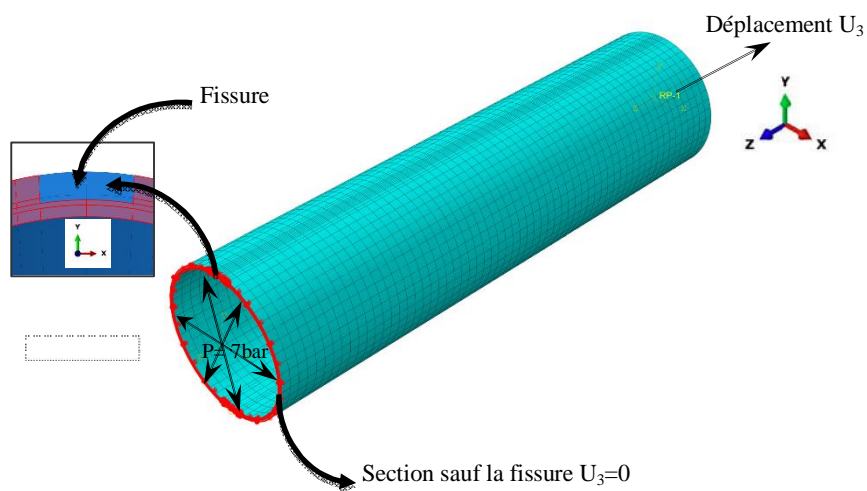
est linéaire vue la situation linéaire du front, alors le front (1) de la fissure présente point d'inversement du FIC  $K_I$  vers la position étiré par le moment au sens de la sollicitation.



**Figure III.15 :** Variation du facteur d'intensité de contrainte  $K_I$  en fonction du moment (2),  $P=70\text{bar}$ .

**c) Chargement mixte pression-traction :**

Dans cette configuration le pipeline est soumis à un chargement mixte, une traction de la surface extrême avec un déplacement  $U_3$  suivant l'axe Z et une pression interne, toujours en présence d'une fissure circonférentielle semi-elliptique (Figure III.16).



**Figure III.16 :** Chargement mixte pression – traction

- Pression variable avec un déplacement constant :

La figure III.17 montre le comportement du  $K_I$  le long du front de la fissure pour différentes valeurs de pression, déplacement  $U_3 = -2\text{mm}$ . On peut dire que l'allure du FIC ne change pas de comportement avec des valeurs légèrement supérieure par rapport au premier modèle (moment (1) -pression figure III.11), on note aussi qu'il existe trois zones comme déjà évoqué auparavant ou il y a des maximums et des minimums du FIC et pour illustrer cet effet on trace la figure III.18 pour distinguer la variation du  $K_{I\text{-max}}$  et  $K_{I\text{-min}}$  en fonction de la pression.

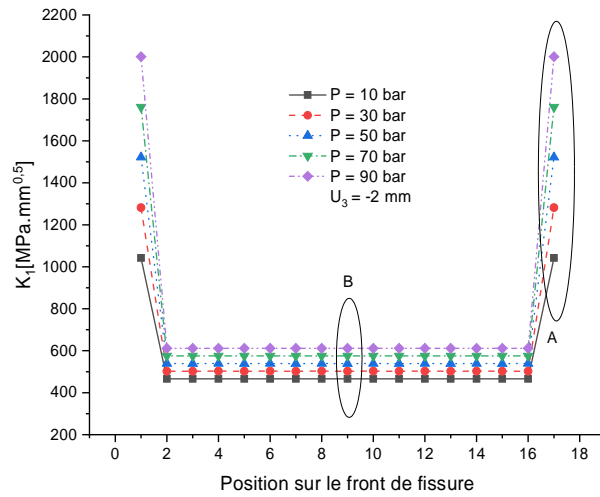


Figure III.17: Variation du facteur d'intensité de contrainte  $K_I$  en fonction de la pression pour un déplacement constant

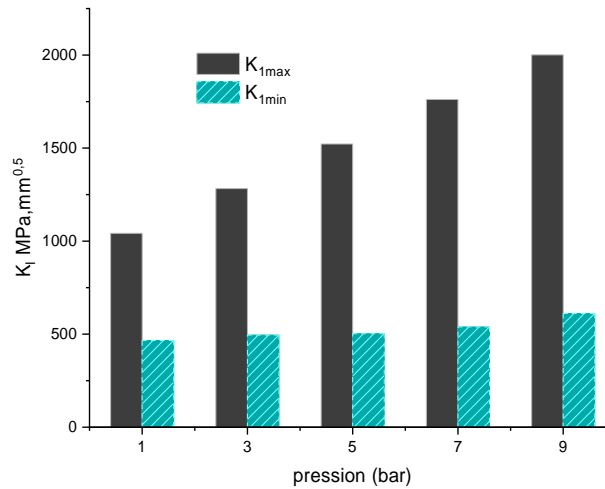
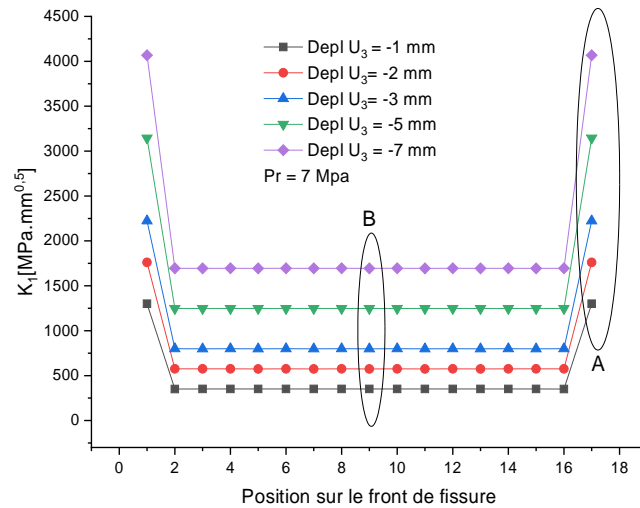


Figure III.18 : Variation du FIC  $K_I$  en fonction de la pression (A :  $K_{I\text{max}}$ , B :  $K_{I\text{min}}$ )

Le FIC  $K_{I_{max}}$  est proportionnel à la variation de la pression pour les trois positions, ceci nous confirme que le facteur d'intensité de contrainte est proportionnel avec le chargement est ce quel que soit la combinaison du chargement, cependant à sa loi :  $K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$ , alors que  $K_{I_{min}}$  est presque indépendant de cette variation de pression pour cette combinaison de chargement.

- **Déplacement variable avec une pression constante :**

La figure III.19 présente la variation du FIC  $K_I$  sur le front de fissure en fonction de la variation des déplacements  $U_3$  (traction), les résultats montrent que la distribution du FIC  $K_I$  garde la même allure sur le front de fissure que pour la figure III.17 avec des niveaux plus élevés, ce qui implique que la présence de la traction avec la pression présente un des risques majeurs de rupture de pipe.



**Figure III.19 :** Variation du FIC le long du front de fissure en fonction de la traction ( $P=70$ bar).

**d) Présentation comparative :**

Afin de visualiser l'effet des combinaisons de chargement sur le comportement de la fissure au sein du pipeline sollicité, on trace la figure III.20 qui nous montre sur un histogramme l'effet des combinaisons étudiées.

Il est clair d'après la figure III.20 que le moment (2) provoque les plus grandes déformations dans la section circonférentielle du pipe où se place la fissure ce qui rend cette combinaison-là plus dangereuse pour le pipeline. En deuxième position la combinaison pression-traction cette dernière très proche de la réalité présente aussi un risque majeur de rupture du pipe d'où il est très important d'étudier le sol ou il est placé

le pipeline et de planifier des contrôles sur les lignes enterrés. En dernière position les combinaisons pression moment (1) et pression et en remarque que le moment (1) provoque des faibles déformations dans la section de la fissure que les deux combinaisons précédentes.

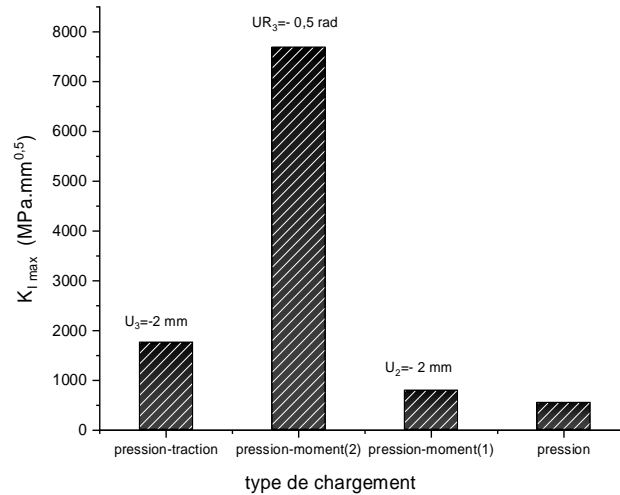


Figure III.20 : Variation du FIC  $K_{I_{max}}$  en fonction des combinaisons des chargements

### III.3.2. Effet de chargement complexe sur le front (2) de la fissure :

La géométrie de la fissure joue un rôle important dans le mécanisme de rupture des pipes ou les normes internationaux (ASME, DNV, AFNOR) donne une importance majeure, dans cette partie de l'étude on va viser les modes de rupture des fissures par rapport au cas étudié.

Dans cette dernière étude et avec les mêmes conditions aux limites déjà utilisés on évalue le comportement en rupture de la même fissure mais sur le front (2) (figure III.21).

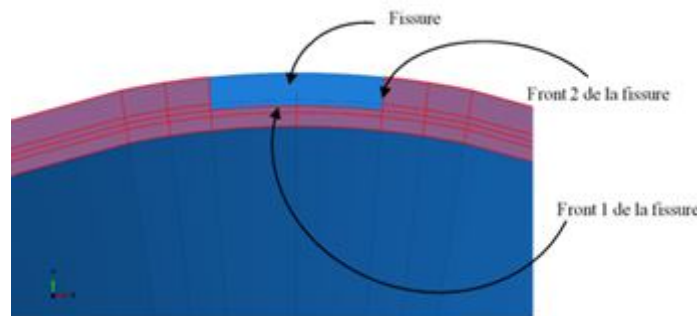
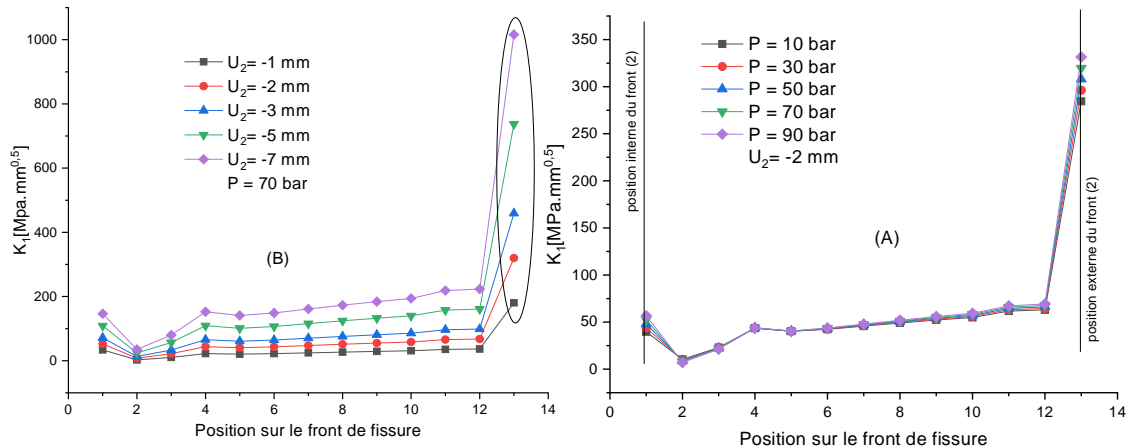


Figure III.21: Géométrie de la fissure.

### a) Chargement mixte pression - moment (1) :

Les pipelines sont soumis à une pression interne plus des sollicitations externes qui existent dans les cas réels. Dans cette représentation on propose les mêmes conditions qui supposent la présence d'un moment (1) par un déplacement de la surface extrême avec un déplacement  $U_2$  et une pression interne.



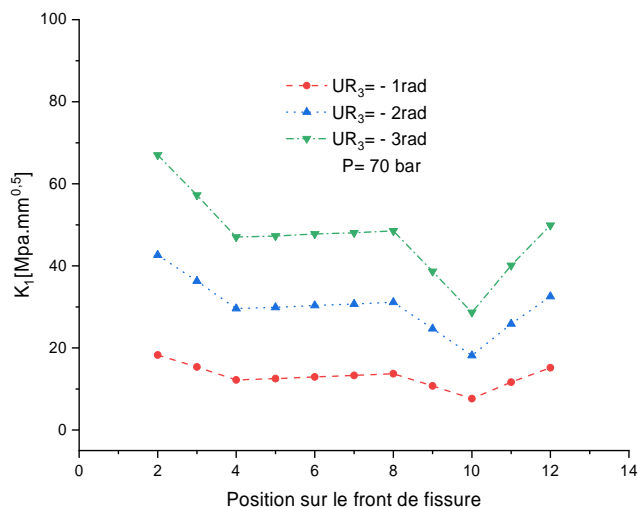
**Figure III.22 :** Variation du facteur d'intensité du contrainte  $K_I$  pour un pipeline soumis à un moment constant avec une pression variable (A), pression constante et moment variable (B).

Le comportement du FIC  $K_I$  le long du front de fissure est représenté sur la figure III.22 pour différentes valeurs de pression (A) et de moment (B). La position externe du front de la fissure est très sensible à la variation du chargement, spécialement le moment exprimé par le déplacement  $U_2$ . Par contre le côté interne du front est inférieur aux valeurs du FIC enregistrées sur le point externe déjà signalé, cette variation devient de plus en plus faible par rapport au changement des chargements (A) ou (B).

### b) Chargement mixte pression - moment (2) :

Dans cette configuration le pipeline est soumis à un chargement mixte, un moment exprimé par une rotation de la surface extrême du pipe avec une rotation  $UR_3$  suivant l'axe Z et une pression interne.



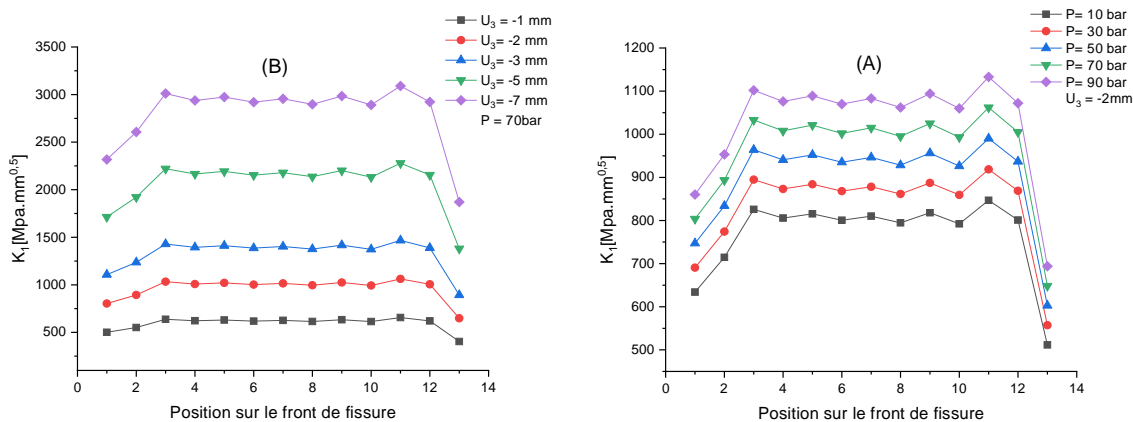


**Figure III.23 :** Variation du facteur d'intensité du contrainte  $K_I$  pour un pipeline soumis à une pression constante et un moment variable

La figure III.23 affiche la variation du FIC  $K_I$  pour une fissure semi- elliptique le long des fronts (2), on constate que la fissure rectangulaire marque un pic plus élevé à coté de la rotation du moment. L'allure du FIC  $K_I$  témoigne d'une sensibilité à la rotation  $UR_3$ .

**c) Chargement mixte pression - traction :**

Dans cette configuration le pipeline est soumis à un chargement mixte, une traction de la surface extrême avec un déplacement  $U_3$  suivant l'axe Z et une pression interne.



**Figure III.24 :** Variation du facteur d'intensité du contrainte  $K_I$  pour un pipeline soumis à une traction constante avec une pression variable (A), pression constante et traction variable (B).

La figure III.24 montre le comportement du  $K_I$  le long du front de la fissure pour différentes valeurs de pression (A) et de traction (B). On peut dire que l'allure du FIC

ne change pas de comportement et s'inverse par rapport au premier modèle (front (1) - moment (1) -pression), on note aussi qu'il existe trois zones où il y a des maximums et des minimums du FIC et comme déjà évoqué auparavant le niveau d'influence de la variation de la traction (déplacement  $U_3$ ) est plus significative que la variation de la pression.

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale :

Cette étude avait pour but principal de concevoir le comportement en rupture d'une fissure circonférentielle dans un pipeline, l'effet de chargement complexe sur les deux fronts de la fissure est caractérisé par des pressions, moments et tractions.

Les résultats obtenus numériquement par la méthode des éléments finis tridimensionnelle nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

1. Pour une fissure circonférentielle le risque de rupture des pipelines est plus dangereux sur les positions externes du front (2) et les positions externes des fronts (1) soumis à un chargement mixte (pression moment (1)).
2. Le comportement des FICs est non linéaire et donne lieu à la présence de trois zones. Deux zones présentent le maximum du FIC  $K_I$  au bord extrême de la fissure et la zone médiane présente le minimal du  $K_I$  pour un chargement mixte (pression moment (1)).
3. Le facteur d'intensité de contraintes maximale en mode I est proportionnel avec le chargement même en présence d'une sollicitation combinée.
4. Pour le chargement combiné (pression moment (2)), la distribution du FIC est non linéaire vue la situation non linéaire aussi (fissure semi-elliptique chargement mixte), alors la fissure présente un pic vers la position étirer par le moment au sens de la sollicitation pour les deux fronts (1 et 2).
5. Pour le chargement combiné (pression – traction), l'allure du FIC ne change pas de comportement avec des valeurs légèrement supérieure par rapport au premier modèle (moment (1) -pression), front (1).
6. Pour le chargement combiné (pression – traction), avec déplacement variable et une pression constante, la distribution du FIC  $K_I$  garde la même allure sur le front de fissure que pour des pressions variables avec des niveaux plus élevés, ce qui implique que la présence de la traction avec la pression présente un des risques majeurs de rupture de pipe.

## Conclusion générale

---

7. La combinaison, pression- moment (2) provoque les plus grandes déformations dans la section circonférentielle du pipe où se place la fissure ce qui rend cette combinaison-là plus dangereuse pour le pipeline.

Comme perspective on propose une étude dans le futur qui prend en compte le comportement élastoplastique du pipeline API 5L X65, évaluer avec l'intégral J comme critère de rupture.

## Références bibliographiques

---

[1] : HADJOUI Féthi " Étude du comportement en fatigue des aciers pour pipelines à différents grades" Thèse doctorat en génie mécanique, option sciences des matériaux. Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen. (2012-2013).

[2] : AGGOUNE Fateh " Évaluation de l'endommagement des tubes dans leurs conditions d'exploitation" Magister en génie mécanique option mécanique appliquée et engineering. Université Mentouri- Constantine. (2010).

[3] : IKHLEF Abdelmalek " Ténacité,  $K_{IC}$  de l'acier API-5L X52 pour le transport des hydrocarbures produit à AMPTA-Annaba : Étude comparative" Master en génie mécanique option mécanique des matériaux. Université Badji Mokhtar-Annaba. (2015-2016).

[4] : BERREKIA Habib " Modélisation et comportement d'endommagement des tubes d'aciers utilisés pour l'exploitation pétrolier" Thèse de doctorat en génie mécanique. Université Mohamed Boudiaf-Oran. (2019)

[5] : BOURAHLA Said, BOUGUERRA Youcef " Analyse structurale de l'acier XC42 du point de vue fissuration à froid en soudage" Mémoire de master en génie mécanique option sciences des matériaux. Université Mouloud Mammeri – TiziOuzou. (2017).

[6] : BOUZIANE Abdelkader "Contribution à la détermination des critères de qualités des tubes soudés soumis à une pression intérieure" Magister en génie mécanique-productique. Université M'Hamed Bougara-Boumerdès. (2007-2008).

[7] : MEDJDOUB Sidi Mohamed " Comportement en rupture des pipelines sous pression interne réparés par des matériaux composites" Thèse de doctorat en sciences, spécialité génie mécanique option interaction fluide-structure. Université Djilali Liabes-Sidi Bel Abbes. (2018-2019).

[8] : BENCHADLI Ismail "Détermination des différents critères de qualité des joints soudés sur les pipelines en service" Mémoire en master génie mécanique, spécialité maintenance industrielle. Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen. (2017).

[9] : MECHERNENE Abderrahim " Étude du comportement en fatigue des aciers pour pipelines" Mémoire en master en génie mécanique option ingénierie des systèmes mécanique productiques. Université Abou Bekr Belkaid- Tlemcen. (2013).

## Références bibliographiques

---

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

[11] : AMMARA Zenati Abdeljelil "Étude du comportement des aciers API 5L X60 sollicités par contraintes mécaniques et milieu de sol Algérien simulé" Thèse de doctorat en génie mécanique option science des matériaux. Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen(2014).

[12] : BELLAHCENE Tassaadit "Étude de la nocivité des défauts dans les canalisations sous environnement hydrogène" Thèse de doctorat en génie mécanique option génie de la construction. Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.

[13] : ALLOUTI Mustapha "Étude de la nocivité des défauts dans les canalisations de transport de gaz tels les éraflures, les enfoncements ou leurs combinaisons" Thèse de doctorat en génie mécanique option mécanique des matériaux. L'université Paul Verlaine de Metz. (2010).

[14] : SHIXIANG Ma "Propagation de fissure en mode mixte dans un milieu élasto-plastique avec prise en compte des contraintes résiduelles". Mécanique [physics.med-ph]. Université Balaise Pascal-Clermont-Ferrand II.

[15] : JACQUES Leconte "Tuyauterie : protection contre la corrosion". Page02.

[16] : CAPELLE Julien "Étude de la nocivité d'un défaut de type éraflure sur une conduite destinée au transport de gaz naturel soumis à une pression d'hydrogène" Thèse de doctorat option génie mécanique. Université Paul Verlaine de Metz, France(2008).

[17] : ISSASFA Brahim "Étude d'endommagement, entretien et réparations des tubes de transport des hydrocarbures en utilisant des matériaux composites". Mémoire de magister en génie mécanique de construction option mécanique et maintenance industrielle. Université 08 Mai 45 de Guelma. (2010).