

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

جامعة - سعد دحلب - البلدية 1

Université SAAD DAHLEB Blida1

كلية التكنولوجيا

Faculté de Technologie

قسم الهندسة الميكانيكية

Département de Génie Mécanique



## Projet de Fin d'Etude

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en génie mécanique

Option : Génie Mécanique et Matériaux

### *Thème*

# Etude de la maintenance d'un pipeline dégradé par un type de fissure

Promoteur:

Mr. BACHA Nacer

Co-Promoteur:

Mr. AZZIN Mohamed

Présentée Par :

- ✓ TOUGGUI Youssef
- ✓ HOUASNIA Imed

Année Universitaire : 2015/2016

## Résumé

Les fissures sont présentes dans toutes les structures, elles peuvent exister sous forme de défaut de base dans le matériau ou peuvent être induites durant la construction, ces fissures sont responsables de la majorité des ruptures qui se produisent dans les structures et pièces de machines en service, soumises à des efforts statiques ou dynamiques. La présence d'une fissure dans pipeline sous pression nécessite, pour des raisons de sécurité évidentes, de connaître de manière précise son degré de nocivité. Le pipe de transport des gaz contenant une fissure longitudinale (mode I de la rupture) est sollicitée à une pression interne. La modélisation numérique par le code commercial Abaqus d'un milieu fissuré permet d'une part de caractériser la singularité du champ de contrainte au front de fissure. La réparation des fissures microscopiques par collage de patch en matériau composite a confirmé son efficacité pour diminuer l'intensité des contraintes aux points des fissures. La géométrie dimensionnelle du patch et l'adhésif joue un rôle nécessaire dans la distribution des concentrations de contrainte aux voisinages et au front de fissure.

## Abstract :

The cracks are present in all structures, they can exist in basic defect of form in the material or can be induced during construction, and these cracks are responsible for the majority of failures that occur in structures and parts of machines in service, subjected to static or dynamic loads. The presence of a crack in pipelines under pressure requires, for obvious safety reasons, to know in a precise way its degree of harmfulness. The pipe of gases containing a longitudinal crack (mode I of the rupture) is solicited with an internal pressure. The numerical modeling by the commercial code Abaqus of a fissured domain allows to characterize the singularity of the field of strain in front of crack. The repairs of the microscopic cracks by joining of composite material patch confirm his efficacy to decrease the intensity of strain in crack points. The dimensional geometry of the adhesive patch and plays a has a necessary part in distribution of strain concentrations at near and front of crack.

**Mots clés: fissure, pipeline, simulation numérique, Abaqus, patch en composite**

## ملخص:

التشققات توجد في كل المنشآت الصناعية ويمكنها أن توجد في شكل خلل أساسي في المادة أو يمكنها أن تظهر أثناء الإنشاء. هذه التشققات هي المسؤولة عن غالبية الانكسارات التي تتعرض لها المنشآت والهياكل والقطع الآلية وهي في حالة عمل معرضة لإجهادات ثابتة وحركية.

الشق في أنبوب الغاز تحت الضغط يحتاج لأسباب وقائية معرفة بصورة دقيقة بدرجة خطورته. لدينا أنبوب الغاز يحتوي على شق طولي معرض للضغط داخلي. ونستعمل طريقة المحاكاة الرقمية باستعمال شفرة الحساب Abaqus في وسط فيه شق يسمح من جهة بتشخيص مجال حقل الإجهادات في عمق الشق .

تصليح هذه التشققات الصغيرة جيدا بواسطة المواد المركبة واللواصق يؤكد فعاليته لتقليل شدة الإجهادات في عمق الشق. الأبعاد الهندسية للمواد المركبة واللواصق تلعب دور مهم وأساسي في توزيع تركيز الإجهادات بجانب وفي عمق الشق.

## Remerciements

Tout d'abord, nous remercions **ALLAH** le tout puissant pour ces faveurs et ses bontés, pour nous donner le courage, la volonté et la patience de terminer ce modeste travail.

Nous tenons à adresser mes vifs remerciements à notre encadreur monsieur **BACHA Nacer Eddine** professeur au département de génie mécanique d'avoir accepté de diriger ce travail ainsi que pour son entière disponibilité, soutien et ses précieux conseils durant toute la période de l'élaboration de ce travail.

Nos remerciements également vont aussi à notre co-encadreur monsieur **AZINE Mohamed** Maître de conférences au département de génie mécanique pour l'aide qui nous a apportée.

Nous remercions aussi toutes les personnes qui nous ont aidés et nous ont encouragés à la rédaction de ce mémoire de prêt ou de loin.

Nous avons une pensée pour l'ensemble de nos ami(e)s de la section GMM 2015/2016, de nos connaissances et de celles et ceux dont le nom ne figure pas sur cette page.

## Dédicace

Je dédie ce travail :

À celui qui m'a indiqué la bonne voie en me rappelant que la volonté fait toujours les grands hommes;

A mon père.

À celle qui a attendu avec patience les fruits de sa bonne éducation ;

A ma mère.

À mes frères et mes sœurs, en témoignage de mon amour et de ma profonde admiration; qui dieu vous protège et vous prête bonne santé et longue vie.

À mes oncles, tantes, cousins et cousines; en témoignage de mon amour, de mon profond respect et de ma reconnaissance.

À mes grands père et mère; que dieu vous protège.

À la mémoire de mes grands-parents ; que dieu accorde sa miséricorde.

À tous mes maîtres de la première et deuxième année master en génie mécanique et matériaux surtout **Dr : TEMMAR M.**

À tous le personnel de l'association sonatrach/ Total/ Repsol.

À tous ceux qui ont participé à ma formation.

Que dieu vous bénisse.

À mon maître, directeur de ce travail Monsieur **BACHA Nacer Eddene** et Co-Promoteur **AZINE Mohamed**

Vous m'avez fait l'honneur de diriger ce travail. Nous vous prie de voir dans ce travail, l'expression de mes estime et de mes reconnaissances.

**T.Youssef**

## Dédicace

Je dédie ce travail :

À celui qui m'a indiqué la bonne voie en me rappelant que la volonté fait toujours les grands hommes;

A mon père.

À celle qui a attendu avec patience les fruits de sa bonne éducation ;

A ma mère.

À mes frères et mes sœurs, en témoignage de mon amour et de ma profonde admiration; qui dieu vous protège et vous prête bonne santé et longue vie.

À mes oncles, tantes, cousins et cousines; en témoignage de mon amour, de mon profond respect et de ma reconnaissance.

À mes grands père et mère; que dieu vous protège.

À la mémoire de mes grands-parents ; que dieu accorde sa miséricorde.

À tous mes maîtres de la première et deuxième année master en génie mécanique et matériaux surtout **Dr : TEMMAR M.**

À tous le personnel de l'association sonatrach/ Total/ Repsol.

À tous ceux qui ont participé à ma formation.

Que dieu vous bénisse.

À mon maître, directeur de ce travail Monsieur **BACHA Nacer Eddene** et Co-Promoteur **AZINE Mohamed**

Vous m'avez fait l'honneur de diriger ce travail. Nous vous prie de voir dans ce travail, l'expression de mes estimes et de mes reconnaissances.

**H.Imed**

# Sommaire

1 Introduction générale.....	1
Chapitre 1:Contexte Industriel	
1.1. Introduction :.....	2
1.2 Présentation de site GTFT.....	3
1.2.1. Historique de production :.....	3
1.2.2 Situation géographique et géologie .....	3
1.3 Unité de traitement de gaz.....	5
1.3.1 Capacité de production.....	5
1.3.2 Le stockage .....	5
1.4 Description du projet :.....	6
1.4.1 Fiche technique du projet:.....	6
Chapitre 2 :Généralité sur les pipelines	
2.1 Introduction.....	7
2.2 Définition.....	8
2.3 Procède de fabrication des tubes de pipelines :.....	8
2.3.1 Les tubes soudés sous forme spirale.....	8
2.3.2 Les tubes soudés sous forme longitudinale.....	9
2.3.2.1 Croquage et formage:.....	9
2.3.2.2 Soudage :.....	10
2.3.2.3 Expansion et calibrage : .....	11
2.3.3 Les tubes sans soudure.....	11
2.4 Evolution des caractéristiques mécaniques des tubes.....	12
2.4.1 Elaboration des aciers pour tubes.....	12
2.4.2 Caractéristiques métallurgiques.....	12
2.5 Les types de pipeline.....	14
2.6 Conclusion.....	14
Chapitre 3: Soudage des pipelines	
3.1 Introduction.....	15
3.2 Définition du soudage.....	15
3.2.1 Procédés de soudage .....	16

3.2.2 Soudage manuel à l'arc avec électrode enrobée SMAW sur chantier (Projet gazoduc 10" ILLIZI- DJANET).....	16
3.2.2.1 Exigences des conditions climatiques.....	16
3.2.2.2 Chanfreinage.....	17
3.2.2.3 Endommagement des extrémités de tube.....	17
3.2.2.4 Alignement des Tube (Clampsage).....	17
3.2.2.5 Câble de Masse.....	18
3.2.2.6 Equipement de soudage.....	18
3.2.2.7 Préchauffage : .....	19
3.2.2.8 Exécution des soudures.....	19
3.2.2.9 Nettoyage du cordon de soudure par brossage.....	20
3.2.2.10 Réparation de Soudage.....	20
3.2.2.11 Température Interpasse.....	20
3.2.2.12 Marquage.....	20
3.2.2.13 Moyens Humains et Matériels.....	21
3.3 Contrôle de soudage.....	23
3.3.1 Contrôle non destructif : .....	23
3.3.1.1 Le contrôle visuel.....	23
3.3.1.2 Contrôle par ressuage.....	24
3.3.1.2.1 Principe du contrôle par ressuage.....	24
3.3.1.2.2 Applications du contrôle par ressuage.....	25
3.3.1.2.3 Le matériel utilisé.....	25
3.3.1.2.4 Différentes étapes du contrôle par ressuage.....	25
3.3.1.2.4.1 Le nettoyage (dégraissage).....	25
3.3.1.2.4.2 Déposition du pénétrant.....	26
3.3.1.2.4.3 Elimination de l'excès de pénétrant.....	27
3.3.1.2.4.4 Application du révélateur.....	27
3.3.1.3 Le contrôle par radiographie ou gamme graphie.....	27
3.3.1.3.1 Entendu de contrôle par radiographie $\gamma$ .....	28
3.3.1.3.2 Matériels utilise.....	28
3.3.1.3.2.1 Radio-élément.....	28
3.3.1.3.2.2 Films, écrans et filtre.....	28



3.3.1.3.2.3	Ecran de blocage.....	29
3.3.1.3.2.4	Indicateurs de qualité d'image (IQI).....	29
3.3.1.3.3	Matériel d'examen des radiographies.....	30
3.3.1.3.3.1	Calcul du temps d'exposition.....	30
3.3.1.3.3.2	Densité.....	31
3.3.1.3.3.3	Flou géométrique (Ug ).....	31
3.3.1.3.3.4	Sensibilité.....	31
3.3.1.3.3.5	Identification des radiogrammes.....	31
3.3.1.3.4	Développement.....	31
3.3.1.3.4.1	Chambre noir.....	32
3.3.1.3.4.2	Eclairage de la chambre noire.....	32
3.3.1.3.4.3	Organisation de la chambre noire.....	32
3.3.1.3.4.4	Le processus.....	32
3.3.1.3.4.4.1	Agitation.....	32
3.3.1.3.4.4.2	Le bain d'arrêt ou le rinçage.....	32
3.3.1.3.4.4.3	Le fixage.....	33
3.3.1.3.4.4.4	Le lavage.....	33
3.3.1.3.4.4.5	Le séchage.....	34
3.3.1.3.4.5	Nettoyage des cuves.....	34
3.3.1.3.4.5.1	Température des cuves.....	34
3.4	Défauts de soudage.....	35
3.4.1	Les fissure.....	35
3.4.1.1	Généralités .....	35
3.4.1.2	La fissuration à chaud :.....	36
3.4.1.3	La fissuration à froid :.....	36
3.4.1.4	Orientation des fissures :.....	36
3.4.1.4.1	Les fissures longitudinales.....	37
3.4.1.4.2	Les fissures transversales.....	37
3.4.1.5	Types des fissures.....	38
3.5	Revêtement des pipelines.....	38

3.5.1	Spécification et conditions du revêtement .....	38
3.5.2	Matériels et Equipements.....	39
3.5.3	Préparation de surface sur chantier.....	39
3.5.3.1	Condition de tube :.....	39
3.5.3.2	Nettoyage.....	39
3.5.3.3	Chanfreinage.....	39
3.5.3.4	Sablage.....	39
3.5.3.5	Contrôle de rugosité .....	40
3.5.4	Application du revêtement .....	40
3.5.4.1	Préparation de l'époxy primaire.....	40
3.5.4.2	Nettoyage après sablage :.....	40
3.5.4.3	Application de l'époxy primaire :.....	40
3.5.4.4	Application du joint thermo rétractable HTLP80 :.....	40
3.5.5	Inspection et contrôle.....	42
3.5.5.1	Contrôle visuel :.....	42
3.5.5.2	Passage du balai électrique :.....	42
3.5.6	Réparation du revêtement :.....	42
3.5.6.1	Matériels et Equipements :.....	42
3.5.6.2	Réparation de surface :.....	43
3.5.6.3	Préchauffage :.....	43
3.5.6.4	Application de ruban PERPFILLER :.....	44
3.5.6.5	Application de PERP :.....	44

#### Chapitre 4: Endommagements des pipelines

4.1	Introduction.....	45
4.2	Un peu d'histoire sur les méthodes d'évaluation des pipelines à défauts.....	45
4.3	Différents types de défauts précurseurs de la rupture des canalisations.....	46
4.3.1	Phénomène de corrosion.....	46
4.3.1.1	Définition de la corrosion.....	46
4.3.2	Fissure.....	47
4.3.3	Eraflure.....	48
4.3.4	Enfoncement.....	48
4.3.5	Endommagement combiné (éraflure+ enfoncement).....	Erreur ! Signet non défini.

4.4 Inspection et maintenance des canalisations en service.....	50
4.5 Conclusion.....	51
Chapitre 5: Phénomène de corrosion	
5.1 Introduction.....	51
5.2 Définition de la corrosion.....	52
5.3 Différents types de corrosion.....	52
5.4 Formes de corrosion.....	52
5.4.1 Corrosion généralisée (uniforme).....	53
5.4.2 Corrosion par piqûres.....	54
5.4.3 Corrosion caverneuse.....	54
5.4.4 La corrosion galvanique.....	54
5.4.5 Corrosion intergranulaire.....	55
5.4.6 La corrosion sous contrainte.....	55
5.4.7 Corrosion érosion.....	56
5.4.8 Corrosion-cavitation.....	57
5.4.9 Corrosion par fatigue.....	57
5.4.10 Corrosion bactérienne.....	57
5.5 Corrosion des pipelines.....	58
5.5.1 Corrosion externe.....	58
5.5.2 Corrosion interne.....	58
5.6 Moyens utilisés pour le contrôle et le suivi de la corrosion.....	59
5.6.1 Contrôle par sonde à coupon (Contrôle perte de masse) :.....	59
5.6.1.1 Montage du coupon.....	60
5.6.1.2 Durée de contrôle.....	60
5.6.2 Contrôle par sonde à résistance électrique.....	60
5.6.2.1 Principe :.....	60
5.6.3 Contrôle par mesure d'épaisseur :.....	61
5.6.3.1 Contrôle par ultrasons.....	61
5.6.3.2 Principe.....	62
5.6.3.3 Avantages.....	62
5.7 Protection contre la corrosion.....	62
5.7.1 Protection cathodique.....	63
5.7.1.1 Protection par courant imposé.....	64

5.7.1.2	Points de mesure.....	65
5.7.1.3	Mesure de potentiel.....	65
5.7.2	Injection d'inhibiteur de corrosion.....	65
5.7.2.1	Le système d'injection d'inhibiteur de corrosion :.....	65
5.8	Conclusion.....	66
<b>Chapitre 6 : Modélisations &amp; Simulation numérique</b>		
6.1	Introduction.....	66
6.2	Description du logiciel.....	67
6.2.1	Le module Part (Pièce) : .....	68
6.2.2	Le module Property : .....	68
6.2.3	Le module Assembly (Assemblage) : .....	69
6.2.4	Le module Step (Etape) : .....	69
6.2.5	Le module Interaction : .....	70
6.2.6	Le module Load (Les charges) : .....	71
6.2.7	Le module Mesh (Maillage) : .....	72
6.2.8	Le module Job : .....	72
6.2.9	Le module Visualization (Visualisation) : .....	73
6.2.10	Le module Sketch (Esquisser) : .....	73
6.2.11	Système d'unités dans le code de calcul Abaqus.....	74
6.3	Simulation numérique.....	74
6.3.1	Rappel sur le critère de Von Mises.....	74
6.3.2	Modèle géométrique.....	75
6.3.3	Modélisation numérique d'un pipeline sans fissure.....	75
6.3.3.1	Représentation géométrique.....	76
6.3.3.2	Les caractéristiques mécaniques et les dimensionnes du matériau.....	76
6.3.4	Modélisation numérique d'un pipe comportant un fissure.....	77
6.3.4.1	Représentation géométrique.....	77
6.3.5	Modélisation numérique d'un pipe avec fissure réparée par patch en composite .....	77
6.3.5.1	Représentation géométrique.....	77
6.3.6	.les conditions aux limité.....	78
6.3.7	Maillage.....	80
6.4	Résultats et interprétations.....	81

6.4.1	Variation des contraintes de Von Mises dans un pipe sans fissure.....	81
6.4.2	La variation des contraintes de Von Mises dans un pipe fissuré.....	81
6.4.3	La variation des contraintes de Von Mises dans pipe réparée par patch en composite.....	82
6.4.3.1	l'effet de l'épaisseur du patch.....	82
6.4.3.2	Effet de l'épaisseur de la colle.....	83
6.4.3.3	Effet de la pression interne du pipe sur la réparation par patch.....	83
6.5	Conclusion.....	84
	Conclusion..	85
	Référence bibliographie .....	86

## Liste des Figures

Figure 1.1 Situation Géographique De L'usine GTFT.....	4
Figure 2.2: Les pipelines.....	7
Figure 2.3 : Technique de fabrication des tubes soudés en spirale .....	8
Figure 2.4 : Croquage .....	10
Figure 2.5 : Formage sous forme "U" .....	10
Figure 2.6 : Formage sous forme "O" .....	10
Figure 2.7: Soudure longitudinale.....	11
Figure 2.8 : Expansion.....	11
Figure 2.9 : Fabrication de pipe sans soudure.....	12
Figure 2.10: Taux de carbone dans les aciers pour tubes [8].....	13
Figure 2.11 : Taux de carbone équivalent dans les aciers pour tubes [8].....	13
Figure 3.12 : Cordon de la soudure .....	15
Figure 3.13 : Le chanfreinage du gazoduc.....	17
Figure 3.14: Début de clampsage.....	17
Figure 3.15 : Fin de clampsage .....	17
Figure 3.16: Câble de masse .....	18
Figure 3.17: le préchauffage avec chalumeau.....	18
Figure 3.18 : Exécution de soudage .....	19
Figure 3.19 : Cordon de soudure nettoyée.....	20
Figure 3.20 : Identification du joint soudure .....	20
Figure 3.21: Centreuse.....	21
Figure3.22: Side Boom.....	21
Figure 3.23: La Grue .....	22
Figure 3.24 : Poste à souder.....	22
Figure 3.25 : Outil d'alignements des tubes (Clamps).....	22
Figure 3.26: matériel utilise dans contrôle par ressuage .....	25
Figure 3.27 : Nettoyage d'un Piquage fissuré d'une ligne .....	25
Figure 3.28 : Déposition du pénétrant .....	26
Figure 3.29 : Application du révélateur.....	27
Figure 3.30 : Principe du contrôle radiographique ou gamma graphique .....	28
Figure 3.31 : Négatoscope .....	30

Figure 3.32: le processus de développement du film .....	33
Figure 3.33 : le four de séchage des cuves .....	34
Figure 3.34 : Cordon de soudure avec les défauts (cratère, morsures/caniveaux, Fissure, Amorces d'arc).....	35
Figure 3.35 : L'image radiographique fissure longitudinale .....	37
Figure 3.36 : L'image radiographique fissure transversale .....	37
Figure 3.37 : Différents type des fissures .....	38
Figure 3.38 : Joint soudure enrobée par manchon thermo rétractable .....	42
Figure 3.39 : Enrobage endommagée d'un gazoduc .....	43
Figure 3.40: Préchauffage le partie endommagée de l'enrobage.....	43
Figure 3.41 : Application de PERP .....	44
Figure 4.42 : agressions corrosives sur la paroi externe d'une canalisation métallique .....	47
Figure 4.43 : Corrosion galvanique.....	47
Figure 4.44 : Fissure dans des joints soudés .....	48
Figure 4.45 : Exemple de pipeline contenant une entaille.....	48
Figure 4.46 : Un pipeline enfoncé .....	49
Figure 4.47 : Géométrie d'un défaut combiné dans un enfoncement .....	50
Figure 4.48 : Photo d'une éraflure .....	50
Figure 4.49 Des pipelines en service.....	50
Figure 5.50: Formes principales de corrosion regroupées par leur facilité d'identification.....	53
Figure 5.51 : (a) Schéma illustratif de la corrosion uniforme.....	54
Figure 5.51 : (b) Image de corrosion uniforme.....	54
Figure 5.52 : Corrosion galvanique.....	55
Figure 5.53 : Corrosion intergranulaire d'un inox.....	55
Figure 5.54: Corrosion sous contrainte d'un tube en acier AISI 304 (agrandissementX35)...	56
Figure 5.55 : La corrosion érosion .....	57
Figure 5.56 : Représentation schématique de quelques étapes dans le processus de cavitation. .....	57
Figure 5.57 : Colonie de bactéries sur un acier inoxydable.....	58
Figure 5.58: Corrosion externe d'un pipeline exposé à l'air .....	58
Figure 5.59: Corrosion interne de pipeline .....	59
Figure 5.60 : Photo d'un coupon.....	60
Figure 5.61: L'emplacement du coupon dans le pipe .....	60
Figure 5.62 : Instrument de mesure.....	61

Figure 5.63 : Probe à fil bouclé.....	61
Figure 5.64 : Positionnement de probe dans la pipe .....	61
Figure 5.65 : Le mesureur d'épaisseur .....	63
Figure 5.66 : Protection cathodique .....	64
Figure 5.67 : L'électrode Cu/CuSO4.....	65
Figure 5.68: Le système d'injection d'inhibiteur de corrosion.....	66
Figure 6.69 : Fenêtre de l'interface.....	68
Figure 6.70 : Fenêtre de module Part .....	68
Figure 6.71 : Fenêtre de module Property .....	69
Figure 6.72 : Fenêtre de module Assembly .....	69
Figure 6.73 : Fenêtre de module Step.....	70
Figure 6.74 : Fenêtre de module Interaction.....	71
Figure 6.75 : Fenêtre de module Load.....	71
Figure 6.76: Fenêtre de module Mesh.....	72
Figure 6.77 : Fenêtre de module Job .....	72
Figure 6.78 : Fenêtre de module Visualizatoin .....	73
Figure 6.79 : Fenêtre de module Sketch.....	73
Figure 6.80 : Gazoduc 10" dans le projet ILLIZI-DJANET.....	75
Figure 6.81: configuration de type .....	76
Figure 6.82 : Configuration d'un pipe avec fissure.....	77
Figure 6.83 : Configuration type de réparation.....	78
Figure 6.84 : L'élimination de mouvement aux niveaux des surfaces rouge suivant l'axe OZ .....	79
Figure 6.85 : L'élimination de mouvement aux niveaux des surfaces rouge suivant l'axe OX .....	79
Figure 6.86 : Type d'élément utilisé pour la génération du maillage .....	80
Figure 6.87 : La variation des contraintes de Von Mises dans un pipe sain.....	81
Figure 6.88 : La variation des contrainte de Von Mises dans un pipe fissure sous différents pressions .....	82
Figure 6.89: La variation des contraintes de Von Mises en fonction de l'épaisseur du patch .82	
Figure 6.90 : Effet de l'épaisseur de l'adhésif sur les variations des contraintes de Von Mise83	
Figure 6.91: Effet de la pression interne d'un pipe sur les variations des contraintes de Von Mises.....	84



# Liste des Tableaux

Tableau 3.1 : Les indicateurs de qualité d'image.....	29
Tableau 3.2 : Différents épaisseurs des indicateurs d'image.....	30
Tableau 3.3 : Température des cuves.....	34
Tableau 6.4 : Système d'unités pour la programmation .....	74
Tableau 6.5 : les propriétés mécaniques du matériau constituant le pipe.....	76
Tableau 6.6 : Propriétés mécanique des différents matériaux.....	78

## Liste des abréviations

GPL	Gaz Pétrolier liquéfier
GTFT	Gropement Tin Fouy Tabnkourt
TFT	Tin Fouy Tabnkort
TRC	Transport Reparation Canalisation
ENGTP	Entreprise National de Grand Travaux Pétrolier
ENGCB	Entreprise National de Grande Construction Bâtiment
HSLA	High Strength aw Alloy Steel
HLE	Haute Limite Elastique
API	American Petrolier Institute
CAE	Computer Aided Engineering
FEM	Méthode Elément Finis
ASME	American Society of Mechanical Engineers, Etats-Unis.
ANSI	American National Standards Institute, Etats-Unis.
ZF	zone fondue
ZAT	La zone affectée thermiquement
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
GTAW	Gaz Tungsten Arc Welding
GMAW	Gaz Metal Arc Welding
WPS	Welding Procedures Specifications
IQI	Indicateur Qualité d' Image
MIG	Metal Inerte Gaz

# Liste des nomenclateurs

$\emptyset$	Diamètre
C <sub>éq</sub>	Carbone équivalente
C	Carbone
Ep :	Epaisseur
t :	Temps de pose par h
Q :	Facteur d'exposition
D	Distance source film en mètre
K	Coefficient de rapidité des films
N :	Facteur correctif de densité
A	Activité de la source.
F	Dimension de la source (mm)
t :	Distance source de radiation au film
D :	Plus grande distance défaut – film (épaisseur)
U <sub>g</sub> :	Le flou géométrique
S %	Sensibilité
d	le plus petit diamètre du fil visible
t :	épaisseur à radiographiée
T° :	Température
K :	Facteur d'intensité de contraintes
$\sigma_e$	Contrainte équivalente de Von Mises
$\sigma_{\theta\theta}$	Contrainte circonférentielle

$\sigma_{zz}$	Contrainte de traction
$\sigma_{rr}$	Contrainte radiale
t	L'épaisseur du tube
L	Langueur du tube
E1	Module de Young longitudinal
E2	Module de Young transversal
E3	Module de Young transversal
$\nu_{12}$	Coefficient de Poisson longitudinal
$\nu_{13}$	Coefficient de Poisson transversal
$\nu_{23}$	Coefficient de Poisson transversal
G12	Module de cisaillement
G13	Module de cisaillement G13
G23	Module de cisaillement

### Introduction générale

Dans les secteurs industriels, les canalisations ont été employées en tant que moyens les plus économiques et les plus sûres pour transporter du pétrole et du gaz. [1].

Le transport du gaz dans des conditions économiques nécessite l'utilisation des pressions de transport aussi élevées que possible. Ceci nécessite l'emploi d'acier de plus en plus résistant dont les propriétés doivent être adéquates auxquelles il est soumis. Les sites de production de gaz sont souvent très éloignés des centres de consommation. Le gaz est alors acheminé à l'aide de canalisations sur des distances de plusieurs milliers de kilomètres.

Un pipeline est une structure dont l'intégrité doit être garantie. En particulier, pour éviter tout amorçage de rupture. Le dimensionnement de la structure est effectué pour travailler dans le domaine élastique avec un coefficient de sécurité adéquat, ce qui autorise une taille critique de défaut. De plus, la température de transition ductile fragile de l'acier est choisie de façon à empêcher une rupture fragile du tube. La sécurité des installations demande une bonne ténacité pour éviter la ruine de la structure par propagation rapide des fissures. Les réseaux gazoducs sont composés d'une dizaine de nuances différentes (Grade A, Grade B, X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70, X80, ..., X120) [2]. Les grades B, X52 et le X60 représentent environ 70% de la diversité de ces réseaux. Mais, ces canalisations sont souvent l'objet d'agressions de diverses sortes. Des études récentes faites par [3], montre que plus de 50% des ruptures sont causées par des agressions extérieures. Durant de nombreuses années, les seules solutions possibles pour les canalisations endommagées étaient de les remplacer par d'autres ou de leur souder une nouvelle section. Ces procédures imposent généralement des arrêts de production. De plus, le travail à chaud est parfois exclu dans les zones dangereuses. Enfin, les problèmes métallurgiques causés par la soudure ajoutent des inconvénients à cette solution compliquée et coûteuse. Afin d'éviter le remplacement de la structure endommagée, pour des raisons économiques et techniques, une solution plus récente consiste à coller un patch composite sur la zone endommagée à l'aide d'une couche d'adhésif [4-5].

Notre projet de fin d'étude a été réalisé au sein d'EN-GTP (Projet Gazoduc ILLIZI-DJANET) et l'Association Sonatrach/Total/Repsol qui a pour but de faire connaître les méthodes de contrôles et de maintenance des pipelines.

Le travail que nous présentons dans ce mémoire est divisé en six chapitres et une conclusion générale :

**Chapitre 1** : Présentation du champ GTFT&Projet gazoduc ILLIZI-DJANET

**Chapitre 2** : Généralités sur les pipelines

**Chapitre 3** : Soudage des pipelines

**Chapitre 4** : Endommagement des pipelines.

**Chapitre 5** : Phénomène de corrosion

**Chapitre 6** : Modélisation &simulations numérique

**Conclusion générale.**

**1.1. Introduction :**

L'Algérie a acquis en 20 ans, une expérience dans le domaine de GPL qui est devenue un produit de large consommation (2,4 millions tonnes/an), répondant aux options de la politique énergétique nationale. L'Algérie dispose d'un vaste potentiel capable d'alimenter des programmes d'exportation de 9.7 millions tonnes/an.

Le GTFT (groupement Tin Fouye Tabenkourt) est l'un des groupements les plus importants en Algérie, depuis sa mise en service [6].

**1.2 Présentation de site GTFT****1.2.1. Historique de production :**

Le site de gaz de Tin Fouye Tabankourt a été découvert en 1961 par le sondage de TFE-1. L'huile n'a été rencontrée qu'en 1965 dans le forage TFEZ. Le groupement de trois sociétés qui sont Sonatrach, Total, et Repsol ont mis en production le champ de gaz à condensât de TFT le 22 mars 1999. Ce champ est exploité, conjointement, par les trois entreprises qui sont liées par un contrat de partage de production, signé en janvier 1996 pour une durée de vingt ans à compter du démarrage de la production. Cette dernière a démarré au rythme de 5 millions m<sup>3</sup>/jour de gaz brut et a atteint après quelques semaines le débit nominal de 20 millions m<sup>3</sup>/jour, soit environ 7 milliards de m<sup>3</sup>/an. Le champ comprend 82 puits forés dont 78 en production et 4 en arrêt [6].

**1.2.2 Situation géographique et géologie :**

Le champ de Tin Fouye Tabankourt (TFT) est situé à environ 400 km au sud est de Hassi Messaoud et de 300 km au nord ouest de In Amenas. (figure 1)

La superficie du champ de GTFT est de 1500 km<sup>2</sup> avec des dimensions de 50 km de l'ouest vers l'est, et 47 km du sud vers le nord. Sa structure fait partie d'un ensemble de structure formant le bassin d'Illizi, qui est situé dans la partie sud Est du Sahara Algérien et qui est limité au sud par le massif du Hoggar, à l'ouest par le haut fond Amguid-El Biod Hassi Messaoud. Le bassin d'Illizi s'étend vers le nord jusqu'à la latitude 32° N approximativement et se prolonge à l'est jusqu'en Libye. Une grande partie de cette région est recouverte de dunes, notamment dans la partie septentrionale où se trouve l'Erg oriental qui est d'accès difficile à cause de hautes dunes qui le recouvrent.

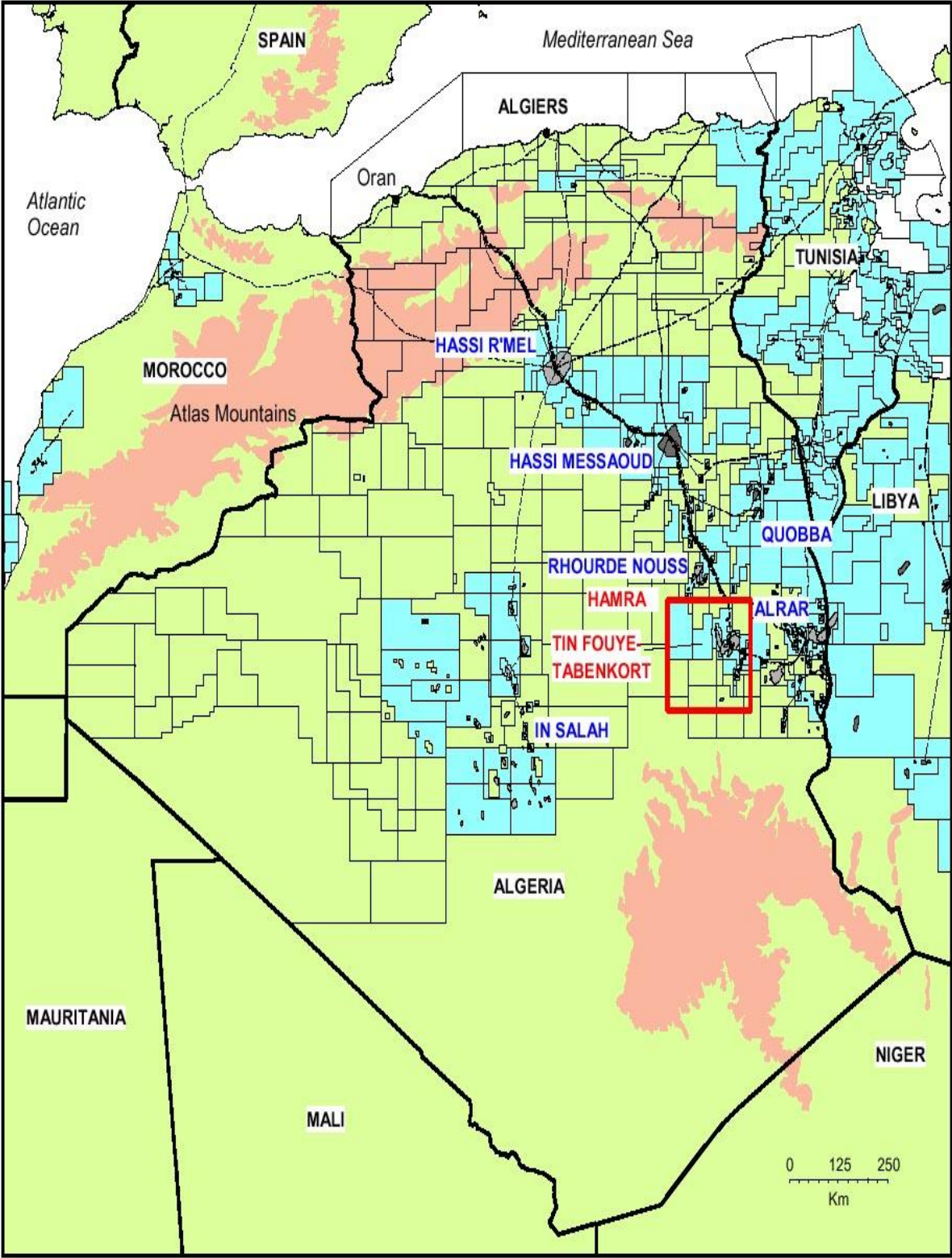
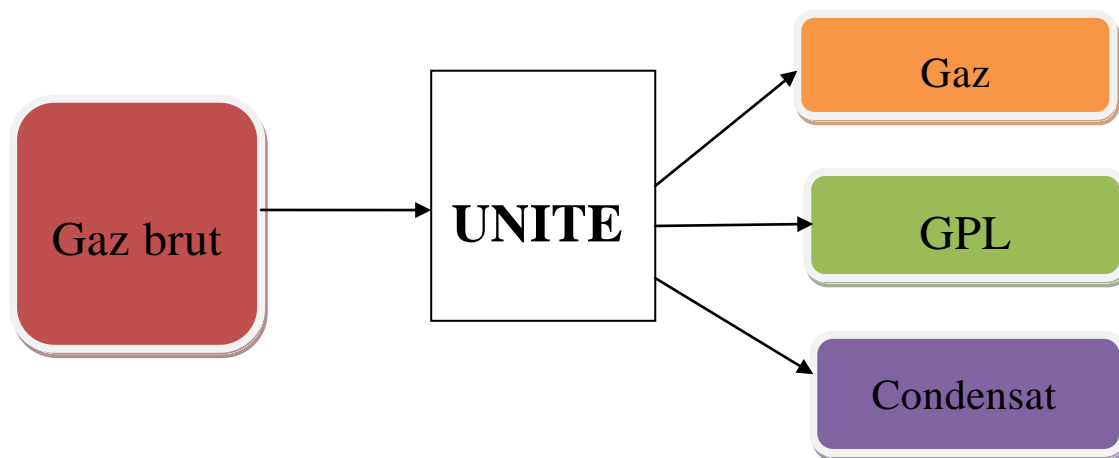


Figure 1.1 Situation Géographique De L'usine GTFT



### 1.3 Unité de traitement de gaz

- Installation de réception.
- Deux trains identiques de traitement.
- Section de compression de gaz résiduel.
- Section de stockage et expédition de GPL et condensat.
- Boosting
- Les utilités communes et de process.



#### 1.3.1 Capacité de production :

La capacité de production de cette unité de traitement est :

- ⇒ Gaz sec: 14 Millions m<sup>3</sup>/Jour
- ⇒ Condensat: 1470 Tonne/Jour.
- ⇒ GPL: 1876 Tonne/Jour.

#### 1.3.2 Le stockage :

Le stockage dans le groupement est assuré par :

- ⇒ Trois sphères de 500 m<sup>3</sup> pour le GPL.
- ⇒ Deux bacs de 6000 m<sup>3</sup> pour le condensat.
- ⇒ Un bac de 2000 m<sup>3</sup> pour le condensat off spec

**1.4 Description du projet :**

Le Projet comprend la réalisation d'un pipe line de diamètre de 10" (254 mm) d'une longueur égale à 379 km pour alimenter en gaz la ville et la centrale électrique de DJANET, à partir du champ de production ASSEKAIFAF situé à 80 Km du terminal d'ILLIZI.

**1.4.1 Fiche technique du projet:**

- ➡ Dénomination du Projet : GAZODUC Ø 10'' ILLIZI - DJANET
- ➡ Localisation : ILLIZI / BORDJ EL HAOUES / DJANET
- ➡ Maitre de l'Ouvrage : SONATRACH ACTIVITE TRC
- ➡ Entrepreneurs
  - Construction : GROUPEMENT ENGTP / ENGCB
  - Engineering & Procurement : ENGTP

## 2.1 Introduction

Les pipelines d'exploitation de gaz sont constitués de tubes d'acier soudés bout à bout, recouverts d'un matériau isolant (polyéthylène, polypropylène, ..) contribuant à leur protection contre la corrosion. Ils peuvent être également revêtus intérieurement pour améliorer l'écoulement du fluide transporté ou pour prévenir la corrosion interne si le gaz transporté est corrosif.

Selon leur nature d'usage, les pipelines sont exploités par des industriels de l'exploration production, du transport ou de la distribution. L'exploitation d'un pipeline consiste à maintenir l'ouvrage en bon état de service dans les conditions optimales de sécurité et de coût. Aujourd'hui, il y a des millions de kilomètres de pipelines qui sont largement utilisés pour transporter de l'eau, du gaz et du pétrole soit en aérien soit enterré ou bien en dessous de la mer, depuis les sources originales jusqu'aux usines de traitement des produits (filtration, raffinage, liquéfaction,...) (Figure 2.2).

Les pipelines sont susceptibles d'être attaqués par les phénomènes de corrosion interne et externe résultant de défauts tel que fissuration, engendrant principalement des fuites et des ruptures. Des accidents, se traduisant parfois par des dégâts catastrophique (dégâts humains, pollution du milieu naturel, frais supplémentaire de réparation, arrêt prolongé des unités de production) se produisent sporadiquement au cours de leur exploitation.



Figure 2.2: Les pipelines

## 2.2 Définition

Un pipeline est une conduite destinée à l'acheminement de matières gazeuses, liquides, solides ou poly phasiques, d'un endroit à un autre. Le diamètre nominal d'une canalisation peut aller de trente millimètre environ (1.25") pour des fluide spéciaux jusqu'à plus de trois mètres vingt (68") pour les adductions d'eau. [7]

Lorsqu'une canalisation a un très petit diamètre (moins de trente millimètres environ), on parle plutôt de tuyauterie.

Les caractéristiques des tubes (diamètre, épaisseur, type d'acier) sont définies par calcul en fonction de plusieurs paramètre tels que : le débit souhaité, le choix du profil du terrain, les zones environnementales traversées, tout en respectant la réglementation en vigueur.

## 2.3 Procède de fabrication des tubes de pipelines :

La multiplicité des diamètres et des épaisseurs de tubes et le développement avec le temps de leurs techniques de fabrication [8], constituent les raisons de la diversité du réseau de transport gazier algérien. On retrouve :

- Tube soudés en spirale
- Tubes en soudure longitudinale
- Tubes sans soudure

### 2.3.1 Les tubes soudés sous forme spirale

Les procédures de fabrication des tubes soudés en spirale sont faites par cintrage de bande de feuilles d'acier de la forme d'un tuyau et la soudure ensemble. Cette technique de production passe par des étapes, comme le précise la figure 2.3. Le soudage se produit ici sur la production de tubes en spirale qui sont généralement fournis.

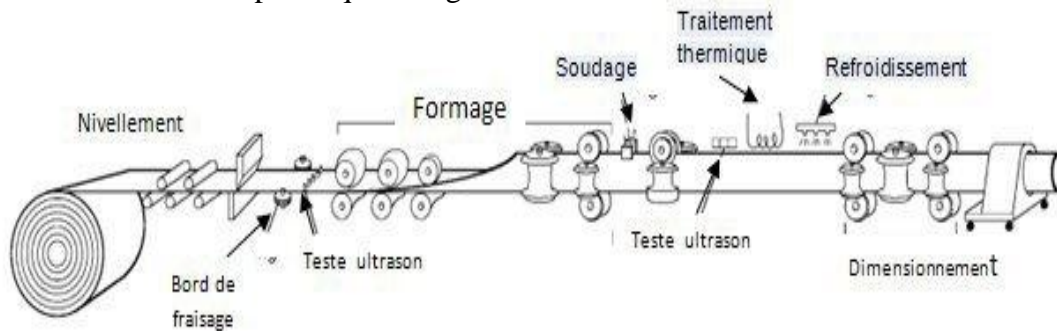


Figure 2.3 : Technique de fabrication des tubes soudés en spirale

La fabrication des tubes spirale peut être subdivisée en opérations principales suivantes :

- La préparation de la bande
- La bande de raboutage
- Le cintrage
- Le soudage
- La parachèvement
- La réception et inspection

La préparation de la bande et des rives de la bande ainsi que des soudures de raboutage influent directement sur la qualité du tube. A cause de l'importance, nous attachons à cette dernière, dans cet exposé, une attention particulière.

A l'entrée de la machine pour tubes spirale, on effectue les opérations suivantes :

- Déroulage de la bande
- Dressage de la bande de cisailage
- Chanfreinage des rives de la bande
- Cambrage des rives pour éliminer l'effet de toit

A l'entrée de la cage de formage, on effectue la passe intérieure de la soudure alors que la passe extérieure est effectuée sur le tube formé. Les procédés usuels pour la coupe sont :

- Oxycoupage
- Découpage au plasma

### **2.3.2 Les tubes soudés sous forme longitudinale**

La technique de fabrication des 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 :

#### **2.3.2.1 Croquage et formage:**

Cette étape où la plaque va être pliée aux niveaux de l'extrémité. L'objectif de cette opération est de faciliter le processus de pliage par les étapes suivantes: à partir de 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" comme c'est illustré aux figures 2.4, figure 2.5 et figure 2.6.

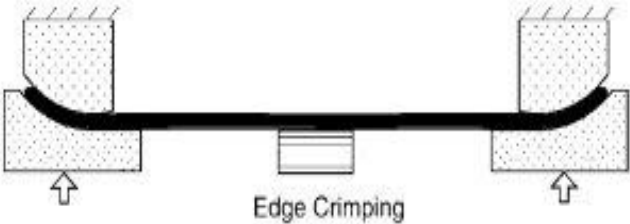


Figure 2.4 : Croquage

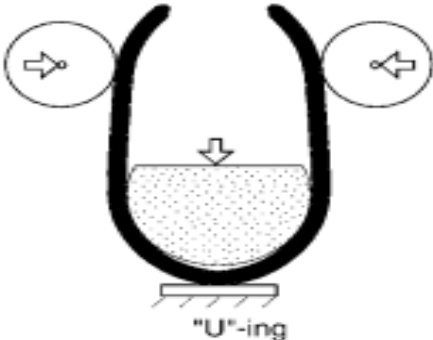


Figure 2.5 : Formage sous forme "U"

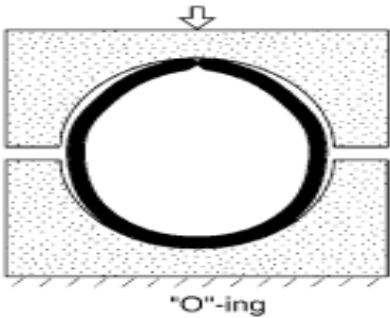


Figure 2.6 : Formage sous forme "O"

### 2.3.2.2 Soudage :

Le soudage dépend ici de la technique de soudage à l'arc submergé à l'aide d'une tête soudeuse automatique. Les soudures intérieures et extérieures grandissent longitudinalement sur une trajectoire d'une ligne droite. Généralement, le cordon intérieur est réalisé en premier comme le montre la figure 2.7.



Figure 2.7: Soudure longitudinale

**2.3.2.3 Expansion et calibrage :** L'objectif de cette opération est de façonner les tubes pour aboutir à une section parfaitement circulaire. L'expansion des diamètres ici est de plus de 1.5 au maximum (Voir principe sur la figure 2.8).

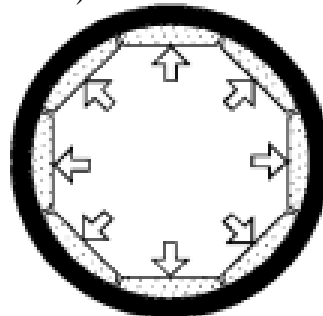


Figure 2.8 : Expansion

### 2.3.3 Les tubes sans soudure

Les tubes formés sans soudure, sont généralement de petits diamètres et de longueur de moins de 450 mm, les méthodes principales de fabrication de ce type de tube comportent, le métal est 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.

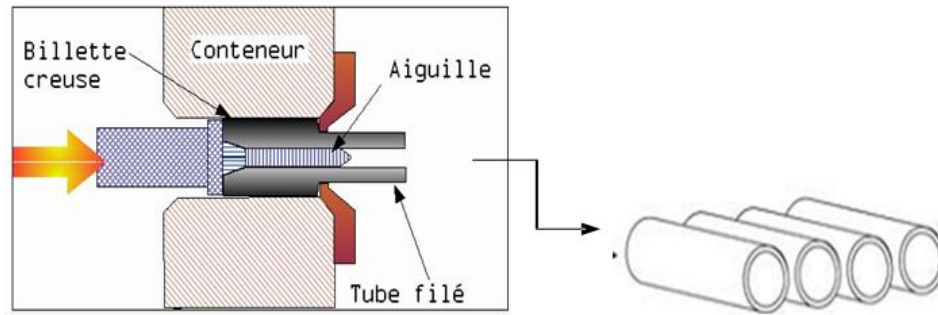


Figure 2.9 : Fabrication de pipe sans soudure

## 2.4 Evolution des caractéristiques mécaniques des tubes

### 2.4.1 Elaboration des aciers pour tubes

Les tubes modernes de transport de gaz sont produits à partir de tôles obtenues par laminage contrôlé. Ce procédé consiste à optimiser les conditions de laminage en imposant certains paramètres du procédé de mise en forme et de traitement thermique. Les propriétés des aciers de structure ferrite-perlite obtenus par laminage dépendent essentiellement de :

- ✓ La taille du grain ferritique,
- ✓ Du durcissement par précipitation sous forme de nitrures, carbures ou carbonitrures formés par réaction du carbone et de azote avec certains éléments de microalliage (V , Nb etc...).
- ✓ Durcissement de solution solide

### 2.4.2 Caractéristiques métallurgiques

Les producteurs des aciers pour tubes de transport de gaz ont sans cesse doublé leurs efforts pour améliorer les caractéristiques mécaniques de ces matériaux. Ils sont souvent contraints de rechercher un compromis entre des propriétés antagonistes. Parmi celles-ci, on peut citer :

- La limite d'élasticité,
- La résilience et la température de transition, ductile/fragile,
- La soudabilité.

La soudabilité est l'une des contraintes imposées qui limite le taux de carbone dans l'acier et, à un degré moindre, le taux de carbone équivalent lié à la présence d'éléments d'addition.



L'analyse chimique réalisée sur les aciers pour tubes constituant le réseau gazier montre que, dans l'ensemble et plus particulièrement pour les aciers récents, le taux de carbone est inférieur à la limite pour mener une bonne soudabilité des aciers. Ce taux de carbone faible dans les aciers récents est compensé par l'augmentation des teneurs en éléments d'addition. L'évolution du taux de carbone équivalent et du manganèse les aciers pour tubes est tracée en fonction du temps sur les figures (2.10) et (2.11). Le taux fictif de carbone équivalent est calculé par la formule suivant :

$$C_{eq} = C + Mn /6 + (Cr + Mo + V) /5 + (Ni + Cu) /15.$$

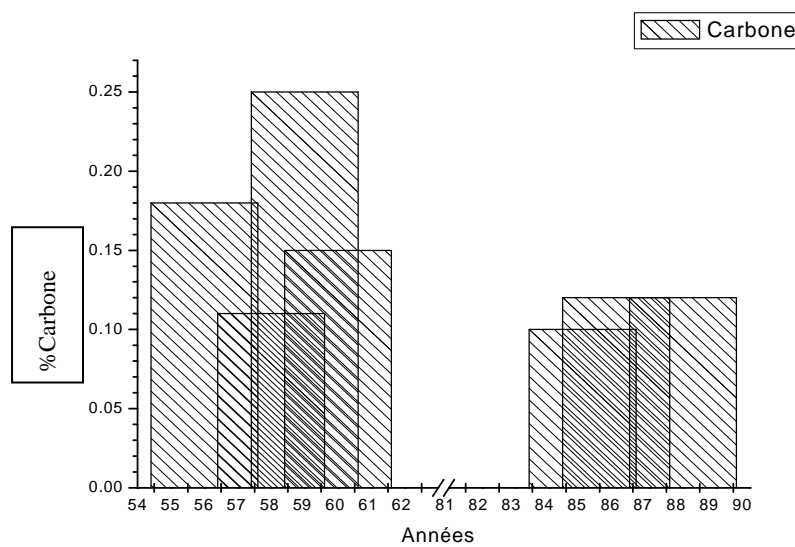


Figure 2.10: Taux de carbone dans les aciers pour tubes [8]

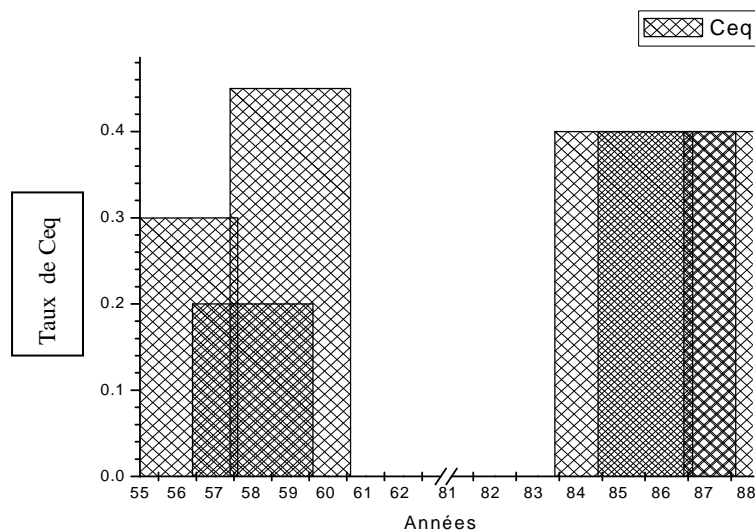


Figure 2.11 : Taux de carbone équivalent dans les aciers pour tubes [8]

### 2.5 Les types de pipeline

Le type et le nom d'une canalisation dépendent de la caractéristique physique et des conditions d'acheminement du produit à déplacer.

- ✓ Pour le gaz naturel, on parle de gazoduc.
- ✓ Pour le pétrole, on parle d'oléoduc.
- ✓ Pour l'eau industrielle, il s'agit de conduite ou d'émissaire. Le terme d'aqueduc est plutôt réservé aux ouvrages maçonnés avec écoulement libre de l'eau.
- ✓ Pour l'eau salée, on utilise le terme de saumoduc.
- ✓ Pour l'oxygène, on utilise le terme d'oxygénoduc.
- ✓ Pour l'hydrogène, on utilise le terme d'hydrogénoduc.

### 2.6 Conclusion

Nous avons vu dans ce deuxième chapitre la nécessité de l'utilisation des aciers à haute limite d'élasticité comme l'acier X42, X52, X60, X65, .....X100. Le développement, récent, de l'approche locale de la rupture a permis d'envisager l'évaluation de la nocivité des défauts fondée sur une démarche physique. Nous avons présenté une recherche bibliographique sur les pipelines de transport des hydrocarbures avec des analyses sur les différents procédés de fabrication et également sur leurs structures micrographiques afin de pouvoir à terme analyser puis certifier la tenue des pipelines.

Bien que le transport de produits dangereux par pipeline soit considéré comme un moyen de transport sûr et malgré la gestion rigoureuse du réseau de pipelines, des défaillances sont identifiées principalement dans la surveillance des travaux effectués dans ce couloir. La sécurité du réseau de transport et la disponibilité, exempte de perturbations de l'agent énergétique gaz naturel sont incontournables si l'on veut garantir la prospérité économique. La multiplication des accidents plus ou moins graves, notamment dus à la corrosion. Les cas les plus fréquents sont relatifs à des incidents amorcés à partir de défauts issus soit de l'élaboration du matériau, soit de la fabrication, de l'assemblage, de la réparation ou des conditions d'exploitations des tubes et qui ont conduit à la naissance et à la propagation des fissures superficielles où traversantes suivies de fuites.

### 3.1 Introduction

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante dans toutes les branches d'industrie et du bâtiment, car il permet d'adapter au mieux les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service. Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans métal d'apport dont la température de fusion est de même ordre de grandeur que celle du matériau de base.

### 3.2 Définition du soudage

Le soudage est une opération d'assemblage où la continuité métallique entre les pièces à souder est assurée par la fusion globale ou de proche en proche de leurs bords. On obtient ainsi, après solidification, un joint homogène de même caractéristique que le métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents. (Voir figure 3.12)

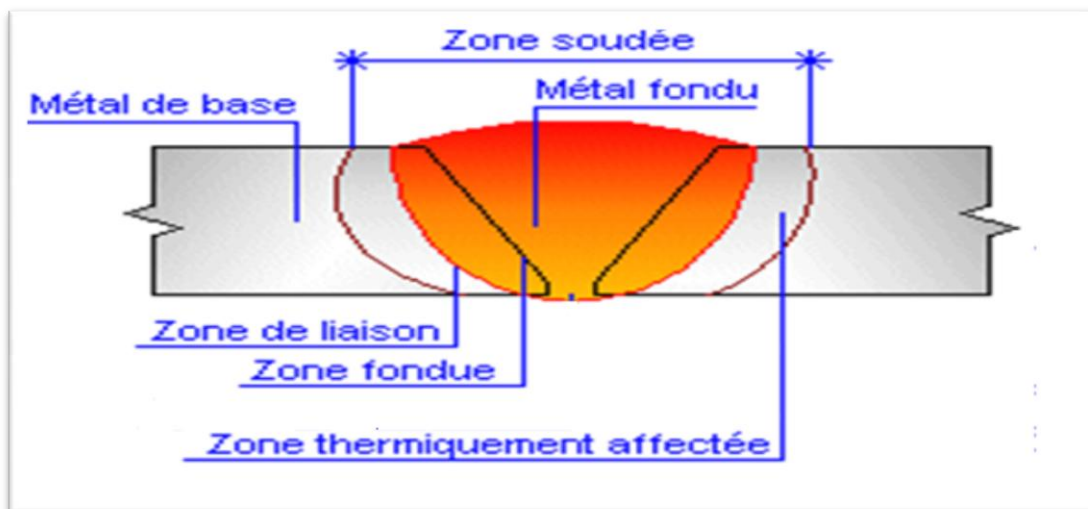


Figure 3.12 : Cordon de la soudure [9]

**La zone fondue** : (nommée ZF) zone où l'état liquide a été atteint et dans laquelle a été élaborée la composition chimique. La structure métallurgique obtenue après solidification, dépend du cycle de refroidissement. On distingue, au sein de cette zone, des gradients de concentration, de la partie la plus fondue vers la moins fondue. Il est donc possible d'examiner la composition d'une soudure ainsi que les variations de dureté.

**La zone affectée thermiquement** : (nommée ZAT) zone se trouvant en bordure de la zone fondue sur une largeur plus ou moins large ayant été soumise à l'élévation de température

sans être portée à la fusion. Le chauffage, la composition chimique et la vitesse de refroidissement de cette zone génèrent des modifications plus ou moins importantes de la structure métallurgique.

**La zone de liaison** : cette zone, située à la frontière entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement, correspond à la surface sur laquelle la solidification du métal fondu a commencé.

**Le métal de base** : au delà de la zone affectée thermiquement, l'élévation de température est insuffisante pour engendrer une quelconque transformation structurale. Cette zone est aussi dite non affectée.

### **3.2.1 Procédés de soudage :**

. Le procédé de soudage applicable dans le projet gazoduc 10" ILLIZI-DJANET c'est un soudage à l'arc électrique. Il regroupe à trois procédés sont :

- ❖ Soudage manuel à l'arc avec électrode enrobée (SMAW)
- ❖ Soudage sous gaz de protection d'argon (GTAW)
- ❖ Soudage semi automatique (GMAW)

Pendant notre période de stage au sein de EN-GTP on note que le soudage manuel à l'arc électrique avec électrode enrobée **SMAW** est plus utilisée.

Les électrodes à enrobage cellulosique et basique sont fréquemment utilisées dans le projet gazoduc 10" ILLIZI-DLANET. La cellulosique est utilisée pour la première et deuxième passe et la basique pour la troisième et quatrième passe (bourrage et finition).

### **3.2.2 Soudage manuel à l'arc avec électrode enrobée SMAW sur chantier (Projet gazoduc 10" ILLIZI- DJANET)**

#### **3.2.2.1 Exigences des conditions climatiques.**

Le soudage de la canalisation sera réalisé dans des conditions climatiques adéquates afin d'éviter toutes impureté susceptible d'affecter la soudure. Les travaux de soudage seront interrompus et suspendus quand les conditions météorologique peuvent affectés la qualité de la soudure (chutes de pluies, de neige, taux d'humidité supérieur à 90% et période des vents de sable). L'utilisation des abris est conditionnée par les conditions climatiques.

### 3.2.2.2 Chanfreinage

- La conception du joint de soudure sera réalisée conformément à la procédure de soudage qualifiée. (Voir figure 3.13)
- En cas de nécessité, le chanfreinage du joint de soudure sera réalisé sur site conformément aux caractéristiques dimensionnelles indiquées dans la procédure de soudage qualifiée.
- Il sera réalisé par oxycoupage sous angle avec finition à la meule.



Figure 3.13 : Le chanfreinage du gazoduc

### 3.2.2.3 Endommagement des extrémités de tube

- Lorsque l'extrémité du tube a été endommagée, le tube sera coupé et chanfreiné de nouveau de façon à obtenir un meilleur alignement.
- Les caractéristiques dimensionnelles du chanfrein à réaliser doivent être conformes à la spécification de soudage qualifiée.
- Le découpage de la partie endommagée sera réalisé par meulage ou oxycoupage.
- Les extrémités découpées et chanfreinées doivent être bien nettoyées pour permettre une bonne qualité de soudage.

### 3.2.2.4 Alignement des Tube (Clampsage).

L'utilisation des clamps extérieurs pour assurer un meilleur alignement des soudures bout à bout, se fera conformément à la WPS. Ils seront enlevés après soudage de 50% de la première passe. Les figure 3.14 et 3.15 illustrée le procédure de clampsage.



Figure 3.14: Début de clampsage



Figure 3.15 : Fin de clampsage

### 3.2.2.5 Câble de Masse

Le câble de masse branché, montré sur la figure 3.16, au poste de soudage sera connecté à la surface à souder pour éliminer les coups d'arc et amorces sur le métal de base.



Câble de masse

Figure 3.16: Câble de masse

### 3.2.2.6 Equipement de soudage

- Les équipements destinés pour les travaux de soudage doivent être bien entretenus. Ils doivent avoir les mêmes capacités d'exécution que celles utilisées pour la qualification des procédures de soudage.
- L'installation de la mise à la terre se fera dans un endroit aussi large que possible. Connections de la mise à la terre ne doit pas provoquer à la disposition des contrôleurs pour pouvoir effectuer les calibrages quand cela est nécessaire.
- Les soudeurs doivent être dotés de leur équipement de protection individuelle.

### 3.2.2.7 Préchauffage :

Le préchauffage des deux bords à souder doit être explicite du mode opératoire de soudage. La température minimale de préchauffage doit être celle préconisée par la procédure de soudage approuvée (WPS). La figure 3.17 montre la procédure de préchauffage.



Figure 3.17: le préchauffage avec chalumeau

### 3.2.2.8 Exécution des soudures

- Le soudage et l'inspection du pipeline doivent satisfaire aux exigences de la norme API 1104 et en conformité avec la WPS approuvée et qualifiée.
- Le maître de l'Ouvrage sera informé du nombre de soudeurs de la première passe.
- L'amorçage des bords à souder est inacceptable.
- Chaque passe de soudure doit être nettoyée de toutes traces de laitiers par des moyens adéquats, (outils à disques). Les défauts visibles à l'œil nu seront enlevés par meulage de chaque passe.
- Avant toute interruption des travaux, s'assurer que le nombre de passes réalisées est d'au moins 3 (trois) passes. La figure 3.18 présente l'exécution de soudage.



Figure 3.18 : Exécution de soudage

### 3.2.2.9 Nettoyage du cordon de soudure par brossage

En fin de l'opération de soudage le cordon de soudure est nettoyé par brossage comme le montre la figure 3.19 pour enlever le laitier.



Figure 3.19 : Cordon de soudure nettoyée

### 3.2.2.10 Soudage de réparation

Les soudures de réparation doivent être exécutées par des soudeurs homologués. Leur exécution doit être conforme au code de soudage.

### 3.2.2.11 Température Interpasse

La température inter passe ne doit pas être plus basse que la température de préchauffage. Dans tous les cas la température inter passe ne doit pas dépasser 250° ce afin d'avoir des cycles thermique non sévères.

### 3.2.2.12 Marquage

Le joint de soudure sera identifié par son numéro séquentiel ainsi que le repère des soudeurs l'ayant exécuté, comme représenté la figure 3.20.





Figure 3.20 : Identification du joint soudure

### 3.2.2.13 Moyens Humains et Matériels

#### 3.2.2.13.1 Moyens Humains

- Soudeur qualifiés
- Radiologues
- Contrôleur
- Meilleurs qualifié
- Tuyauteurs qualifiés
- Electriciens et mécaniciens qualifiés
- Clampsseurs
- Man œuvres conducteur d'engin

#### 3.2.2.13.2 Moyens Matériels

- Poster à souder
- Clamps extérieurs
- Side Boom
- Cintreuse
- Grues
- Compresseur
- Bouteille et Torche de Gaz
- Meuleuse
- Moyens de protection individuels (lunettes, Casque, Masque, Gants, souliers)



Figure 3.21: Centreuse



Figure 3.22: Side Boom



Figure 3.23: La Grue



Figure 3.24 : Poste à souder



Figure 3.25 : Outil d'alignements des tubes (Clamps)

### 3.3 Contrôle de soudage

Les soudures sont rigoureusement contrôlées pour s'assurer de la bonne qualité de l'assemblage. La qualité des soudures est contrôlée visuellement « au plus près » après leur réalisation pour repérer les éventuels défauts et procédé à leur réparation sans gêner l'avancement général du chantier (durant toute l'opération de soudage).

#### 3.3.1 Contrôle non destructif :

Les contrôles non destructifs est un ensemble des méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité des structures ou des matériaux. Ces méthodes sont utilisées dans l'ensemble des secteurs industriels. On peut citer par exemple : l'industrie pétrolière (pipeline – tubes – barres – soudures – réservoirs).[10]

Actuellement, pour le contrôle non destructif, il existe différentes méthodes, mais les plus utilisées au niveau d'EN- GTP et GTFT sont :

- Le contrôle visuel
- Le contrôle par ressuage
- Le contrôle par radiographie (rayons  $\gamma$ )

##### 3.3.1.1 Le contrôle visuel

**3.3.1.1.1 Principe du contrôle :** Le contrôle visuel et dimensionnel consiste à soumettre une surface, une préparation de chanfrein ou une soudure à une vérification visuelle de son aspect physique et de ses dimensions géométriques.

**3.3.1.1.2 Condition du contrôle visuel et dimensionnel :** Le contrôle visuel et dimensionnel doit être réalisé sous une luminosité de 350 lux minimum (recommandé : 500 lux). L'œil de l'observateur doit être placé à une distance inférieure à 500 mm de la surface à examiner sous un angle supérieur à 30°

##### 3.3.1.1.3 Modalité de contrôle visuel

- ✓ Contrôles visuels effectués avant, pendant et après le soudage seront conformes aux spécifications techniques du projet et à la classification d'indications conformément aux documents de références.
- ✓ L'inspecteur doit veiller à la conformité et la bonne marche du matériel lié au soudage (les étuves, les postes de soudage, la conformité des métaux d'apport, le préchauffage, les abris, etc.).

- ✓ Toutes les soudures doivent être dépourvues d'incisions marginales, de porosité, de discontinuités brusques ou d'autres défauts, les cordons de soudures doivent être bien raccordés au métal de base sans caniveaux, et sans rainures de soudage.
- ✓ Toutes les imperfections liées aux arrachements de supports ou aux manœuvres et amorces doivent être réparées immédiatement.
- ✓ Les parties adjacentes des soudures doivent être exemptes de peinture, graisse, imperfection ou autre pouvant gêner ou nuire à la qualité de soudage.
- ✓ Les soudures d'angle doivent avoir un profil régulier avec angle 45° environ.
- ✓ Sur chaque soudure réalisée doit apparaître le ou les repères attribués aux soudeurs lors de leur qualification.
- ✓ Toutes les indications relevées doivent être enregistrées et consignées sur PV. Les imperfections doivent être réparées.

#### 3.3.1.1.4 Matériels et contrôle

- Règle droite ou ruban de mesure avec graduations de 1 mm ;
- Loupe grossissante de 2 à 5 fois ;
- Jeu de jauges ou cales de 0,1 à 3 mm
- Jauge à vernier ou calibre de soudure
- Miroir ou endoscope

Le contrôle consiste à vérifier que :

- la hauteur de la surépaisseur du cordon externe et de la pénétration est conforme ;
- la surface de la soudure est saine et régulière ;
- la largeur de la soudure est constante ;
- la dénivellation ou le désalignement est dans les tolérances de la norme

#### 3.3.1.2 Contrôle par ressuage

**3.3.1.2.1 Principe du contrôle par ressuage :** Le contrôle par ressuage permet de détecter des défauts de compacité, parfois très fins, débouchant en surface et non obstrués (fissures, porosités, replis, manque de liaison) sur des matériaux métalliques non poreux et non absorbants. Ce contrôle est réalisé à l'aide de produits (les pénétrants) à très faible tension superficielle qui pénètrent par capillarité dans les défauts débouchant en surface. Après élimination de l'excès de pénétrant sur la surface des pièces, l'apparition visuelle des défauts

est réalisée par l'application d'un révélateur en une fine couche de poudre constituée de microscopiques tubes capillaires qui pompent le pénétrant retenu dans les discontinuités des défauts.

### 3.3.1.2.2 Applications du contrôle par ressuage :

- Avant soudage : préparation des chanfreins
- Pendant le soudage : contrôle entre passes, gougeage d'une reprise envers
- Après soudage : défauts superficiels, étanchéité

### 3.3.1.2.3 Le matériel utilisé

Au niveau de GTFT le matériel utilise sont :

- a. Produit de nettoyage
- b. pénétrant
- c. révélateur



Figure 3.26: matériel utilise dans contrôle par ressuage

### 3.3.1.2.4 Différentes étapes du contrôle par ressuage

#### 3.3.1.2.4.1 Le nettoyage (dégraissage)

Par solvants chlorés en phase vapeur, par produits alcalins ou encore par des jets d'eau chaude s'effectue dans des installations adaptées et est complété si nécessaire d'une opération de séchage.



Figure 3.27 : Nettoyage d'un Piquage fissuré d'une ligne

#### 3.3.1.2.4.2 Déposition du pénétrant

Application par pulvérisation (ou application au pinceau de soie) du liquide pénétrant (pré ou post émulsionné) coloré, fluorescent ou mixte sur toute la surface à examiner.



Figure 3.28 : Déposition du pénétrant

Temps d'imprégnation (de 15 à 40 minutes) du pénétrant par capillarité dans les défauts débouchant.

### 3.3.1.2.4.3 Elimination de l'excès de pénétrant

Élimination de l'excès de pénétrant sur la surface de la pièce à contrôler par rinçage à l'eau ou par solvant spécial. Vérification de l'élimination complète de l'excès de pénétrant et vérification du séchage complet de la pièce à contrôler.

### 3.3.1.2.4.4 Application du révélateur

Application par pulvérisation du révélateur à sec ou en suspension dans un solvant volatil en une couche mince et uniforme. Le révélateur pompe le pénétrant resté dans les discontinuités des défauts débouchant. Des taches colorées apparaissent à l'endroit des défauts.



Figure 3.29 : Application du révélateur

### 3.3.1.3 Le contrôle par radiographie ou gamme graphie

Le contrôle radiographique par rayonnements ionisants (X ou  $\delta$ ) permet de détecter des défauts de compacité internes souvent très fins (fissures, soufflures, inclusions, manque de liaison, manque de fusion) dans les parois des matériaux métalliques. Ce contrôle est réalisé à l'aide d'un tube générateur à rayons X ou d'une source radioactive  $\delta$  qui émettent des rayonnements ionisants, de films radiographiques ou d'une caméra pour l'acquisition numérique de l'image transmise placés sur la face inverse au rayonnement. Les rayons électromagnétiques de faible longueur d'onde sont partiellement absorbés par les hétérogénéités du milieu en traversant la paroi du matériau irradié. Le faisceau impressionne le film radiosensible en fonction des rayonnements transmis à travers la pièce contrôlée pour donner naissance à l'image radiographique. La présence d'un défaut se traduit par une variation de l'absorption du rayonnement émis et donc à une

variation de la densité optique du film au droit de l'image du défaut (Figure 3.30).[10]

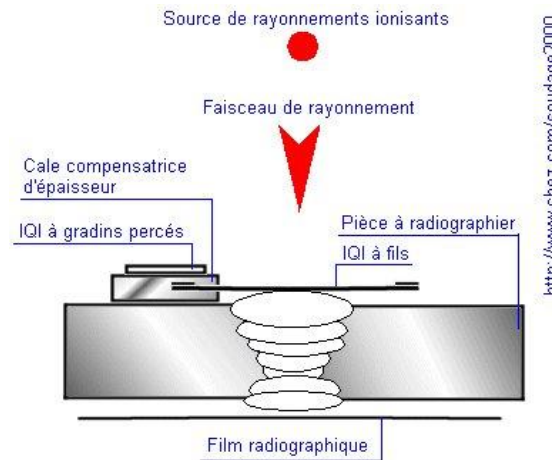


Figure 3.30 : Principe du contrôle radiographique ou gamma graphique

La radiographie a rayon gamma  $\delta$  est généralement utilisée sur chantier dans le projet de gazoduc 10 " ILLIZI-DJANET.

### 3.3.1.3.1 Entendu de contrôle par radiographie $\gamma$

La présente procédure a pour but et objet de définir la méthode et les moyens à mettre en œuvre pour le contrôle radiographie des joints soudés bout à bout. L'examen radiographie se fera à 100% pour les joints soudés.

### 3.3.1.3.2 Matériels utilise

#### 3.3.1.3.2.1 Radio-élément :

On utilise des sources à rayons **Gamma en Iridium** (Ir 192), de demi de vie est 74jours.

#### 3.3.1.3.2.2 Films, écrans et filtre :

Pour l'examen radiographie **RT**, les films utilisés seront conformes aux exigences de la norme SE 94 (de type **AGFA GEVART D7**, **KODAK T200** ou équivalent) avec des écrans en plomb de dimension similaire au film et d'épaisseur de 0.125mm.

Dimensions des films :

- ✓ 10x 40(cm) pour la radiographie de soudage linge
- ✓ 10x 24 (cm) pour les réparations et les installations de surface.



### 3.3.1.3.2.3 Ecran de blocage :

Dans le cas de protection de la radiation rétrodiffusée, le film est soutenu par un écran en **plomb** d'épaisseur  $\geq$  à 1mm place au plafond. Les dimensions de ces écrans dépendent de diamètre de tube à radiographie, pour le 10" on utilise des écrans de 100x300x2 mm.

Le contrôle de rayonnement rétrodiffusé se fait au moyen d'une lettre B en plomb de hauteur minimum de 13 mm et d'épaisseur environ 3 mm qui sera placée au dos de la cassette contenant le film.

### 3.3.1.3.2.4 Indicateurs de qualité d'image (IQI) :

L'indicateur (IQI) sera le type de trou ou le type de fil. Les indicateurs de qualité d'image utilisés pour cet ouvrage seront du type de fil cité dans le tableau ci-dessous :

IQI W 10 FE		IQI W 6 FE	
N° fil	Ø du fil	N° fil	Ø du fil
10	0.40	6	1.0
11	0.32	7	0.8
12	0.25	8	0.63
13	0.20	9	0.5
14	0.16	10	0.40
15	0.13	11	0.32
16	0.10	12	0.25

Tableau 3.1 : Les indicateurs de qualité d'image

Ils seront choisis en fonction des épaisseurs à contrôler et de la technique de radiographie. Les IQI seront placés côté source, et en cas d'impossibilité, ils pourront être placés côté film avec une lettre **F**, conformément au tableau ci après :

EPAISSEUR (mm)	Ø du fil (mm) Côté Film	Ø du fil (mm) Côté Source
Ep. < 6.4	0.16	0.20
6.4 > Ep. < 9.5	0.20	0.25
9.5 > Ep. < 12.7	0.25	0.32
12.7 > Ep. < 19.0	0.32	0.40
19.0 > Ep. < 25.4	0.40	0.50

Tableau 3.2 : Différents épaisseurs des indicateurs d'image

### 3.3.1.3.3 Matériel d'examen des radiographies :

Le négatoscope c'est un appareil destiné à la lecture des films aura une source lumineuse suffisante pour l'échelle de densité spécifiée. Cette intensité sera réglable et ne devra pas produire un éclairage de fond susceptible de se réfléchir sur le film.



Figure 3.31 : Négatoscope

Le densitomètre c'est un appareil permettant d'effectuer les mesures de densité optique sur les plages d'un film suivant les exigences du code et spécification.

La densité optique est le logarithme décimal du rapport du flux lumineux incident aux flux lumineux transmis ou réfléchi.

#### 3.3.1.3.3.1 Calcul du temps d'exposition :

Le temps d'exposition est défini en tenant compte de l'activité de la source, les opérateurs disposent des documents, abaque et de toute informations leur permettant de calculer le temps d'exposition s'effectuer avec l'une de méthode suivantes :

\*Par formule  $t = (Q * D^2 * K * N) / A$  tel que :

- ✓ **t** : temps de pose par h
- ✓ **Q** : facteur d'exposition
- ✓ **D** : distance source film en mètre
- ✓ **K** : coefficient de rapidité des films
- ✓ **N** : facteur correctif de densité
- ✓ **A** : activité de la source.

\*Par la réglette à calculer

### 3.3.1.3.3.2 Densité

La densité (D) des radiogrammes doit être comprise

- Pour la technique simple :  $2 < D < 4$

### 3.3.1.3.3.3 Flou géométrique ( $U_g$ )

Le flou géométrique sera calculé selon la formule :  $U = F \times t / D$

**F** : dimension de la source (mm)

**t** : distance source de radiation au film

**D** : plus grande distance défaut – film (épaisseur)

### 3.3.1.3.3.4 Sensibilité

la sensibilité est calculée suivant la formule suivant :  $S \% = (d \times 100) / t$

d : le plus petit diamètre du fil visible

t : épaisseur à radiographiée

### 3.3.1.3.3.5 Identification des radiogrammes :

Les radiogrammes portent les indications suivantes :

- ✓ Nom de l'ouvrage
- ✓ Repère de soudure
- ✓ Le diamètre et l'épaisseur du tube
- ✓ Type de joint (linge, réparation ou raccordement)
- ✓ Lettre R pour indique les réparations Maximum R2 (2 réparations)
- ✓ Lettre C pour indiquer les soudures à couper

### 3.3.1.3.4 Développement

Le traitement manuel des films s'effectue dans la chambre noire, dans plusieurs bains chimiques, afin de transformer les films radiographiques (composant l'image latente) en

image interprétable, suivant les recommandations du fournisseur et la politique environnementale du client.

#### **3.3.1.3.4.1 Chambre noire :**

La chambre noire doit être isolée complètement de la lumière. L'entrée doit être protégée par deux portes se faisant face ou des chicanes. Dans la pratique, la meilleure solution est l'entrée avec chicanes, mais elle exige davantage de place.

#### **3.3.1.3.4.2 Eclairage de la chambre noire :**

Les films doivent être traités sous un éclairage inactinique. L'éloignement de la source lumineuse ainsi que la durée d'exposition dépendent de la sensibilité du film utilisé.

#### **3.3.1.3.4.3 Organisation de la chambre noire :**

La chambre noire comportera deux zones de travail distinctes. L'une pour les opérations à sec, l'autre pour les opérations humides.

La première servira à charger et décharger les cavaliers, à placer les films dans les cadres de développement. La seconde servira au traitement chimique du film dans les différentes cuves.

#### **3.3.1.3.4.4 Le processus**

Le développement normal est de 5 à 8 minutes à 20 C°. Un plus long temps de développement rapporte généralement une vitesse d'élaboration des films plus rapide et le rendement légèrement plus contraste. Quand la température est supérieure ou inférieure, le temps d'élaboration doit être changé.

##### **3.3.1.3.4.4.1 Agitation :**

On agite le film horizontalement et verticalement pendant quelques secondes pendant le développement. Ceci aidera les films de se développer également, et éviter la formation des bulles d'air de l'émulsion (qui entraîne la formation de taches sur l'image radiographique).

##### **3.3.1.3.4.4.2 Le bain d'arrêt ou le rinçage :**

Après l'achèvement du développement et avant de procéder au fixage du film développé l'activité du révélateur doit être arrêté et neutraliser dans un bain d'arrêt d'eau.

### 3.3.1.3.4.4.3 Le fixage :

Le fixage assure la conservation de l'image détenue pendant le développement en éliminant de l'émulsion les halogénures d'argent non réduits.

- Les films doivent être maintenus séparément dans le fixateur.
- On agite les cadres de développement verticalement pendant environ 10 secondes, puis on agite une deuxième fois pour assurer une fixation rapide et uniforme.
- On maintient les films dans le fixateur jusqu'à ce que la fixation soit complète (au moins deux fois le temps de lavage), mais pas plus de 15 minutes dans le fixateur à la température relativement fraîche. L'agitation fréquente permettra de diminuer le temps de fixation.

### 3.3.1.3.4.4.4 Le lavage :

L'efficacité du lavage dépend de l'eau utilisée, de sa température, de sa vitesse d'écoulement, et du film lavé. Généralement, le lavage est très lent au-dessous de 16 C°. Pour des températures supérieures à 30 C° des précautions doivent être prises pour ne pas laisser les films pendant un temps très long dans l'eau. Pour éviter la contamination, les films développés doivent être lavés séparément des nouveaux films récents retirés du fixateur.

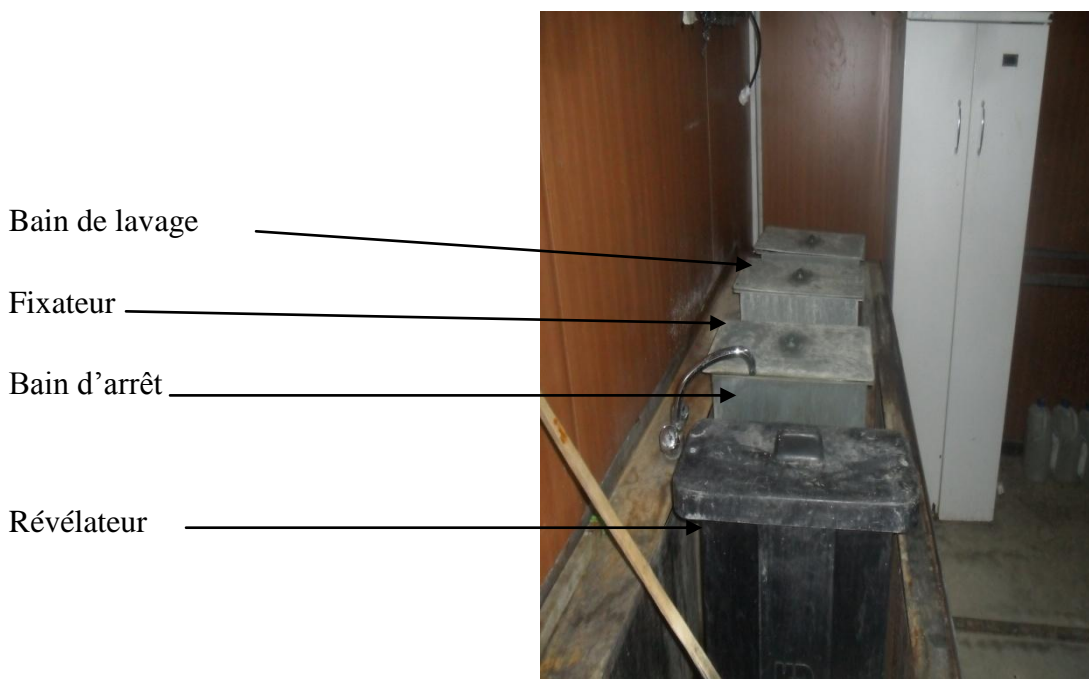


Figure 3.32: le processus de développement du film

### 3.3.1.3.4.4.5 Le séchage :

Le séchage de films se fait par l'air circulé par un ventilateur à 60 C°. On prend les films avec soins au moment de leur insertion dans des cadres, de sorte qu'ils ne se touchent pas dans le four de séchage. Une température de séchage trop élevée à basse humidité doit être évitée car elle peut avoir comme conséquence un séchage inégal.



Figure 3.33 : le four de séchage des cuves

### 3.3.1.3.4.5 Nettoyage des cuves :

Les cuves seront nettoyées à chaque renouvellement du bain. Le nettoyage s'opère de préférence à l'eau chaude ou à l'eau savonneuse

#### 3.3.1.3.4.5.1 Température des cuves :

Une température régulière à également un effet important sur les caractéristiques de qualité de films.

Désignation	T°	Temps
Révéléateur	20 C° ± 2°	5 mm
Bain d'arrêt	20 C° ± 2°	3 mm
Fixateur	20 C° ± 2°	10 mm
Levage	20 C° ± 2°	20 mm

Tableau 3.3 : Température des cuves

### 3.4 Défauts de soudage

Il existe plusieurs types de défauts de soudure à titre d'exemple : cratère, fissure, amorce d'arc, Morsures/Caniveaux, Les inclusions, manque de fusion, porosité ...etc.

Dans notre travail, nous allons étendre notre étude sur le défaut **fissure** qui est un défaut a ne peut pas sous estimé car avec le temps il provoquera une dégradation tel que percement.

#### 3.4.1 Les fissure

##### 3.4.1.1 Généralités :

Les fissurations constituent l'un des défauts de soudure les plus fréquents. Elles sont causées par la présence de tensions internes trop importantes à l'intérieur du métal soudé. L'utilisation d'un métal d'apport incompatible avec le métal de base, un cordon trop petit ou des tensions internes créées par le retrait peuvent être à l'origine des fissures. Le bon choix du métal d'apport, un préchauffage approprié, une bonne préparation des joints et la formation d'un cordon respectant les dimensions exigées peuvent donc prévenir les fissures. Les fissures dans un métal sont divisées en deux catégories selon l'endroit où elles apparaissent : – Les fissures peuvent être localisées dans le métal fondu ; elles dépendent alors de la nature du métal d'apport et des conditions d'exécution de la soudure. – Les fissures peuvent aussi se retrouver dans le métal de base, dans la zone de liaison ; ces dernières sont généralement reliées à une plus faible soudabilité du métal. On peut aussi distinguer deux types de fissurations selon le moment où elles surviennent à la suite d'une soudure : la fissuration à chaud et la fissuration à froid.



Figure 3.34 : Cordon de soudure avec les défauts (cratère, morsures/caniveaux, Fissure, Amorces d'arc). [11]

**3.4.1.2 La fissuration à chaud :**

Est due à la présence entre les grains d'un film liquide de sulfure de fer ou de phosphore durant le retrait à la solidification. Ce phénomène résulte soit d'une solidification étalée sur un large intervalle de température et donc à la solidification tardive des éléments possédant un bas point de fusion, soit d'une forme de cordon ou d'un bridage inadéquate, soit d'une vitesse de soudage trop grande. Ce type de défaut se caractérise par des fissures larges, ouvertes, perpendiculaire aux vagues de solidification et généralement oxydées à l'intérieur.

Le risque de fissuration à chaud peut être diminué en minimisant le bridage afin de faciliter le retrait, en jouant sur les paramètres de soudage et notamment sur la tension et l'intensité, ou en diminuant la vitesse de soudage. Une autre possibilité est de choisir des alliages à basse teneur en carbone, en phosphore et en soufre.[11]

**3.4.1.3 La fissuration à froid :**

Est essentiellement due à l'hydrogène dissout dans le métal fondu et diffusé dans la ZAT. Au voisinage du métal fondu, l'eau se décompose et se dissout en grande quantité (4 cm<sup>3</sup> pour le soudage MIG). Au cours du refroidissement, sa solubilité diminuant, l'hydrogène se rassemble pour former des molécules H<sub>2</sub> puis des soufflures. Du fait de la diffusion, la pression du gaz va tendre à augmenter et à provoquer l'apparition de fissure dans les zones les moins ductiles comme la partie surchauffée de la ZAT. Ces fissures se forment à basse température, souvent plusieurs heures après le soudage, le plus souvent dans la zone affectée thermiquement. Elles sont fines, non oxydées et perpendiculaires aux directions de contraintes maximales.

Afin de réduire les risques de fissuration, il est important de réduire au maximum toute intrusion d'hydrogène, que ce soit avant, pendant ou après le soudage. Les soudeurs ont souvent recours dans ce cas à un préchauffage ou à un post-chauffage. Il est également possible, bien que plus difficile, de diminuer le niveau de contraintes, que ce soit par une relaxation des contraintes résiduelles, une création de contraintes résiduelles favorables ou par une amélioration de la géométrie de raccordement.

**3.4.1.4 Orientation des fissures :**

Les fissures peuvent être décrites comme étant longitudinales ou transversales, en fonction de leur orientation. Quand une fissure est parallèle à l'axe de la soudure, elle est appelée fissure longitudinale, peu importe qu'il s'agisse d'une fissure centrale dans le métal fondu ou une fissure dans la zone de jonction du métal de base affectée par la chaleur.



#### 3.4.1.4.1 Les fissures longitudinales :

Dans les petites soudures entre fortes sections sont souvent le résultat des taux de refroidissement et de contraintes résiduelles élevées. En soudage à l'arc submergé, elles sont généralement associées à des vitesses de soudage élevées ou peuvent être liées à des problèmes de porosités non apparentes à la surface de la soudure. Les fissures longitudinales de la zone affectée thermiquement sont généralement causées par de l'hydrogène dissous.

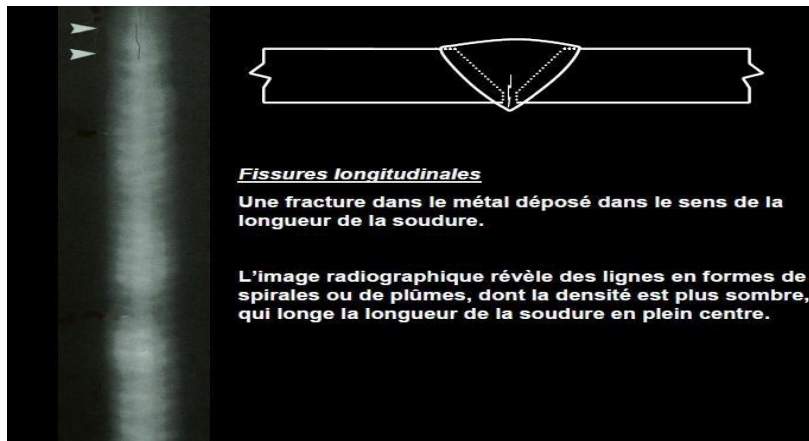


Figure 3.35 : L'image radiographique fissure longitudinale [11]

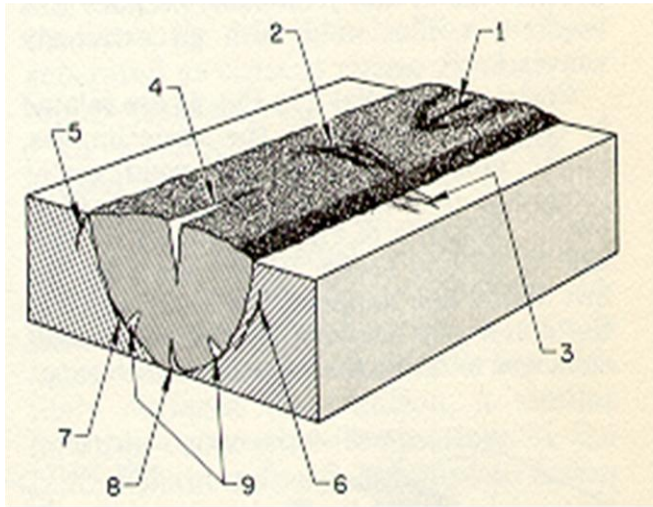
#### 3.4.1.4.2 Les fissures transversales :

Sont perpendiculaires à l'axe de la soudure. Celles-ci peuvent être limitées en taille et contenues entièrement dans le métal de soudure ou bien se propager dans la zone adjacente affectée par la chaleur puis dans le métal de base à partir du métal de soudure. Dans certains assemblages soudés, les fissures transversales se forment dans la zone affectée par la chaleur et non pas dans la soudure. Les fissures transversales sont généralement le résultat de contraintes de retrait longitudinal agissant sur le métal fondu de faible ductilité. La fissuration par hydrogène du métal fondu peut être orientée dans le sens transversal (Figure 3.36)



Figure 3.36 : L'image radiographique fissure transversale [11]

**3.4.1.5 Types des fissures :** La figure 3.37 résume les fissures qui peuvent être trouvés dans la plupart des cas :



- 1. De cratère
- 2. Transversale (M.A)
- 3. Transversale (Z.A.T)
- 4. Longitudinale (M.A)
- 5. D'entaille
- 6. Sous cordon
- 7. De liaison (zone.)
- 8. A la racine (M.A)
- 9. A LA racine (M.B)

Figure 3.37 : Différents type des fissures [11]

### 3.5 Revêtement des pipelines

Ces dernières années, la plupart des pipelines sont enrobés au niveau de l'usine par un revêtement tri couches (époxy, colle, polyéthylène), une fois sur chantiers un revêtement adéquat est appliqué uniquement sur les joints de raccords ainsi que sur les parties endommagées détectées après inspection au balai électrique. Cette procédure a pour but d'assurer l'application sur chantier du revêtement extérieur en manchon thermo rétractable HTLP 80 de format approprié, collé par un primaire époxy S1301 M sur les joints de soudure au niveau du projet gazoduc 10" ILLIZI- DJANET après la préparation de surface, la température de préchauffage de l'acier est comprise entre 60 et 80 c°. L'objectif principal des revêtements est de protéger les pipelines contre la corrosion.

#### 3.5.1 Spécification et conditions du revêtement :

Le revêtement des joints de soudure et d'autre surface en acier sera appliqué par une couche primaire époxy (S1301 M) et des manchons thermo-rétractables HTLP 80 époxy collés en fusion par l'application directe sur les surfaces extérieures en acier. Le revêtement doit être appliqué dans les conditions suivantes :

- Température ambiante comprise entre 20 et 40 C°
- Humidité relative maximum 85%

- La température de surface est supérieure à au moins 3C° du point de rosée.
- Température de métal comprise entre 10 et 18 C°

### **3.5.2 Matériels et Equipements**

- ✓ Compresseur d'air
- ✓ Sableuse
- ✓ Pinceau ou pompe à époxy
- ✓ Chalumeau
- ✓ Bouteille de propane avec détendeur
- ✓ Pyromètre de contact
- ✓ Rouleau manuel siliconé
- ✓ Hygromètre
- ✓ Rugosimètre
- ✓ Dynamomètre
- ✓ Equipement de protection individuelle

### **3.5.3 Préparation de surface sur chantier**

#### **3.5.3.1 Condition de tube :**

Avant de procéder au nettoyage de la zone à sablier, on prélèvera toute les informations inscrites (N° tube, N° de coulée...etc.) qu'on portera sur une zone limitrophe afin qu'elle soit lisible lors de la mise en fouille.

#### **3.5.3.2 Nettoyage**

Les joints de soudure et les surfaces à revêtir devront être nettoyés en enlevant tous les produits gras (graisse, huile...) avec un solvant ou détergent.

#### **3.5.3.3 Chanfreinage**

Si le chanfrein du revêtement du tube n'a pas été effectué en usine biseauter l'extrémité du revêtement de manière à obtenir un angle de 15° à 30° maximum.

#### **3.5.3.4 Sablage**

On remarque qu'il y a trois types de sable sur chantier pour les utiliser au sablage

- Sable oued SERSOUF

- Sable oued Bordj El Houes
- Sable oued ISSANDELAN

Pendant de procéder au sablage, il est recommandé de préchauffer la surface de l'acier à une température comprise entre 40C° - 50 C° et ce afin d'éviter l'oxydation naturelle du métal.

### **3.5.3.5 Contrôle de rugosité :**

A l'aide d'un rugosimètre, on contrôlée la rugosité de la surface sablée.

### **3.5.4 Application du revêtement :**

#### **3.5.4.1 Préparation de l'époxy primaire :**

- 1) La préparation de l'époxy se fera selon la livraison du produit.
- 2) Les composés de l'époxy sont livrés dans deux flacons distincts, qu'on mélangera et remuera Pendant une minute.
- 3) Une fois mélangé le primaire époxy peut être appliqué pendant trente minutes environ à température ambiante. Pour faciliter les opérations de mélange et d'application, il ya lieu d'utiliser le primaire époxy à une température minimale de 18C°, si nécessaire, le conserver dans un endroit chauffé.
- 4) Préchauffage l'acier et le revetement adjacent du tube à une température comprise entre 60C° et 80C° pour réduire le temps de la mise en place du manchon et garantir une bonne adhérence.

#### **3.5.4.2 Nettoyage après sablage :**

Nous essuyons la surface pour enlever la poussière et les résidus des matériaux de sablage par chiffon propre et sec.

#### **3.5.4.3 Application de l'époxy primaire :**

Après le préchauffage on appliquer le primaire époxy mélangé S1301 M sur le pipe à l'aide d'un chiffon ou éponge.

#### **3.5.4.4 Application du joint thermo rétractable HTLP80 :**

Le manchon thermo rétractable sera posé de la manière suivant :

1. Prépare le joint du tube et les surface environnantes, et nettoyer les joints.
2. Au chalumeau, préchauffer 140° la zone à recouvrir, y compris le revêtement FBE existant, afin d'éliminer toute trace d'humidité.

3. Dérouler partiellement le manchon prédécoupé et décoller le film protecteur. Chauffer doucement l'adhésif découvert le long de la bordure du manchon.
4. Retourner le manchou, le centrer sur le joint en plaçant la bordure à 30 degrés de la verticale et passer l'adhésif chaud contre la surface.
5. Chauffer doucement la bordure afin d'oxyder la surface et d'augmenter la température superficielle.
6. Chauffer le dessous de la bordure opposée et envelopper le tuyau complètement.
7. Chauffer la zone de chevauchement à la flamme bleue et en lisse les plis à l'aide d'un gant.
8. Toujours avec une flamme bleue, chauffer le manchon en commençant par faire le tour de tuyau au milieu.
9. Continuer le retrait du manchon en se déplaçant vers l'un des coté jusqu'à environ 50mm du bout, puis orienter le chalumeau vers le milieu pour achever le retrait du bord.
10. Pour finir, lisser par grands mouvements horizontaux sur la surface du manchon pour assurer une cohésion uniforme.
11. Lorsque l'opération sera finie, s'assurer que :
  - L'adhésive s'écoule le long des deux bords du manchon.
  - Le manchon est parfaitement ajusté par rapport aux cordons de soudure et revêtement.
  - Il n'y a pas de fissures, brûlures ou trous dans le manchon.

Le manchon thermo rétractable est parfaitement terminé lorsque toutes les conditions suivantes sont remplies :

- Le manchon est parfaitement ajusté sur la canalisation et son revêtement adjacent.
- Il n'ya pas de points froide ou de rides à la surface du manchon.
- Ou peut distinguer le profil de la soudure au travers du manchon.
- Une fois que le manchon est refroidi, les exsudations d'adhésif apparaissent aux deux extrémités.
- Les stries sur la surface polyéthylène du manchon ont disparues et le manchon présente une surface lisse et unie.



Figure 3.38 : Joint soudure enrobée par manchon thermo rétractable

### 3.5.5 Inspection et contrôle

#### 3.5.5.1 Contrôle visuel :

- ✓ Contrôle visuellement la surface sablée pour quelle soit exempte de tout corps étranger.
- ✓ Effectuer un contrôle visuel pendant toutes les étapes d'application du revêtement de la préparation de surface jusqu'à l'application du joint thermo rétractable en assurant que la totalité de l'acier soit recouvert de l'époxy primaire.

#### 3.5.5.2 Passage du balai électrique :

Toute opération ou réparation du revêtement doit subir un passage du balai électrique.

### 3.5.6 Réparation du revêtement :

#### 3.5.6.1 Matériels et Equipements :

- Rouleau de ruban de réparation
- Brosse métallique et couteau
- Papier abrasif
- Chalumeau
- Pyromètre de contact
- Rouleau en silicone
- Equipement de sécurité

### 3.5.6.2 Réparation de surface :

- Enlever le revêtement de la surface endommagée à l'aide d'un couteau, d'un grattoir ou d'une brosse métallique. Eliminer toutes les arêtes tranchantes et nettoyer la surface endommagée et le revêtement adjacent a fin d'enlever toutes substance étrangère telle que salissure, rouille, huile, graisser et humidité.
- Abraser le revêtement adjacent de la zone endommagée.
- Découper un morceau de renfort dans le ruban en choisissant sa taille pour qu'il s'étende à la surface endommagée et arrondisse les angles.



Figure 3.39 : Enrobage endommagée d'un gazoduc

### 3.5.6.3 Préchauffage :

Préchauffage le métal nu exposé et le revêtement adjacent de la conduite à température comprise 70 C° et 100 C°.



Figure 3.40: Préchauffage le partie endommagée de l'enrobage

### 3.5.6.4 Application de ruban PERPFILLER :

- Découper le ruban à la dimension souhaitée et appliquer le sur toutes les surface ou l'acier est exposé.
- Chauffer le mastic et lisser le à l'aide d'un grattoir à peinture de façon à recouvrir toutes les surfaces de métal nu sans occlusions d'air.

### 3.5.6.5 Application de PERP :

- Caresser à la flamme le côté adhésif du renfort de PERP jusqu'à ce que l'adhésif soit brillant.
- Positionner le renfort de PERP prédécoupé sur la surface endommagée et chauffer le jusqu'à ce que l'adhésif fonde. Faire sortie toute occlusion d'air à l'aide d'un rouleau en silicone.
- Contrôler que l'adhésif est doux au toucher du doigt soue gant.
- Lisser le renfort de réparation à l'aide de la main gantée afin d'éliminer les occlusions d'air et d'assurer une bonne adhérence



Figure 3.41 : Application de PERP

Remarque :

Le renfort est installé correctement lorsque toutes les conditions suivantes sont satisfaites :

- ✓ Aucune arête ne dépasse
- ✓ Une fois que le renfort est froid, la coulée d'adhésif apparait sur les bords.
- ✓ Le renfort s'est parfaitement allié au revêtement.



### 4.1 Introduction

Les pipelines sont transportés sur les chantiers pour être exploitées. Suite à cela, commence l'apparition de ce qu'on appelle les endommagements. Des études ont été réalisées dans le cadre de contrôle de la nocivité des défauts de surfaces dans les pipelines.

- Au moment du transport, les pipelines sont soumis à des oscillations qui peuvent provoquer des fissures microscopiques en faiblement les mailles du matériau.
- Au moment d'assemblage de tube, les soudures réalisées sur chantier peuvent présenter des fissures car elles sont parfois réalisées dans des conditions difficiles et peuvent ne pas être contrôlées (manque de pénétration de la matière).
- Au moment des opérations d'entretiens, par imprudence, un engin percute le pipeline, générant une déformation s'appelée selon le cas (éraflure, enfoncement ou combinée (éraflure+enfoncement)
- Selon le cas du pipeline (enterré ou aérien), l'environnement a une influence nocive en provoquant le phénomène de corrosion.

### 4.2 Un peu d'histoire sur les méthodes d'évaluation des pipelines à défauts

L'effet des défauts dans les structures a été étudié qualitativement à partir du 15ème siècle par Leonard de Vinci. Celui ci a mesuré la force d'élongation d'un fil de fer, et a observé que la force d'élongation du fil était plus importante pour un fil court qu'un fil long. Il a introduit le concept de distribution volumique des défauts.

En 1920, Griffith a publié pour la première fois une formule reliant la contrainte à rupture à la taille des irrégularités (défauts). Cette relation découle d'un simple bilan énergétique à partir d'une analyse des contraintes au niveau d'un trou elliptique faite précédemment et de la première loi de la thermodynamique. Toutefois, ces travaux sont applicables uniquement aux matériaux parfaitement élastiques.

Avant les années 1950, l'ingénierie des structures ne prenait pas en considération la présence des fissures, ces dernières étant jugées inacceptables en terme de qualité, sans avoir été évaluées quantitativement.

Dans les années 1950, il y avait un intérêt majeur pour l'industrie aéronautique aux Etats-Unis, notamment pour la rupture des alliages d'aluminium, et dans les années 1960, cet intérêt s'est déplacé aux risques de rupture dans les centrales nucléaires. Cela conduira à la mise au

point de la mécanique élastoplastique de la rupture en utilisant diverses approches (facteur d'intensité de contraintes (K), Intégrale J et écartement de fissure (CTOD)). Les décennies 1950 et 1960 ont également été une période où la sécurité des canalisations de gaz et de pétrole a commencé à préoccuper les compagnies pétrolières, principalement aux Etats-Unis en raison de la taille et du vieillissement de ces canalisations. Les premiers travaux de recherche sur la rupture des pipelines présentant des défauts ont été réalisés par John F. Kiefner et al. à l'institut de Battelle [12]. La majorité de ces travaux était basée sur des essais d'éclatements de tubes. L'objectif principal de ces travaux était de fournir et de comprendre les relations entre les essais d'éclatements et la taille des défauts détectés. C'est grâce aux travaux de Kiefner que le code ASME 1 / ANSI 2 B31G a été développé, le code "Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines" a été publié pour la première fois en 1984 aux Etats-Unis. Il a été modifié et republié en 1991.

### **4.3 Différents types de défauts précurseurs de la rupture des canalisations**

Les canalisations sont largement employées pour le transport de fluides et de gaz car c'est le mode d'acheminement actuellement le plus économique. L'accroissement de leur diamètre et de la pression de service augmentent le risque de rupture amorcée à partir de défauts. La présence d'un défaut dans une canalisation associée à l'effet de la pression interne pourra provoquer une rupture localisée induisant une fuite et éventuellement une explosion. Généralement, pour les canalisations, on distingue les défauts suivants: les cratères de corrosion, les fissures, les enfoncements, les éraflures et le défaut dit combiné (enfoncement + éraflures) [13]. Dans notre cas ce qui nous intéresse le plus c'est les fissures.

#### **4.3.1 Phénomène de corrosion**

##### **4.3.1.1 Définition de la corrosion**

On définit la corrosion, d'une manière générale, comme étant la destruction des métaux qui se produit sous l'effet de réaction chimique ou électrochimique lorsqu'ils sont en contact avec un milieu gazeux ou aqueux. [14]

La corrosion est un phénomène naturel, les métaux élaborés industriellement à partir d'un minerai à la suite d'opérations 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 liée à la présence d'eau liquide au contact des métaux. (Pour le plus sur le phénomène de

corrosion voir l'annexe B)



Figure 4.42 : agressions corrosives sur la paroi externe d'une canalisation métallique



Figure 4.43 : Corrosion galvanique [10].

#### .4.4 Fissure

Les canalisations sont le plus souvent assemblées sur chantier à partir de la jonction de tubes d'acier soudés bout à bout (soudure de raboutage) .Les soudures longitudinales réalisées lors du formage du tube en usine sont contrôlés avant que le transport du 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.

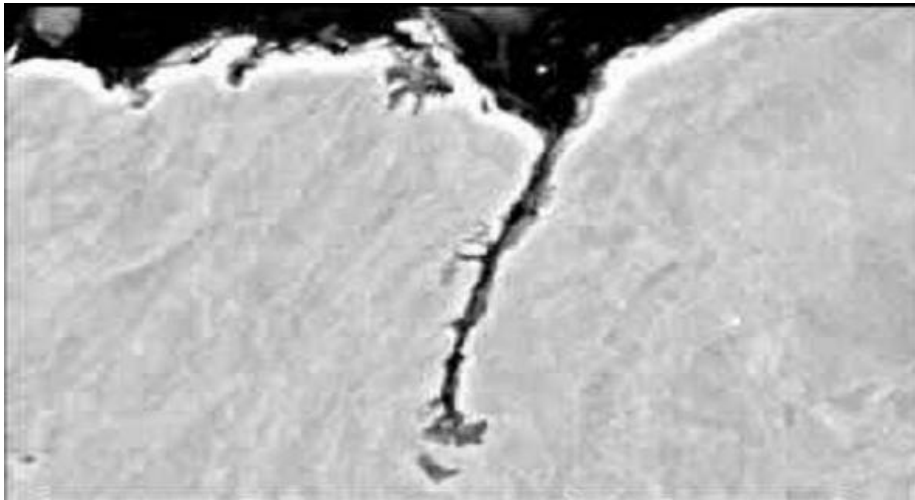


Figure 4.44 : Fissure dans des joints soudés [14]

#### 4.5 Eraflure

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 4.45 : Exemple de pipeline contenant une entaille [15]

#### 4.6 Enfoncement

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 ancres des bateaux pour les pipelines immergés).

Autrement dit un enfoncement est un changement de la 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.

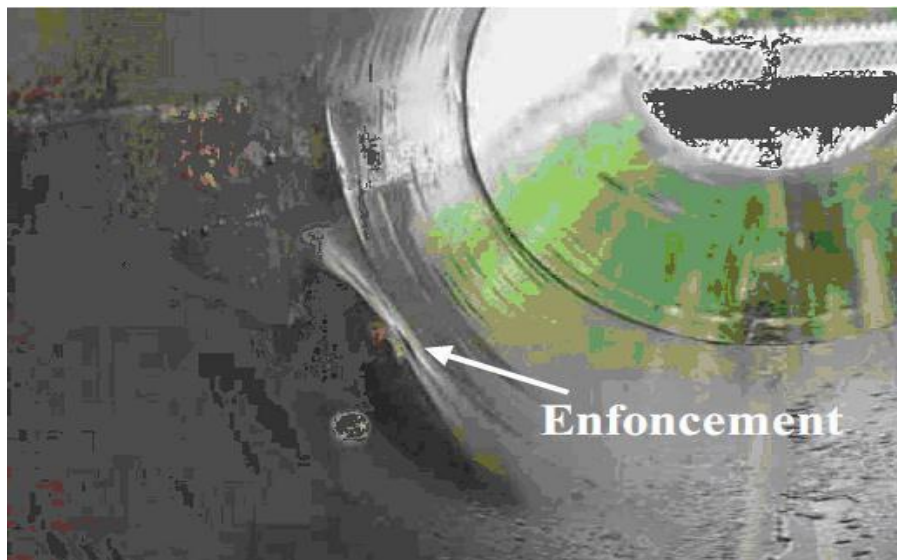


Figure 4.46 : Un pipeline enfoncé [16]

#### 4.7 Endommagement combiné (éraflure+ enfoncement)

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. (Voir figure 4.47 et 4.48)

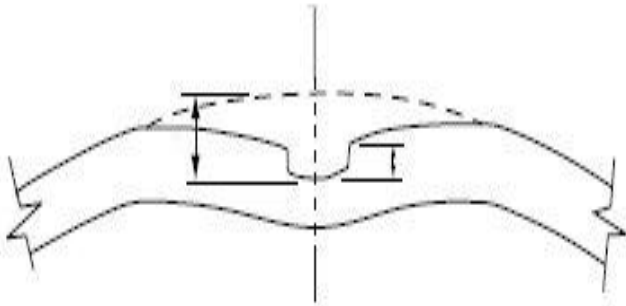


Figure 4.47 : Géométrie d'un défaut combiné d'une éraflure



Figure 4.48 : Photo dans un enfoncement

#### 4.8 Inspection et maintenance des canalisations en service

L'inspection et la maintenance des canalisations en services est un domaine multidisciplinaire, il associe trois secteurs technologiques: Inspection, Matériaux et Mécanique [17]. Ces trois secteurs sont présentés dans la figure (4.49) avec leurs diverses fonctions.

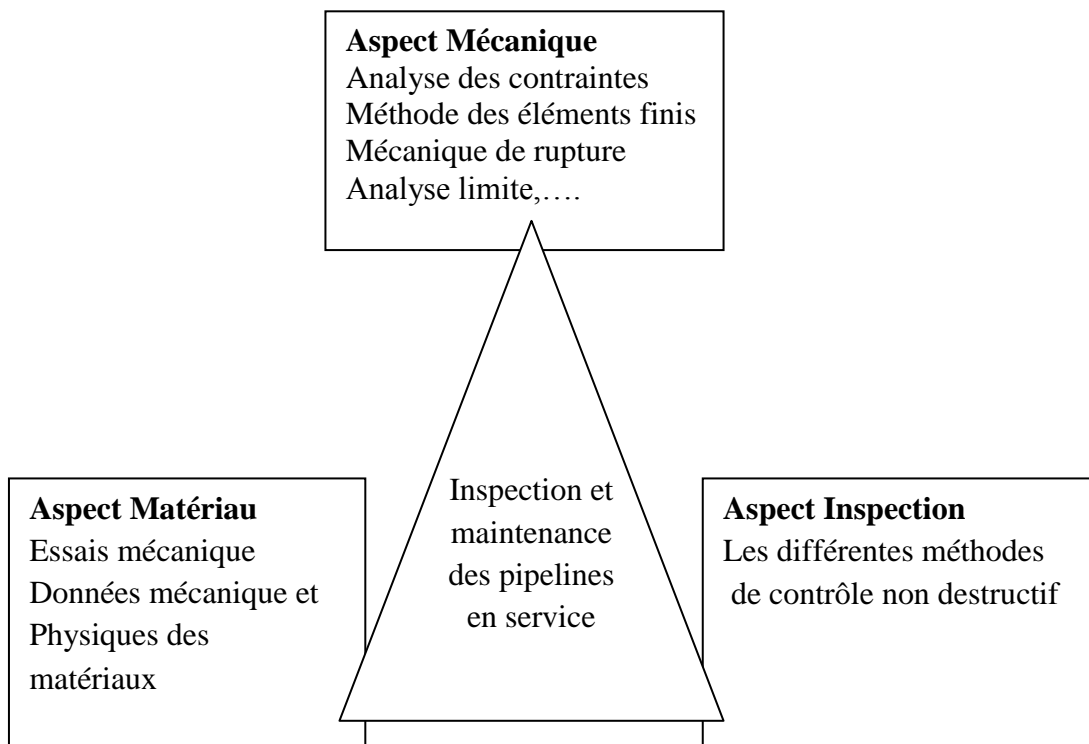


Figure 4.49 Des pipelines en service

Ces trois secteurs sont représentés par les sommets du triangle de la figure (4.49). Les inspecteurs sont les yeux et les oreilles de chaque unité opérationnelle ; ils examinent, regardent et recueillent des données critiques à l'issue de l'inspection. Ils examinent les problèmes et spécifient le type et la procédure de réparation. Les spécialistes des matériaux représentent le second secteur, ces derniers ont connaissances des différents matériaux utilisés ainsi que leurs différentes propriétés mécaniques et physiques pour en optimiser le choix. Le troisième et dernier secteur est celui de la mécanique, il a comme objectif l'évaluation des contraintes auxquelles sont soumises les canalisations au moyen de diverses techniques analytiques et théoriques existantes à ce jour (Exemple: les éléments finis, la mécanique de la rupture, l'analyse limite, ...). Le besoin économique et sécuritaire a conduit les chercheurs et les ingénieurs à mener des études très poussées dans cette perspective afin de faire une évaluation plus précise de la nocivité des défauts rencontrés dans les canalisations.

#### **4.9 Conclusion**

Les pipelines transportant des gaz et des fluides contiennent souvent des défauts pouvant conduire à leur rupture. Ces défauts sont classés en cinq types majeurs : les piqures et cratères de corrosion, les fissures, les entailles (éraflures), les enfoncements (indentations) et les défauts dits combinés (enfoncements+éraflures). La différence de géométrie et de nature des défauts ont amené les chercheurs à créer des outils spécifiques pour chaque type de défaut en se basant sur l'analyse limite, la mécanique de rupture linéaire et non linéaire, ainsi que l'analyse par éléments finis et l'expérimentation.

L'étude de ce chapitre réalisée correspond à l'état de l'art sur les différents types de défauts contenus dans les canalisations rencontrés dans la littérature ainsi que les outils adaptés pour l'analyse et le contrôle de la nocivité de ces défauts. On sera attaché plus particulièrement et par la suite à un type de défaut : le fissure.

## 5.1 Introduction

Bien que le transport de produits dangereux par pipeline soit considéré comme un moyen de transport sûr et malgré la gestion rigoureuse du réseau de pipelines, des défaillances sont identifiées principalement dans la surveillance des travaux effectués dans ce couloir. La sécurité du réseau de transport et la disponibilité, exempte de perturbations de l'agent énergétique gaz naturel sont incontournables si l'on veut garantir la prospérité économique. La multiplication des accidents plus ou moins graves, notamment dus à **la corrosion**, ainsi que leur incidence sur l'économie mondiale et leur impact sur l'environnement rendent le transport des hydrocarbures de plus en plus préoccupant.

## 5.2 Définition de la corrosion

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.[12]

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.

## 5.3 Différents types de corrosion

D'un point de vue général et macroscopique, il existe deux types de corrosion :

- La corrosion uniforme ou généralisée.
- La corrosion localisée.

Le premier type affectant la totalité de la structure du métal, n'est pour cette raison préjudiciable que sur le plan de l'esthétique mais ne modifie que très peu les propriétés mécaniques du matériau.

Au contraire, la corrosion localisée est plus dangereuse car les dégâts quelle provoque en profondeur diminue fortement la résistance du métal en général ce type de corrosion ce manifeste sur les matériaux qui présente une hétérogénéité sur leur surface.

Les formes de corrosion localisées sont nombreuses mais il possible dont distinguer les souvent rencontrée.



5.4 Formes de corrosion

Les formes de corrosion ont été classées selon leurs modes d'identification en trois groupes (Figure 5.50) [10]:

Groupe I : aisément identifiable par un examen visuel (a).

Groupe II : identifiable par des moyens supplémentaires d'examens (b).

Groupe III : une vérification est exigée par la microscopie (optique, électronique) (c)

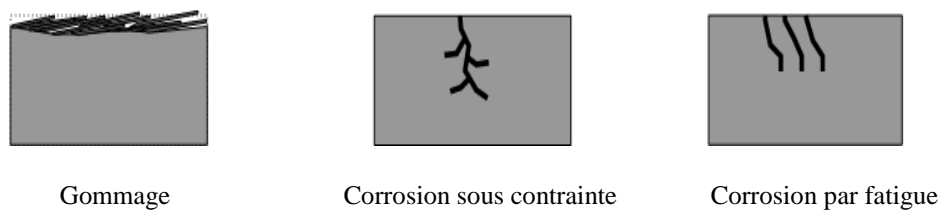
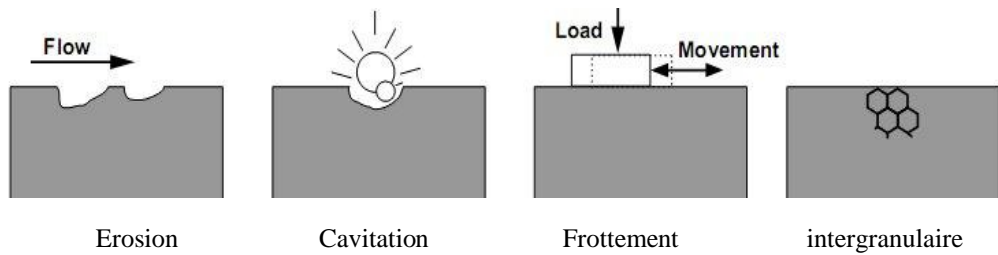
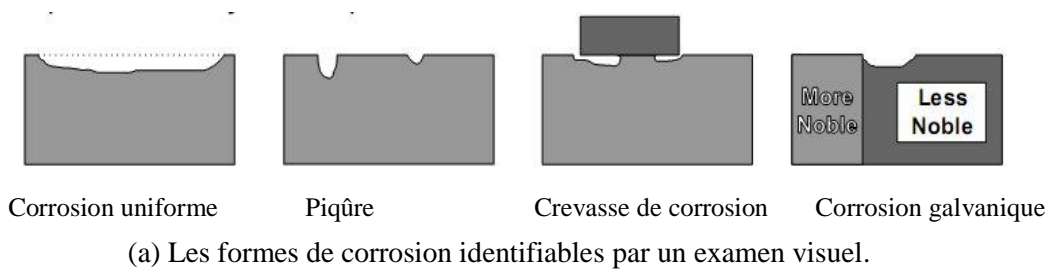


Figure 5.50: Formes principales de corrosion regroupées par leur facilité d'identification.

### 5.4.1 Corrosion généralisée (uniforme)

C'est le phénomène de corrosion le plus simple et le mieux connu. Il survient dans le cas d'un environnement homogène (absence de gradient de température, de pression ou de concentration le long de l'interface) et lorsque le métal lui-même présente vis à vis de cet environnement un comportement suffisamment homogène. Cette homogénéité de comportement peut être le fait soit d'une homogénéité intrinsèque du matériau due à l'absence d'inclusions ou de défauts structuraux, soit au non sélectivité de l'environnement vis à vis de ces défauts. La figure 5.51 illustre la corrosion uniforme.

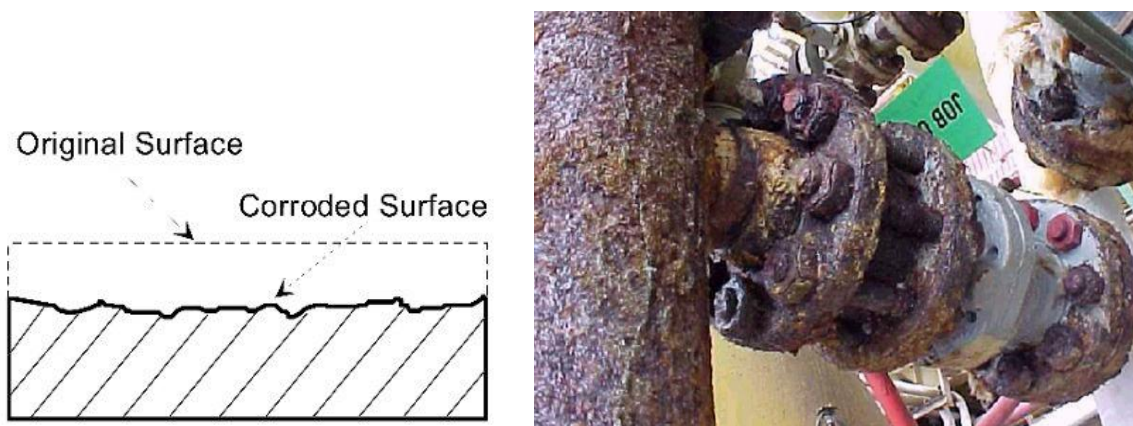


Figure 5.51 : (a) Schéma illustratif de la corrosion uniforme.  
(b) Image de corrosion uniforme.[10]

### 5.4.2 La corrosion par piqûtes

Elle est produite par certains anions, notamment le chlorure, sur les métaux protégés par un film d'oxyde mince. Elle induit typiquement des cavités de quelques dizaines de micromètres de diamètre.[12]

### 5.4.3 Corrosion caverneuse [12]

Le processus de la corrosion caverneuse est proche de celui par piqûre. Il est généralement associé à la présence de petits volumes de solution stagnante dans des trous, sous des dépôts et dans des joints ou des crevasses. Cette solution s'appauvrit en oxygène et s'acidifie.

#### 5.4.4 La corrosion galvanique

Appelée aussi corrosion bimétallique, est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux. La dégradation du métal le moins résistant s'intensifie.

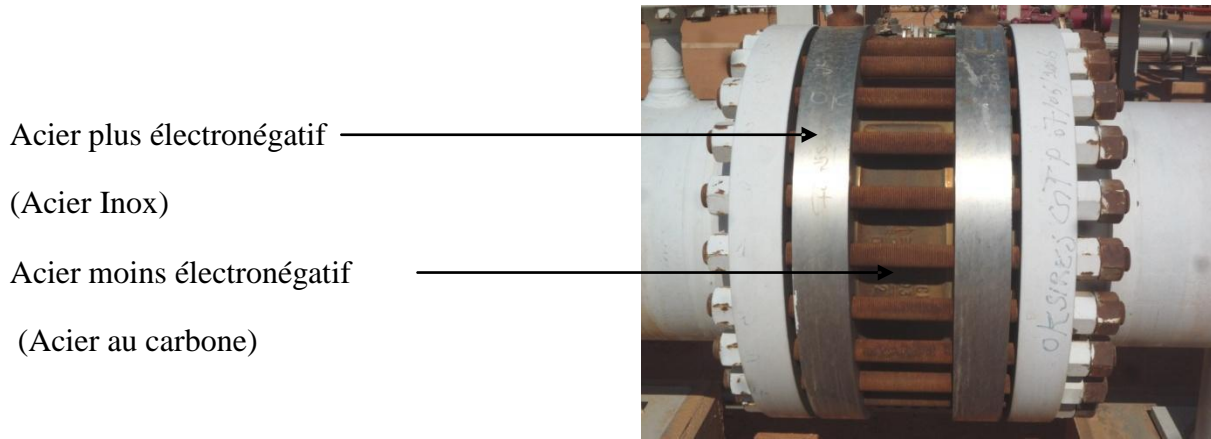


Figure 5.52 : Corrosion galvanique.[10]

#### 5.4.5 Corrosion intergranulaire

Cette forme de corrosion se manifeste par une attaque localisée aux joints de grains du matériau (figure 5.53). Ces derniers en effet constituent des zones désordonnées par rapport au réseau cristallologique plus régulier des grains.[10]



Figure 5.53 : Corrosion intergranulaire d'un inox.

### 5.4.6 La corrosion sous contrainte

Ce type de corrosion se définit comme un processus de développement de fissures, pouvant aller jusqu'à rupture complète de la pièce sous l'action combinée d'une tension mécanique et d'un milieu corrosif. En général, la contrainte mécanique est incapable à elle seule de rompre le matériau et le milieu est souvent peu ou pas agressif. Les actions simultanées de contraintes et d'un milieu corrosif produisent des fissurations dans un métal. Les fissures sont intergranulaires ou transgranulaires et se présentent souvent sous forme ramifiée.

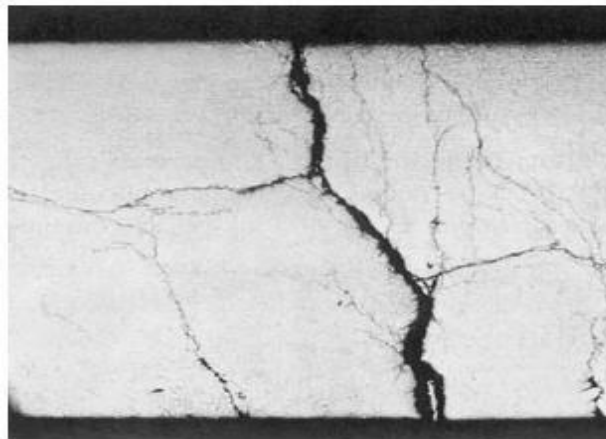


Figure 5.54: Corrosion sous contrainte d'un tube en acier AISI 304 (agrandissement X35).[10]

### 5.4.7 Corrosion érosion

Ce phénomène se produit par le mouvement relatif d'un fluide corrosif et d'une surface métallique. L'aspect mécanique du mouvement est important ; le frottement et l'usure peuvent intervenir. On a apparition de sillons, surfaces ondulées, trous,... ayant un aspect directionnel caractéristique. Les phénomènes de turbulence, collision, couplage galvanique, peuvent contribuer à détruire les films protecteurs et entraîner des vitesses de corrosion très élevées sur des matériaux par ailleurs très résistants à l'état statique.



Figure 5.55 : La corrosion érosion

#### 5.4.8 Corrosion-cavitation

La corrosion-cavitation désigne quant à elle la dégradation progressive du matériau sous l'action conjuguée de la corrosion et de l'implosion de bulles de cavitation. Le phénomène de cavitation, bien connu en mécanique des fluides, consiste en la formation de bulles dans un écoulement turbulent suite à une diminution locale de la pression en dessous de la tension de vapeur du fluide. Lorsque ces bulles atteignent une zone où la pression est plus forte, elles implosent en produisant une onde de choc. Cette dernière induit une fatigue locale du matériau conduisant à des ruptures répétées du film passif et à une attaque localisée. La figure 5.56 montre le processus de la corrosion-cavitation.

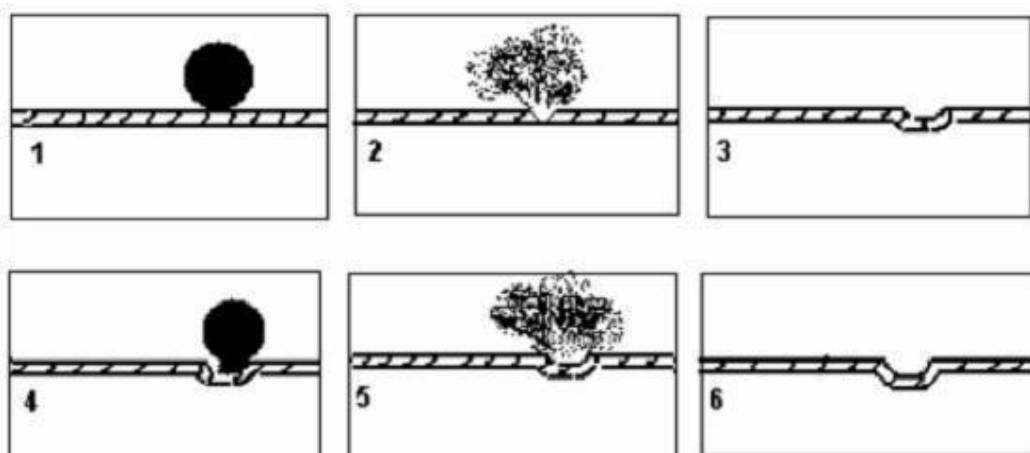


Figure 5.56 : Représentation schématique de quelques étapes dans le processus de cavitation.[10]

### 5.4.9 Corrosion par fatigue

Très comparable à la corrosion sous contrainte, le phénomène de fatigue-corrosion apparaît sous l'action conjuguée de l'environnement et d'une sollicitation cyclique. Il se manifeste par un abaissement de la résistance du matériau (acier) à la fatigue.

### 5.4.10 Corrosion bactérienne

La biocorrosion, appelée encore corrosion bactérienne, rassemble tous les phénomènes de corrosion dans lesquels les bactéries agissent directement ou par l'intermédiaire de leur métabolisme en jouant un rôle primordial, soit en accélérant un processus déjà établi, soit en créant les conditions favorables à son établissement. Lorsque les colonies de microorganismes se fixent à la surface du matériau (figure 5.57), elles créent ce que l'on appelle alors un biofilm.

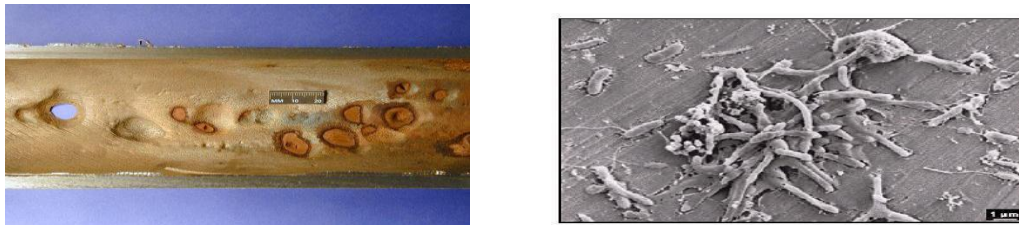


Figure 5.57 : Colonie de bactéries sur un acier inoxydable. [10]

## 5.5 Corrosion des pipelines

A cet égard, on distingue en général la corrosion externe et la corrosion interne.

### 5.5.1 Corrosion externe

Si ce n'était la corrosion, l'ingénierie des installations pétrolière se ferait uniquement à base de mécanique et de coûts. Ceci signifie que le matériau de construction pratiquement universel est l'acier, et qu'il faut donc le protéger de la corrosion par l'environnement naturel. On regroupe alors sous le vocable de corrosion externe la corrosion par l'air, la mer et les sols. Dans ce domaine, les techniques de prévention ont beaucoup évolué avec les progrès technologiques. La figure 5.58 illustre le cas de corrosion externe par l'air d'un pipeline.



Figure 5.58: Corrosion externe d'un pipeline exposé à l'air[10]

### 5.5.2 Corrosion interne

Dans ce cas on distingue d'une part les problèmes de dissolution, et leur implication sur la durée en termes de perte d'épaisseur et surépaisseur de corrosion, et d'autre part les problèmes de fissuration et leurs conséquences immédiates sur la sécurité. De ce fait, la dissolution peut être prévenue par des traitements d'inhibition, même si ceux-ci peuvent toujours être l'objet de défaillances temporaires, ne serait-ce qu'humaines (interruption d'approvisionnement, injection incorrecte). En revanche, la fissuration ne peut être prévenue que par le choix de métallurgies résistantes, car une fois le métal mis en place et vérifié, la fiabilité requise est alors assurée.



Figure 5.59: Corrosion interne de pipeline [10]

La corrosion externe est caractérisée par deux facteurs :

- Fragilisation par hydrogène
- Attaque par  $\text{CO}_2$

## 5.6 Moyen utilisés pour le contrôle et le suivi de la corrosion

La corrosion est souci majeur pour les industries pétrolières et gazières, pour cela différents moyens sont utilisés pour lutter contre ce phénomène ainsi que pour le contrôle de la vitesse de corrosion. Les moyens de contrôle de la corrosion au niveau de GTFT sont :

- Les sondes à coupons.
- Les sondes à résistance électrique
- Les Mesures des épaisseurs

### 5.6.1 Contrôle par sonde à coupon (Contrôle perte de masse) :

Le coupon est un échantillon de la même nuance d'acier que le pipe, pesé préalablement, et introduit dans le pipe. Après un intervalle de temps raisonnable, le coupon est enlevé et ensuite nettoyé de tous les produits de corrosion et pesés à nouveau.



Figure 5.60 : Photo d'un coupon

#### 5.6.1.1 Montage du coupon

Les Coupons doivent être montés de telle façon qu'ils sont solidement maintenus et sont électriquement isolés de tout contact avec tous les autres métaux afin d'éviter les effets de la corrosion galvanique. Le montage du matériel (consoles, chevilles, etc.) et les matériaux isolants devraient être sélectionnés pour être totalement résistants à l'environnement (figure 5.61). L'échec de l'un de ces éléments entraînera la perte de données ou perte d'isolation électrique. La figure 5.61 illustre l'emplacement du coupon dans le pipe.



Figure 5.61: L'emplacement du coupon dans le pipe



**5.6.1.2 Durée de contrôle**

En général, les tests coupon doivent être exécutés pour un minimum d'une semaine. Dans de nombreux cas, il sera utile et souhaitable d'évaluer l'effet du temps d'exposition qui peut être fait au moyen d'un intervalle de vérification contrôlé. Dans notre cas, la récupération des coupons se fait une fois tout les 6 mois.

**5.6.2 Contrôle par sonde à résistance électrique**

La probe à résistance électrique (ER) est une technique dite "on-line". C'est une méthode de surveillance de la vitesse de corrosion et l'ampleur des pertes en métal en cours même de processus de corrosion. La méthode ER est particulièrement adaptée aux environnements corrosifs soit pauvre ou riche en électrolytes continus comme des vapeurs, des gaz, les sols humides, hydrocarbures et des liquides non aqueux.

**5.6.2.1 Principe :** Cette méthode est simple dans son principe, elle consiste à mesurer la perte de masse de l'électrode de mesure en comparant sa résistance à celle de l'électrode de référence non corrodable ou protégée. Cette dernière est considérée comme électrode de référence (figure 5.62).



Figure 5.62 : Instrument de mesure



Figure 5.63 : Probe à fil bouclé.

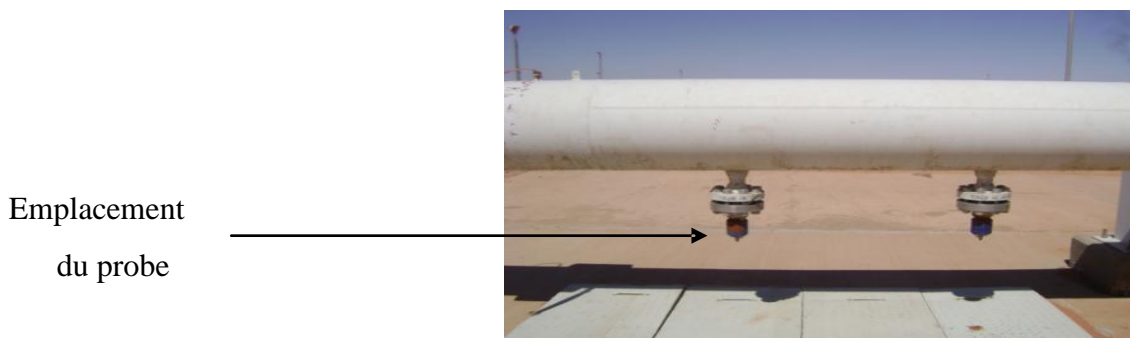


Figure 5.64 : Positionnement de probe dans la pipe[10]

### 5.6.3 Contrôle par mesure d'épaisseur :

Les ultrasons sont également utilisés pour de l'analyse dimensionnelle (mesure d'épaisseur)

#### 5.6.3.1 Contrôle par ultrasons

Les ultrasons sont émis au moyen de transducteurs (ou palpeurs) contenant un élément piézoélectrique qui transforme un courant électrique alternatif en oscillations mécaniques.

En présence de variations des caractéristiques du milieu, les ondes voient leur propagation perturbée selon les lois de la réflexion – réfraction – absorption : l'onde incidente arrivant à l'interface entre 2 milieux, transmet une partie de son énergie au second milieu et en réfléchit une partie dans le premier.

Les ultrasons, aux fréquences utilisées (1 à 10 MHz) ne se propagent pas dans l'air. Cette particularité est exploitée lorsque l'onde rencontre un défaut (fissure, inclusion...) ou l'autre face de la pièce.

En revanche, pour assurer leur passage entre le transducteur et la pièce à contrôler, il faut placer entre les deux un milieu dit de couplage : graisse, huile, gels spéciaux...

La méthode la plus usuellement employée est la méthode "par réflexion" qui n'utilise qu'un seul transducteur jouant simultanément le rôle d'émetteur et de récepteur.

Le contrôleur analyse la propagation et doit pouvoir distinguer les échos provenant de la géométrie de la pièce (face opposée, etc.) des échos pouvant provenir d'une anomalie. L'amplitude des signaux d'échos est en relation avec le pouvoir réfléchissant du réflecteur et dépend de diverses caractéristiques : nature, grandeur, forme, orientation...

La position et l'amplitude d'un écho ne permettent l'interprétation que si l'appareil est convenablement réglé et son bon fonctionnement vérifié périodiquement. L'amplitude d'un écho n'est jamais mesurée en absolu mais toujours comparée à l'amplitude de l'écho d'un réflecteur bien défini (bloc étalon, défaut type connu...)

#### 5.6.3.2 Principe

Les ondes ultrasonores se propagent dans un matériau donné à une vitesse déterminer on utilise un échantillon de même matériau et d'épaisseur connue sur lequel on étalonne l'appareil : le mesureur d'épaisseur.

Une onde ultrasonore est émise par un transducteur mono ou bi-éléments d'ondes longitudinales à travers le matériau et est renvoyée par la face opposée de la paroi. La mesure du temps d'aller /retour de l'onde permet alors de déterminer l'épaisseur de la paroi.

### 5.6.3.3 Avantages

- Accès nécessaire à un seul coté de la paroi.
- Facile à mettre en œuvre.
- Résultat immédiat



Figure 5.65 : Le mesureur d'épaisseur

## 5.7 Protection contre la corrosion

La lutte contre la corrosion est une préoccupation constante dans beaucoup de domaines industriels, elle doit être prise en considération depuis le début d'un projet et jusqu'à sa réalisation, il s'agit de garantir une certaine durée de vie à un objet pour un minimum de charges.

Au sein de **GTFT** les moyens de protection contre la corrosion sont :

- ✓ Protection cathodique pour la corrosion externe.
- ✓ Injection d'inhibiteur pour la corrosion interne.

### 5.7.1 Protection cathodique

La protection cathodique est la technique qui permet de conserver dans son intégrité la surface extérieure des structures en acier enterrées ou immergées, en s'opposant au processus électrochimique d'attaque du métal par le milieu ambiant, c'est-à-dire **la corrosion**. Les canalisations acier constituent le champ d'application principal de cette protection. Les réseaux en acier, même anciens et dégradés, peuvent bénéficier de cette technique dans des conditions économiques admissibles.

Elle consiste à amener par des moyens extérieurs et artificiels l'ensemble de la surface extérieure du métal à un potentiel suffisamment négatif pour rendre le métal entièrement cathodique et supprimer ainsi tout risque de corrosion extérieure. Le critère de protection cathodique est la valeur du potentiel au-dessous duquel l'acier ne peut se corroder. Pour l'acier enterré ou immergé, le critère de protection est mesuré avec une électrode de référence Cu/CuSO<sub>4</sub> en contact avec le milieu situé au voisinage immédiat du métal de -850 mV. Ce n'est qu'à partir d'une certaine valeur de courant que le potentiel nécessaire est atteint. Pour réaliser la protection cathodique des canalisations enterrées en acier, il suffira donc : soit de constituer une pile à l'aide d'un métal plus électronégatif que l'acier (magnésium ou zinc) : c'est la protection par anode sacrificielle.

Soit de les relier à une source électrique convenablement connectée de manière que l'acier devient la cathode du système et de vérifier que le potentiel de cette cathode atteint bien le critère de protection en tous points : c'est le soutirage de courant.

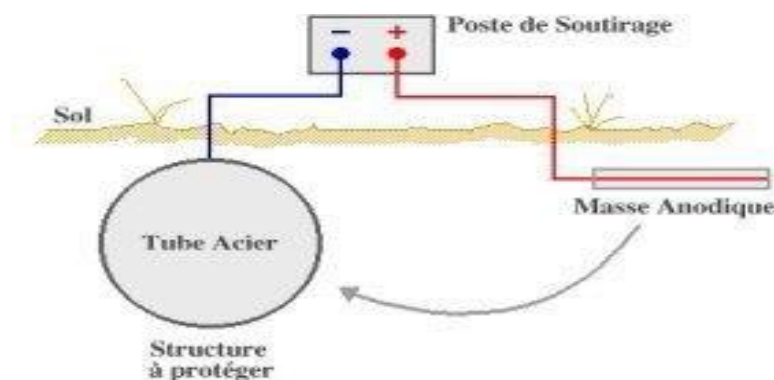


Figure 5.66 : Protection cathodique

Deux méthodes sont utilisées pour rendre un ouvrage cathodique par rapport à une anode extérieure.

- L'anode sacrificielle appelée encore anode réactive.
- le soutirage de courant ou dispositif à courant imposé

On note que au niveau de **GTFT** la protection par courant imposé sont couramment utilise pour protégé les canalisations.

### 5.7.1.1 Protection par courant imposé

Cette méthode utilise un générateur extérieur et une anode auxiliaire. Elle offre l'avantage de pouvoir régler la f.e.m ou le courant en fonction des besoins, ceci permet d'optimiser le système et de protéger de grandes surfaces.

### 5.7.1.2 Points de mesure

Ils sont destinés à contrôler le potentiel d'une canalisation par rapport au sol. Le nombre de points de mesure dépend de la configuration de l'ouvrage.

### 5.7.1.3 Mesure de potentiel

La mesure du potentiel des canalisations dans le sol est indispensable pour contrôler l'efficacité de la protection cathodique. On mesure le potentiel par l'intermédiaire d'électrodes de référence.

L'électrode de référence le plus utilisé c'est électrode au sulfate de cuivre  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ .



Figure 5.67 : L'électrode  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$

### 5.7.2 Injection d'inhibiteur de corrosion

Selon la définition donnée par la Nationale Association of Corrosion Engineers (NACE), un inhibiteur de corrosion est une substance chimique qui, ajoutée à faible concentration au milieu corrosif, ralentit ou stoppe le processus de corrosion d'un métal placé au contact de ce milieu, sans modifier la nature de ce dernier.

### 5.7.2.1 Le système d'injection d'inhibiteur de corrosion :

Dans le but de protéger les installations de surface et de conserver leur intégrité, un système d'injection d'inhibiteur de corrosion est mis en place. Ce dispositif comprend :

- ✓ Une citerne fixe remplie avec le produit chimique "inhibiteur".
- ✓ Pompes d'injection.
- ✓ Un débit mètre pour mesurer le débit.

L'injection d'inhibiteur de corrosion se fait au niveau de la tête de puits.



Figure 5.68: Le système d'injection d'inhibiteur de corrosion

## 5.8 Conclusion

Un facteur important qui entraîne une dégradation des pipelines dans l'industrie du pétrole et du gaz est la corrosion. Coûts énormes sont dirigés annuellement à atténuer la corrosion. La corrosion sous contrainte dans les oléoducs et le gaz est une question très importante, parce que toujours il y a fuite ou rupture est l'échec des pipelines peut constituer une menace potentielle pour les humains et l'environnement.

Nous présenterons dans le chapitre suivant une étude de maintenance d'un pipe en présence d'une fissure. Cette étude base sur la modélisation par éléments fins avec code calcule ABAQUS.

## 6.1 Introduction

Les pipelines sont sujets à divers problèmes (corrosion, fissuration) dues à des charges excessives suite à des mouvements du sol, ou à des conditions environnementales particulières (écoulement érosion alcalinité du sol...). Les méthodes traditionnelles de réparation qui consistaient à renforcer à l'aide d'un béton projeté, à couler un béton de résine, ou encore de remplacer les tronçons défectueux, sont souvent trop lourdes à mettre en œuvre et durent trop longtemps, et nécessitent souvent l'arrêt du débit du fluide. Le renforcement par enrobage de fibres (carbone, aramide, fibre de verre) noyées dans une résine époxydique est donc un procédé optimal en terme de coût, vu la facilité et la rapidité de la mise en œuvre. La réparation par patch en composite permet de retarder la propagation des fissures et par conséquent d'augmenter la durée de vie des structures ainsi réparées. [17].

Dans notre étude nous intéressons sur l'études les variations des contraintes de Von Mises dans un pipe fissurée avec différents pression. Ainsi que la diminution des concentrations des contraintes au niveau de front de fissure par la réparation de pipe en service par l'application d'un patch en composite avec le code de calcul ABAQUS.

ABAQUS, qui est l'un des codes de calcul, basé sur la méthode d'éléments finis, parmi les plus utilisés dans le monde.

## 6.2 Description du logiciel

ABAQUS CAE est divisé en unités fonctionnelles appelées modules. Chaque module contient les outils qui sont propres à une partie de la tâche de modélisation [18].

- ✓ Part ;( Piece)
- ✓ Property; (Propriet)
- ✓ Assembly;(Assemblage)
- ✓ Step;(étapes)
- ✓ Interaction;
- ✓ Load; (Charge)
- ✓ Mesh; (Maillage)
- ✓ Job; (Execution)
- ✓ Visualization; (Visualisation )

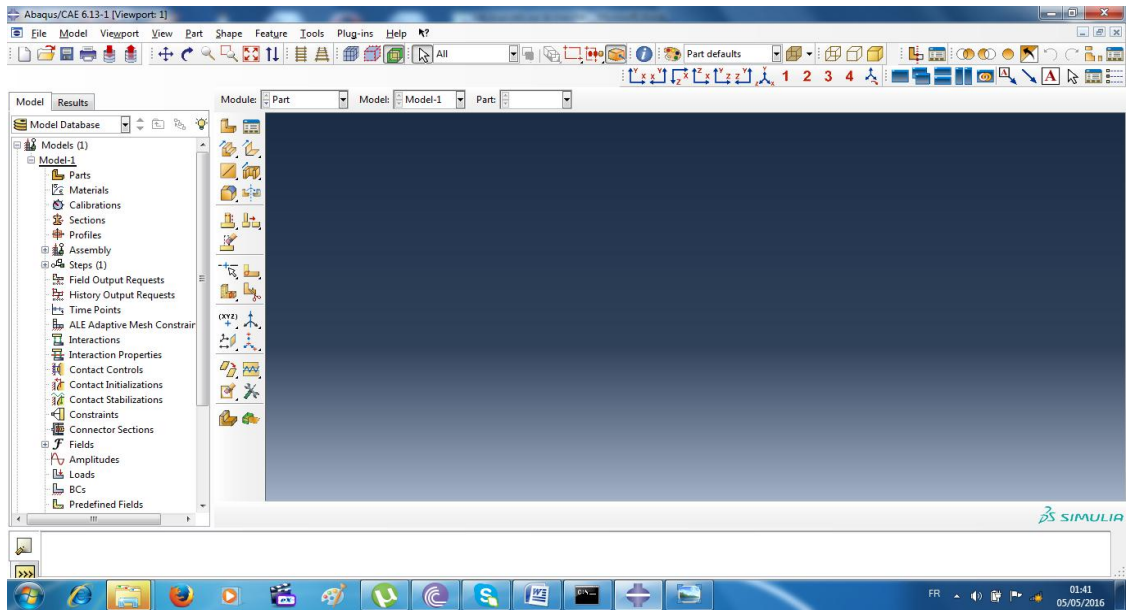


Figure 6.69 : Fenêtre de l'interface

### 6.2.1 Le module Part (Pièce) :

Le module Part permet de créer des parties ou objets géométriques, soit en les dessinant dans ABAQUS CAE, soit en les important d'un autre logiciel (SolidWorks, Ansys, Auto cad...) de modélisation. [18]

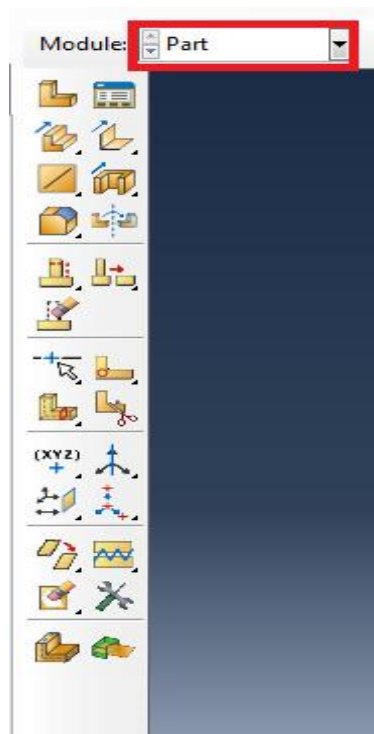


Figure 6.70 : Fenêtre de module Part



### 6.2.2 Le module Property :

Le module property permet de définir les propriétés des parties, ou objets géométriques, créées dans Part ou d'une région de ces parties. [18]

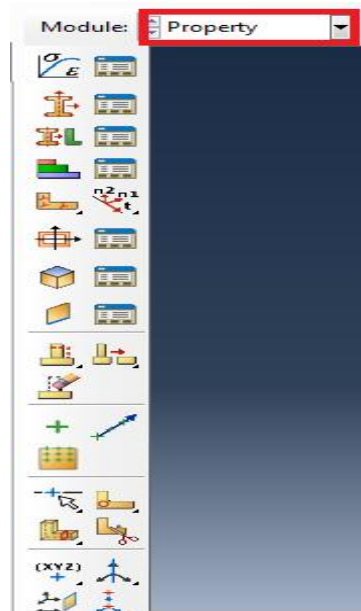


Figure 6.71 : Fenêtre de module Property

### 6.2.3 Le module Assembly (Assemblage) :

Ce module permet d'assembler les différentes parties créées dans un même repère de coordonnées global. Un modèle ABAQUS contient un seul assemblage. [18]



Figure 6.72 : Fenêtre de module Assembly

### 6.2.4 Le module Step (Etape) :

Ce module permet de créer et configurer les étapes d'analyse et les requêtes pour le post-traitement ou **Output Requests**. La séquence d'une étape fournit une manière commode de capturer des changements dans un modèle (tel qu'un changement du chargement ou des conditions aux limites) : les requêtes de post-traitement peuvent changer selon besoins pour chaque étape. [18]

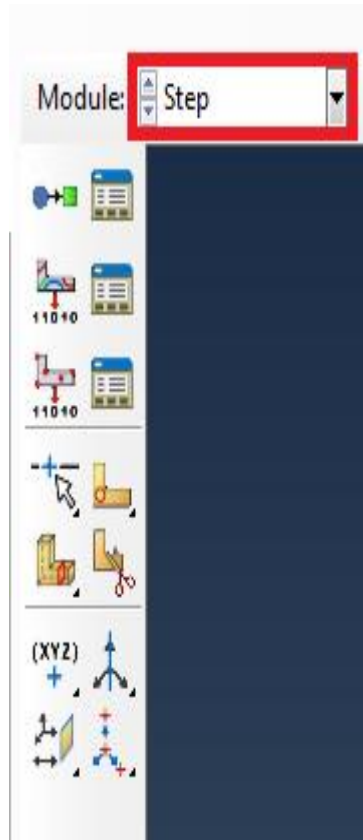


Figure 6.73 : Fenêtre de module Step

### 6.2.5 Le module Interaction :

Grâce à ce module, il est possible de spécifier les interactions mécaniques et thermiques entre les différentes parties et régions du modèle. Un exemple d'une interaction est le contact entre deux surfaces. Il faut savoir qu'ABAQUS ne prend en compte que les interactions explicitement définies, la proximité géométrique n'étant pas suffisante. [18]

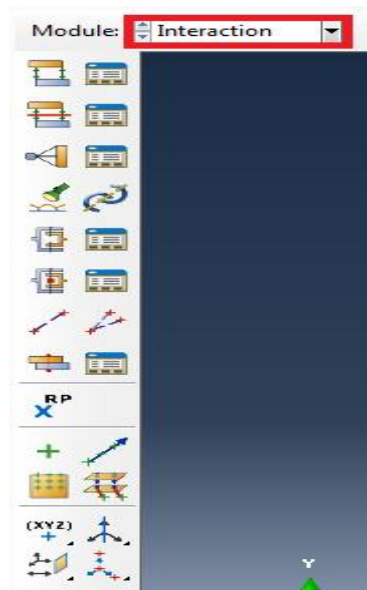


Figure 6.74 : Fenêtre de module Interaction

### 6.2.6 Le module Load (Les charges) :

Le module Load permet de spécifier tous les chargements, conditions aux limites. Il faut savoir que les chargements et les conditions limites sont dépendants des étapes (**Step**), ce qui signifie que vous devez indiquer les étapes d'analyse dans lesquelles elles sont actives. [18]



Figure 6.75 : Fenêtre de module Load

### 6.2.7 Le module Mesh (Maillage) :

Ce module contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage éléments finis sur un assemblage. [18]

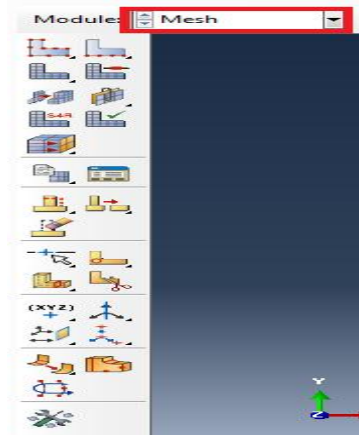


Figure 6.76: Fenêtre de module Mesh

### 6.2.8 Le module Job :

Une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, le module **Job** peut être utilisé pour analyser ce modèle. Ce module permet de soumettre interactivement un calcul(**Job**) pour l'analyse et de surveiller son progrès. Plusieurs modèles et calculs peuvent être soumis et surveillés simultanément. [18]

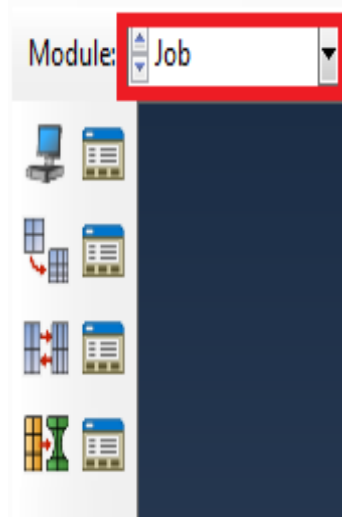


Figure 6.77 : Fenêtre de module Job

### 6.2.9 Le module Visualization (Visualisation) :

Ce module fournit l'affichage graphique des modèles et des résultats éléments finis. Les variables qu'on peut sortir sont commandés à partir des requêtes de post-traitement (**Output Requests**) du module **Step**. [18]



Figure 6.78 : Fenêtre de module Visualizatoin

### 6.2.10 Le module Sketch (Esquisser) :

Ce module permet de créer des formes bidimensionnelles employées pour aider à former la géométrie définissant une pièce dans ABAQUS/CAE. Il peut être utilisé pour créer des parties planaires, des poutres, des géométries 2D qui peut être extrudé ou tourné pour former des parties tridimensionnelles. [18]

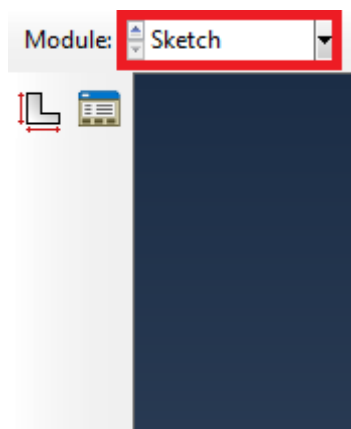


Figure 6.79 : Fenêtre de module Sketch

### 6.2.11 Système d'unités dans le code de calcul Abaqus

Comme dans beaucoup de logiciels, il n'y a pas de système d'unités fixé. C'est à l'utilisateur de définir son propre système (tableau 6.4)

Quantité	SI	SI (mm)
Longueur	<i>m</i>	<i>mm</i>
Force	N	N
Masse	Kg	tonne ( $10^3$ kg)
Temps	s	s
Contrainte	Pa ( $N/m^2$ )	MPa ( $N/mm^2$ )
Energie	J	mJ ( $10^{-3}$ J)
Densité	$Kg/m^3$	tonne/ $mm^3$

Tableau 6.4 : Système d'unités pour la programmation [18]

### 6.3 Simulation numérique

Cette partie porte sur une analyse numérique par les méthodes des éléments finis tridimensionnelle. Nous allons étudier l'évolution des contraintes de Von Mises dans les cas suivant :

- 1) Evolution des contraintes de Von Mises dans un pipe sain sous différentes pressions.
- 2) Evolution des contraintes de Von Mises dans un pipe fissuré sous différentes pressions.
- 3) Evolution des contraintes de Von Mises dans un pipe fissuré réparé par un patch en composite
  - Effet de variation de l'épaisseur du patch
  - Effet de variation de l'épaisseur de l'adhésif FM37
  - Effet de la pression interne du pipe sur la réparation par patch

### 6.3.1 Rappel sur le critère de Von Mises

Ce critère considère que le seuil de plasticité est lié à l'énergie élastique de cisaillement. C'est l'énergie déviatrice qui provoque la plasticité selon les plans de cisaillement maximum. Cette énergie est définie par [ 8] :

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{rr})^2 + (\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta})^2} \quad (4.1)$$

Tell que :

$\sigma_e$  = Contrainte équivalente de Von Mises

$\sigma_{\theta\theta}$  = Contrainte circonférentielle

$\sigma_{zz}$  = Contrainte de traction

$\sigma_{rr}$  = Contrainte radiale

### 6.3.2 Modèle géométrique

La géométrie étudiée c'est un gazoduc 10" en acier API 5L X52 qui sont utilise dans le projet ILLIZI-DJANET pour transport de gaz de ville sous pression de 40 bar.



Figure 6.80 : Gazoduc 10" dans le projet ILLIZI-DJANET

### 6.3.3 Modélisation numérique d'un pipe sans fissure

#### 6.3.3.1 Représentation géométrique

Pour des raisons de symétrie seulement la moitié du pipe étant modélisée par des éléments cubiques (hexaèdres) à huit nœuds.

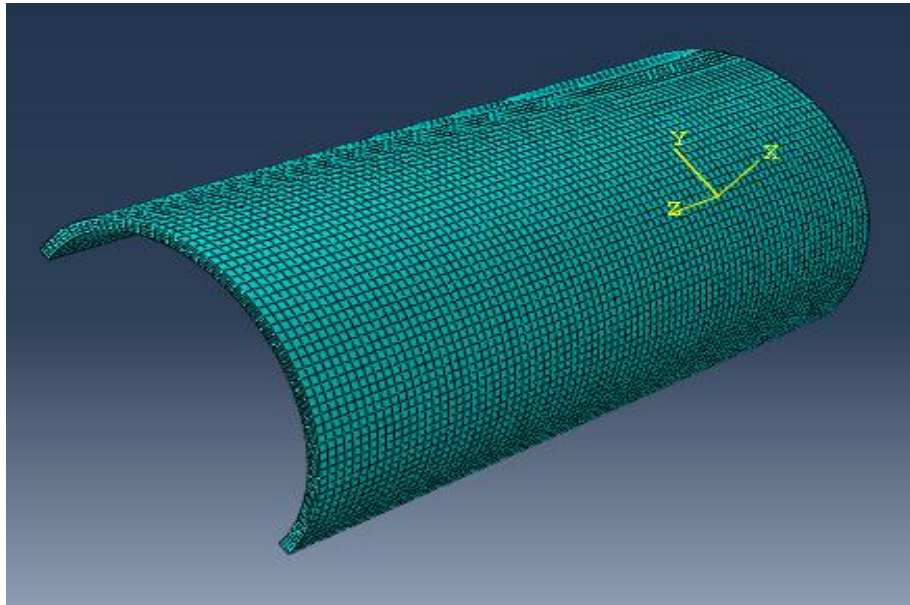


Figure 6.81: configuration de type

#### 6.3.3.2 Les caractéristiques mécaniques et les dimensionnes du matériau

Le matériau utilisé dans cette étude est en acier API 5L X52, un matériau fréquemment utilisé dans les structures des pipelines. Nous avons considéré que le comportement est élastique.

Les propriétés mécanique du pipe utilisant dans cette simulation sont données dans le tableau suivant :

Module de Young (Mpa)	Coefficient de Poisson	Limite élastique (Mpa)	Contrainte de rupture (Mpa)
21e3	0.3	360	455

Tableau 6.5 : les propriétés mécaniques du matériau constituant le pipe

Les dimensionnes du moitié du pipe (180°) sont indiqué ci-dessous :

- Rayon extérieur  $R_{ext}=127\text{mm}$
- Rayon intérieur  $R_{int}= 118,26 \text{ mm}$



- L'épaisseur du tube  $t= 8.74\text{mm}$
- Longueur du tube est  $L=500\text{mm}$

### 6.3.4 Modélisation numérique d'un pipe comportant un fissure

#### 6.3.4.1 Représentation géométrique

On a considéré un modèle formellement identique au modèle précédent. Le pipe comporte un fissure a une forme longitudinal caractérisé par son longueur 6mm. Un maillage raffiné est effectué autour de front de fissure. Le nombre total d'éléments du pipe est égal à 26040.

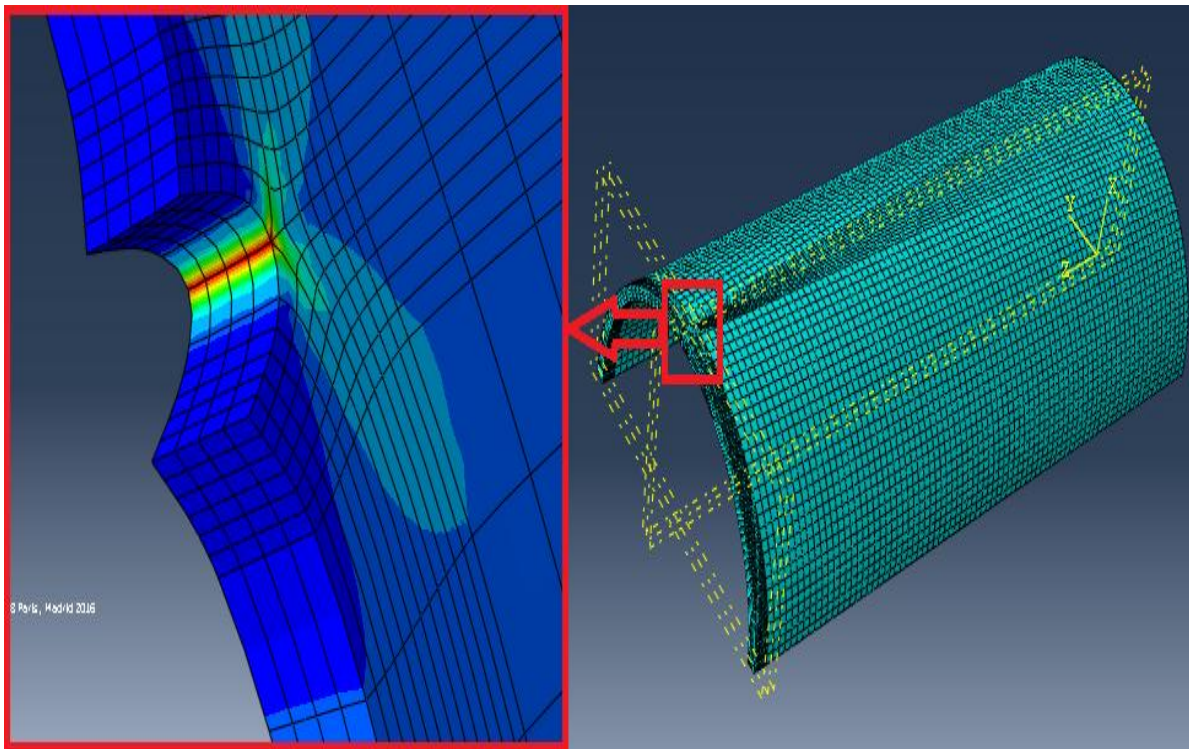


Figure 6.82 : Configuration d'un pipe avec fissure

### 6.3.5 Modélisation numérique d'un pipe avec fissure réparée par patch en composite

#### 6.3.5.1 Représentation géométrique

On a considéré un modèle formellement identique au modèle précédent. La réparation est réalisée par un patch en composite (borne/époxy). Tell que l'épaisseur du patch étudié est de l'ordre de 2.5 ; 5 ; 7.5 et 10mm et celle l'épaisseur de la colle (l'adhésif FM37) est de l'ordre de 0.4 ; 0.5 ; 0.6 ; 0.7 et 0.8mm

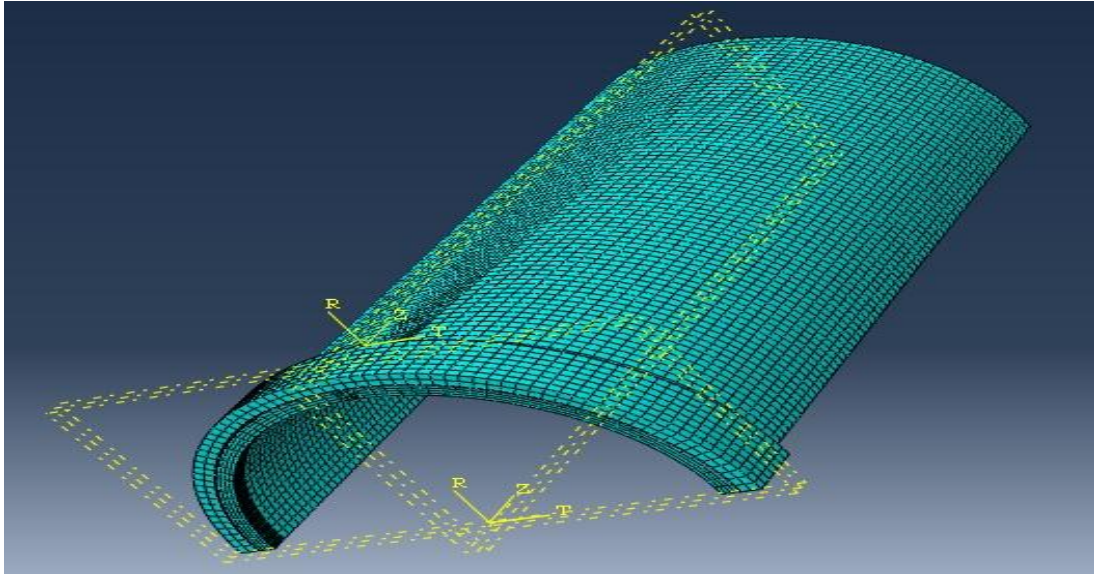


Figure 6.83 : Configuration type de réparation

Le tableau (6.6) regroupe les valeurs des propriétés mécanique de patch en composite utilisées dans notre étude pour réparation de pipeline fissurée.

Propriétés	patch	adhésif
	<b>borne /époxy</b>	<b>FM37</b>
Module de Young longitudinal E1 (Gpa)	200	2.21
Module de Young transversal E2 (Gpa)	25	
Module de Young transversal E3 (Gpa)	25	
Coefficient de Poisson longitudinal $\nu_{12}$	0.21	0.43
Coefficient de Poisson transversal $\nu_{13}$	0.21	
Coefficient de Poisson transversal $\nu_{23}$	0.21	
Module de cisaillement G12 (GPa)	7.2	
Module de cisaillement G13 (GPa)	5.5	
Module de cisaillement G23 (GPa)	5.5	

Tableau 6.6 : Propriétés mécanique des différents matériaux [12]

### 6.3.6 .les conditions aux limité

Tout calcul par éléments finis nécessite la définition des conditions aux limites. Pour commencer, il faut dire que la géométrie de pipe a été simplifiée en considérant moitié, car elle est symétrique par rapport au plan médian (figure 6.84 et 6.85)

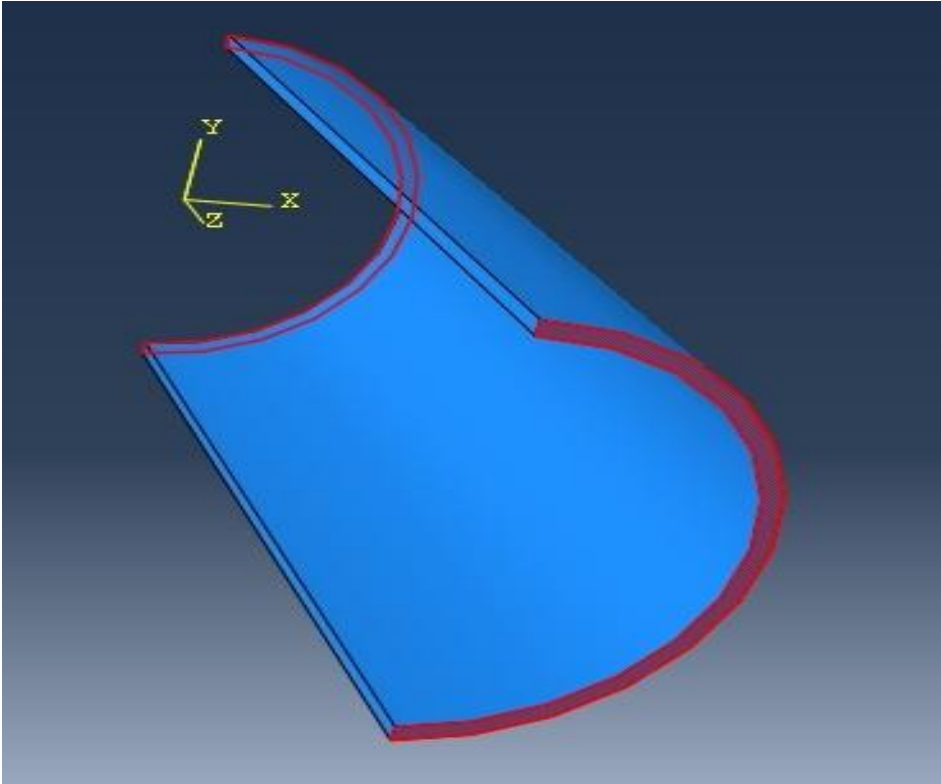


Figure 6.84 : L'élimination de mouvement aux niveaux des surfaces rouge suivant l'axe OZ

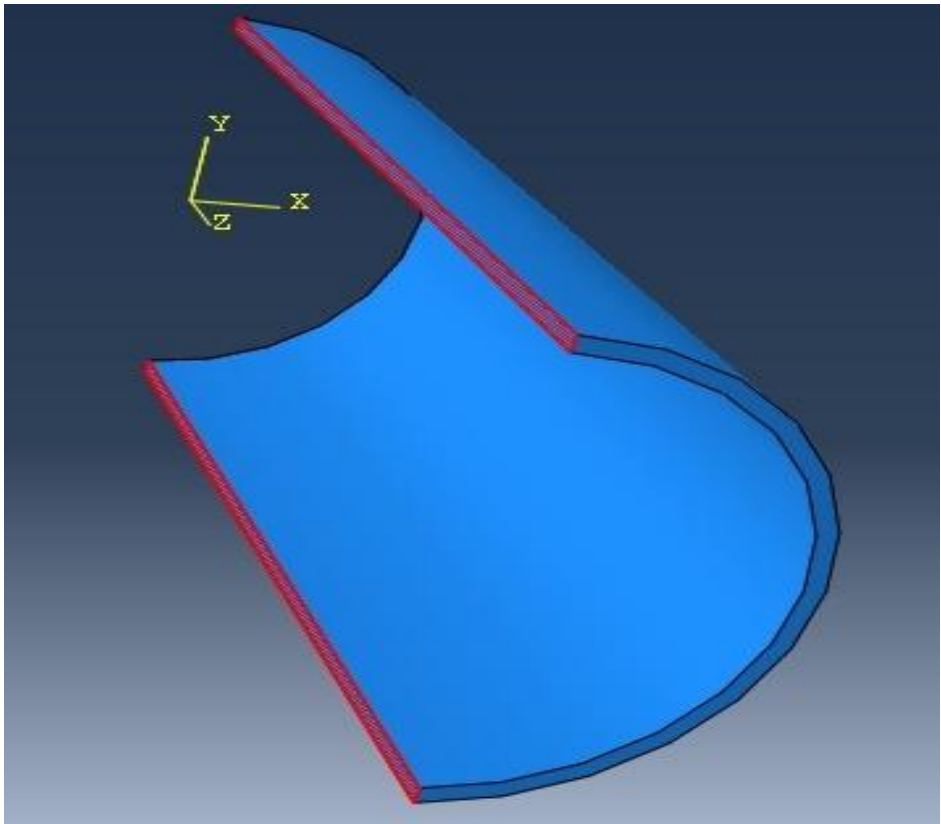


Figure 6.85 : L'élimination de mouvement aux niveaux des surfaces rouge suivant l'axe OX

### 6.3.7 Maillage

L'analyse est réalisée par la méthode des éléments finis tridimensionnels est donc sur des éléments volumique. Un maillage automatique sera effectué sur la structure et le type d'élément employé pour la modélisation est hexaédriques structurés à 8 nœuds. La figure (6.86) représente le maillage de la structure. Ce maillage reste le même tout au long du calcul afin d'éviter toute influence du maillage sur les résultats.

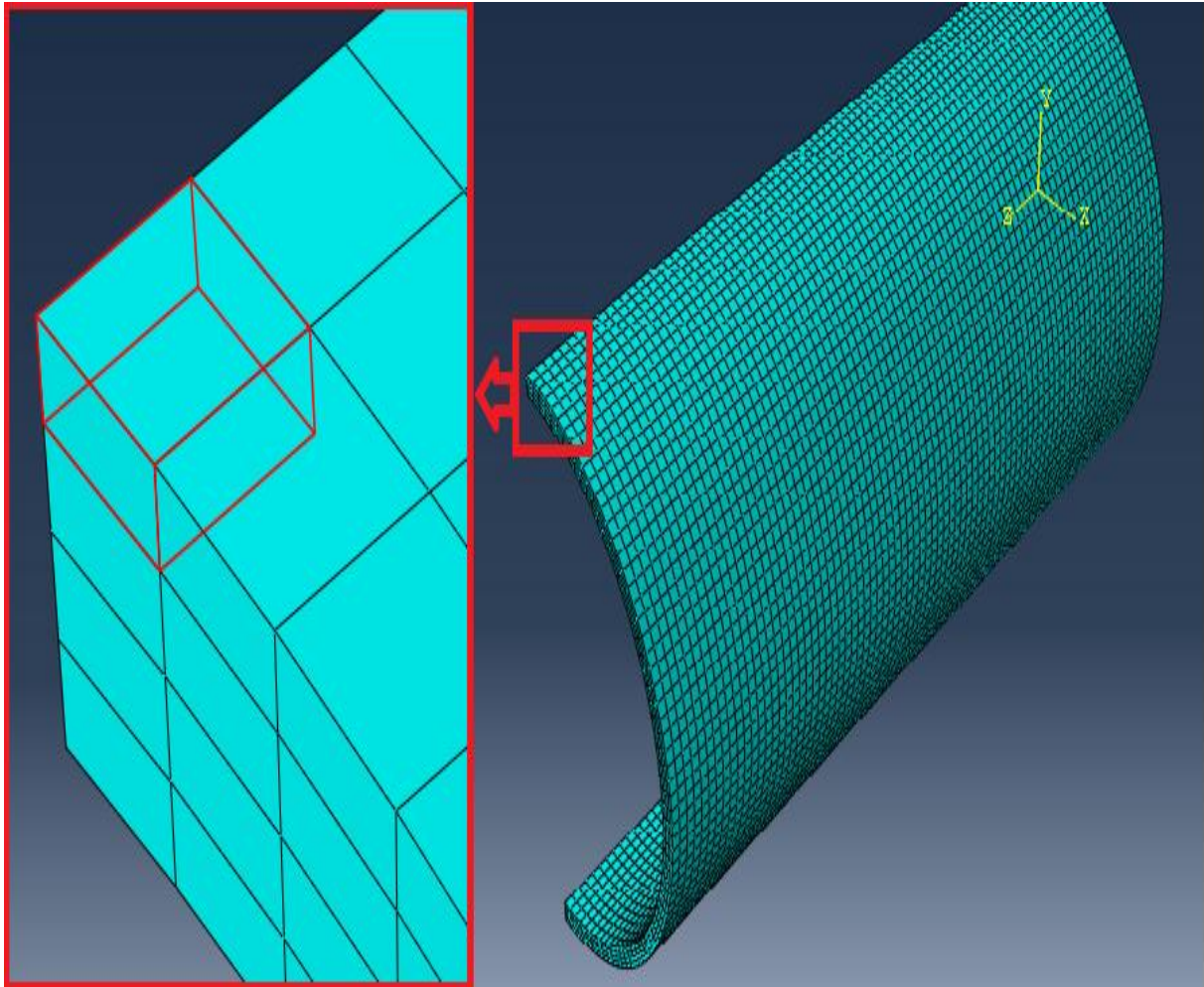


Figure 6.86 : Type d'élément utilisé pour la génération du maillage

## 6.4 Résultats et interprétations

### 6.4.1 Variation des contraintes de Von Mises dans un pipe sans fissure

La figure (6.87) présente la variation des contraintes de Von Mises dans un pipe sain sous différentes pressions. On note que ces contraintes restent inférieures à la limite élastique du matériau du pipe (X52) pour des pressions de service de 1 ; 1.5 ; 2 ; 2.5 ; 3 ; 3.5 ; 4 ; 4.5 et 5 Mpa.

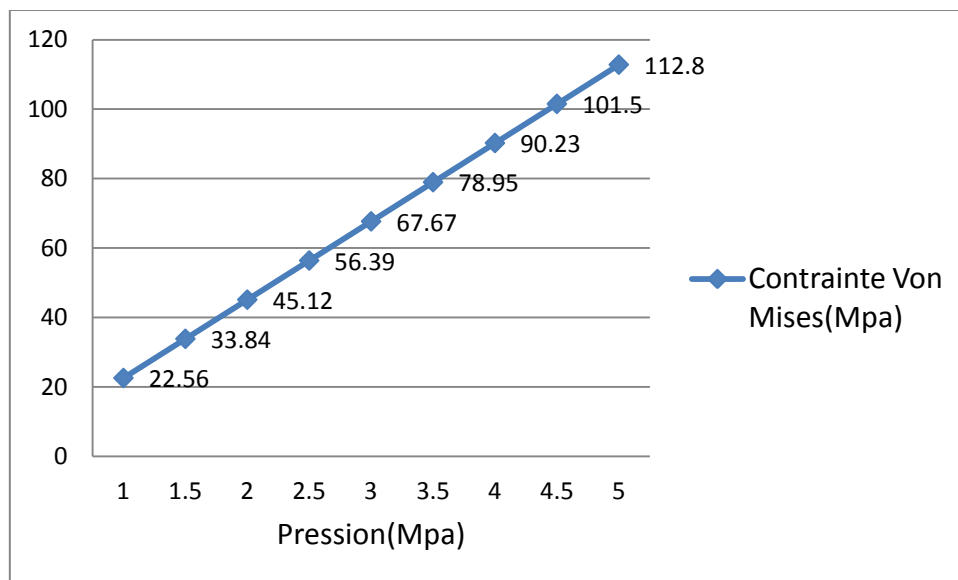


Figure 6.87 : La variation des contraintes de Von Mises dans un pipe sain

### 6.4.2 La variation des contraintes de Von Mises dans un pipe fissuré

La figure (6.88) présente la variation des contraintes de Von Mises dans un pipe fissurée sous différentes pressions. On constate une concentration des contraintes de Von Mises au front de fissure avec l'augmentation de la pression interne comparée avec un pipe sain (sans fissure). On remarque que cette concentration à cause de présence une fissure. Ce ci montre l'effet négatif de la présence de fissure dans un pipeline.

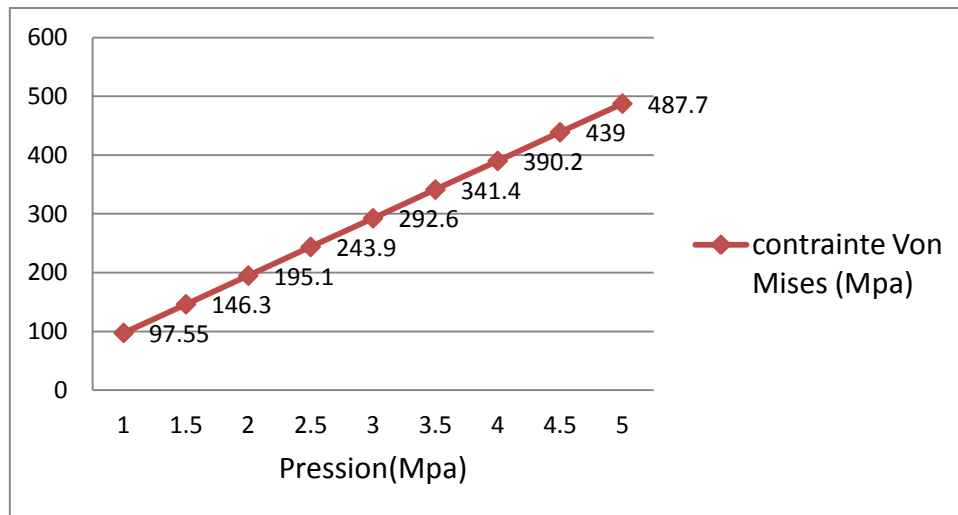


Figure 6.88 : La variation des contraintes de Von Mises dans un pipe fissuré sous différentes pressions

### 6.4.3 La variation des contraintes de Von Mises dans pipe réparée par patch en composite

#### 6.4.3.1 l'effet de l'épaisseur du patch

La figure (6.89) représente la variation des contraintes de Von Mises en fonction de l'épaisseur du patch. Les contraintes de Von Mises diminuent avec l'augmentation de l'épaisseur du patch. L'effet bénéfique de l'épaisseur du patch est confirmé par la réduction de la concentration des contraintes au front de fissure avec l'augmentation de l'épaisseur du patch, pour une pression interne de 4 Mpa et l'épaisseur de la colle est de 0.4 mm. Une optimisation de l'épaisseur du patch a été recommandée par plusieurs chercheurs [19,20]

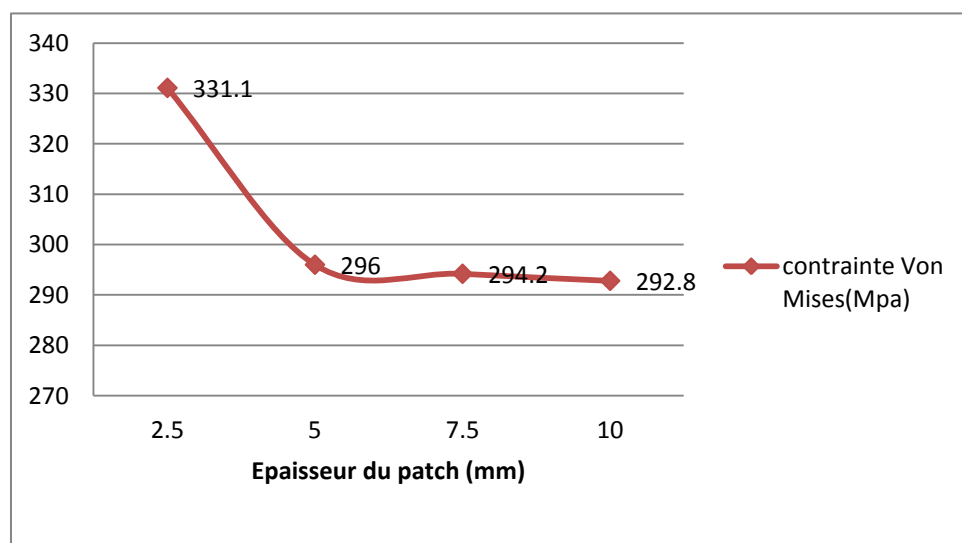


Figure 6.89: La variation des contraintes de Von Mises en fonction de l'épaisseur du patch

### 6.4.3.2 Effet de l'épaisseur de la colle

La figure (6.90), montre la variation de contrainte de Von Mises pour une fissure réparée par patch en fonction de l'épaisseur de l'adhésif. On constate que lorsque l'épaisseur de l'adhésif augmente le contrainte de Von Mises augmente, pour une pression interne 4 Mpa et l'épaisseur du patch est 10mm. L'effet bénéfique de la réparation est obtenu pour les faibles épaisseurs.

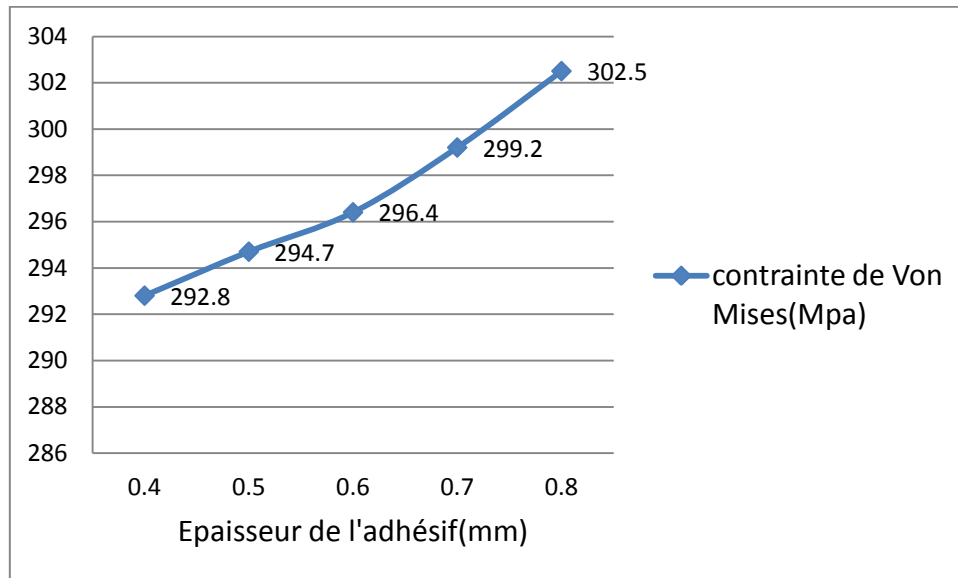


Figure 6.90 : Effet de l'épaisseur de l'adhésif sur les variations des contraintes de Von Mises

### 6.4.3.3 Effet de la pression interne du pipe sur la réparation par patch

Nous avons présenté dans la figure (6.91) la variation des contraintes en fonction de la pression interne et nous remarquons que les contraintes de Von Mises au front de fissure augmentent proportionnellement avec l'augmentation de la pression interne appliquée, pour l'épaisseur du patch est 10mm et l'épaisseur de la colle est 0.4mm. La figure montre clairement l'effet bénéfique du patch, tel que les valeurs de contrainte de Von Mises dans le cas de pipe réparé sont nettement faible que celles d'un pipe fissuré.

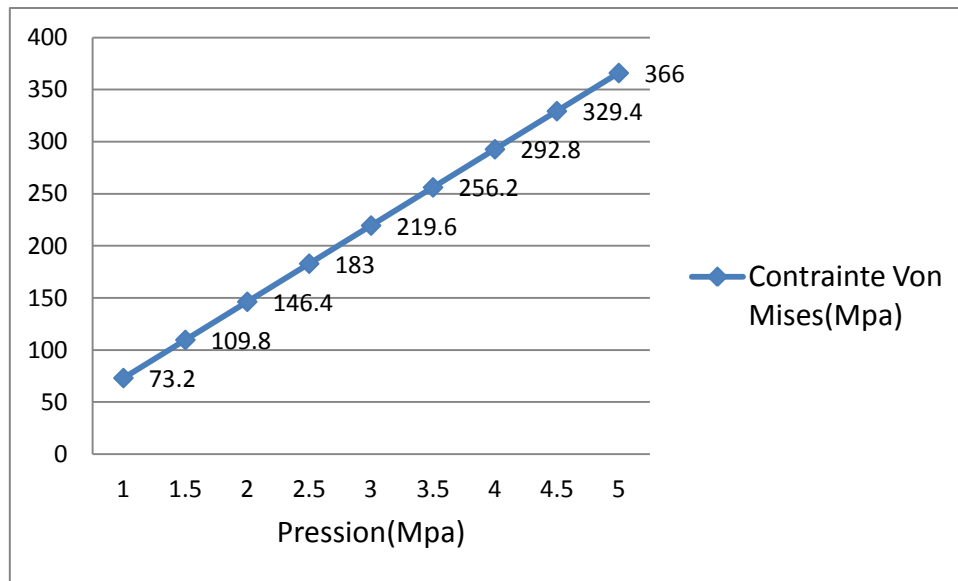


Figure 6.91: Effet de la pression interne d'un pipe sur les variations des contraintes de Von Mises

## 6.5 Conclusion

L'objectif de cette étude est de montrer l'influence du renforcement des structures par patch en composite sur la réduction la concentration des contraintes de Von Mises en front de fissure. Le choix du renfort composite est une question sensible. Les différents types de renfort principalement utilisés sont de type carbone/époxy et borne/époxy [21]-[22]. Nous avons choisi comme matériau composite utilise pour la réparation des structures métallique le borne/époxy. Il présente certain avantage par rapport aux autres types de patch en composite [10] qui sont :

1. Un bon coefficient de dilatation thermique dans le sens des fibres qui aide à réduire la contrainte résiduelle thermique due aux températures élevées.
2. Une bonne résistance aux contraintes d'ouvertures en mode I
3. . Absence de problèmes de corrosion métallique sur la structure après réparation

Nous avons introduit le code de calcul Abaqus/CAE dont la particularité est de pouvoir, à présent, modéliser de façon totalement automatique plusieurs sous-domaines et plusieurs matériaux. Ce code de calcul éléments finis 3D permet de modéliser un ou plusieurs matériaux en grandes déformations. La bonne maîtrise de la structure du maillage ainsi que les conditions aux limites imposés sont indispensables si l'on veut obtenir un calcul précis des champs de contraintes.



### Conclusion

Les pipes sont soumises en service à des sollicitations mécaniques donnant lieu à des contraintes généralement multiaxiales et à amplitude variable, ce qui conduit à l'apparition de fissures provoquant leurs endommagements ou leurs ruptures. Une alternative à la réparation de ces pipes consiste à les renforcer auparavant, afin de retarder l'apparition ou la propagation de fissures. Ainsi les patchs en matériaux composites sont utilisés dans ce but. Cette réparation permet de retarder la propagation des fissures et augmenter la durée de vie des pipes ainsi réparés.

L'étude présentée répond à des préoccupations liées à la maintenance industrielle portant sur l'augmentation de la durée de vie de structures endommagées. Une méthode est proposée pour la réparation ; renforcement par patch en matériau composite (Boron/époxy). Des calculs tridimensionnels par éléments finis ont ensuite été réalisés avec le code de calcul Abaqus/CAE.

Les principaux résultats de l'analyse montrent l'effet bénéfique du patch sur le comportement en rupture des pipes endommagés, Les paramètres de rupture dépendent essentiellement de la pression interne du pipe des propriétés géométriques et mécaniques du patch, du pipe et de l'adhésif ainsi que leurs épaisseurs, Les résultats obtenus numériquement par la méthode des éléments finis tridimensionnelle permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Le choix de l'épaisseur du patch en composite influe positivement sur la réduction des contraintes au voisinage de la fissure pour une meilleure durée de vie.
- Le patch réduit l'intensité du champ de contrainte en pointe de fissure.
- l'adhésif et son épaisseur doit être aussi optimisé afin de permettre la transmission des contraintes vers le patch et pour éviter la rupture de l'adhésif en raison à l'augmentation des contraintes dans la couche adhésive.

Enfin, d'après nos résultats de simulation, nous pouvons conclure que la réparation par collage de composite est très efficace et prometteuse pour la réparation des structures métalliques. En perspectives, il serait souhaitable d'appliquer cette méthode de réparation en recherchant les matériaux composites adéquats en minimisant le nombre de spirales de réparation où l'assemblage collé serait plus résistant , les sollicitations environnementales seraient faibles et le temps de réparation serait réduit.

## Référence bibliographie

- [1] Moustabchir H. El-hakimi A. Hariri S. Hadj-meliani M. Azari Z., Etude sous pression de tuyaux de transport de gaz, en présence de défauts de type entaille, 18ème Congrès Français de mécanique, Grenoble, 27-31 aout 2007.
- [2] 6th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group, 1970-2004, (2005).
- [3] 7th Report of European Gas Pipeline Incident Data Group, 1970–2007, Gas pipeline Incidents, 1 –33 – <http://www.EGIG.nl>, December 2008.
- [4] Chow WT, Atluri SN., Composite patch repairs of metal structures: adhesive nonlinearity, thermal cycling, and debonding. *AIAA J.* 35(9): 1528–1535, 1997.
- [5] Pablo Gabriel Fazzini, José Luis Otegui. Influence of old rectangular repair patches on the burst pressure of a gas pipeline. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 83 (2006) 27–34.
- [6] documentation du Groupement Tin Fouy Tabonkort (GTFT).
- [7] Sedrini Abdelkader, Etude sur le comportement en endommagements des aciers API 5X65 du model wiebull, ingénieur mécanique, université Telmcen, 2007
- [8] Bouziane Abdelkader, contribution à la détermination des critères de qualité des tubes soudés soumis à une pression intérieure, magister en génie mécanique, université M'Hamed Bougara Boumerdas, 2008
- [9] : Application d'un control non destructive des soudures de pipeline par la méthode de radiographie industrielle
- [10] H. Mounir & K. Younes , « Inspection, suivi et évaluation de la corrosion interne d'un pipeline ». Mémoire d'ingénieur, université Houari Boumediene, Algérie 2010.
- [11] BENEDDEB Mostafa, Etude les défauts de soudage des pipelines, Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2012
- [12] Azzouz Achewek , Etude de la réparation des pipes endommagés par patch en composites, magister en génie mécanique, université de Sidi bel Abbes. 2012

- [13] Tahar Nateche, Réhabilitation et renforcement des canalisations sous pression en présence des défauts de surfaces, thèse de doctorat, université Mohamed Boudiaf Oran, 2010
- [14] Djdid Ibrahim ,Etude sur les déffillance des aciers API-5L-X60 pour pipeline gaz de la ligne GZ1, université Telmcen,2013
- [15] M. ALLOUTI. Étude de la nocivité de défauts dans les canalisations de transport de gaz tels les éraflures, les enfoncements ou leurs combinaisons, Thèse de Doctorat, Université Paul Verlaine de Metz, 2010.
- [16] Julien CAPELLE. Étude de la nocivité d'un défaut de type éraflure sur une conduite destinée au transport de gaz naturel soumise à une pression d'hydrogène, Thèse de Doctorat, Université Paul Verlaine de Metz, 2008.
- [17] A.A. Griffith, The phenomena of rupture and flow in solids. Philosophical Transactions of the Royal Society, Vol. A221, 1920, pp. 163-198.
- [18] ABAQUS standard User's manuel, Karlsson & Sorensen, 2005.
- [19] Norme AFNOR NF A 03-183, Mécanique de la Rupture : Détermination à partir de La courbe J- $\Delta a$  des valeurs conventionnelles  $J_0$  et  $dJ/da$ , caractéristiques de la résistance à la déchirure ductile. juin 1987
- [20] Norme ASTM E813-89. Standard Test Method for JIC, A leasure of fracture Toughness. Avril 1991
- [21] O. Kolednik et H.P. Stuwe. The stereophotogrammetric determination of the critical crack tip opening displacement, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 21, N°1, 1985, PP. 145-155.
- [22] D. Bergez. La rupture des plaques et des coques fissures, Thèse de doctorat es sciences. Université de paris, Juin 1974.