



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد

Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي

Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

**Département De Maintenance En Electromécanique**

**MÉMOIRE**

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière** : électromécanique

**Spécialité** : *Maintenance en électromécanique.*

**Thème**

**Prédiction de la répartition des contraintes des pipelines  
réparés par patches en composites – variation de la géométrie du  
défaut –**

Devant le jury composé de

Présenté et soutenu publiquement par :

**Cheribi Noufel & Adda benziane Nacer**

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Lalaoui Mohammed Amine	MAA	IMSI	Président
Hemmami zineb	MCB	IMSI	Examinateur
Bouhafis Mohammed	MCB	IMSI	Encadreur

**Année Universitaire 2021/2022**

# *Remerciements*

*Tous d'abord, je tiens à remercier Dieu de m'avoir donné la force et le courage de mener à terme ce travail ; je tiens aussi à remercier toute ma famille pour le soutien et les encouragements.*

*Je remercie Monsieur BOUHAFS MOHAMED, mon encadreur pour son aide précieuse, sa confiance, sa patience durant toute la période de préparation de ce mémoire.*

*Je remercie vivement toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire*

*A cette source de tendresse, de patience et de générosité*

*A mon père*

*A la personne qui a toujours lutté pour mon succès...*

*A mes amis pour le respect qu'ils m'ont toujours témoigné*

*Et je les remercie pour un si merveilleuse compréhension... jamais  
oubliée*

*A tous ceux qui m'ont aidé dans ma vie...*

*Adda  
benziane  
nacer*

# *Dédicace*

*A Mes Très chers Parents*

*Je dédie ce mémoire à mes parents, pour l'amour qu'ils m'ont  
toujours donné, leurs*

*Encouragements et toute l'aide qu'ils m'ont apportée durant mes  
études.*

*Aucun mot, aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma  
considération, et mon*

*Ka*

*Amour pour les sacrifices qu'ils ont consentis pour mon instruction  
et mon bien-être.*

*Ka*

*A Mes Amis*

*Nulle dédicace ne pourrait exprimer ma profonde affection et mon  
immense gratitude pour*

*Tous les encouragements et soutiens qu'ils ont consentis à mon  
égard*

*Cheribi  
noufel*

## Sommaire

Remerciements .....	
Dédicaces.....	
Sommaire.....	
Liste des figures.....	
Liste des tableaux .....	
Nomenclature.....	
Résumé.....	
Introduction générale.....	
CHAPITRE I : Généralité sur les Pipelines	
I.1 Introduction :.....	3
I.2 Pipeline :.....	3
I.2.1 Définition d'un pipeline : .....	3
I.2.2 Historique : .....	3
I.2.3 Type des pipelines :.....	4
a) Pipelines de collecte:.....	4
b) pipelines d'alimentation :.....	5
c) pipelines de transport :.....	5
d) pipelines de distribution :.....	5
I.2.4 caractéristiques d'un pipeline :.....	6
a) Caractéristique des tubes :.....	6
b) propriétés et Caractéristiques mécaniques des aciers:.....	7
I.2.5 Procédé de fabrication des tubes de pipelines .....	7
a. Les tubes soudés sous forme spirale.....	7
b. Les tubes soudés sous forme longitudinale.....	8
b. 1. Croquage et formage.....	8
b. 2. Soudage.....	9
Il existe trois grandes familles de tubes soudés :.....	9
b. 3. Expansion et calibrage.....	10
c. Les tubes sans soudure.....	10
I.3 l'endommagement de pipeline : .....	10
I.3.1 Statistiques sur les causes d'accidents.....	11
I.3.2 Corrosion :.....	12
I.3.2.1 Définition :.....	12
I.3.2.2 types de corrosion.....	12
A. Corrosion chimique.....	12
B. Corrosion électrochimique.....	12

I.3.3 Les Fissures.....	12
I.3.4 Les Enfoncements.....	13
I.3.5 Les éraflures.....	13
I.3.6 Conclusion.....	14

## CHAPITRE II : Les matériaux composites

II.1 introduction:.....	15
II.2 les matériaux composites:.....	15
II.2.1 définition : .....	15
II.2.2 Constituants des matériaux composites : .....	15
II.2.2.1 Les renforts :.....	15
Différents familles du renfort :.....	16
1. Les fibres de verre :.....	16
2. Les fibres de carbone :.....	16
3. Les fibres céramiques :.....	17
4. Fibres aramides :.....	17
II.2.2.2 La matrice :.....	18
Différentes familles de matrice :.....	18
1 Les résines thermodurcissables :.....	19
2. Les résines thermoplastiques :.....	19
II.2.2 Les différents types de matériaux Composites :.....	20
Les avantages du matériau composite :.....	20
II.3 Les différentes formes de renforts dans un matériau composite :.....	20
II.3.1 Composites à particules :.....	20
II.3.2 Composites à fibres courtes :.....	21
II.3.3 Composites stratifiés :.....	21
Application des matériaux composites : .....	21
L'automobile :.....	22
Médicale :.....	23
L'aéronautique:.....	23
Réparation des pipelines par patch en composite :.....	24
-A Réparation par collage :.....	24
B Système de réparation par renforcement des fibres composites.....	25
Système de réparation par matériaux composites flexible.....	25
Système de réparation par matériaux composites pré – durci :.....	26

Conclusion :	27
CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcule analytique	
III.1 Introduction :	28
III.2 recherche bibliographique :	28
III.3 Évaluation de l'effet de renforcement et conception des systèmes de réparation en matériaux composites:	35
III.4 Calcule La pression de service maximale du pipeline endommagé :	36
III.4.1 la méthode de la Norme ASME B31.G :	37
III.4.2 la méthode de la Norme ASME B 31 G Modifiée :	38
III.4.3 La méthode recommandée par NV RP-F101 :	38
III.5 le calcule d'épaisseur :	39
III.6 le calcule de contrainte équivalente :	40
III.6 Conclusion :	41
CHAPITRE IV : Simulation numérique, résultats et discussions	
IV.1Modélisation et simulation numérique:	42
IV.1.1Introductions sur la simulation:	42
IV.1.2 Représentation de la géométrie et caractéristiques mécanique:	42
IV.1.3 Modélisation numérique d'un tube sans défaut :	42
4IV.3 Modélisation d un maillage :	43
IV.2.1.1Qualité d'élément des maillages Hexaèdres:	43
IV.2.2 Maillage Tétraèdre:	46
IV.2.2.1Qualités d'élément du maillage Tétraèdre:	47
IV.2.3Justification de la taille des éléments:	48
5IV.3 Simulation numérique d'un pipeline saint:	51
6IV.3 Simulation numérique d'un pipeline corrodé:	53
7IV.3 Simulation numérique d'un pipeline corrodé réparé:	56
Conclusion générale	59
Références bibliographiques.	60

**Liste des figures**  
**Et**  
**Des tableaux**

## Liste des figures :

Figure (I-1) : Pipeline dans l'environnement.

Figure (I-2) : Caractéristique dimensionnelles et les Contraintes s'exerçant sur un pipeline.

Figure (I-3) : Technique de fabrication des tubes soudés en spirale.

Figure (I-4) : L'angle d'introduction de la bande.

Figure (I-5) : Croquage.

Figure (I-6) : Formage sous forme "U".

Figure (I-7) : Formage sous forme "O".

Figure (I-8) : Soudage manuelle et automatique des tubes.

Figure (I-9) : Expansion.

Figure (I-10) : Fabrication de pipe sans soudure « Schéma du filage sur aiguille permettant d'obtenir un tube sans soudure ».

Figure (I-11) : Organigramme présente les grandes catégories d'endommagement.

Figure (I-12) : Causes des ruptures de pipelines en cours d'exploitation (1985-1995).

Figure (I-13) : Corrosion externe dans une pipe.

Figure (I-14) : Fissuration des pipelines.

Figure (I-14) : Géométrie d'un enfoncement et photo d'un pipeline enfoncé.

Figure (I-15) : engins provoquant une éraflures et géométrie d'une éraflure.

Figure (II -1) : exemple de matériaux composite.

Figure (II -2) : Organigramme présente Différents familles du renfort.

Figure (II -3) : Fibre de verre tissée.

Figure (II -4) : Fibres de carbone.

Figure (II -5) : Fibre céramique couverture.

Figure (II -6) : Fibres aramides.

Figure (II -7) : Organigramme présente Différents familles de matrice.

Figure (II -8) : Exemple de résine thermodurcissable.

Figure (II -9) : Exemple de résines thermoplastiques.

Figure (II -10) : Les différentes formes de renforts dans un matériau composite.

Figure (II -11) : peau extérieure hayon Peugeot.

Figure (II -11) : Bac de roue de secours et plancher de coffre.

Figure (II -12) : La place des matériaux composites dans une automobile en 2014.

Figure (II -13) : Représente la transparence des matériaux composites à la radio.

Figure (II -14) : Materials used in a modern aircraft, the Airbus A350 XWB.

Figure (II -15) : Réparation par composites d'un pipe en acier.

Figure (II -16) : Emballage de composite flexible pour la réparation sous – marine.

Figure (II -17) : réparation par renforcement composite type clockspring.

Figure (III -1) : Schéma de principe de la méthode de réparation par infiltration de résine dans le réseau de fissures.

Figure (III -2) : SIF pour patch simple et double en fonction de la longueur de fissure longitudinale.

Figure (III -3) : Comparaison des contraintes dans l'épaisseur de la structure à partir du calcul analytique et du calcul par éléments finis Abaqus.

Figure (III -4) : Evolution de la teneur en eau et de la déformation hygroscopique longitudinale dans différents points du matériau suivant (ox) et dans les positions des capteurs de l'humidité et de la déformation.

Figure (III -5) : montre à la fois la résistance ultime expérimentale et prédite.

Figure (III -6) : Pipeline enveloppé.

Figure (III -7) : (a) Le modèle 3D et (b) la coupe transversale de la corrosion du tuyau.

Figure (III -8) : Configurations d'essai : (a) essai de traction et (b) essai de flexion à quatre points avec  $l_1=0,26$  m,  $l_2=0,15$  m,  $l_3=0,17$  m et  $e= 0,0215$  m.

Figure (III -9) : La conception de système de réparation par composite.

Figure (III -10) : Défaut parabolique.

Figure (III -11) : Défaut rectangulaire.

Figure (III -12) : Défaut de corrosion long selon une forme arbitraire selon le code ASME B31G modifiée.

Figure (IV -1) : Le modèle géométrique du pipeline saint.

Figure (IV-2) : Représentation d'élément hexaèdre sous différents ordres.

Figure (IV-3) : Modèle numérique du pipeline avec maillages hexaèdre.

Figure (IV-4) : Diagrammes quantité d'élément en fonction du critère de qualité.

Figure (IV-5) : Qualité de l'élément sur le model 3D.

Figure (IV-6) : Maillage 3DTétraèdredanschaqueordre.

Figure (IV-7) : Model numérique du pipeline avec un maillage tétraèdre.

La figure (IV-8) : Diagrammes quantité d'élément en fonction du critère de qualité du maillage tétraèdre.

Figure (IV-9) : A perçu de la qualité du maillage sur le model pipeline.

Figure (IV-10) : les différentes tailles d'élément modélisé d'un maillage.

Figure (IV-11) : photos haute définition d'un maillage tétraèdre de taille 5 mm.

Figure (IV-12) : Courbe graphique représentant la contrainte maximale d'un même pipeline en fonction de la taille d'élément de maillage.

Figure (IV-13) : Modélisations du pipeline avec un maillage tétraèdre et de taille 20mmd'élément.

Figure (IV-14) : Attribution d'une pression de surface de 12.2Mpa On obtient la solution suivante des contraintes équivalentes vomisses.

Figure (IV-15) : A perçu générale de la contrainte équivalentes vomisses sur le model.

Figure (IV-16) : La distribution des contrainte vomisses sur l'épaisseur du pipeline.

Figure (IV-17) : Aperçu des contraintes sur la partie intérieur du pipeline.

Figure (IV-18) : Démontions du default.

Figure (IV-19) : Pipeline acier X42 corrodé.

Figure (IV-19) : Distribution des contrainte de vomisses sur un pipeline corrodé sous pression 12.2 Mpa.

Figure (IV-20) : La déformation du pipeline en vecteur de déplacement des éléments.

Figure (IV-21) : Déformations avec une échelle automatique et une coupe de section au milieu.

Figure (IV-22) : Model numérique de la résine.

Figure (IV-23) : model numérique du patch composite.

Figure (IV-24) : Distribution des contraintes vomisses sur le model réparé.

Figure (IV-25) : Contrainte dans chaque cas.

## Liste des tableaux :

Tableau (III-1) : Propriété des matériaux composite.

Tableau (IV-1) : Géométrie des pipelines.

Tableau (IV-2) : Propriété mécanique de l'acier X42.

Tableau (IV-3) : Les valeurs clés de la qualité du maillage hexaèdre.

Tableau (IV-2) : Les valeurs clés de la qualité du maillage tétraèdre.

Tableau (IV-4) : Donnée de l'évolution de l'expérimentation avec la taille d'élément de maillages.

Tableau (IV-5) : Propriété mécanique du composite.

Tableau (IV-6) : propriété mécanique de la résine.

Tableau (IV-7) : Comparaisons des résultats.

# **Nomenclature**

## Nomenclature

### Liste des symboles :

symboles	signification	Unité
$b_p$	rayon extérieur	mm
$a_p$	rayon intérieur	mm
$t_{rp}$	l'épaisseur relative de pipeline	mm
$D_e$	l'épaisseur nominale de la paroi	mm
$E_p$	module de Young	MPa
$\mu_p$	coefficient de poisson	MPa
$R_{mp}$	résistance à la traction	MPa
$R_{yp}$	limite d'élasticité	MPa
$\sigma_{ap}$	la contrainte admissible	MPa
$p_{ao}$	la pression de service maximale admissible	MPa
$f_d$	Facteur de service	-
$D_{rd}$	profondeur relative du défaut	-
$S_p$	longueur du défaut	mm
$RSF$	Remaining Strength Factor	-
$M$	Facteur de Folias	-
$p_d$	La pression de service maximale du pipeline endommagé	MPa
$t_{cw}$	l'épaisseur de composite	mm
$a_{ep}$	rayons intérieur équivalant de paroi	mm
$b_{ep}$	rayons extérieure équivalant de paroi	mm
$t_{ep}$	l'épaisseur équivalente de paroi	mm
$\sigma_f$	La contrainte d'écoulement	MPa
$\sigma_e$	La limite d'élasticité	MPa
$\sigma_u$	La contrainte de résistance à la traction du matériau	MPa
$B$	la largeur de bande	mm
$\beta$	L'angle d'introduction de la bande par rapport au l'axe symétrique ( $\Delta$ )	-
$t_n$	épaisseur nominale de paroi	mm

## Liste des abréviations :

<b>abréviation</b>	<b>Définition</b>
ASME B31 G	American Society of Mechanical Engineers, Etats-Unis
DNV-RP-F101	DetNorskeVeritas, Fondation autonome et indépendante.
API	American Petroleum Institute, Etats-Unis.
FEM	Méthode des éléments finis

# Résumé

## Résumé :

L'utilisation de canalisations en acier pour le transport de matières énergétiques telles que le pétrole et le gaz dans un environnement agressif est l'un des facteurs qui les rend vulnérables à de nombreux risques qui empêchent leur bon fonctionnement, ce qui nécessite une méthode de renforcement qui la rend très résistante aux conditions environnementales, dans cette étude nous avons analysé le comportement de deux types de canalisations, la première est les canalisations intactes de défauts et la seconde avec un défaut d'usure de deux types, la première est un défaut de forme rectangulaire et la seconde est sous la forme d'une parabole, qui sont réparés avec des patches composites, soumis à diverses charges telles que : couple de flexion, contrainte interne et contrainte de traction, en utilisant la méthode des éléments finis pour obtenir la valeur Épaisseur optimale du composite. Les résultats obtenus à l'aide du programme ANSYS montrent que la présence de composite patch repair augmente significativement la résistance aux contraintes et à la corrosion, et augmente la durée de vie des canalisations.

Mots clés: pipeline, acier x42/L290, corrosion, ANSYS Workbench, réparation, patch, composite.

## Abstract:

The use of steel pipelines for transporting energetic materials such as oil and gas in an aggressive environment is one of the factors that makes them vulnerable to many risks that prevent their proper functioning, which requires a method of reinforcement that makes it very resistant to environmental conditions, in this study we analyzed the behavior of two types of pipes, the first is the pipes intact from defects and the second with a wear defect of two types, the first is a defect rectangular in shape and the second is in the shape of a parabola, which are repaired with composite patches, subjected to various loads such as: bending torque, internal stress and tensile stress, using the finite element method to obtain the Optimal Composite Thickness value. The results obtained using the ANSYS program show that the presence of composite patch repair significantly increases the resistance to stress and corrosion, and increases the service life of the pipes.

Keywords: pipeline, steel x42/L290, corrosion, ANSYS Workbench, repair, patch, composite.

# **INTRODUCTION GENERALE**

## **Introduction générale**

### **Introduction générale :**

Les Pipelines sont le moyen le plus utilisé pour transporter les hydrocarbures énergétiques sur de longues distances, en particulier le pétrole et le gaz, en raison de la flexibilité qu'elles offrent dans la vitesse de déplacement et de leur capacité à transporter en continu des hydrocarbures sur des dizaines de centaines de kilomètres, et en même temps, faire en sorte que ces matériaux parviennent aux raffineries et aux centres de consommation. Rapidement et à moindre coût, aux principaux centres d'exportation pour être distribués aux différents centres de consommation du monde entier. Il n'est peut-être pas exagéré de dire que la renaissance industrielle et civilisée se poursuit dans divers endroits dans le monde en raison de l'extension de ces lignes longues de plusieurs milliers de kilomètres. Il est également plus facile à entretenir que d'autres moyens

Les Pipelines sont fabriqués en différents diamètres et sont posés soit à la surface de la terre, soit en dessous, avec la nécessité de mettre des marques d'identification pour prévenir les accidents, ainsi que placés sur des piliers fixes, à travers les déserts et les montagnes, et peuvent également être posés sous la surface de l'eau, c'est-à-dire que les Pipelines se trouvent sur tous les terrains géographiques, en tenant compte des moyens de sécurité environnementale en raison des risques liés aux accidents et aux fuites.

Malgré tout cela, les Pipelines sont sujets à de nombreux types de défaillances en raison de leur longue durée de vie, de leur exposition à un environnement difficile et de la demande croissante, les Pipelines en acier sont soumis à un taux d'usure extrêmement élevé en raison de la détérioration et de l'usure. Les investigations ont révélé que la défaillance des Pipelines en acier est principalement due à l'effet combiné de la corrosion et des charges internes et externes. Divers degrés de différences sont observés dans la plupart des paramètres associés à la défaillance des Pipelines en acier, tels que le processus de corrosion, les propriétés techniques et matérielles des Pipelines, etc.

Pendant de nombreuses années, les seules solutions possibles pour les Pipelines endommagés étaient de les remplacer par des neufs ou d'y souder un nouveau tronçon. Ces actions arrêtent généralement la production. De plus, le travail à chaud lors du remplacement impose une interdiction de son utilisation dans les zones dangereuses. Enfin, les problèmes métalliques causés par le soudage ajoutent des imperfections à cette solution complexe et coûteuse. Afin d'éviter de remplacer 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 de colle. Les matériaux composites ont fourni à l'industrie des pipelines sécurité, fiabilité et économie dans la réparation des défauts, par rapport à d'autres procédures comportant de nombreux défauts tels que les réparations soudées et les manchons en acier.

Dans cette étude, nous intéressons à suivre le comportement de la structure métallique du pipeline qui conduit à des zones de corrosion et à des réparations composites sous stress environnemental. Le but de nos travaux est de montrer l'efficacité de la réparation des liaisons composites en utilisant des modèles numériques de comportement structurel sans défaut, défectueux et après que le défaut est réparé.

Le premier chapitre présente généralité sur les pipelines, historique des pipelines, les types et leur caractéristiques mécaniques et chimiques et la procédure de fabrication des tubes en fin on site les différents causes principales de leurs dégradation.

## **Introduction générale**

Le deuxième chapitre présente une recherche sur les matériaux composite ou on parle sur leur composition son rôle principale et c'est différente avantage afin de citer les différentes méthodes de la réparation de pipeline ont utilisent les matériaux composite.

Le troisième chapitre inclus deux parties :

- La première partie comporte une recherche bibliographique sur les endommagements des pipelines et la réparation par les matériaux composite et
- la deuxième partie s'agit d'une étude analytique sur l'état de déformation de la paroi de tuyau en fin en détermine les lois expérimentales qui nous permet de calcule la pression critique et l'épaisseur de composite nécessaire pour la réparation de pipeline.

Dans le quatrième chapitre, dans la première partie, la méthode des éléments finis est utilisée pour modéliser numériquement le comportement de la structure sans défaut et défectueuse, et quand la canalisation est réparée avec le patch de matériau composite.

# **CHAPITRE I**

## **Généralité sur les Pipelines**

# CHAPITRE I : Généralité sur les Pipelines

## I.1 Introduction :

Au cours de la dernière ère, le monde a connu un développement important dans divers domaines, dirigés par l'industrie et l'agriculture, nécessitant une énergie majeure de suivre cette évolution, qui appelle des moyens de transport rapides et peu coûteux de jouer un rôle essentiel dans le transfert d'énergie et ces des moyens de transport à travers le pipeline, qui se classe au premier rang dans les supports de transfert, que ce soit sous terre au-dessus de la terre ou dans l'eau et utilisée pour transférer les produits liquides telles que l'huile et le gaz, etc., mais même dans le transfert de solides par pression d'air,,

Malgré cela, les ingénieurs sont confrontés à des problèmes qui sont effectivement affectés par l'influence de l'environnement et des charges appliquées. A cela s'ajoute la corrosion, qui représente le plus grand problème pour les structures métalliques Surtout dans des états d'emplacement qui accélèrent la corrosion tels que les eaux souterraines, la basse résistivité et l'alcalinité élevée du sol. [1].

## I.2 Pipeline :

### I.2.1 Définition d'un pipeline :

Le pipeline est un mode de transport, par lequel peuvent transporter le pétrole brut, gaz naturel et les produits pétroliers liquides. Sûr Les grandes distances, le transport du brut se réalise à l'intérieur des canalisations circulaires reliées par des accessoires sous pression, constituant un réseau des gros tuyaux métallique et des stations de pompage [2].

Les pipelines sont généralement constitués de sections de tuyaux en métal (par exemple, en acier, en fonte et en aluminium), bien que certains soient construits en béton, en argile et parfois en plastique. Les sections sont soudées ensemble et dans la plupart des cas, enterrées.



Figure (I-1) : Pipeline dans l'environnement

### I.2.2 Historique :

Des réseaux d'aqueducs pour la collecte et la distribution d'eau Les pipes sont l'une des plus anciennes inventions utilisées par l'homme dans divers domaines, car elles sont

## **CHAPITRE I : Généralité sur les Pipelines**

utilisées en Chine depuis 500 avant JC. J.-C montrant les premiers tubes, le bambou fendu et noué avec un fil, dans le but de transporter l'eau. Pendant les temps anciens, des tuyaux en bois, en argile et en pierre étaient utilisés pour transporter l'eau.

Au début du XIX<sup>e</sup> siècle, la civilisation industrielle, qui a vu se développer des installations complexes (haut fourneaux, usines à gaz, centrales de vapeur, etc.), met en place des systèmes locaux de transport de fluides constitués par des canalisations en fonte, bois, acier, ou céramique.

À partir de 1860, les pipelines deviennent indispensables avec la révolution industrielle et le début de l'exploitation du pétrole [3].

À Titusville en Pennsylvanie, l'exploitation des premiers gisements de pétrole provoque une véritable ruée vers l'or noir et très vite il faut trouver un moyen autre que des chalands ou le chemin de fer pour transporter par barils cette production massive. Le premier concept industriel de transport par pipeline (canalisation sous pression) aurait été formulé par le Russe Dmitri Mendeleïev en 1863 suggérant l'utilisation de tubes en acier. Dès 1865 un premier oléoduc, de huit kilomètres en tubes vissés en fonte et d'un diamètre de 2", est construit et peut transporter 100 m<sup>3</sup> de pétrole par jour. En 1878, un nouveau pipeline, de 170 kilomètres et d'un diamètre de 6", est construit avec la capacité de transport jamais atteinte de 1 500 m<sup>3</sup> de pétrole par jour. À la fin de ce siècle 1 800 km de canalisations étaient en exploitation. Le russe Vladimir Choukhov pour la société Branobel (acronyme de Brothers Nobel), a construit l'un des premiers oléoducs en 1878-1880 près de Bakou.

Le début des années 1960, la demande en gaz commencé et la liquéfaction du gaz naturel étant mis au point, voit l'arrivée des premiers importants gazoducs. L'Italie, L'Angleterre les Pays Scandinaves et les Pays-Bas découvrent sur leur territoire d'immenses champs gaziers et décident de les exploiter tout comme l'URSS. Le réseau de gazoducs s'est répandu dans le monde entier, en particulier en Amérique et en Europe, et s'est répandu sur les continents par la mer, et il est devenu le premier moyen de transport au lieu du transport par pétroliers.

### **I.2.3 Type des pipelines :**

En général, les pipelines peuvent être classés en quatre catégories en fonction de leur objectif :

#### **a) Pipelines de collecte:**

Les pipelines de collecte sont un type de pipelines conçus pour transporter un produit pétrolier ou gazier de sa source d'origine vers des usines de traitement ou des réservoirs de stockage. Ces conduites de collecte sont généralement alimentées par des « Flowlines », chacune étant reliée à des puits individuels dans le sol.

Un type spécifique de pipeline de collecte est un tuyau sous-marin utilisé pour collecter le pétrole des plates-formes de production en eau profonde. Voici quelques exemples de produits transportés par les conduites de collecte : gaz naturel, pétrole brut et liquides de gaz naturel, comme l'éthane, le butane et le propane.

Par rapport aux différents types de canalisations, les canalisations de collecte sont relativement courtes – environ 200 mètres de long. Ils sont également généralement

## **CHAPITRE I : Généralité sur les Pipelines**

assez petits, avec un diamètre inférieur à 18 pouces, bien que les développements de la production de schiste aient vu l'utilisation de pipelines de collecte avec des diamètres allant jusqu'à 20 pouces.

### **b) pipelines d'alimentation :**

Les pipelines d'alimentation sont généralement assez petits et sont utilisés pour déplacer le produit (qu'il s'agisse de pétrole brut, de gaz naturel ou de gaz naturel liquéfié) des installations de traitement et des réservoirs de stockage vers les pipelines de transport longue distance. Les conduites d'alimentation ont généralement un diamètre de 6 à 12 pouces.

### **c) pipelines de transport :**

Les pipelines de transport sont utilisés pour transporter le pétrole brut, les LGN, le gaz naturel et les produits raffinés. Ils sont généralement utilisés sur de grandes distances et peuvent traverser des États, des pays et même des continents.

Ils sont utilisés pour déplacer le produit en question des installations de production vers les centres de distribution. En tant que tels, ils ont tendance à fonctionner à des pressions très élevées, allant de 200 à 1200 psi (force/square inch). Chaque ligne de transmission utilise des stations de compression (pour les conduites de gaz) et/ou des stations de pompage (pour le pétrole brut et les produits liquides).

Les pipelines de transport sont constitués de très gros tuyaux individuels pouvant atteindre 42 pouces de diamètre. Si elle n'est pas construite correctement, si elle n'est pas soudée correctement ou si un matériau inapproprié est choisi pour contenir un produit particulier, cela peut parfois entraîner une défaillance de la ligne de transmission.

### **d) pipelines de distribution :**

Les pipelines de distribution sont généralement un système composé de lignes « principales » et « de service ». Ensemble, ces conduites fournissent du gaz naturel aux quartiers résidentiels et commerciaux du monde entier.

Les conduites principales sont l'étape entre les lignes de transmission à haute pression et les lignes de service à basse pression. Une large gamme de matériaux différents peut être utilisée pour ces tuyaux, notamment l'acier inoxydable, la fonte, le plastique et le cuivre. Ils peuvent résister à une gamme de pressions différentes, jusqu'à une limite d'environ 200 psi. On pense que les conduites de distribution principales sont de petite à moyenne taille, c'est-à-dire de 2" à 24" de diamètre.

Les conduites de service sont celles qui se connectent à un compteur individuel et livrent ainsi du gaz naturel à un client unique. Les tuyaux de service ne nécessitent généralement pas de matériaux lourds comme dans d'autres pipelines et sont donc fabriqués à partir de plastique, d'acier ou de cuivre. La pression dans ces pipelines est généralement très faible à environ 6 psi et ils utilisent des tuyaux très étroits qui mesurent généralement moins de 2 pouces de diamètre.

## CHAPITRE I : Généralité sur les Pipelines

### I.2.4 caractéristiques d'un pipeline :

On désigne par « pipelines », les oléoducs ou gazoducs qui sont des canalisations de diamètres pouvant aller de 1 à 42 pouces. Celles-ci sont le plus souvent en acier, constituées d'éléments linéaires soudés aux extrémités et revêtus, dans lesquelles transitent, sous des pressions relativement élevées, des produits pétroliers, liquides ou gazeux. Ces produits pétroliers sont propulsés par des installations de pompage ou de compression. Elles servent à transporter un produit entre deux points donnés et elles sont construites avec des matériaux et des techniques qui apportent la solution la plus économique au problème posé [4].

#### a) Caractéristique des tubes :

Le type et le nom d'une canalisation dépendent des caractéristiques physiques et des conditions d'acheminement du produit à déplacer [5].

Ceci dit, Les caractéristiques principales des pipelines (diamètres, épaisseur, type d'acier, spécifications de construction, températures et pression d'exploitation...) sont régies par tout un ensemble de règles et font l'objet de multiples calculs et de compromis économiques, ainsi donc les caractéristiques d'une canalisation sont déterminés en fonction du débit des produits à acheminer, de leur viscosité, de leur densité et des conditions d'exploitations de façon à réaliser un compromis économique entre la puissance des stations de pompage ou de compression à installer et l'importance de l'investissement total à réaliser [6].

Lorsque les considérations technico-économiques ont ainsi permis de fixer le diamètre, et également la pression de service, on calcule l'épaisseur en fonction de cette pression de service ou des conditions de pose lesquelles parfois imposent des caractéristiques dimensionnelles plus sévères.

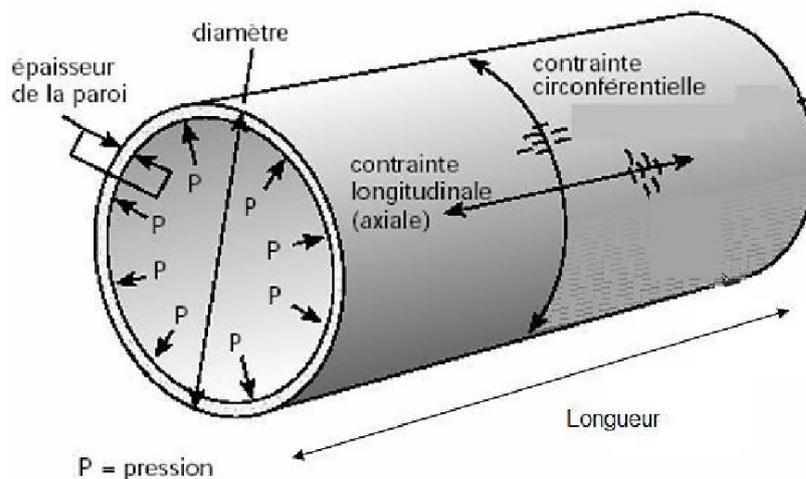


Figure (I-2): Caractéristique dimensionnelles et les Contraintes s'exerçant sur un pipeline

## CHAPITRE I : Généralité sur les Pipelines

### **b) propriétés et Caractéristiques mécaniques des aciers:**

Le développement des transports à grande distance de quantités importantes d'hydrocarbures a nécessité l'emploi des tubes de grand diamètre, exploités à des pressions plus élevées. Pour éviter d'atteindre des épaisseurs difficiles à souder et faire des économies d'aciers, des nouvelles nuances à caractéristiques mécaniques sont améliorées. C'est ainsi qu'on a vu apparaître les grades X60, X65, X70, X80 et même X100 [5].

L'acier est un alliage fer-carbone avec du carbone allant de 0,2 à 1,7 %, sa densité différant de celle du fer de 7,32 à 7,86 selon sa composition chimique et ses traitements thermiques. La densité de l'acier inox austénitique est typiquement un peu supérieure à 8, en raison de la structure cristalline. Ils ont un module de Yong d'environ 210000 MPa, indépendamment de leur composition. Les autres propriétés varient énormément en fonction de leur composition, du traitement thermomécanique et des traitements de surface auxquels ils ont été soumis. Le traitement thermomécanique est l'association :

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

Les aciers de transport des hydrocarbures sont des aciers faiblement alliés qui doivent présenter des propriétés à l'amorçage de rupture d'une part et vis-à-vis de la propagation de l'arrêt des fissures lors de rupture fragile par clivage. D'autres parts, ils présentent également une limite d'élasticité élevée due à la recherche d'une rentabilité accrue et une bonne soudabilité. Par conséquent concilier une haute limite d'élasticité et une bonne ténacité est exigé pour la fiabilité des aciers [5].

Les qualités d'aciers couramment utilisés dans la construction des pipelines sont définies dans deux spécifications API qui sont adoptées depuis 1992 par l'industrie pétrolière américaine dénommée :

- 5L pour les qualités normales
- 5LX pour les qualités à hautes résistances

### **I.2.5 Procédé de fabrication des tubes de pipelines**

#### **a. 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. Le soudage se produit ici sur la production de tubes en spirale qui sont généralement fournis.

## CHAPITRE I : Généralité sur les Pipelines

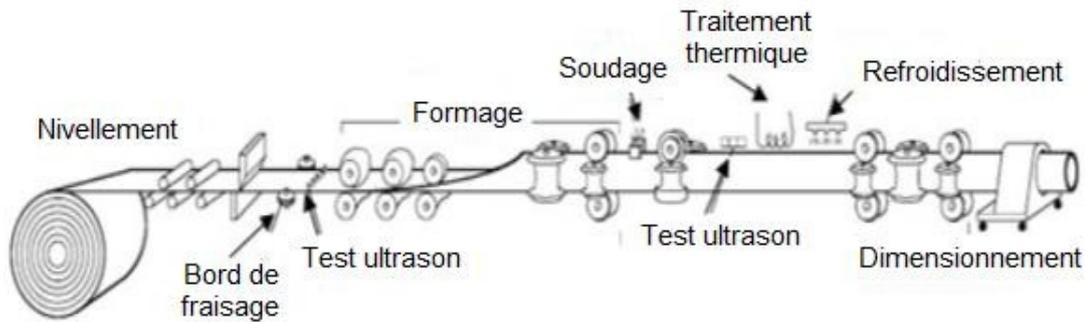


Figure (I-3): Technique de fabrication des tubes soudés en spirale [7].

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

$$\beta = \text{Arc sin} \frac{B}{D_{\text{ext}} * \pi} \quad (I. 1)$$

Pratiquement, c'est très difficile de fabriquer les tubes avec un petit angle aigu, pour cela, que les valeurs de l'angle se limitent entre 15° et 50°.

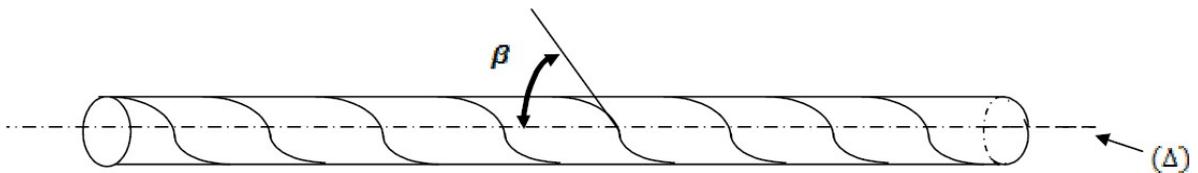


Figure (I-4) : L'angle d'introduction de la bande [7].

### b. Les tubes soudés sous forme longitudinale

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

#### b. 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 suivante, à partir de ça 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".

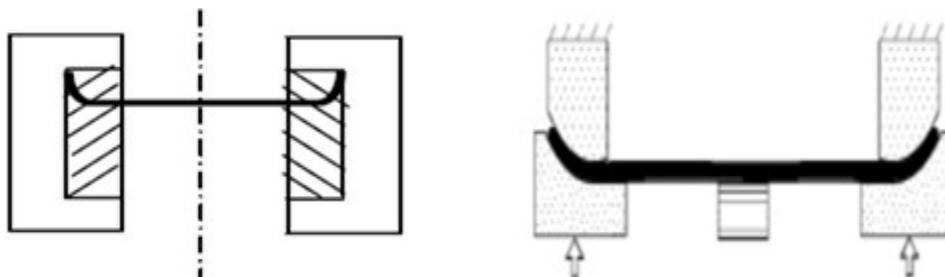


Figure (I-5): Croquage [8].

## CHAPITRE I : Généralité sur les Pipelines

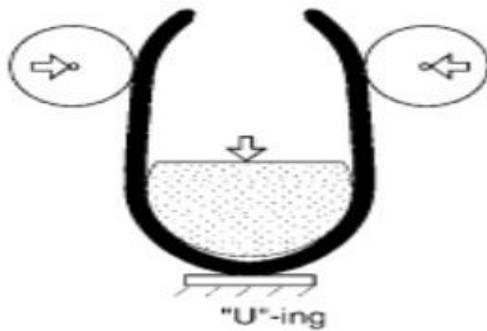


Figure (I-6): Formage sous forme "U" [8].

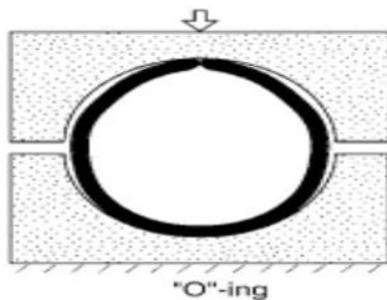


Figure (I-7): Formage sous forme "O" [8].

### b. 2. Soudage

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



Figure (I-8) : Soudage manuel et automatique des tubes [9].

### Il existe trois grandes familles de tubes soudés :

- Les petits tubes soudés dont le diamètre ne dépasse pas 219 mm.
- Les moyens tubes soudés dont le diamètre est compris entre 219 et 406 mm.
- Les gros tubes soudés dont le diamètre est supérieur à 406 mm\

## CHAPITRE I : Généralité sur les Pipelines

### b. 3. Expansion et calibrage

L'objectif de cette opération est d'atteindre des tubes de section parfaitement circulaire, l'augmentation des diamètres ici est de plus jusque' à 1.5 m au maximum Figure (I-9).

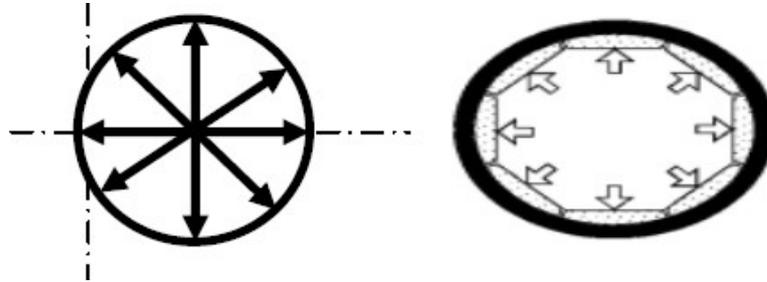


Figure (I-9):Expansion [7].

### c. Les tubes sans soudure

Les tubes formés sans soudure, sont généralement de petits diamètres et de longueur 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 (I-10).

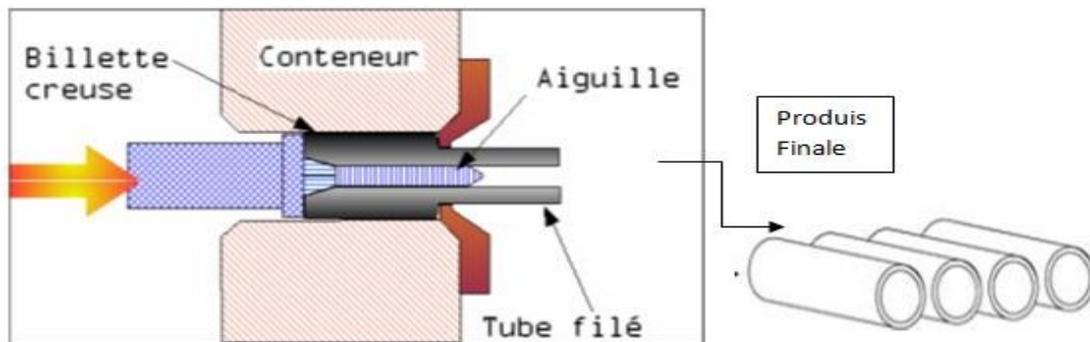


Figure (I-10) : Fabrication de pipe sans soudure « Schéma du filage sur aiguille permettant d'obtenir un tube sans soudure » [9].

### I.3 l'endommagement de pipeline :

Parmi les paramètres influant le comportement en fatigue des pipelines et des structures, on trouve trois grandes catégories : la déformation géométrique et la perte de métal et encrassement et Depauts. Chacune de ces sections est divisée comme indiqué dans l'organigramme.

## CHAPITRE I : Généralité sur les Pipelines

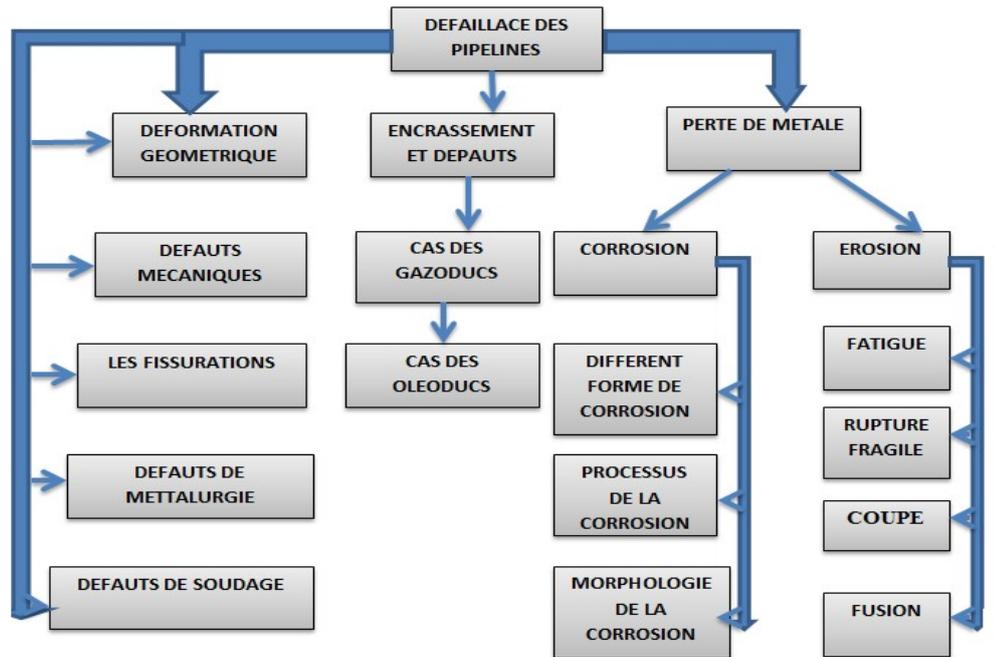


Figure (I-11) : Organigramme présente les grandes catégories d'endommagement

### I.3.1 Statistiques sur les causes d'accidents

Les canalisations sont des éléments de structures dont les avaries entraînent des risques pour les vies humaines et l'environnement écologiques, associés à des pertes d'exploitations avec souvent un préjudice qui peut être considérables. Les causes des défaillances des gazoducs sont de diverses natures. Elles peuvent se manifester soit par une rupture, soit par une fuite. La plupart de ces défaillances sont causées par des piqûres de corrosion ou par des fissurations de corrosion sous contrainte, mais il existe également des problèmes liés aux défauts de soudage. Les mouvements de terrain (glissement du sol, tremblement de terre,...) peuvent aussi être la cause de dommage sur les gazoducs enterrés. Les exploitants de gazoducs étudient ces problèmes depuis longtemps et possèdent une bonne connaissance des méthodes permettant de les gérer. Voir la Figure (I-12).

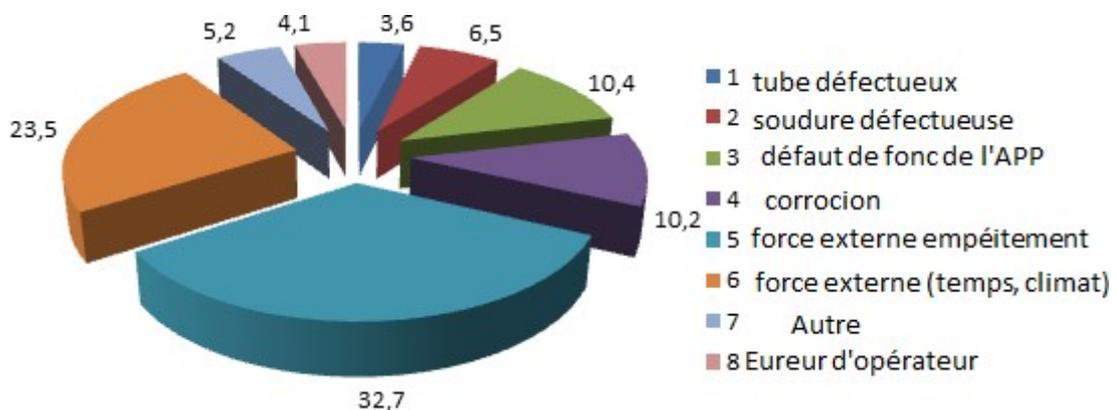


Figure (I-12) : Causes des ruptures de pipelines en cours d'exploitation (1985-1995) [10].

## CHAPITRE I : Généralité sur les Pipelines

### I.3.2 Corrosion :

#### I.3.2.1 Définition :

Corrosion métallique représente tout processus de dégradation des métaux et alliages faisant intervenir, au moins partiellement, la composition chimique de leur environnement. En d'autre terme on peut dire que la corrosion d'un métal est la destruction de celui-ci sous l'effet de réactions chimiques ou électrochimiques, lorsqu'il est en contact avec un milieu gazeux ou aqueux. Elle correspond donc au retour de la matière à son état le plus stable.



Figure (I-13) : Corrosion externe dans une pipe

#### I.3.2.2 types de corrosion

##### A. Corrosion chimique

C'est une réaction hétérogène entre une phase solide (métal) et une phase liquide ou gazeuse (l'électrolyte). Le plus souvent c'est l'oxydation des métaux par les gaz à température élevée ; on parle donc de corrosion sèche. Il se produit donc une attaque du métal avec formation d'un produit de corrosion à la surface. Ce type de corrosion, se rencontre surtout dans les fours, les chaudières et les turbines à gaz.

##### B. Corrosion électrochimique

Elle se produit lorsqu'il existe une hétérogénéité soit dans le métal ou dans le réactif. L'existence de cette hétérogénéité conduit à la formation d'une pile, ainsi la zone constituant l'anode (borne négative) de cette pile est corrodée. Les hétérogénéités dans le métal peuvent être des inclusions d'impuretés précipités et celles de l'électrolyte des gradients de concentration d'ions ou de gaz dissout, autrement appelée corrosion humide. [11]

#### I.3.3 Les Fissures

Une fissure est définie comme la surface séparant localement un solide en deux parties. Le champ des déplacements est alors discontinu à travers cette surface L'objet de mécanique de la rupture est l'étude des évolutions de cette surface (propagation de la fissure) en fonction des chargements appliqués et des caractéristiques du matériau constituant. [12]

La fissuration n'est pas une maladie, mais le symptôme d'une maladie. En effet, la faible capacité de déformation et la faible résistance en traction, compression ou en pression..., rendent les matériaux très sensibles à la fissuration. . [13]

## CHAPITRE I : Généralité sur les Pipelines



Figure (I-14) : Fissuration des pipelines

### I.3.4 Les Enfoncements

Un enfoncement dans un pipeline est une déformation plastique permanente de la section circulaire de la paroi du tube due à un impact avec un corps étranger (exemple : le godet d'un engin en travaux pour les canalisations enterrées ou posées par terre, les ancrs 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 de tuyau par rapport à son diamètre initial (Figure (I-14) ) [14]

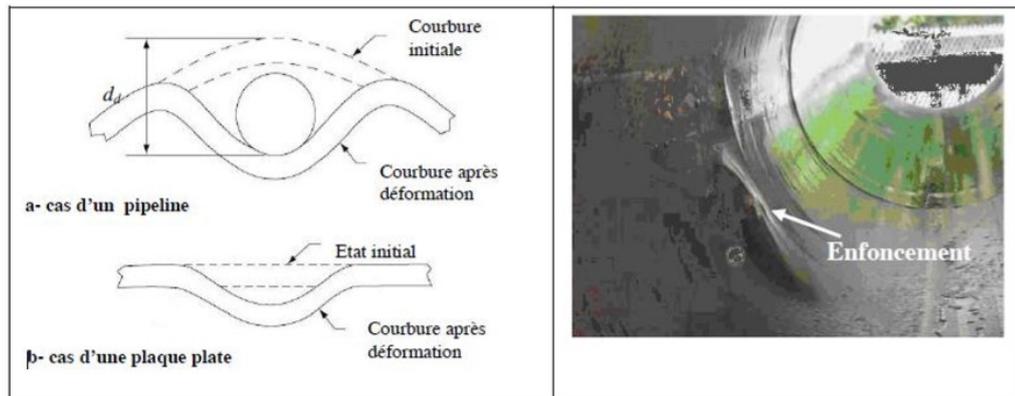


Figure (I-14) : Géométrie d'un enfoncement et photo d'un pipeline enfoncé

### I.3.5 Les éraflures

Une éraflure est un endommagement superficiel de la surface, dû à un contact avec un corps étranger qui provoque un enlèvement de la matière (Figure (I-15)). Cette éraflure peut être considérée comme une entaille. Les dimensions d'une éraflure sont définies de façon à ce que la longueur soit plus grande que la largeur [14]. Le choc causé par l'agression externe peut néanmoins provoquer de graves endommagements au tuyau. En service, l'action de la pression pourra provoquer une rupture localisée qui provoquera elle-même une fuite et éventuellement une explosion.

## CHAPITRE I : Généralité sur les Pipelines

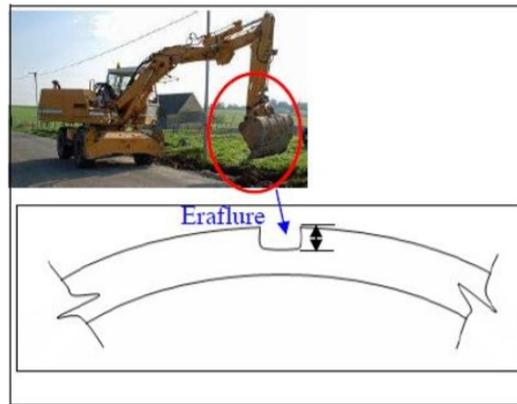


Figure (I-15) : engins provoquant une éraflures et géométrie d'une éraflure

### I.3.6 Conclusion

Les pipelines sont un moyen de transport efficace pour transporter de grandes quantités d'énergie et d'autres matériaux sur de longues distances et en toute sécurité, ce qui en fait un système en évolution à travers le monde, Ce qui le soumet à un processus de fabrication précis et différent avec des matériaux différents, Ce qui lui fait acquérir de nombreuses caractéristiques pour atteindre l'efficacité dans son domaine, mais il reste exposé aux agressions internes et externes représenté par la Corrosion, Les Fissures, Les Enfoncements et Les éraflures.

# **CHAPITRE II**

## **Les matériaux composites**

## CHAPITRE II : Les matériaux composites

### II.1 introduction :

Les matériaux composites en général un rôle très important pour tout développement dans le domaine de la maintenance. Une grande partie de l'activité économique des pays industrialisés est rattachée aux matériaux composites. Vu les exigences de l'industrie modern, Composite sleeve reinforcement systems are being increasingly used as repair systems for metallic pipelines with localized imperfections or damage that impair the serviceability. One of the main applications is the lifetime extension of corroded pipelines with part-wall metal loss defects in petroleum, petrochemical and natural gas industries. The damages derived from the corrosion process cause very important economic losses and the classical repair procedures using welding (to cut and replace a corroded segment or to replace a localized damaged section and use a steel patch) require stopping the operation while the repair is being performed. Composite repair systems are particularly interesting in environments where any repair method using equipment that may produce heat and/or sparkling is forbidden (such as in offshore platforms which are hydrocarbon atmospheres).

### II.2 les matériaux composites :

#### II.2.1 définition :

Les matériaux composites sont des matériaux à très hautes performances mécaniques, qui peuvent être façonnés à volonté au gré du concepteur, de manière à obtenir les propriétés souhaitées en faisant un choix approprié des constituants.

Le matériau composite est constitué de l'assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles et de nature de différente. Se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composant pris séparément.

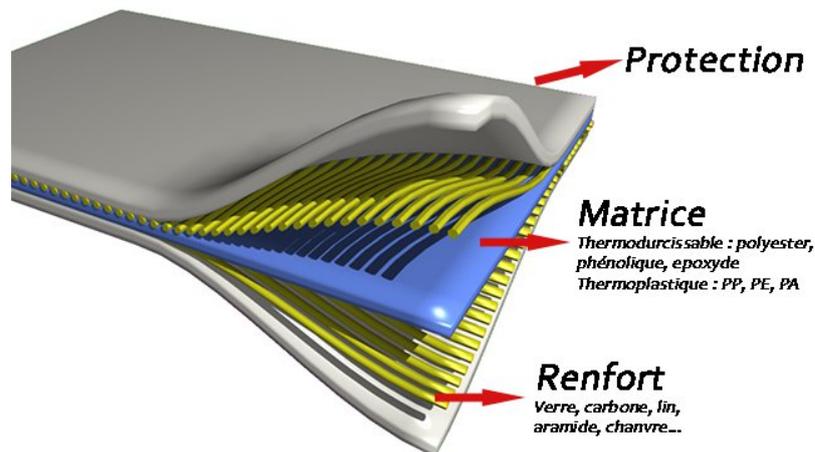


Figure (II -1) : exemple de matériaux composite

#### II.2.2 Constituants des matériaux composites :

##### II.2.2.1 Les renforts :

Le renfort est généralement composé de matériau plus dur que la résine, son rôle principal est d'assurer au matériau une grande résistance surtout à la traction, et qui se présente, généralement, sous forme de fibres :

- Fibres longues unidirectionnelles.

## CHAPITRE II : Les matériaux composites

- Fibres longues tissées.
- Fibres courtes réparties aléatoirement sans directions privilégiées.

### Différents familles du renfort :

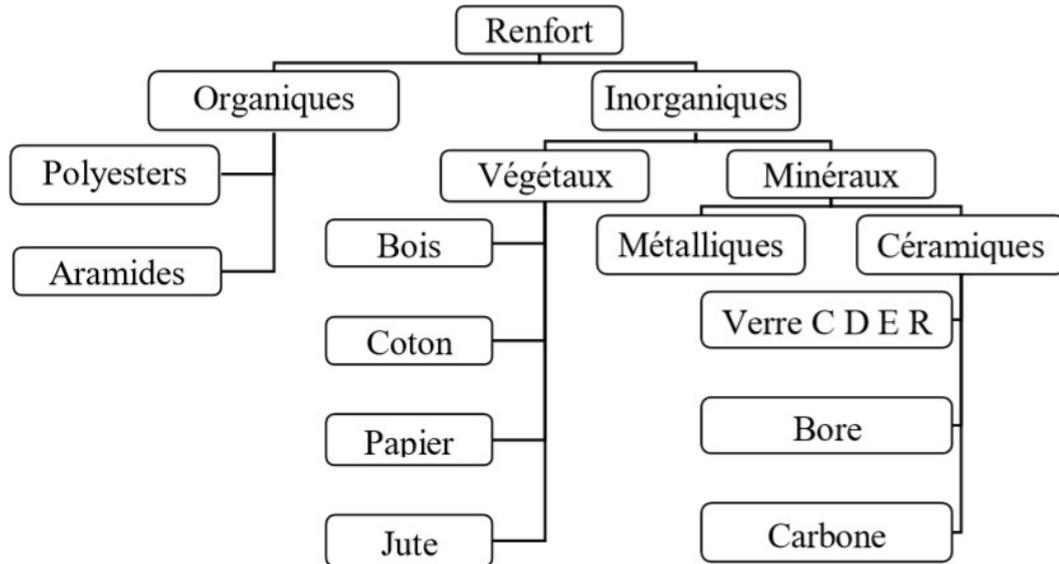


Figure (II -2) : Organigramme présente Différents familles du renfort

### 1. Les fibres de verre :

Les fibres de verre ont un excellent rapport performance/prix qui les place au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composites. Elles sont obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore).

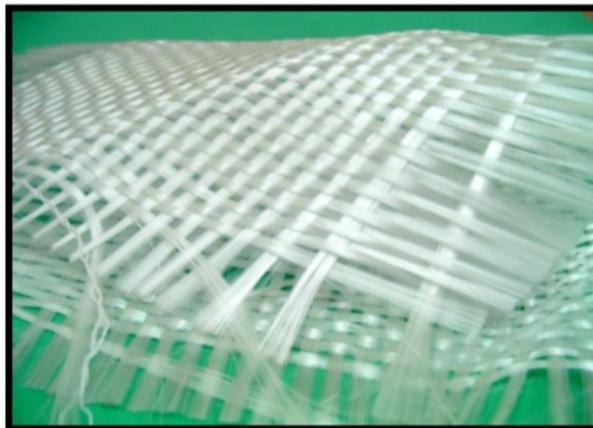


Figure (II -3) : Fibre de verre tissée

### 2. Les fibres de carbone :

Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques et sont élaborées à partir d'un polymère de base, appelé précurseur. C'est la fibre la plus utilisées dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN

## CHAPITRE II : Les matériaux composites

(Polyacrylonitrile). A une température comprise entre 700 et 1500°C, sous atmosphère d'azote, pendant quelques minutes, on distingue deux types de fibres :

- fibres haute résistance (HR) : pour une combustion de 1000 à 1500 °C ;
- fibres haut module (HM) : pour une température de combustion de 1800 à 2000 °C.

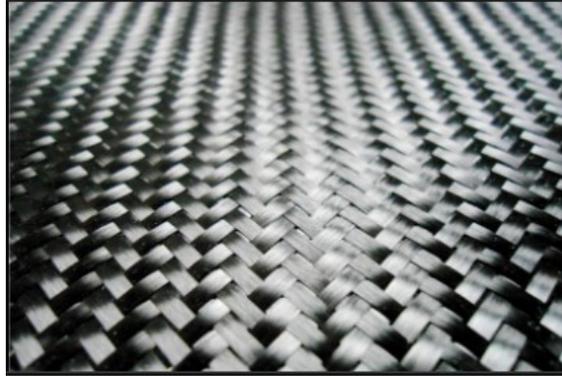


Figure (II -4) : Fibres de carbone

### 3. Les fibres céramiques :

Les matériaux composites de type céramiques sont souvent constitués de renforts et de matrice en céramique. Les fibres sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Ces fibres sont rencontrées dans des applications où la température est très élevée entre 500°C et 2000°C. Ces matériaux sont utilisés notamment dans les parties chaudes des moteurs d'avions. Il existe plusieurs exemples de fibres céramiques, notamment :

- fibres de Carbure de Silicium.
- fibres de Bore.
- fibres de Bore carbure de silicium.



Figure (II -5) : Fibre céramique couverture

### 4. Fibres aramides :

Les fibres aramides ont des propriétés mécaniques élevées en traction comme les carbones mais leurs résistances à la compression est faible. La faible tenue mécanique en compression est généralement attribuée à une mauvaise adhérence des fibres à la matrice dans le matériau composite. Pour y remédier, des enzymages des fibres peuvent être utilisé. L'utilisation de composites à fibres hybrides permet également de remédier aux faiblesses des composites à fibres aramides. Des renforts hybrides de type verre-

## CHAPITRE II : Les matériaux composites

kevlar ou carbone-kevlar sont largement utilisés dans le domaine des loisirs (ski, raquette de tennis).



Figure (II -6) : Fibres aramides

### II.2.2.2 La matrice :

La matrice est l'élément qui lie et maintient les fibres. Elle répartie les efforts (résistance à la compression ou à la flexion) et assure la protection chimique des fibres. Elle permet également la transition des efforts mécaniques vers les renforts. La matrice est généralement homogène et isotrope. Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère.

### Différentes familles de matrice :

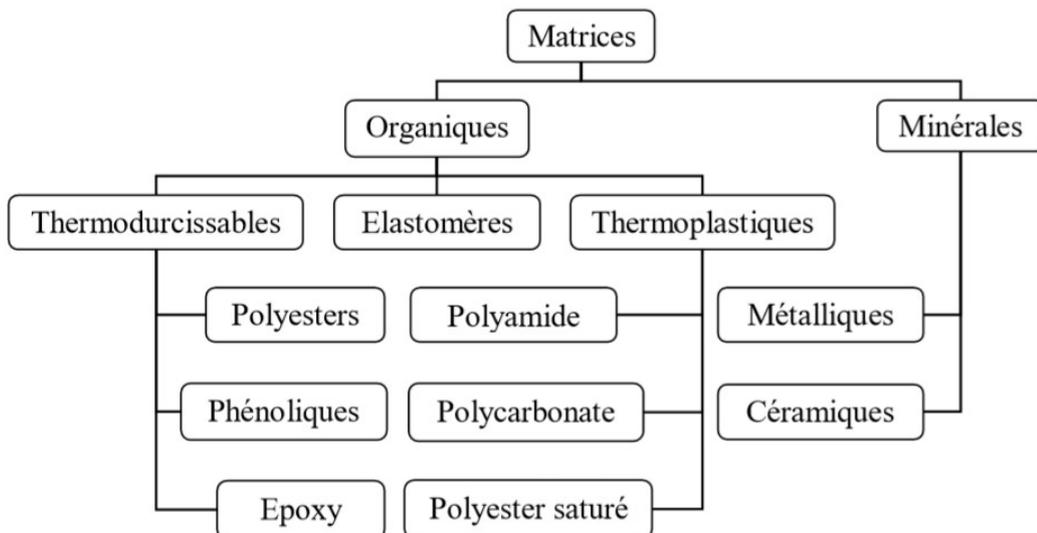


Figure (II -7) : Organigramme présente Différents familles de matrice

## CHAPITRE II : Les matériaux composites

### 1 Les résines thermodurcissables :

Il se présente sous la forme d'un liquide visqueux qui est façonné et polymérisé à la forme souhaitée. La transformation irréversible. En provoquant une réaction chimique de polymérisation par ajout d'un solide, ce qui conduit à la solidification. Il possède des propriétés mécaniques élevées. Il est le plus couramment utilisé pour fabriquer des pièces en matériaux composites.



Figure (II -8) : Exemple de résine thermodurcissable

### 2. Les résines thermoplastiques :

Les résines thermoplastiques occupent une place de plus en plus importante dans la fabrication des matériaux composites et sont : économiques et moins polluants lors de leur transformation, se présentent sous forme solide (granulés, feuilles, etc.), et nécessitent une transformation à très haute température. Il peut être mis en forme plusieurs fois par chauffage et refroidissement successifs et peut donc être facilement récupéré et recyclé. Mais il a de mauvaises propriétés mécaniques.



Figure (II -9) : Exemple de résines thermoplastiques

## **CHAPITRE II : Les matériaux composites**

### **II.2.2 Les différents types de matériaux Composites :**

Il existe 3 grandes familles qui répertorient les matériaux composites en fonction de la matrice qui les compose :

- Le CMO (ou composite à matrice organique) qui est le plus utilisé aujourd'hui grâce à son coût plus bas permettant une production en série. Dans cette famille, on distingue deux catégories :

1. Les matériaux composites à grande diffusion offrent des avantages essentiels, qui sont : optimisation des coûts par diminution des prix de revient, sa composition de polyester avec des fibres de verre longues ou courtes (sous forme de mat ou tissu) et la simplicité du principe d'élaboration des matériaux (moulage par contact, SMC et injection).
2. Les matériaux composites à hautes performances sont utilisés dans le domaine d'aéronautique où le besoin d'une grande performance déduite des hautes valeurs ajoutées. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%.

- Le CMC (ou composite à matrice céramique) qui est majoritairement utilisé pour des domaines très spécifiques à haute technicité et à température élevée : spatial, militaire ou encore nucléaire

- Le CMM (ou composite à matrice métallique) qui est composé d'aluminium, zinc ou magnésium par exemple qui peut être utilisé pour diverses applications comme l'automobile, les loisirs ou encore l'électronique.

Pour chacune de ces familles, les renforts utilisés pour compléter la matrice sont différents.

### **Les avantages du matériau composite :**

1. Les composites peuvent être utilisés là où les colliers ne peuvent l'être, et sont bien souvent plus rentables.
2. Ils présentent des avantages économiques car ils peuvent être utilisés directement dans les structures en cours de fonctionnement.
3. Cela réduit considérablement les coûts de maintenance.
4. Ont suscité un grand intérêt pour la restauration en raison de leur rigidité spécifique.
5. Ces enveloppes appliquées à la structure peuvent améliorer l'étanchéité à l'air, la ductilité et la résistance du métal.
6. Réparations sous stress environnemental.

### **II.3 Les différentes formes de renforts dans un matériau composite :**

Il existe trois types de renforts différents dans les matériaux composites : [15]

#### **II.3.1 Composites à particules :**

En physique des particules, une particule composite est un regroupement de particules. On distingue en particulier les hadrons qui sont constitués de particules élémentaires composites interagissant avec l'interaction forte, Caractérisé par ce qui suit:

## CHAPITRE II : Les matériaux composites

- Matière = Matrice métallique /céramique / polymère + particules céramiques / charges creuses
- Mise en œuvre = injection / coulage (+ frittage); fabrication Additive
- Réalisations = Sous-ensemble résistant aux températures et au frottement ;
- Secteurs = transport, énergie, santé ; Forte valeur ajoutée

### II.3.2 Composites à fibres courtes :

Ce sont des fibres courtes, réparties de manière aléatoire, sans directions privilégiées, qui ont des propriétés mécaniques variables, Caractérisé par ce qui suit:

- Matière = Matrice polymère avec fibres courtes de verre, de bois, ...
- Mise en œuvre = injection / compression
- Réalisations = Sous-ensemble peu travaillant ;
- Secteurs = tous secteurs avec grandes séries ; bon marché Composites à fibres longues – stratifiés / tissés / tricotés :

### II.3.3 Composites stratifiés :

Les structures composites stratifiées sont constituées de couches successives de renfort imprégné de résine. Les structures stratifiées en matériaux composites sont constituées d'empilements de nappes unidirectionnelles ou bidirectionnelles. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La résine assure la cohésion entre les renforts pour répartir les contraintes mécaniques, Caractérisé par ce qui suit:

- Matière = Matrice polymère avec fibres longues hautes performances
- Mise en œuvre = injection / infusion
- Réalisations = Sous-ensemble fortement sollicités;
- Secteurs = transport, énergie, santé;
- Forte valeur ajoutée

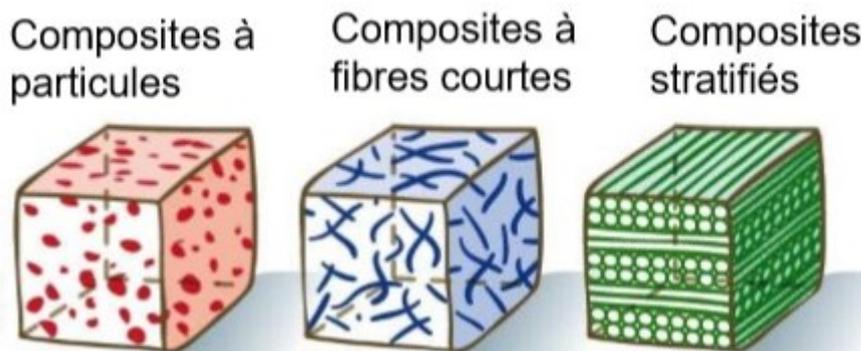


Figure (II -10) : Les différentes formes de renforts dans un matériau composite [15]

### Application des matériaux composites :

Dans la pratique, les usages des matériaux composites sont nombreux. Parmi ceux-ci, il y a plusieurs domaines dans lesquels les applications sont diverses. Il y a par exemple :

## CHAPITRE II : Les matériaux composites

### L'automobile :

Les constructeurs automobiles utilisent de plus en plus les matériaux composites pour faire évoluer leurs offres en prenant en compte les contraintes économiques, concurrentielles mais aussi réglementaires telles que les réglementations internationales relatives aux émissions sonores émises par le véhicule, à la sécurité lors de chocs ou encore à l'environnement (pollution, véhicules en fin de vie ...). Ils doivent aussi limiter la consommation en carburant et la pollution par les gaz d'échappement, la solution passe donc par l'allègement du véhicule.

L'industrie automobile reste un grand champ d'investigation pour les matériaux composites. Plus de 30000 tonnes de matières plastiques et composites sont utilisées pour la fabrication de pièces de carrosserie ; notamment dans les pare-chocs, les ailes, les portes latérales, les ouvrants arrières, les pièces sous capot ect...



Figure (II -11) : peau extérieure hayon Peugeot



Figure (II -11) : Bac de roue de secours et plancher de coffre

## CHAPITRE II : Les matériaux composites

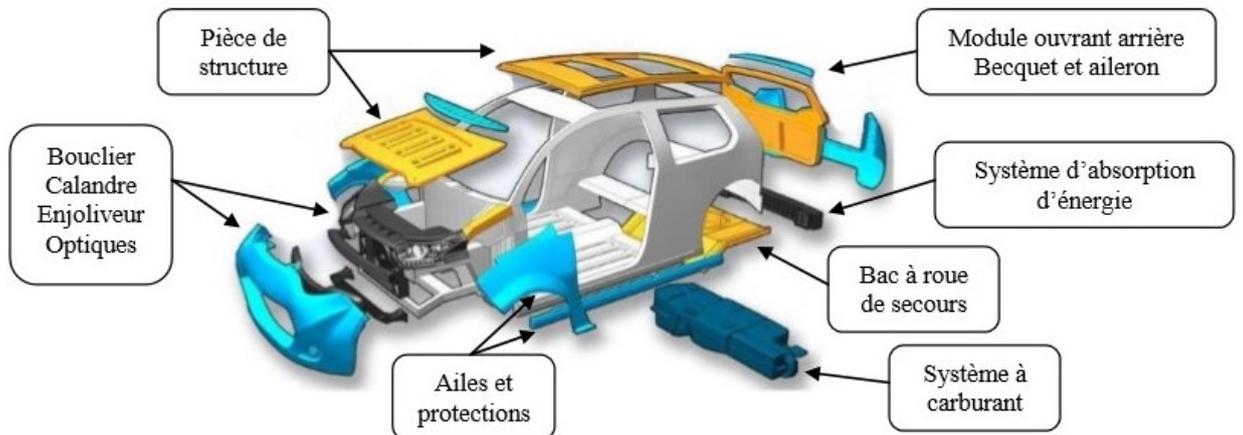


Figure (II -12) : La place des matériaux composites dans une automobile en 2014

### Médicale :

Met les qualités des matériaux composites hautes performances (résistance aux chocs, grande rigidité, faible masse, excellente résistance à la corrosion, transparence aux rayons X, précision de la finition...) au service du secteur médical.

Les matériaux composites permettent d'augmenter la fiabilité, la précision et la légèreté des instruments médicaux, des prothèses et des dispositifs d'aide aux personnes handicapées. Leur transparence aux rayons X en font une technologie parfaitement adaptée pour les tables de radiologie.



Figure (II -13) : Représente la transparence des matériaux composites à la radio

### L'aéronautique:

L'aéronautique utilise principalement des matériaux composites « haute performance », qui sont constitués d'une matrice époxy associée à un fort taux de matériaux renforcés de fibres de carbone. Parce qu'il est léger, de forme flexible et peuvent réduire les coûts de maintenance. Les applications rencontrées concernent : radome de radar, bords d'attaque, volets, dérives, pales d'hélicoptères, disques de freins d'avion...etc.

## CHAPITRE II : Les matériaux composites

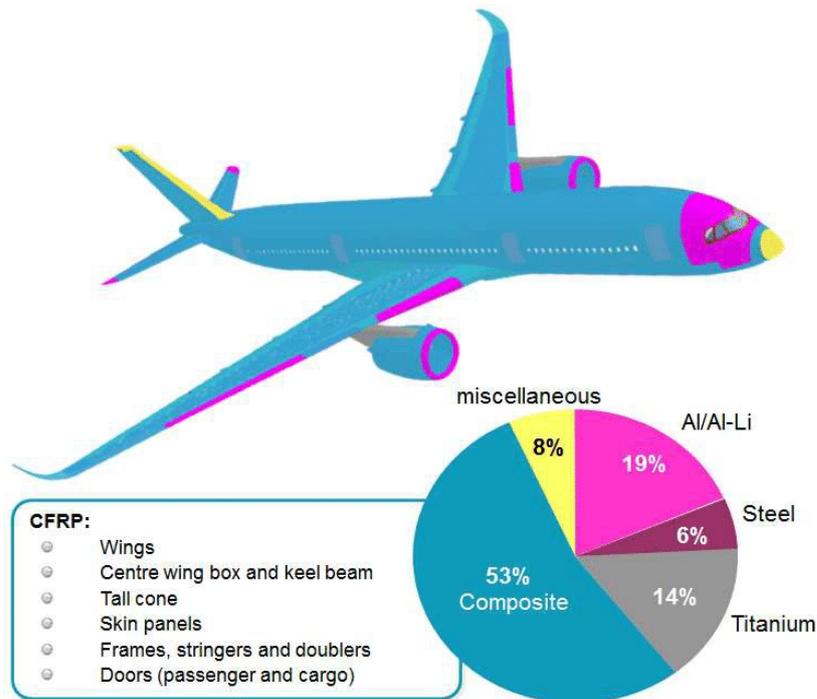


Figure (II -14): Materials used in a modern aircraft, the Airbus A350 XWB

### Réparation des pipelines par patch en composite :

Les pipelines sont des ouvrages soumis à de nombreuses contraintes et agressions internes et externes, qui augmentent les risques de leur corrosion et de leur fissuration. Afin de faire face à ces problèmes, plusieurs méthodes de réparation sont utilisées. Afin de réduire le taux de propagation de la corrosion et de prolonger la durée de vie des structures.

### -A Réparation par collage :

Les matériaux composites sont des matériaux performants constitués par l'association à l'échelle microscopique de plusieurs matériaux aux caractéristiques complémentaires. Cela permet d'associer un ensemble de propriétés mécaniques ou physiques qu'il serait impossible à obtenir avec les composants prisent de façon isolée. Outre le gain de poids, un autre avantage des matériaux composites est le caractère multifonctionnel qui leurs est conféré par leurs propriétés orthotropes. Ils sont en effet plus largement utilisés au fur et à mesure que les connaissances concernant le processus de fabrication, leurs caractéristiques mécaniques et physiques ainsi que leur durabilité et comportement sous charge s'accumulaient.[16]

La caractérisation des matériaux composites à base de fibres et de résines est généralement complexe. Contrairement aux matériaux métalliques qui demande un nombre relativement restreint d'essais, les composites à base de fibre et de résines se distingue par la nécessité d'une multitude d'essai afin d'aboutir aux caractéristiques mécaniques.[17] et [18]

## CHAPITRE II : Les matériaux composites



Figure (II -15): Réparation par composites d'un pipe en acier

### **B Système de réparation par renforcement des fibres composites**

Généralement, les systèmes de réparation par collage de composite peuvent être classés en deux types : Système de réparation par matériaux composites pré-durci « recuredlayered » et système de réparation par matériaux composites flexible « Flexible wetlay-up system » qui sont appliqués dans la réparation des pipelines défectueux.

#### **Système de réparation par matériaux composites flexible**

Le système de réparation par matériaux composites flexible est intensivement utilisé pour l'industrie de réparation des pipelines enterrés sous la forme de suremballage des pipes d'acier même aux angles ou des courbures pour une vaste gamme d'application de pression. Cette application utilise la matrice de résine qui est généralement à l'état non solidifié. Leurs solidifications est réalisée après leur mise en place sur la structure.

Ce système de réparation utilise un matériau composite qui est imprégné avec des systèmes de résines différents (verre, carbone, armide...) pour tenir compte des conditions environnementales spécifiques, telles que les applications sous-marines, les températures élevées et le froid.

Le système de réparation par matériaux composites flexible est adapté pour les réparations de surfaces externes ou pour la probable progression de la corrosion et pour rétablir la résistance du pipeline contenant un défaut à la parois. Ce système est également adapté aux conditions souterraines pour des applications relativement à faible et à moyenne pression. Toutefois, en raison de la complexité de préparation, d'application et de durcissement de la résine pour les systèmes flexibles, il est souvent souhaitable d'utiliser un manchon spiral pré-durci. [6]

La figure suivante présente l'emballage d'un composite flexible pour la réparation d'une conduite sous - marine.

## CHAPITRE II : Les matériaux composites

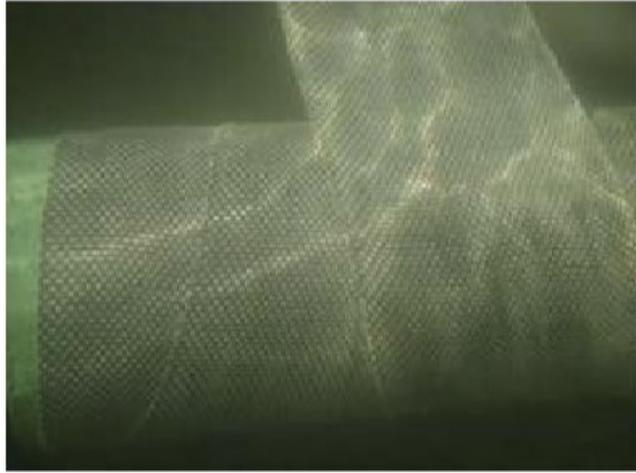


Figure (II -16) : Emballage de composite flexible pour la réparation sous – marine [19]

### **Système de réparation par matériaux composites pré – durci :**

Le système de réparation par matériaux composites pré – durci comprend le collage de matériaux composites renforcés par des fibres pré – durcis qui est tenu ensemble avec un adhésif appliqué sur le terrain. La figure II.4 montre le système de réparation ClockspringR qui est intensivement utilisé dans l'industrie de réparation des pipelines [20]. Ce type de système de réparation est un enroulement de matériau composite à haute résistance avec une structure qui lui permet d'envelopper en toute sécurité autour des pipelines. Les couches sont scellés ensemble avec un agent de liaison solide. Le défaut est rempli avec du mastic adhésif pour aider à l'appui et au transfert de charge avant leur installation.[6]

Cette méthode de réparation est fiable pour les défauts extérieurs. La plupart des technologies de réparation moyennes sont basées sur ce principe. Cependant, la réparation à l'aide de ce système est généralement limité à des sections droites de tuyau. Elle nécessite un grand espace pour appliquer ce système sur le pipeline défectueux. En outre, l'application sous – marine de ce système est difficile car elle consiste à une application interne de la colle pour le système en couche. Ainsi, la liaison des couches et leurs performances ainsi que l'installation sont les principaux inconvénients de ce système de réparation. [6]

## CHAPITRE II : Les matériaux composites

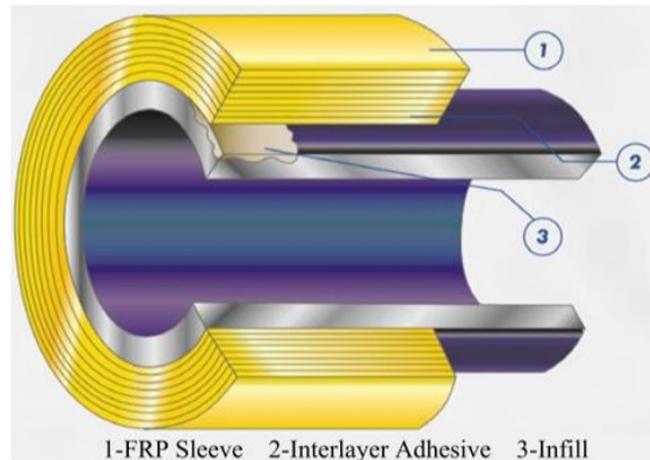


Figure (II -17): réparation par renforcement composite type clockspring [21]

### Conclusion :

D'après ce chapitre on distingue la supériorité des matériaux composites dans tous les domaines spécialement le domaine de restauration des pipelines avec les patches, en raison de leur résistances et propriétés mécaniques ; la non nécessité d'arrêt de transmission ; cette méthode est meilleure se qui concerne la sureté on vue que la méthode de soudure requière beaucoup de maniabilité en raison que trais souvent le fluide transporté est hyper inflammable et sous très haute pression.

# **CHAPITRE III**

**Recherche bibliographique et  
calcul analytique**

## **CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique**

### **III.1 Introduction :**

Puisque les pipelines sont d'une grande importance dans le transport de pétrole, de gaz et les produits liquides, ils sont exposés à de nombreux dangers en raison de leur présence dans un environnement dangereux et hostile, que ce soit sous terre, au-dessus ou dans l'eau. Ce qui nécessite un processus d'entretien serré et élaboré qui lui permet d'effectuer son travail avec excellence. La réparation est effectuée avec des matériaux composites qui ont de fortes propriétés mécaniques qui résistent à la rouille, ce qui rend l'entretien sûr et simple.

Notre chapitre est divisé en deux parties, la première partie comporte une recherche bibliographique sur les endommagements des pipelines et la réparation par les matériaux composites et dans la deuxième partie on va examiner les différents paramètres nécessaires pour modéliser le bonding en composite.

### **III.2 recherche bibliographique :**

- 1- Le travail de S.A. Timashev et al [22] est d'étudier la croissance de la corrosion des défauts de la paroi du tuyau et sa mise en œuvre pour évaluer la probabilité conditionnelle de défaillance du pipeline et optimiser la réparation et l'entretien du pipeline par modèle de Markov. Qui prédit la longueur, la profondeur et la largeur des défauts par un ensemble d'expressions mathématiques, basées sur des données de terrain recueillies par inspection en ligne ou évaluation directe ou en utilisant une combinaison d'une équation différentielle qui décrit la croissance des paramètres de défaut avec la méthode de simulation de Monte Carlo. Grâce à la mise en œuvre de cette approche, la probabilité que les paramètres de défaut soient dans un état donné (analogue d'un histogramme) et les intensités de transition (d'un état à l'autre) sont facilement dérivées pour un instant donné. Cette approche donne automatiquement une évaluation de la probabilité de défaillance d'un segment de pipeline, car elle est dérivée à l'aide des données d'une longueur de pipeline spécifique. Ce modèle permet également de tenir compte de la pression de rupture du pipeline. Sur la base de ce modèle, un algorithme est construit pour optimiser le moment de la prochaine inspection/réparation. Cette méthodologie est mise en œuvre sur un pipeline d'exploitation spécifique qui a été inspecté plusieurs fois par un outil d'inspection MFL. Le nombre et le volume attendus des réparations dépendent de la valeur de la probabilité ultime de défaillance admissible du pipeline. Sensibilité de le taux de défaillance conditionnel du pipeline et le temps de réparation optimal par rapport au taux de croissance réel sont étudiés.
- 2- Mattos et al [23] ont fait une analyse de pipelines métalliques à paroi mince avec des dommages de corrosion localisés renforcés par des systèmes de réparation composites à base de polymères. Dans le but de proposer une méthodologie simple pour estimer la pression de rupture d'un spécimen renforcé avec des dommages de corrosion localisés arbitraires en introduisant des expressions spécifiques proposées en ne prenant en compte quelques données concernant sa géométrie, la contrainte ultime du métal du tube et les propriétés élastiques du manchon composite. L'analyse de ces problèmes, en raison de la variété des conditions de corrosion possibles, peut être coûteuse et longue lorsqu'une simulation par éléments finis est

### CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

adoptée. Des tests hydrostatiques sont effectués pour évaluer l'intégrité structurelle des tuyaux corrodés. Ensuite, les prédictions théoriques sont comparées aux résultats obtenus dans une série d'essais hydrostatiques montrant un bon accord. En termes simples, une estimation raisonnable de la pression de rupture minimale peut être obtenue. Cette méthodologie peut être utilisée pour déterminer l'épaisseur de composite nécessaire pour une réparation appropriée. Apparemment, pour ce type de défaut, les spécifications techniques semblent dans certains cas surestimer la pression de rupture de la canalisation, et donc sous-estimer l'épaisseur de composite nécessaire pour assurer la sécurité de la réparation dans les conditions d'exploitation.

- 3- M. Hautier et al [24] ont proposé dans cette étude, un procédé de réparation original basé sur l'infiltration de résine dans le réseau de fissures créées par impact. Un modèle analytique a été développé et permet de s'assurer une bonne combinaison physico-chimique de la résine de réparation avec le matériau à réparer. Des essais mécaniques ont par ailleurs été réalisés sur des panneaux réparés afin de démontrer les capacités du procédé de réparation. L'essai de compression après impact a été sélectionné car il est largement utilisé industriellement et c'est un des essais les plus discriminants pour les structures composites. Afin de comprendre les mécanismes d'échec de la réparation, des essais complémentaires issus de la mécanique de la rupture ont été réalisés. Aujourd'hui les résultats sur structure réparée sont de très corrects contrairement aux essais élémentaires dont la qualité semble dépendre grandement de la ténacité des résines de réparation injectées.

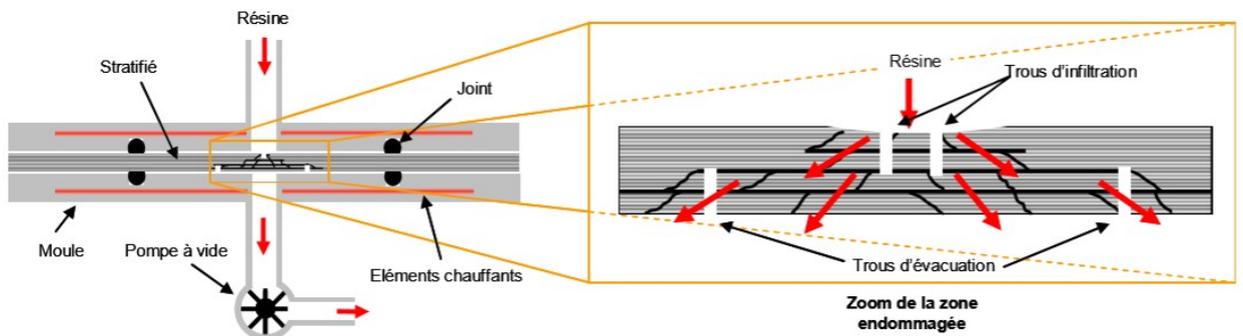


Figure (III -1) : Schéma de principe de la méthode de réparation par infiltration de résine dans le réseau de fissures.

- 4- M. Benziane et al [25] ont comparé les performances de la réparation longitudinale de fissures dans les pipelines de type API-X65 dans deux conditions différentes : avec des patches (c'est-à-dire des correctifs simples et doubles) et sans patch. La méthode des éléments finis tridimensionnelle FEM a été utilisée pour calculer les facteurs d'intensité de contrainte (SIF) en pointe de fissure. La réparation des fissures sous pression interne en utilisant des composites carbone-époxy a été étudiée, le diagramme d'évaluation des défaillances a été introduit pour obtenir la valeur du facteur de sécurité. Les résultats obtenus indiquent que la valeur de ce facteur dépend à la fois de la longueur de la fissure et de la pression. En outre, les résultats ont montré que la technique suggérée est admissible pour prédire le comportement des réparations.

### CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

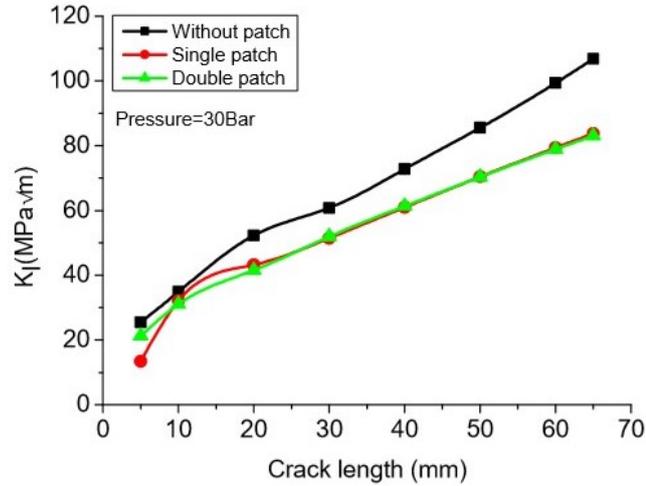


Figure (III -2) : SIF pour patch simple et double en fonction de la longueur de fissure longitudinale.

5- A. Pilato et al [26] ont mené une étude dans le but d'augmenter épaisseur des réservoirs en forme de cylindre à haute pression (700 bars) pour stocker une masse importante d'hydrogène sous forme gazeuse. Pour supporter une pression d'éclatement égale à trois fois la pression de travail comme l'exige la réglementation, en développant un outil de calcul analytique permettant de mettre en place des boucles d'optimisation pour un ensemble de paramètres (matériaux, nombre de couches- épaisseur et orientations des différentes couches) et de retrouver les valeurs de pression d'éclatement observées sur des essais. Pour cela, nous utilisons un modèle analytique épais qui est enrichi par la prise en compte de l'état de contraintes résiduel d'origine thermique ainsi que de l'hétérogénéité des propriétés mécaniques dans l'épaisseur de la structure. Des essais permettant de quantifier ces variations au sein de l'épaisseur sont en cours de réalisation pour enrichir le modèle analytique épais, notamment par rapport à la fraction volumique de fibres et aux propriétés transverses du matériau. L'étude se limite dans un premier temps à la partie cylindrique du réservoir.

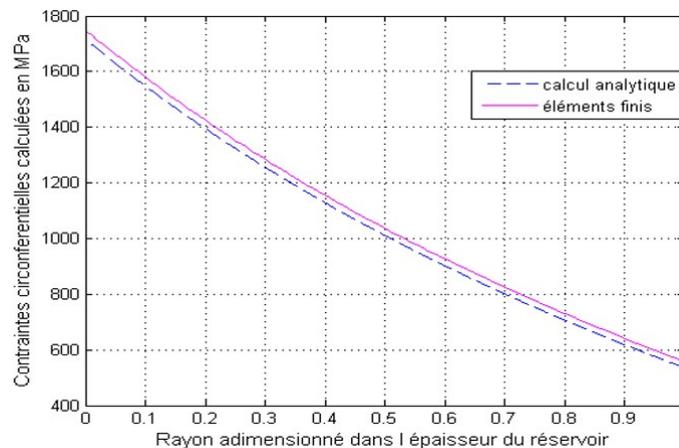


Figure (III -3) : Comparaison des contraintes dans l'épaisseur de la structure à partir du calcul analytique et du calcul par éléments finis Abaqus

### CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

- 6- Mulle et Collombet [27] a mis en œuvre des mesures de base par des capteurs de fibres optiques avec des réseaux Bragg (FORB) pour caractériser la diffusion d'humidité dans des composites unidirectionnels. Cette méthode, historiquement dédiée à la mesure de déformations locales, permet également de suivre l'évolution de l'humidité à partir de la déformation qu'elle engendre, en fonction du temps, à des endroits bien localisés, sans soustraire l'échantillon du milieu humide. La difficulté de cette méthode réside dans l'insertion du capteur au sein du matériau et au caractère intrusif des fibres optiques utilisées. Elle ne permet cependant de mesurer qu'en des points précis : là où le réseau de Bragg est inséré. Cette étude est réalisée à l'aide d'une simulation par éléments finis.

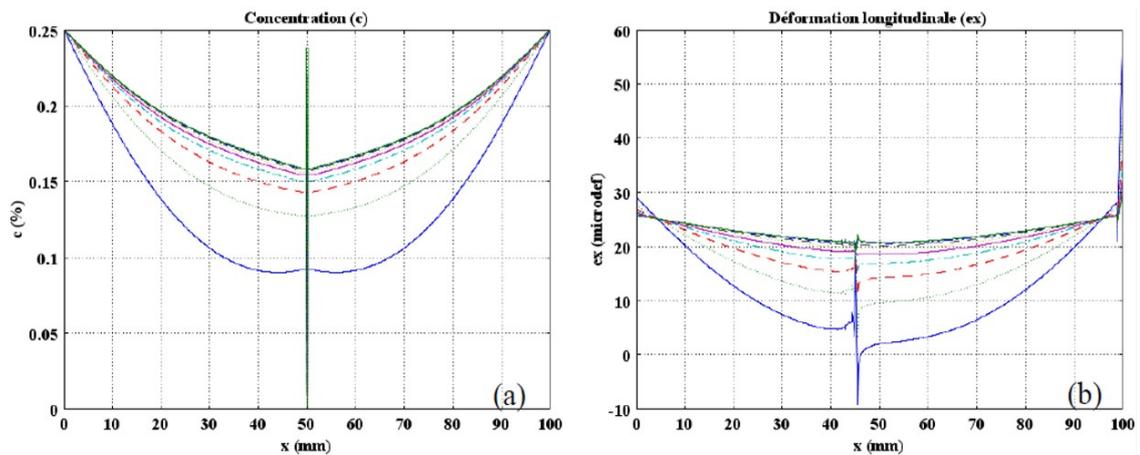


Figure (III -4) : Evolution de la teneur en eau et de la déformation hygroscopique longitudinale dans différents points du matériau suivant (ox) et dans les positions des capteurs de l'humidité et de la déformation

- 7- Paim et al [28] ont mené une étude dans le but d'analyser les systèmes de réparation époxy pour les tubes métalliques soumis à des déformations élastiques ou inélastiques avec des dommages de corrosion localisés altérant leur aptitude au service. La principale motivation de l'étude présentée dans cet article est la réhabilitation des canalisations corrodées transportant l'eau produite dans les plates-formes pétrolières offshore. Bien que la pression de service de ces tuyaux ne soit pas très élevée, la température de l'eau varie de 60 ° C à 90 ° C, ce qui peut être un inconvénient important de l'utilisation de matériaux polymères comme systèmes de réparation. Des tests de traction ont été effectués sur du polyuréthane renforcé de fibres de verre à différentes températures entre la température ambiante et 90°C. L'analyse expérimentale montre que la résistance ultime de ce composite dépend fortement de la température dans cette plage de température, tandis que les propriétés élastiques ne sont pas affectées. Cette étude est une étape préliminaire pour obtenir un critère de rupture simple mais efficace pour les systèmes de renforcement composite utilisés pour les pipelines corrodés dans l'industrie pétrolière.

### CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

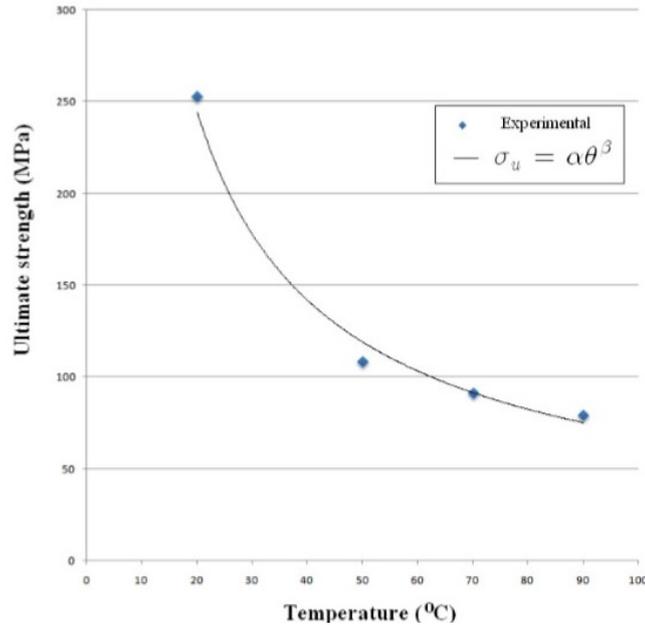


Figure (III -5) : montre à la fois la résistance ultime expérimentale et prédite.

- 8- Zugliani et al [29] Ont proposé une méthodologie plus simple et plus efficace pour prédire la pression de défaillance en appliquant des concepts de taux de libération d'énergie. Les tests Double Beam Cantilever (DCB) et Double Width Tapered Cantilever (WTDCB) ont été utilisés pour obtenir le taux de libération d'énergie d'échantillons dissemblables composés du même matériau que les réparations les plus courantes (acier/polymère renforcé de fibres). Le verre). Avec l'équation de conception liée au taux de libération d'énergie et à la pression de défaillance, il est possible de prédire la valeur de la pression de défaillance à l'aide des résultats du taux de libération d'énergie DCB et WTDCB. La valeur attendue de la pression d'éclatement a été comparée aux résultats d'essais hydrostatiques expérimentaux et analysée. Les résultats ont montré un bon accord entre ces deux valeurs, indiquant que la méthodologie développée dans cet article pourrait, à l'avenir, être utilisée pour prédire la pression d'éclatement dans les tubes réparés au lieu des tests hydrostatiques.
- 9- Elsadig et al [30] ont mené une étude sur l'érosion des structures sous isolation (CUI). Ce qui est un défi majeur dans de nombreuses industries en raison du coût et des risques élevés, pour les protéger des problèmes environnementaux externes ou généraux, pour protéger le personnel travaillant autour des structures, pour réduire les pertes de chaleur et maintenir les températures afin de faire fonctionner le processus efficacement. Ils ont constaté que les raisons les plus importantes qui causent la CUI sont la pénétration d'humidité dans le matériau isolant et sa propagation sous l'isolant à d'autres parties de la surface métallique, soit en raison de dommages au matériau isolant dus à des facteurs externes, soit en raison de l'absorption. D'eau par le matériau isolant. Il existe trois principales armes anti-CUI : un revêtement protecteur de haute qualité sous le matériau isolant (revêtement époxy résistant à la chaleur, nouvelle technologie de revêtement liquide et revêtement en aluminium thermodurcissable), une veste anti-intempéries et le choix

### CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

d'un matériau isolant imperméable et épais. Ils ont constaté que le matériau de choix était le cryogel et que l'épaisseur optimale de l'isolant se situait entre 2,06 et 6,25 pouces.

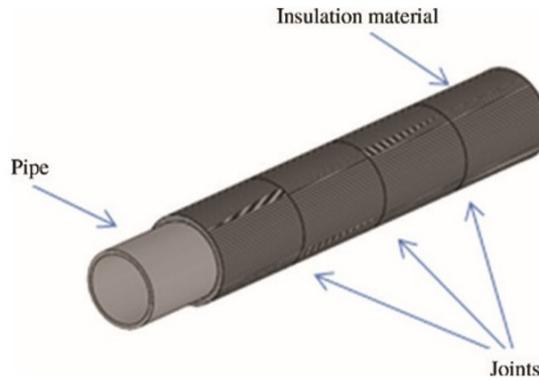


Figure (III -6) : Pipeline enveloppé.

10- Fang et al [31] ont mené une étude sur les propriétés mécaniques des tuyaux en béton corrodés. Pour étudier en profondeur l'effet des profondeurs d'abrasion, des charges de matières premières et des profondeurs de couverture sur les propriétés mécaniques des tuyaux en béton corrodés enterrés sous des charges de traction statiques, une série d'essais complets a été réalisée. Par la suite, un modèle 3D de tuyaux en béton corrodés enfouis sous des charges archéologiques a été créé sur la base d'ABAQUS. Les résultats ont montré que la paroi interne du tube est plus susceptible d'être endommagée que l'extérieur. Lorsque la profondeur d'usure augmente, la pression et la déformation à l'intérieur de la couronne du tube augmentent, et la pression et la déformation à l'intérieur de la couronne du tuyau augmentent. Une plus grande profondeur de couverture ou une charge de passage accrue entraîne une augmentation rapide à la fois de la contrainte ambiante et de la pression maximale du noyau. Il est recommandé de vérifier régulièrement les canalisations d'une profondeur supérieure à 1,5 m et d'une charge de circulation supérieure à 1,0 MPa pour détecter les dommages aux canalisations.

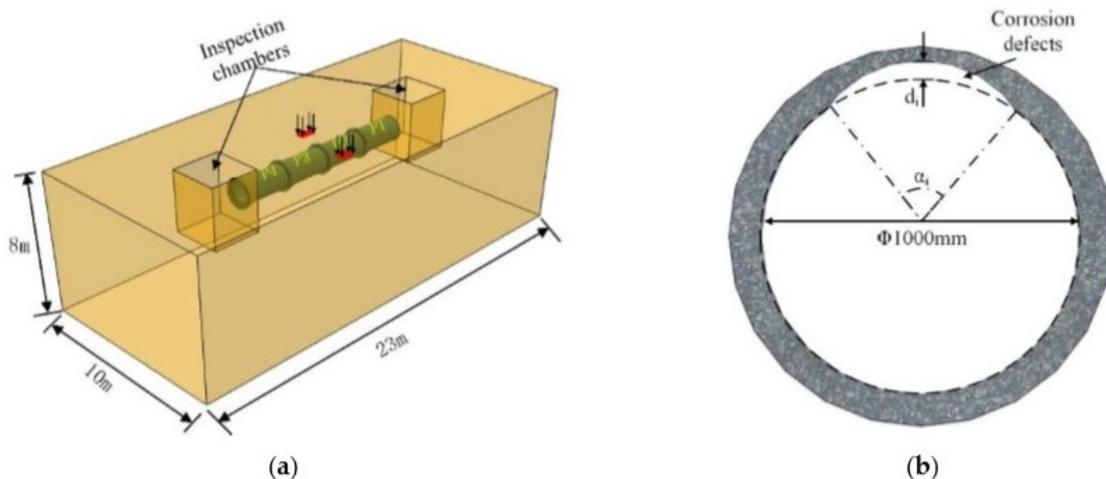
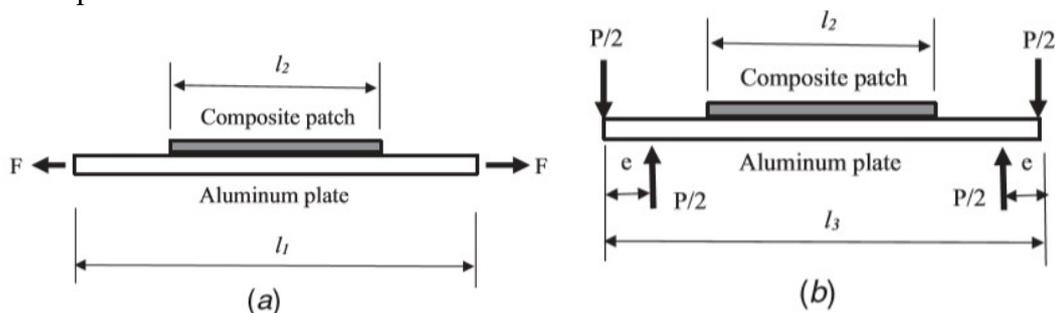


Figure (III -7) : (a) Le modèle 3D et (b) la coupe transversale de la corrosion du tuyau.

## CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

11- R. W. Bianchi et al [32] ont mené des études empiriques et numériques pour vérifier l'efficacité de la réparation par patch sur les structures sous-marines en aluminium. Des échantillons physiques ont été préparés à l'aide de plaques d'aluminium avec un trou préformé et des couches de tissu de verre tissé. La résine époxy a été choisie pour pouvoir être traitée sous l'eau. Les échantillons de test ont été préparés dans différentes conditions de traitement telles que le traitement à sec et le traitement humide avec différents temps d'exposition dans l'eau. Des jauges de contrainte ont été attachées à tous les échantillons. Les échantillons ont été testés pour les charges de traction et de flexion en quatre points. Les patches ont été comparés à ceux préparés dans différentes conditions de fixation. La valeur la plus importante évaluée et utilisée comme comparaison à l'efficacité du patch était la pression dans l'aluminium mesurée près du trou. Dans les deux expériences et pour tous les échantillons, la pression au niveau de l'orifice a été mesurée et utilisée pour déterminer si le patch de réparation composite fournissait un renforcement suffisant pour réduire la contrainte dans les échantillons d'aluminium. Les échantillons fixés sous l'eau ont fourni un renforcement adéquat et la déformation mesurée à la fosse était bien inférieure à celle de l'échantillon sans le patch. Du point de vue de l'échec de la conception, un modèle numérique FEA a été utilisé pour évaluer les contraintes de cisaillement et de pelage à l'interface du patch afin de déterminer les contraintes prévalant lors du délaminage. Il a été démontré que la contrainte de cisaillement était la contrainte de rupture dominante pour les charges de flexion, tandis que la contrainte de pelage normale était la contrainte dominante pour les charges de traction. Dans les deux expériences, il a été démontré que la résistance de l'interface entre le patch et la surface en aluminium était augmentée car le patch pouvait durcir plus longtemps dans l'eau. C'est une indication que dans la condition de charge partagée, le correctif s'avérera également efficace. La conclusion est que le patch composite sous-marin remplissait l'objectif de la recherche et qu'il est possible de réparer les structures en aluminium sous l'eau à l'aide d'un patch composite.



### III.3 Évaluation de l'effet de renforcement et conception des systèmes de réparation en matériaux composites:

Pour évaluer l'effet de renforcement et conception des systèmes de réparation en matériaux composites on a besoin de quelques données : [33]

## CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

1- Caractéristiques dimensionnelles du tube en acier : l'épaisseur relative du tuyau  $t_{rp}$ , son rayon interne  $a_p$ , et son rayon externe  $b_p$ , définis comme suit :

$$t_{rp} = \frac{t_n}{D_e} \quad (III.1)$$

$$a_p = \frac{D_e}{2} - t_n \quad (III.2)$$

$$b_p = \frac{D_e}{2} \quad (III.3)$$

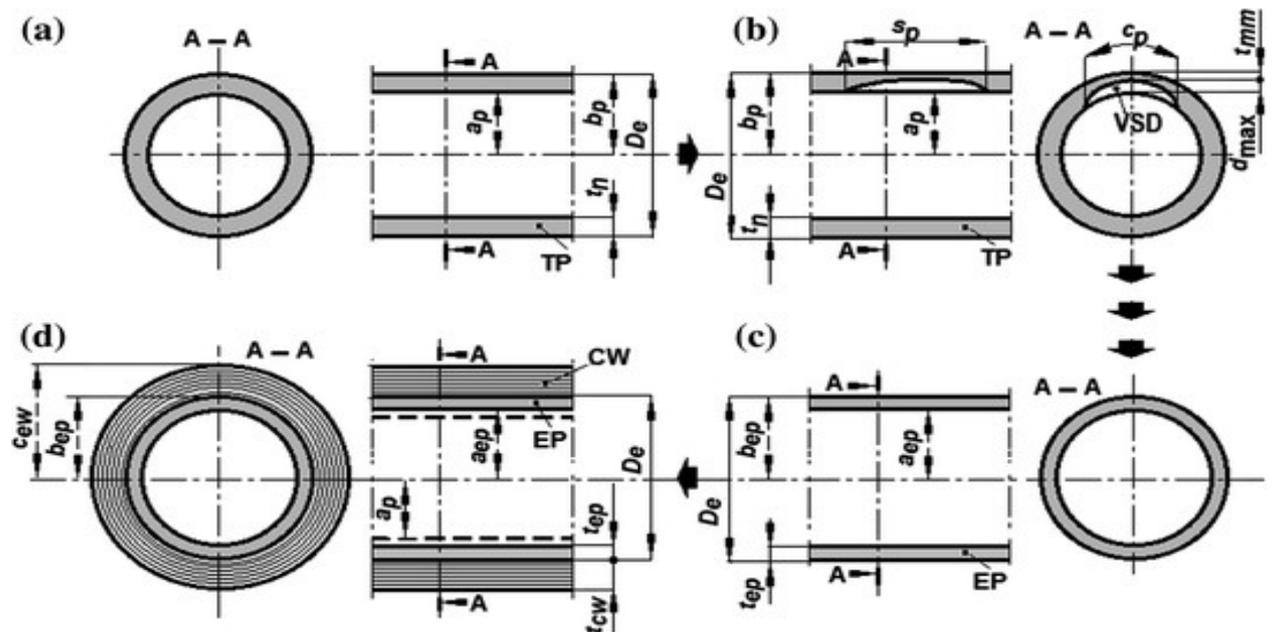


Figure (III -9) : La conception de système de réparation par composite.

2-Propriétés mécaniques du tube en acier à réparer : module d'Young  $E_p$ , limite d'élasticité  $R_{yp}$  (généralement exprimée par la limite d'élasticité, extension totale); résistance à la traction  $R_{mp}$ , Coefficient de Poisson  $\mu_p$ .

3-Conditions de conception et conditions normales de fonctionnement de la conduite réparée : pression de conception. De plus, la contrainte admissible  $\sigma_{ap}$ , et la pression de service maximale admissible  $p_{ao}$ , du tuyau doivent également être calculées à l'aide des équations :

$$\sigma_{ap} = f_d \times R_{yp} \quad (III.4)$$

$$p_{ao} = \frac{2t_n \cdot \sigma_{ap}}{D_e - t_n} \quad (III.5)$$

### CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

Où  $f_d$  est le facteur de conception du pipeline. Dans cet article, la classe d'emplacement 1 a été prise en compte dans le calcul, correspondant à une valeur supposée du facteur de conception du pipeline :  $f_d = 0.72$

4- Dimensions caractéristiques du défaut de perte de métal détecté dans la paroi du tube en acier peuvent également être calculées à l'aide des équations :

$$D_{rd} = \frac{d_{max}}{t_n} \quad (III.6)$$

$$S_{rd} = \frac{S_p}{\sqrt{D_e \cdot t_n}} \quad (III.7)$$

5- Les Propriétés du matériau composite, y compris les contraintes/déformations admissibles et les conditions de température pour la réparation des conduites.

Type de composite	1	2	3	4
Matériel d'armement	Fibre de verre	Fibre de verre	Fibre de verre	Fibre de carbone
Module de traction $E_{cc}$ , GPa	34.0 ... 38.0	7.9 ... 8.7	33.8 ... 34.5	67.5 ... 69.8
Module de traction $E_{ac} E_{cc}$ , GPa	7.8 ... 8.7	5	6.1 ... 11.1	26.5 ... 27.4
module de poisson	0.30 ... 0.32	0.15 ... 0.23	0.22 ... 0.25	0.30 ... 0.33
Module de cisaillement $E_{cc}$ , GPa	3.1 ... 6.5	-	3.1 ... 5.9	6.5 ... 6.8
Résistance à la traction, MPa	580 ... 620	72 ... 190	630 ... 650	822 ... 1020
Allongement à la rupture, %	1.0 ... 1.1	2.8 ... 3.7	1.0 ... 1.2	0.25

Tableau (III-1) : Propriété des matériaux composite [33]

#### III.4 Calcule La pression de service maximale du pipeline endommagé :

La pression maximale de service (de sécurité) de la canalisation endommagée  $p_d$ , requise pour la conception de l'enveloppe composite, peut être évaluée à l'aide du RSF qui est le rapport de la valeur de la propriété qui détermine la résistance mécanique (ou la charge mécanique maximale admissible, c'est-à-dire la pression interne de la canalisation) de la canalisation endommagée et la valeur de la même caractéristique pour un routage sans défauts.

Pour calculer le RSF nous avons retenu pour nos analyses les trois voies suivantes, considérées comme les plus pertinentes. Nous utilisons les trois méthodes suivantes.

##### III.4.1 la méthode de la Norme ASME B31.G :

La Norme ANSI/ASME B31 est utilisée pour déterminer la résistance résiduelle des canalisations corrodées à l'aide d'une méthode d'évaluation simplifiée basée sur les résultats d'analyses et d'essais. L'application de B31G a permis aux exploitants de pipelines de déterminer de manière fiable les niveaux de pression de fonctionnement

### CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

sûrs pour les conduites affectées par la corrosion et de déterminer si des réparations sont nécessaires pour continuer à fonctionner en toute sécurité. [34]

La base de l'équation utilisée dans B31G est relativement simple et implique : [35]

- Supposer que la contrainte circonférentielle maximale, est égale à la limite d'élasticité du matériau,

- Caractériser la géométrie du défaut de corrosion par une forme projetée parabolique pour un défaut court, et une forme rectangulaire pour un défaut long.

L'équation de *RSF* sera exprimée comme suit :

- Pour le cas d'un défaut court de forme parabolique ou  $S_{rd}^2 = \left(\frac{L}{\sqrt{Dt}}\right)^2 \leq 20$  :

$$RSF = 1.1 \left[ \frac{1 - \left(\frac{2}{3} D_{rd}\right)}{1 - \left(\frac{2}{3} D_{rd}\right)^{\frac{1}{M}}} \right] \quad / \quad D_{rd} = \frac{d}{t} \quad (III.8)$$

Où le facteur de Folias (*M*) qui représente le gonflement ou le flambement qui se produit autour d'une fissure dans un cylindre sous pression et qui est donné par:

$$M = \sqrt{1 + 0.8 S_{rd}^2} \quad \rightarrow \quad \sqrt{0.8 S_{rd}^2} \leq 4 \quad (III.9)$$

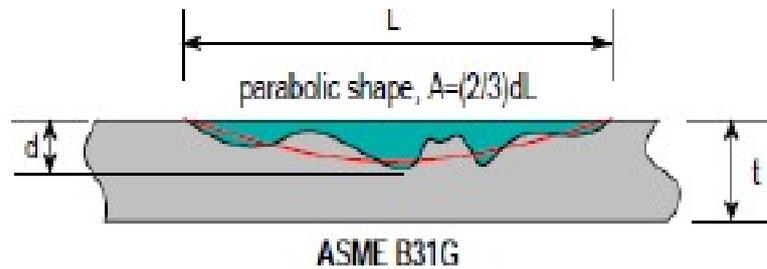


Figure (III -10) : Défaut parabolique

- Pour le cas d'un défaut long de forme rectangulaire ou  $S_{rd}^2 = \left(\frac{L}{\sqrt{Dt}}\right)^2 > 20$ :

$$RSF = 1.1 [1 - D_{rd}] \quad (III.10)$$

$$M = \sqrt{1 + 0.8 S_{rd}^2} \quad \rightarrow \quad \sqrt{0.8 S_{rd}^2} > 4 \quad (III.11)$$

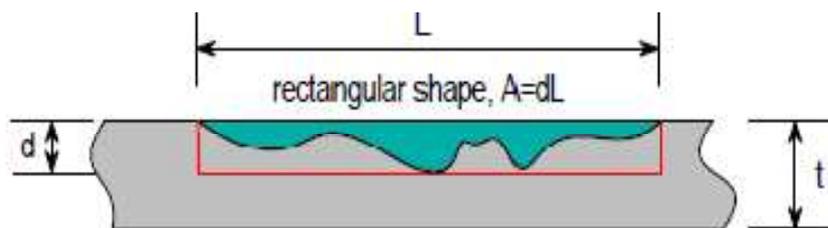


Figure (III -11) : Défaut rectangulaire

## CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

### III.4.2 la méthode de la Norme ASME B 31 G Modifiée :

Kiefner et Vieth [36] [37] ont reconnu plus tard que la méthode d'analyse de la corrosion dans le code B31G pourrait être trop conservatrice pour certains types de défauts constatés dans la pratique. Pour cela Ils ont modifié le code pour développer ce qui est connu comme la méthode 0.85dL [38].

L'équation de RSF dans l'ASME B 31 G Modifiée sera donnée alors par :

$$RSF = 1.1 \left[ \frac{1 - (0.85 \frac{rd}{1})}{1 - (0.85 D_{rd})^{\frac{1}{M}}} \right] \quad (III.12)$$

De même que le facteur de Folias a été modifié comme suit :

- Pour  $S_{rd}^2 \leq 50$  :

$$M = \sqrt{1 + 0.6275 S_{rd}^2 - 0.003375 S_{rd}^4} \quad (III.13)$$

- Pour  $S_{rd}^2 > 50$  :

$$M = 0.032 S_{rd} + 3.3 \quad (III.14)$$

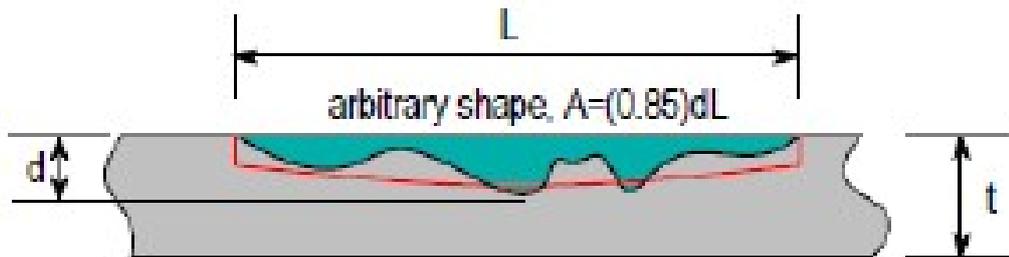


Figure (III -12) : Défaut de corrosion long selon une forme arbitraire selon le code ASME B31G modifiée

### III.4.3 La méthode recommandée par NV RP-F101 :

Le code DNV. RP-F101 décrit deux approches alternatives pour l'évaluation de la corrosion. La principale différence entre les deux approches réside dans leur philosophie de sécurité :

La première approche comprend des facteurs de sécurité calibrés prenant en compte la propagation naturelle des propriétés des matériaux et des variations d'épaisseur de paroi et de pression interne.

Les incertitudes associées au dimensionnement du défaut et à la spécification des propriétés du matériau sont spécifiquement prises en compte dans la détermination de la pression de fonctionnement admissible. Cette partie du RP est également un supplément à DNV-OS-F101. Des équations probabilistes calibrées (avec des facteurs de sécurité partiels) pour la détermination de la pression de service admissible d'une canalisation corrodée sont données.

La deuxième approche, est basée sur le format ASD (Allowable Stress Design). La pression de défaillance (capacité) du défaut de corrosion est calculée et cette pression de défaillance est multipliée par un facteur d'utilisation unique basé sur le facteur de

### CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

conception d'origine. La prise en compte des incertitudes liées au dimensionnement du défaut de corrosion est laissée à l'appréciation de l'utilisateur [39].

$$RSF = 1.1 \left[ \frac{1 - D_{rd}}{1 - \frac{D_{rd}}{M}} \right] \quad (III.15)$$

$$M = \sqrt{1 + 0.31 S_{rd}^2} \quad (III.16)$$

Après le calcul de RSF on peut déduire la valeur de la pression critique  $p_d$  à l'aide d'équation suivante :

$$p_d = RSF \cdot p_{ao} \quad (III.17)$$

#### III.5 le calcul d'épaisseur :

Pour la détermination de l'épaisseur d'enveloppe composite  $t_{cw}$ , les méthodes disponibles dans la littérature les plus fréquemment utilisées ont été analysées et commentées par les auteurs dans [40–41]. Les résultats des analyses détaillées dans [40] ont montré que la méthode la plus adéquate pour la conception de l'épaisseur de l'enveloppe composite est celle proposée par les normes ASME et ISO, en utilisant les équations (III.18) et (III.19).

$$t_{cw} = \frac{D_e E_p}{2 E_{cc} \sigma_{ap}} (p_c - p_d) \quad (III.18)$$

$$t_{cw} = \frac{D_e E_p}{4 E_{ac} \sigma_{ap}} (p_c - p_d) \quad (III.19)$$

Vient ensuite la méthode développée par les auteurs dans [41,42]: considérer le tube comme un tube multicouche (avec l'enveloppe composite comme couche extérieure et un tube acier équivalent comme couche intérieure) et formuler la condition analytique pour que ce tube résister à la pression interne, il donne :

$$t_{cw} = \frac{D_e}{2} \left[ \frac{\sqrt{K_{EP} - \mu_c + 1}}{\sqrt{K_{EP} - \mu_c - 1}} \right] - 1 \quad (III.20)$$

Dans lequel:

$$K_{EP} = \frac{E_{cc}}{E_p} \frac{1}{K_{ep}^2 - 1} \left[ \frac{8 t_{rp} K_{ep}^2}{t_{rp} (3 K_{ep}^2 + 1) - K_{ep}^2 + 1} - K_{EP} \right] \quad (III.21)$$

$$K_{EP0} = (K_{ep}^2 - 1)(1 - \mu_p) + 2 \quad (III.22)$$

### CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

$$K_{EP} = \frac{b_{ep}}{a_{ep}} \quad (III.23)$$

Où  $a_{ep}$  et  $b_{ep}$  sont respectivement les rayons intérieur et extérieur correspondant à une conduite équivalente sans défaut, réalisée dans le même acier que la conduite endommagée, définie comme ayant la même résistance mécanique que la zone de conduite en défaut. Les valeurs de  $a_{ep}$ ,  $b_{ep}$  et l'épaisseur de paroi de ce tuyau équivalent  $t_{ep}$ , sont obtenues à l'aide des équations suivantes :

$$a_{ep} = \frac{D_e}{2} - t_{ep} \quad (III.24)$$

$$b_{ep} = b_p \quad (III.25)$$

$$t_{ep} = \frac{p_d}{2\sigma_{ap} + p_d} D_e \quad (III.26)$$

#### III.6 le calcul de contrainte équivalente :

Les pipelines sont des structures minces peu rigides face aux déformations causées par des facteurs externes, du fait que l'épaisseur du tube sur son diamètre extérieur est inférieure au rapport  $t/D_{ext} < 0,05$ , ce qui la rend facile à endommager. De contrainte dans la conduite : contrainte radiale  $\sigma_r$  contrainte circonférentielle  $\sigma_\theta$  et contrainte de traction  $\sigma_z$ . Elle s'exprime par les relations suivantes en fonction de la variable r.

$$\sigma_{rr} = \frac{r_i^2 p_i}{r_e^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_e^2}{r^2}\right) \quad (III.27)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{r_i^2 p_i}{r_e^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_e^2}{r^2}\right) \quad (III.28)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{r_i^2 p_i}{r_e^2 - r_i^2} \quad (III.29)$$

Pour le calcul de contrainte équivalente de pipelines, il est plus commode d'employer cette théorie en utilisant des coordonnées cylindriques, dont les composantes des efforts sont combinées en un seul effort efficace selon l'équation de Von Mises.

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{rr})^2 + (\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta})^2} \quad (III.30)$$

#### III.6 Conclusion :

Les études que nous avons présentées dans ce chapitre ont eu un impact sur les connaissances liées à l'efficacité de la réparation composite pour raviver la résistance mécanique de la conduite corrodée et augmenter la durée de vie sans l'endommager, ainsi que sur les méthodes et mesures utilisées pour calculer la résistance mécanique

### **CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcule analytique**

résiduelle de la conduite a permis de connaître la pression maximale de service de la conduite endommagée et de calculer l'épaisseur nécessaire de mélange Pour réparation et effort équivalent sur le lieu de réparation.

# **CHAPITRE IV**

**Simulation numérique, résultats et  
discussions**

## CHAPITRE IV: Simulation numérique, résultats et discussions

### IV.1 Modélisation et simulation numérique:

#### IV.1.1 Introductions sur la simulation:

La simulation numérique est une représentation de phénomènes physiques complexes rendue possible grâce à une série de calculs et un modèle mathématique comportant des équations aux dérivés partiels. La méthode la plus répandue est la méthode des éléments finis.

C'est le moyen de simuler de manière virtuelle un produit dans son environnement final et ainsi de répondre à de multiples enjeux industriels tels qu'anticiper les écueils de conception, réduire le prototype ou encore favoriser l'innovation.

C'est une solution plus économique Le prototype est virtuel et facilement modifiable La procédure est rapide à mettre en place(en heures) Elle peut être fait en 'importe où et n'importe quand Elle permet d'avoir une plus-value car permet une meilleure compréhension et interprétation du comportement du produit.

#### IV.1.2 Représentation de la géométrie et caractéristiques mécanique:

Dans cette simulation on va configurer un pipeline d'acier X42 de diamètre extérieur de 323,9mm. Et on a les propriétés mécaniques du pipeline X42 dans le tableau IV.2

Acier X42	Mesures
Diamètre extérieur $D_{ext}$	323,9 mm
Longueur L	2240mm
Épaisseur	9,5 mm

Tableau (IV-1) : Géométrie des pipelines

	Contrainte admissible	Limite d'élasticité	La résistance à la traction
Pipe I	209 Mpa	290 Mpa	415 Mpa

Tableau (IV-2) : Propriété mécanique de l'acier X42

On note que la limite d'élasticité citée dans le tableau IV.2 est à la fois la limite d'élasticité en traction et en compression, le pipeline étant en acier les deux limites peuvent être considérées comme égales. Pour les métaux, on considère en général pour simplifier que la limite d'élasticité en compression  $R_{ec}$  est égale à la limite en traction  $R_e$ :

$$R_{ec} \approx R_e$$

Ceci est valable pour les aciers doux et mi-durs. Ce n'est pas le cas pour d'autres matériaux comme les bétons ou les fontes.

#### IV.1.3 Modélisation numérique d'un tube sans défaut :

La figure (IV -1) présente le modèle géométrique de la pipe.

## CHAPITRE IV: Simulation numérique, résultats et discussions

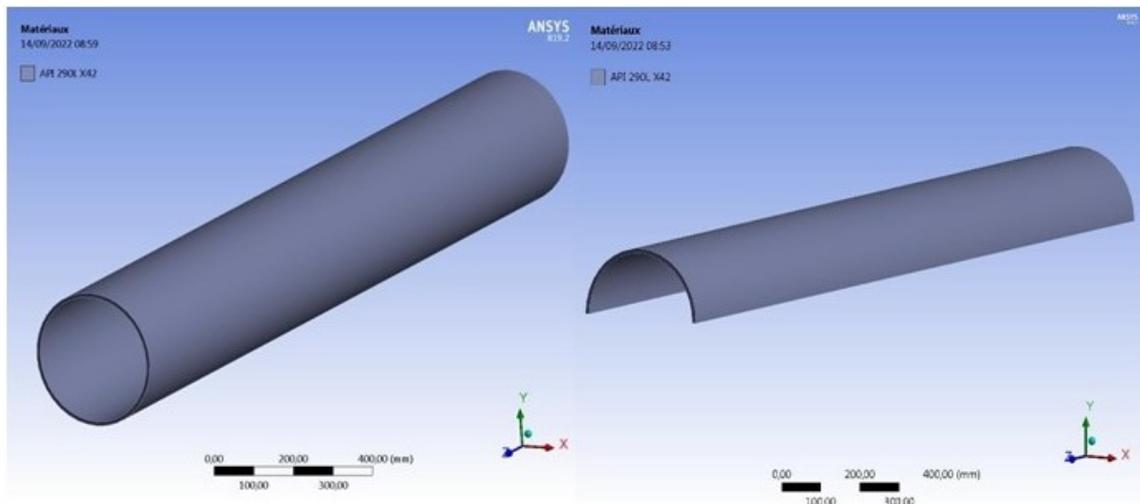


Figure (IV -1) : Le modèle géométrique du pipeline saint

La figure (IV.1) : représente la modélisation faite par le logiciel «*Désigne Modeler*» chargé pour la création géométrique qui est un composant de ANSYS, qui ensuite lis par «*Mechanical* » avec le quelle on pue attribuer notre matériau Acier X42.

### 4IV.3 Modélisation d un maillage :

#### IV.2.1 Maillage à dominance Hexaédrique :

Un maillage hexaédrique veut dire que l'élément a la forme d'un cube (s'ilestd'ordre1) comme la Figure IV.2 le montre.

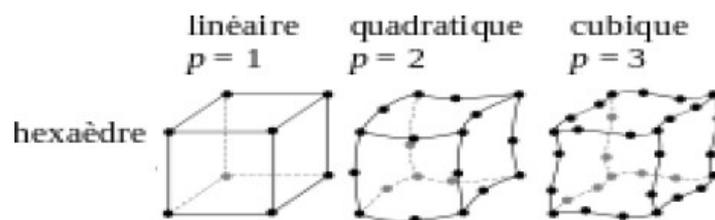


Figure (IV-2) : Représentation d'élément hexaèdre sous différents ordres

Dans la figure (IV-3) : nous avons réglé notre modèle de pipeline avec un maillage à dominance Hexaédrique de taille 20 mm et préférence physique mécanique d'ordres contrôlé par le programme (pour éviter des Erreur potentiel puisque nous voulons testés plusieurs contrainte sauris que de dépassé la limite élastique du matériau).

**CHAPITRE IV: Simulation numérique, résultats et discussions**

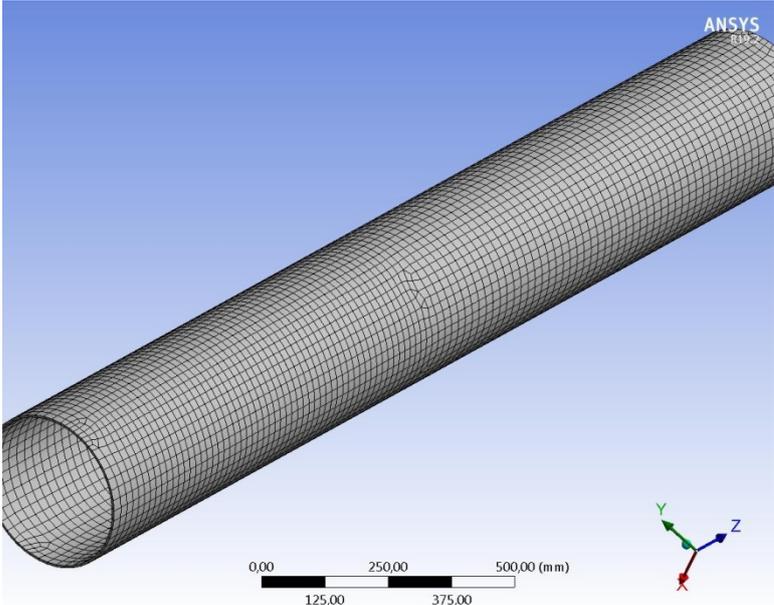


Figure (IV-3) : Modèle numérique du pipeline avec maillages hexaèdre

**IV.2.1.1 Qualité d’élément des maillages Hexaèdres:**

Grass eaux fonctionnalités d’ANSYS on peut obtenir une démographie des éléments des maillages en fonction du critère de qualité schématisé en diagramme de bâtons Figure (IV-4):

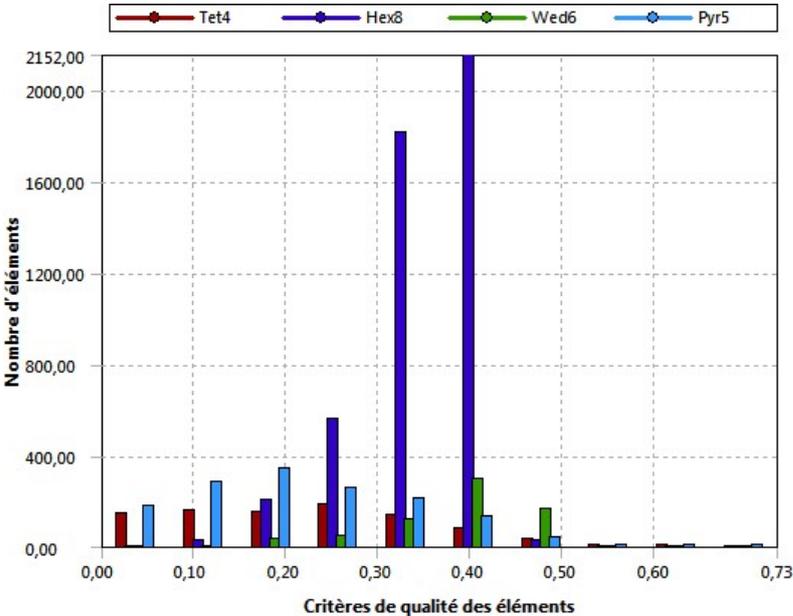


Figure (IV-4) : Diagrammes quantité d’élément en fonction du critère de qualité

## CHAPITRE IV: Simulation numérique, résultats et discussions

La figure (IV-5) : représente ces éléments dans le model 3D en distinguant la qualité.

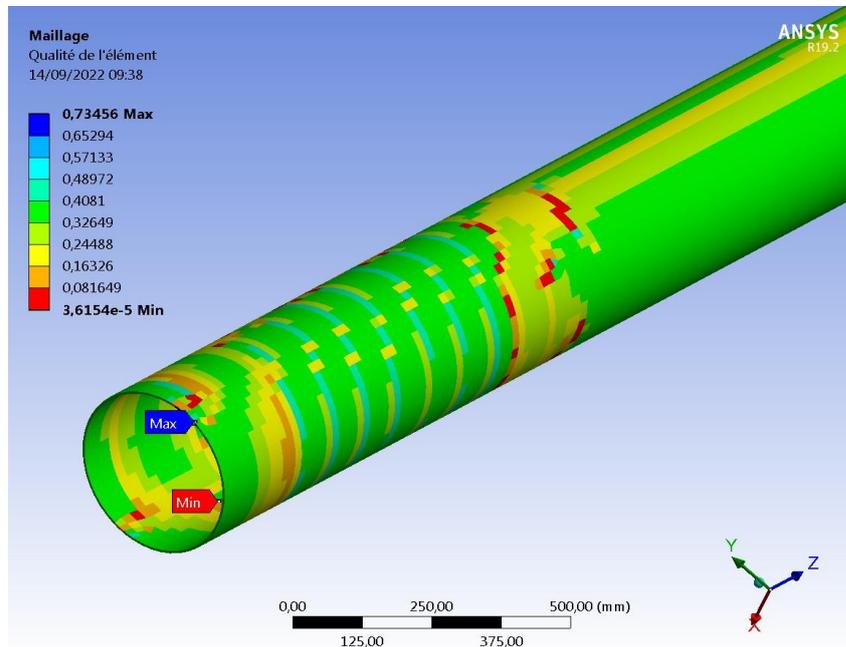


Figure (IV-5) : Qualité de l'élément sur le model 3D

On rappelle que le critère de la qualité de l'élément du maillage est borné entre 0 et 1, pour

« 1 »: veut dire que l'élément est en bonne santé ou qu'il a une bonne forme géométrique est uniforme qui le rend apte à donner des calculs précis, et pour tous éléments rapprochant de « 0 » ont de mauvaise forme et non uniforme et potentiellement peu fiable pour un calcul précis.

On observe que la qualité de ce maillage varie entre « 0 » et « 0.73 », mais les éléments ayant un critère de « 0.5 » à « 0.73 » sont donc négligeables (moins de 200 éléments), l'élément majoritaire sont ceux qui ont un critère de « 0.4 » à « 0.1 » (plus de 2500 éléments).

Le Tableau IV.3 représente le moyen de qualité du maillage complet:

Paramètres de maillage	Qualité de l'élément
<input type="checkbox"/> Min	3,6154e-005
<input type="checkbox"/> Max	0,73456
<input checked="" type="checkbox"/> Moyenne	0,31052
<input type="checkbox"/> Ecart type	0,10413

Tableau (IV-3) : Les valeurs clés de la qualité du maillage hexaèdre.

On constate que la moyenne  $\approx 0.310$  pour une qualité de l'élément du maillage et très incertaine et non fiable.

IV.2.2 Maillage Tétraèdre:

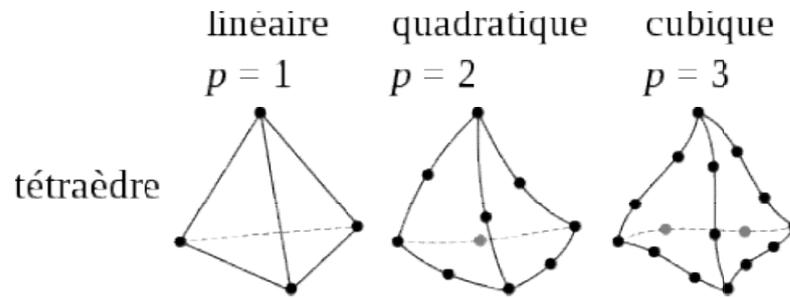


Figure (IV-6) : Maillage 3D Tétraèdre dans chaque ordre.

La figure (IV-6) : représente le maillage que nous allons appliquer à notre pipeline.

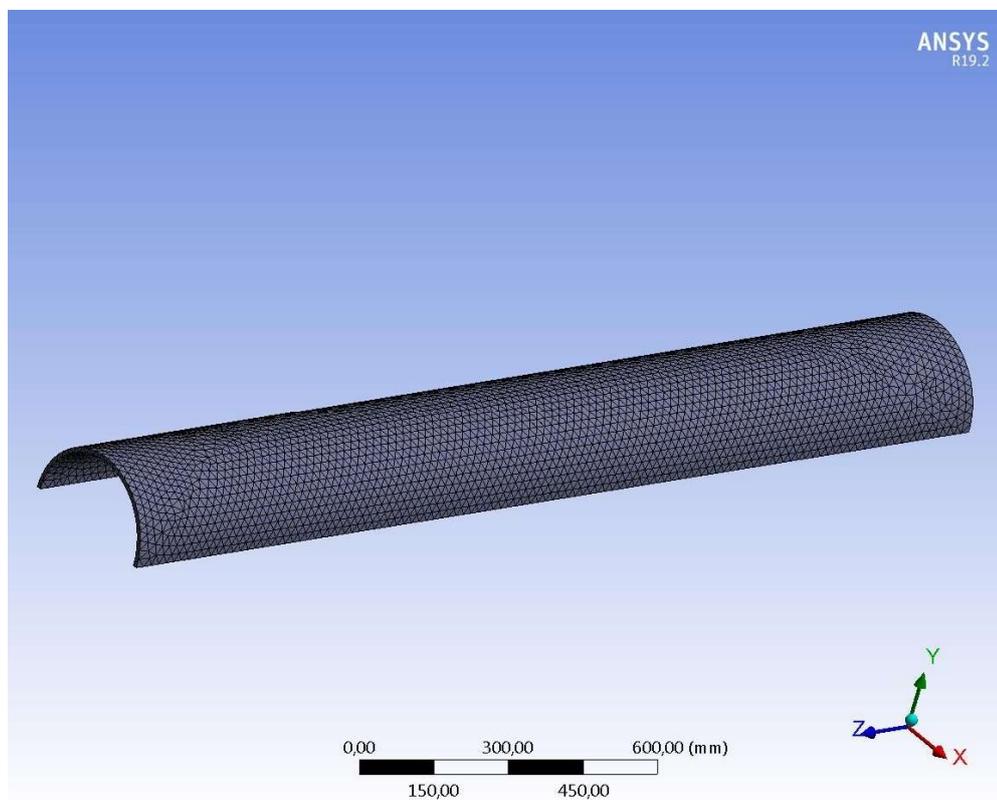
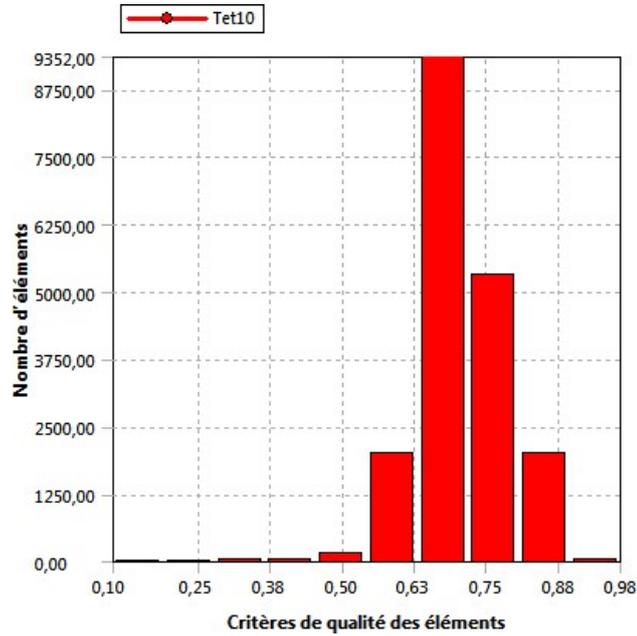


Figure (IV-7) : Model numérique du pipeline avec un maillage tétraèdre

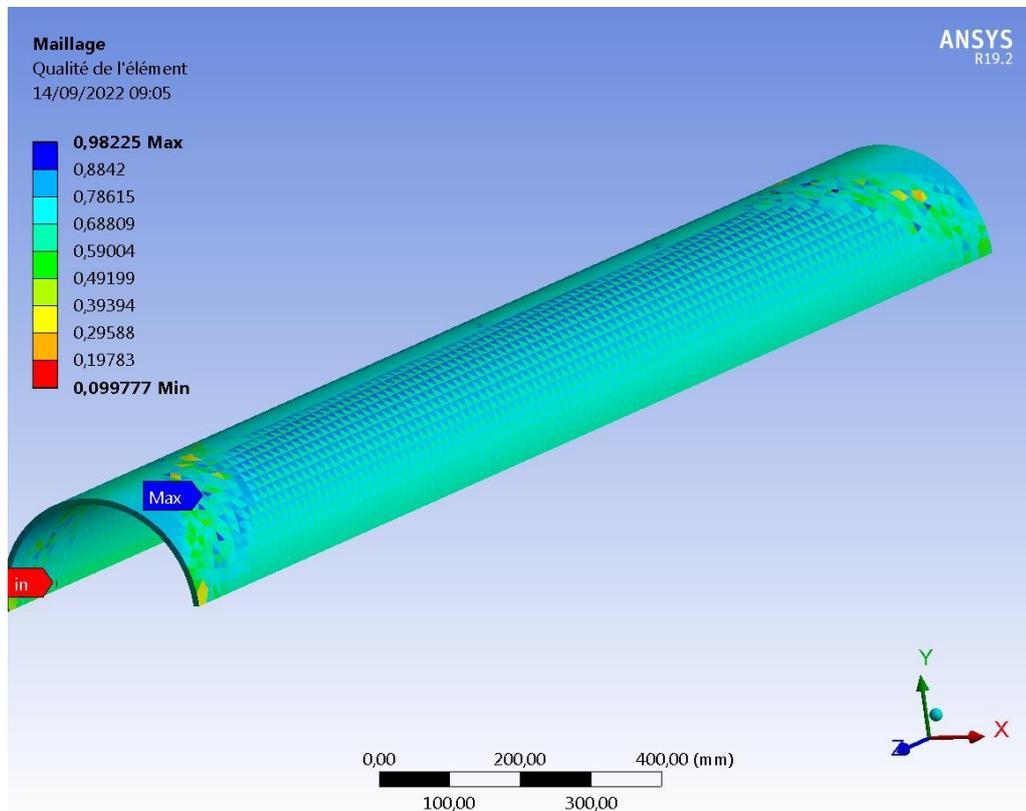
La figure (IV-7) : représente le résultat de notre maillage tétraèdre en ou savon s appliqué les mêmes conditions avec le précédent maillages (même taille, préférence physique et ordre contrôlé par le programme).

IV.2.2.1 Qualités d'élément du maillage Tétraèdre:



La figure (IV-8) : Diagrammes quantité d'élément en fonction du critère de qualité du maillage tétraèdre.

Figure (IV-8) : nous donne des informations sur la démographie des éléments sur notre pipeline.



La Figure (IV-9) : A perçu de la qualité du maillage sur le modèle pipeline

## CHAPITRE IV: Simulation numérique, résultats et discussions

Dans cette configuration en maillage tétraèdre on constate que nous avons obtenu une tranche d'élément a qualité entre « 0,1 » et « 0,98 », avec les éléments entre « 0,1 » et « 0,5 » sont très peu et négligeable par rapport aux autres éléments de « 0,6 » a « 0,9 » qui sont majoritaire soit plus de 10000 éléments pour 18909 éléments en tout.

Et case traduit avec une moyenne de 0,70241 de qualité générale ce qui est acceptable comme nous le montre le Tableau IV.2.

Paramètres de maillage	Qualité de l'élément
Min	9,9777e-002
Max	0,98225
Moyenne	0,70241
Ecart type	7,3479e-002

Tableau (IV-2) : Les valeurs clés de la qualité du maillage tétraèdre.

Avec les résultats obtenus nous pouvant faire une comparaison entre les deux méthodes (Tétraèdre ou Hexaèdre). On a la méthode Hexaèdre qui a une moyenne de 0.31052 de critère de qualité pour 7783 éléments au total, puis nous avons la méthode tétraèdre qui a une moyenne de 0,70241 pour 18 909 nombres d'éléments. Sure cette comparaison nous avons bien évidemment choisis la méthode tétraèdre pour la suite de la simulation.

### IV.2.3 Justification de la taille des éléments:

Dans les deux méthodes nous avons prédéterminé la taille des éléments a 20mm que nous trouvons la plus optimale pour la simulation avec un rapport (nombre d'élément/temps de calcul) meilleurs.

La Figure (IV-10) et Figure (IV-11) montrent les essais que nous avons de plusieurs tailles d'éléments, pour en conclure la plus adéquates à nos besoins et aussi pour nos moyens logistiques (machine de calculs).

Avec les quelle nous avons imposé une pression interne de 12.2Mpa [40], nous obtenons les résultats suivants dans la Figure (IV-12).

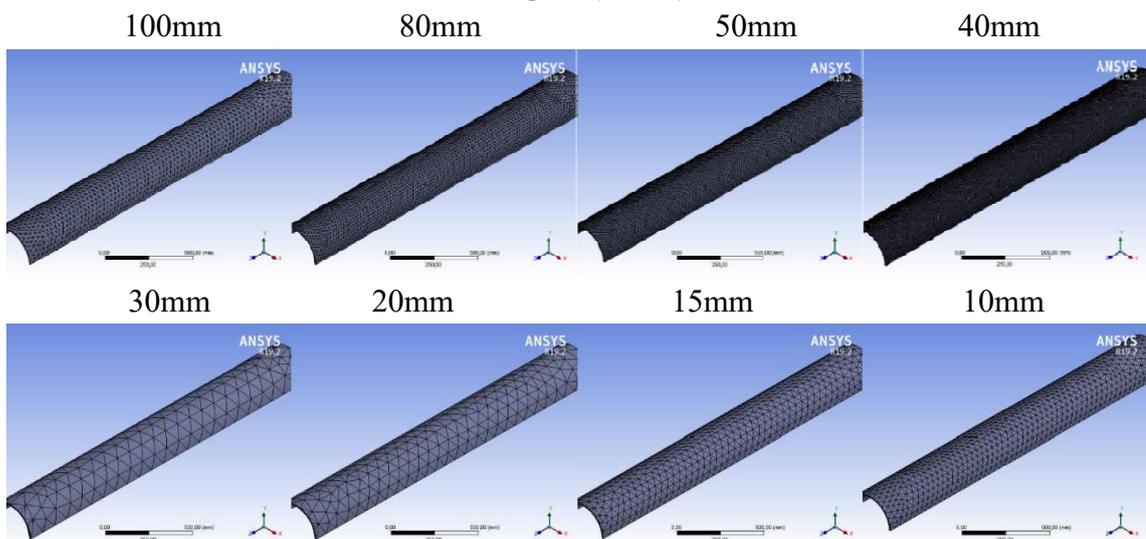


Figure (IV-10) : les différentes tailles d'élément modélisé d'un maillage

## CHAPITRE IV: Simulation numérique, résultats et discussions

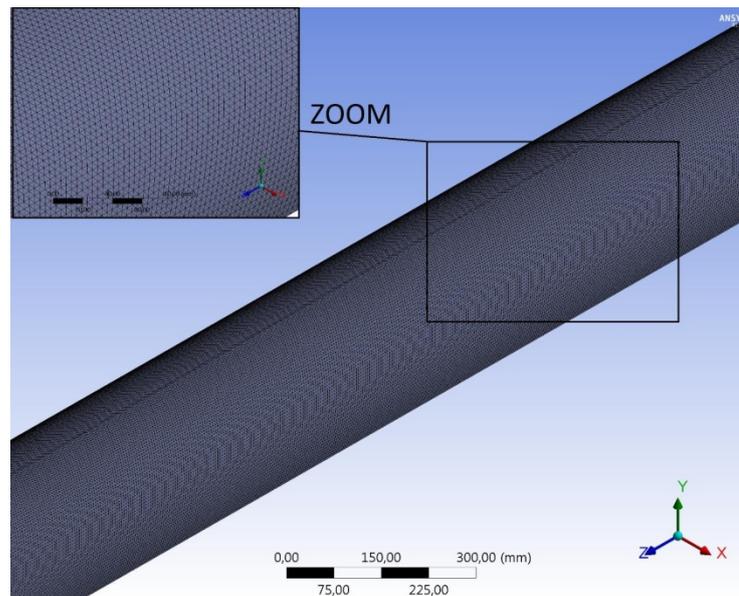


Figure (IV-11) : photos haute définition d'un maillage tétraèdre de taille 5 mm

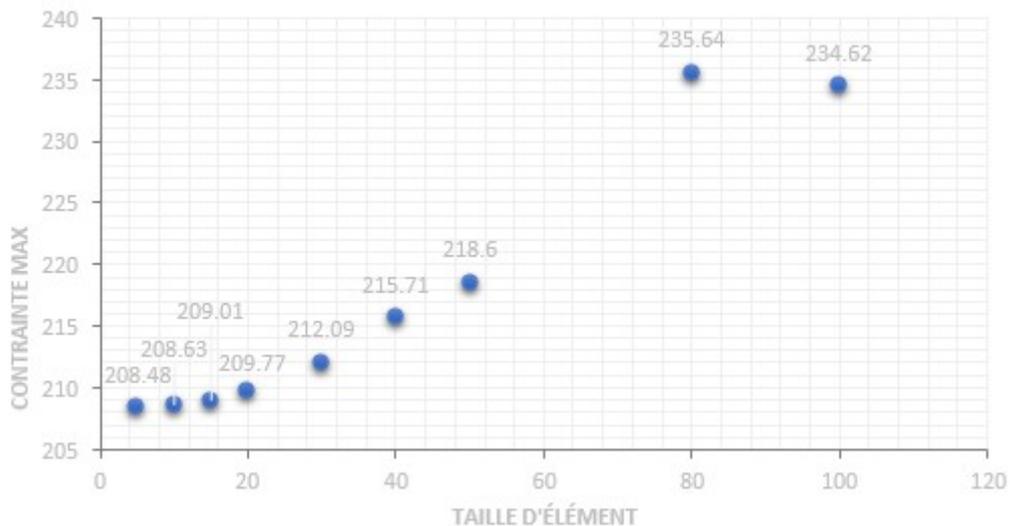


Figure (IV-12) : Courbe graphique représentant la contrainte maximale d'un même pipeline en fonction de la taille d'élément de maillage

On remarque que la contrainte maximale varie de « 234.62 Mpa » à « 208.48 Mpa » selon la taille d'élément alors que la pression interne est la même entre autres une différence de 26.14 Mpa requiert le choix d'une taille de 100 mm, et elle est avilissée vers les « 208 Mpa ». Avec un maillage composé de 720850 éléments de taille 5 mm.

Alors pour le critère de précision le choix de 5 mm est notre meilleure option mais le tableau

## CHAPITRE IV: Simulation numérique, résultats et discussions

### IV.4 suivants nous donnent plus de critères :

Taille d'élément (mm)	Contrainte maximale (Mpa)	Temps de calcul (m, s)	Nombre d'élément
100	234.62	3s	958
80	235.64	3s	1290
50	218.6	3s	3156
40	215.71	4s	4799
30	212.09	5s	8344
20	209.77	8s	18909
15	209.01	22s	33757
10	208.63	1m21s	78734
5	208.48	10m41s	720850

Tableau (IV-4) : Donnée de l'évolution de l'expérimentation avec la taille d'élément de maillages.

Nous constatons l'élément de taille 5 mm nous avons pour plus de 10 mn de calcul avec un nombre vertigineux soit plus de 700 000 nombres d'éléments ce qui peut nous engendrer des erreurs au future simulation plus complexe, et nous ajoutons qu'avec cette taille le logiciel ANSYS peut devenir pénible a manipulé en raison des gèle du programme et des fois des messages d'erreur causé par l'insuffisance de mémoire RAM.

On remarque 4 valeurs de contrainte très proche qui sont (208.48, 208.63, 209.01, 209.77) de (5, 10, 15, 20) taille de maillage respective. On compare entre la taille 20mm et 5mm:

Pour une différence de 1,29 Mpa on gagne 1 minute et 33 secondes. Donc le choix de 12 mm est très évident.

On compare entre la taille 20 mm et 15mm:

Elle a un temps de calcul plus rapide que la taille 15mm mais ne perd que moins de 1Mpa de précision, on gagne 275% de rapidité contre 0.35% de précision ce qui est très rentable. Tableau IV.4

## CHAPITRE IV: Simulation numérique, résultats et discussions

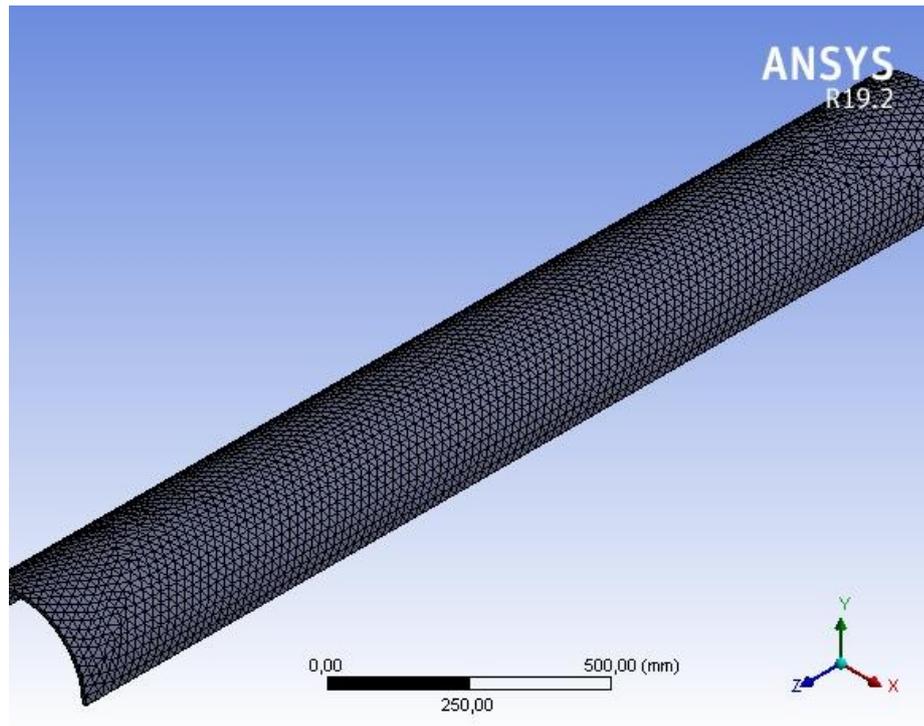


Figure (IV-13) : Modélisations du pipeline avec un maillage tétraèdre et de taille 20mm d'élément.

La Figure (IV-13) représente le maillage choisi il est notre meilleure option pour notre simulation.

### 5IV.3 Simulation numérique d'un pipeline saint:

On a un pipeline avec les caractères suivants :  $D_e=323.9\text{mm}$ ,  $t_n=9.5\text{mm}$ . Soumis à une pression interne de 12.2 Mpa.

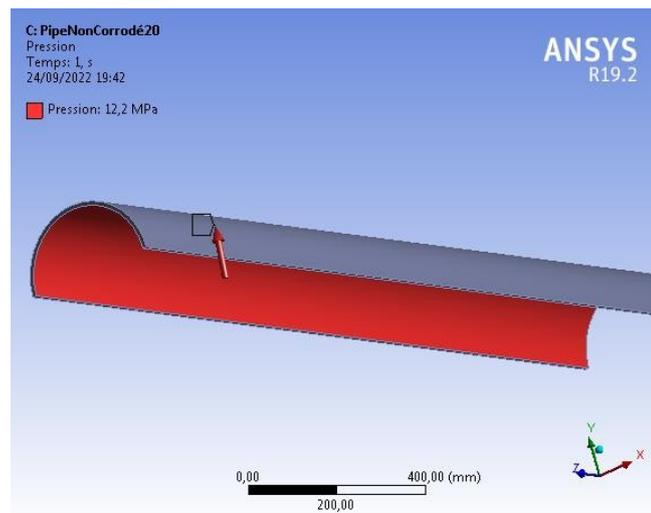


Figure (IV-14) : Attribution d'une pression de surface de 12.2Mpa On obtient la solution suivante des contraintes équivalentes vomisses

## CHAPITRE IV: Simulation numérique, résultats et discussions

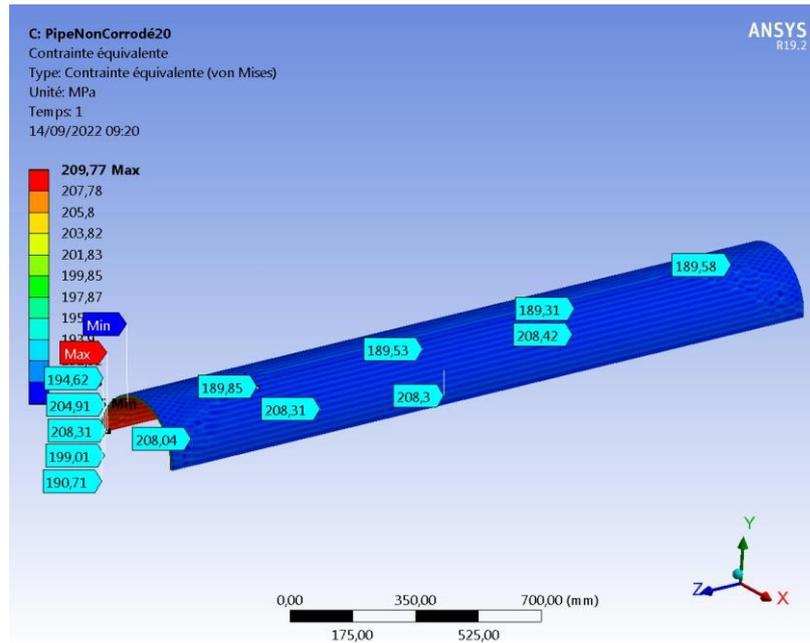


Figure (IV-15) : A perçu générale de la contrainte équivalentes vomisses sur le model.

La solution nous montre qu'on a une contrainte maximale de 209.77 Mpa et des contraintes d'environ entre 189,93Mpa et 187,59Mpa sure la paroi extérieure et sure la paroi intérieure on trouve des contrainte de 205Mpa a 209,77Mpa Figure (IV-16 et 17). La valeur de la limite élastique na pas n'été dépassé ni la pression admissible donc le pipeline.

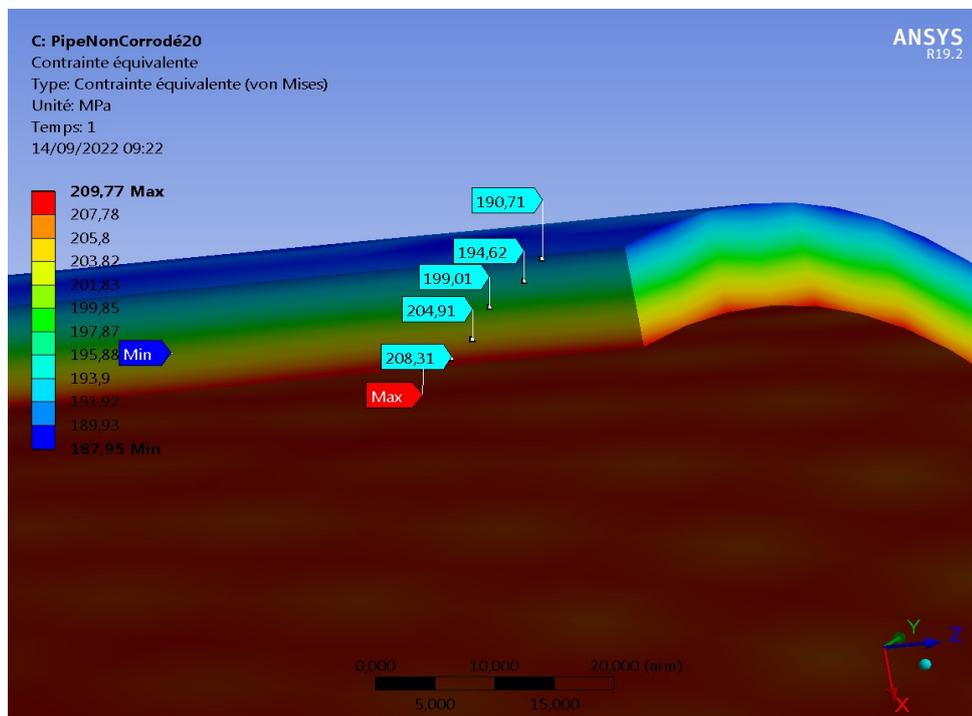


Figure (IV-16) : La distribution des contrainte vomisses sure l'épaisseur du pipeline.

**CHAPITRE IV: Simulation numérique, résultats et discussions**

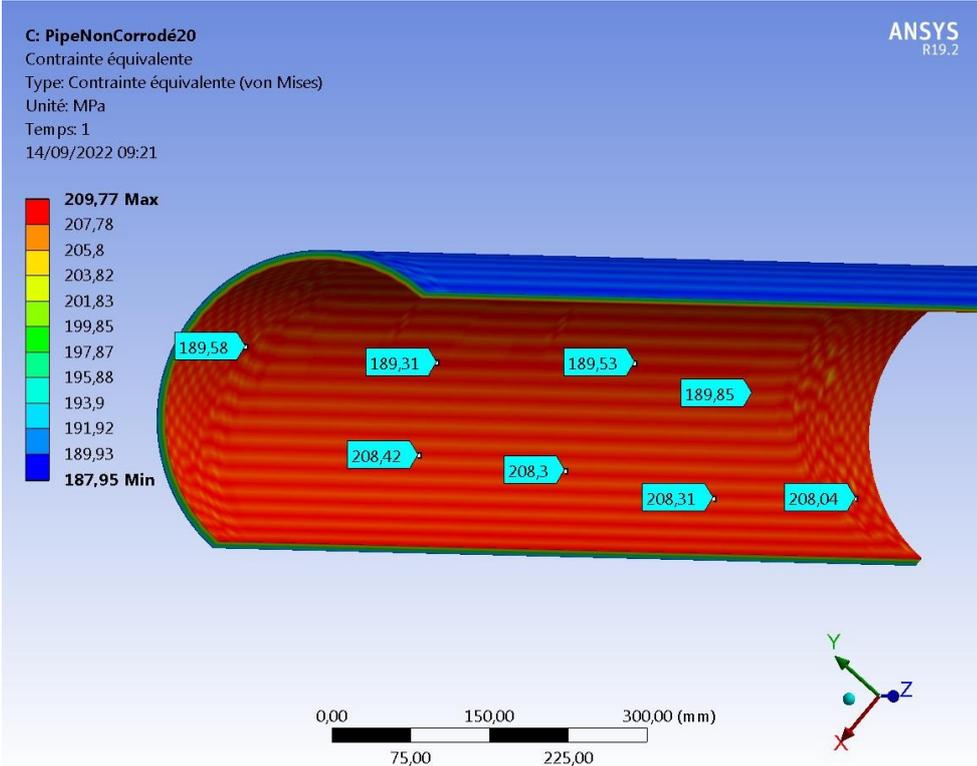


Figure (IV-17) : Aperçu des contraintes sure la partie intérieur du pipeline.

**6IV.3 Simulation numérique d'un pipeline corrodé:**

Les dimensions de la corrosion :  $l_p=220\text{mm}$  ;  $w_p=150\text{mm}$ ;  $d_{\text{max}}=4,75\text{mm}$ ;  $\alpha=0^\circ$ .

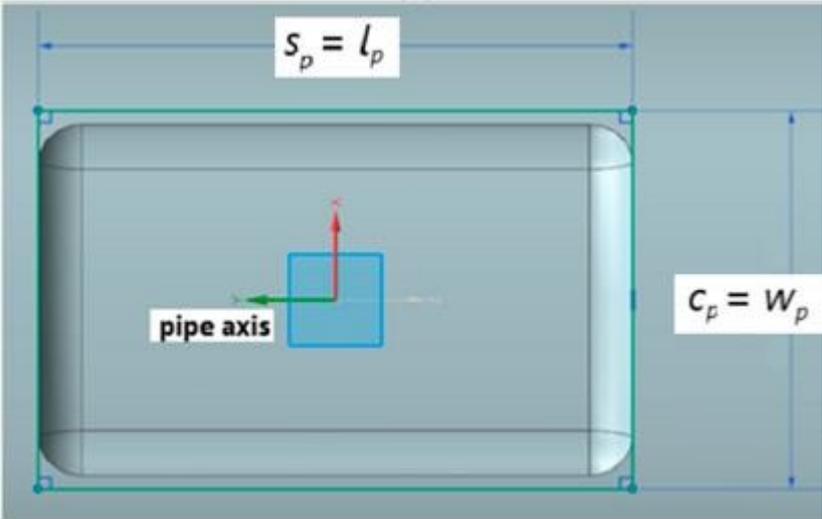


Figure (IV-18) : Démontions du default.

**CHAPITRE IV: Simulation numérique, résultats et discussions**

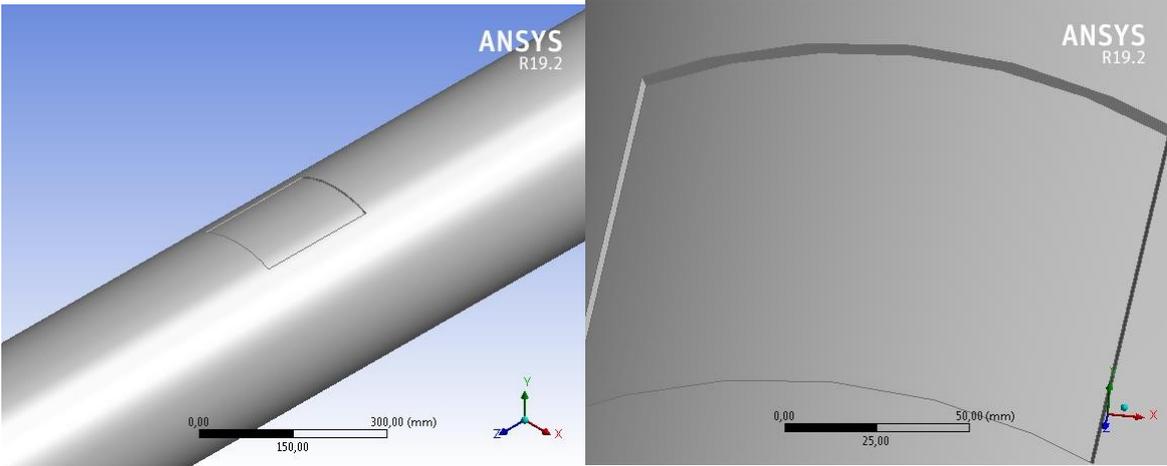
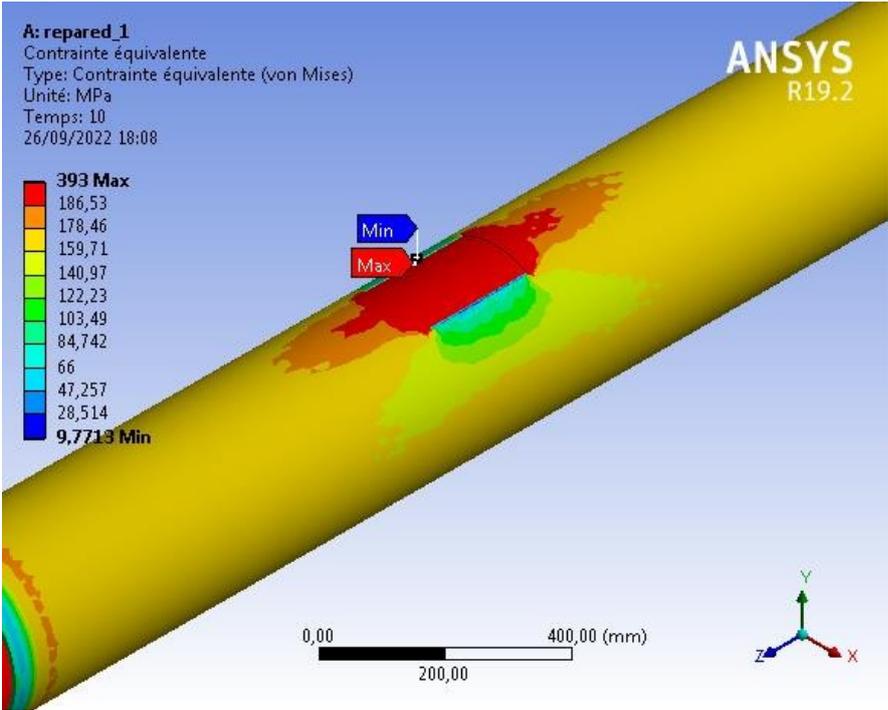


Figure (IV-19) : Pipeline acier X42corrodé.

Simulation du pipeline corrodé de  $D_{rd}=0.5$ :



## CHAPITRE IV: Simulation numérique, résultats et discussions

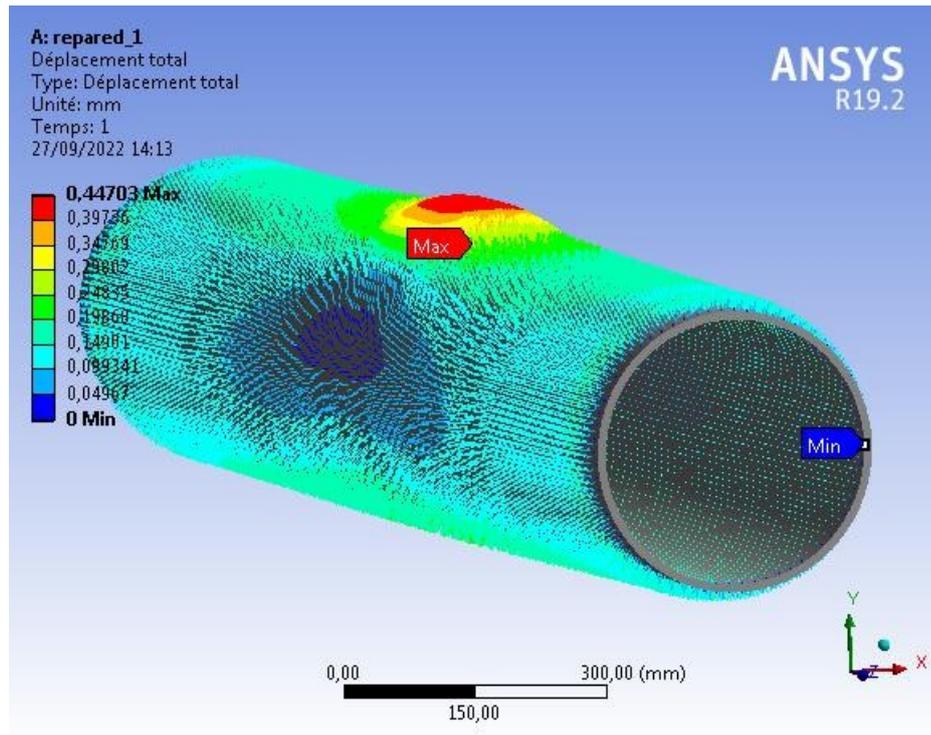


Figure (IV-20) : La déformation du pipeline en vecteur de déplacement des éléments.

On voit que dans la zone du défaut il y a un déplacement de 0.44mm des éléments en direction de l'axe des «Y» Figure IV.20. Et il en résulte des irrégularités de l'écoulement, qui peut provoquer des tourbillons internes et gêner le transfert du fluide. [43]

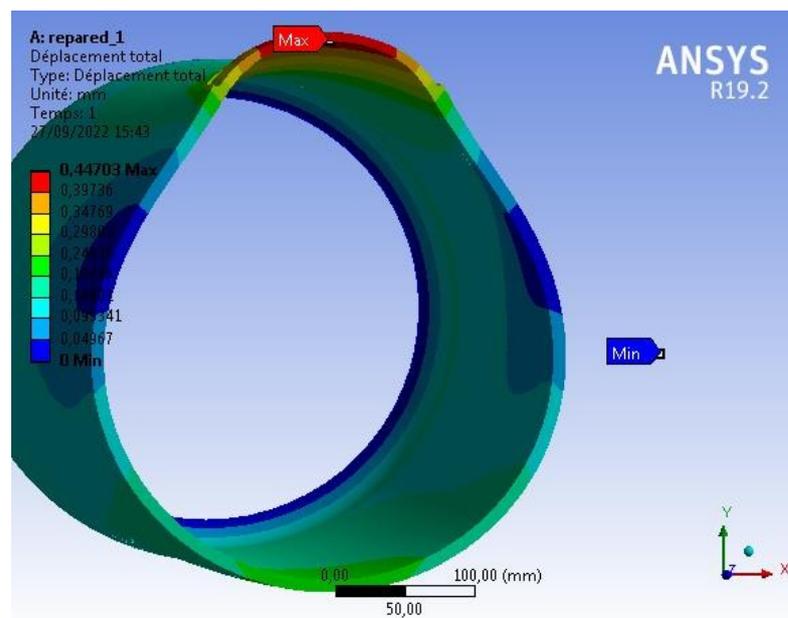


Figure (IV-21) : Déformations avec une échelle automatique et une coupe de section au milieu.

## CHAPITRE IV: Simulation numérique, résultats et discussions

### 7IV.3 Simulation numérique d'un pipeline corrodé réparé:

On va simuler une réparation par patch en composite et remplir le default par une résine (filler).

Type of Composite	III
Arming material	Glass fibers
Tensile modulus $E_{cc}$ , GPa	33.8 ... 34.5
Tensile modulus $E_{ac}$ , GPa	6.1 ... 11.1
Poisson's ratio $\mu_c$	0.22 ... 0.25
Shear modulus $G_c$ , GPa	3.1 ... 5.9
Tensile strength $R_{mcc}$ , MPa	630 ... 650
Elongation at break $A_{cc}$ , %	1.0 ... 1.2

Tableau (IV-5) : Propriété mécanique du composite. [40]

Résine	Valeurs
(Module de Young) $E_f$	30GPa
(Résistance à la Traction) $R_{mf}$	60 Mpa

Tableau (IV-6) : propriété mécanique de la résine. [40]

Modélisation de la résine et le patch en composite:

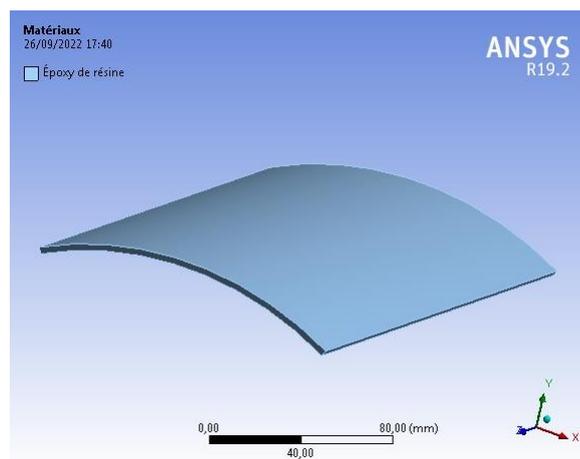


Figure (IV-22) : Model numérique de la résine.

## CHAPITRE IV: Simulation numérique, résultats et discussions

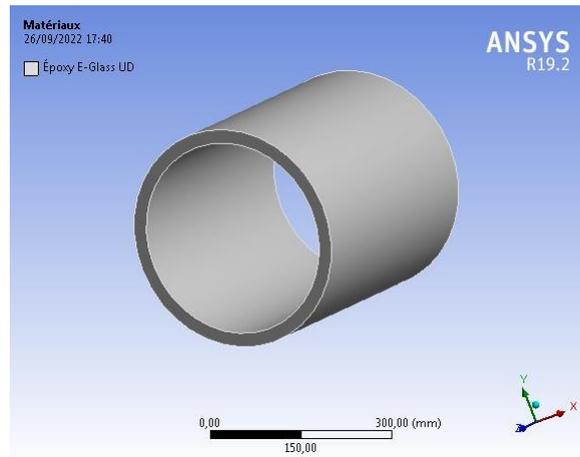


Figure (IV-23) : model numérique du patch composite.

Résultats de la simulation sous pression 12.2Mpa:

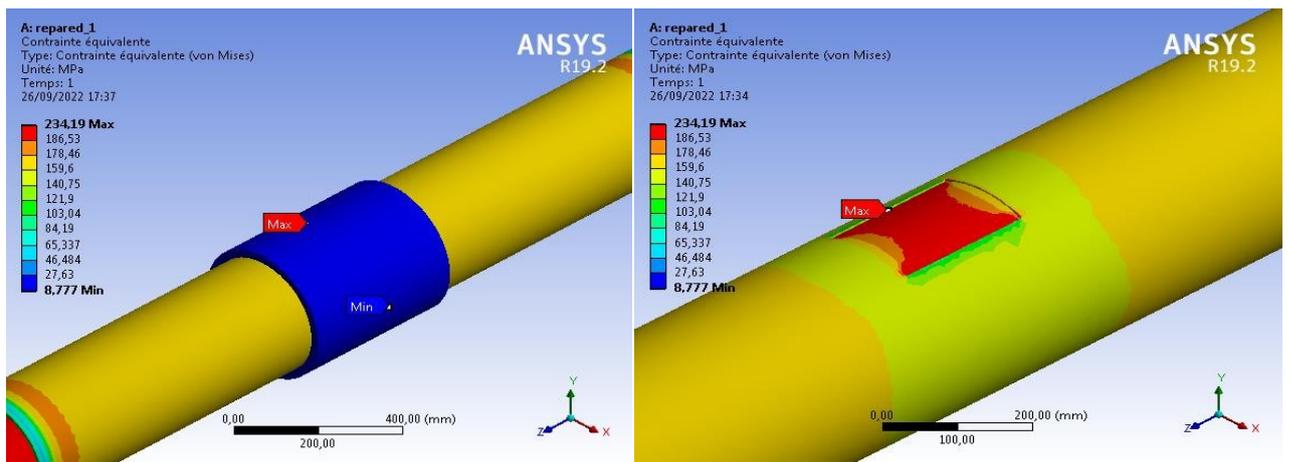


Figure (IV-24) : Distribution des contraintes vomisses sur le model réparé.

On observe que la contrainte maximale est de 234,19 Mpa soit inférieure à la limite élastique donc techniquement le pipeline est opérationnel.

Resultants Dumitrescu	241,54Mpa
Notre resultat	234,19Mpa
Pourcentage de Difference	3,04%

Tableau (IV-7) : Comparaisons des résultats.

**CHAPITRE IV: Simulation numérique, résultats et discussions**

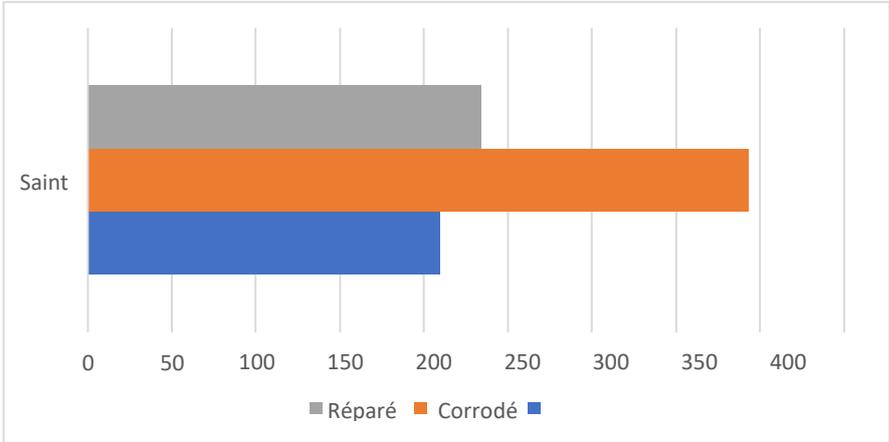


Figure (IV-25) : Contrainte dans chaque cas.

### **Conclusion générale :**

Le but de ce travail était de connaître la pression équivalente dans le site de corrosion avant et après réparation, et de connaître l'épaisseur appropriée du matériau composite utilisé dans la réparation des structures de canalisation. Nous avons effectué des simulations numériques d'un tube avec un défaut rectangulaire sans réparation, d'un tube avec un défaut rectangulaire avec réparation et d'un tube avec un défaut parabolique avec réparation. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux obtenus dans l'étude de Dimitriscu, nous avons obtenu les résultats suivants :

- La méthode de réparation vérifiée est utile, car elle permet des travaux de maintenance opérationnelle sans mettre le pipeline hors service.
- Les systèmes de réparation composites qui utilisent des matériaux avec de plus grandes valeurs de résistance à la traction et surtout le module de Young (qui ont des valeurs plus proches de celles de l'acier) sont plus efficaces pour restaurer la résistance mécanique d'une canalisation endommagée (corrodée). Il n'existe pas de méthode de conception largement acceptée pour déterminer l'épaisseur caractéristique d'une enveloppe composite tcw.
- Les résultats des analyses détaillées ont montré que la méthode la plus adaptée pour dimensionner l'épaisseur de la coque composite (donnant les résultats les plus proches de la simulation FEA) est celle proposée par les normes ASME et ISO.
- L'épaisseur appropriée de l'enveloppe composite est de 23 mm
- Rétablissement de la résistance mécanique du tube pour que la contrainte de von Mises diminue de 38% de sa valeur avant la réparation, pour qu'elle soit de 393 MPa avant la réparation, et après la réparation elle devienne 234,19 MPa

Nos résultats ont montré que le renforcement avec des matériaux composites permettait d'augmenter la résistance et la durée de vie des tubes corrodés. L'état de contrainte au voisinage du défaut d'usure est significativement réduit par l'utilisation du renfort composite, confirmant l'efficacité de la réparation composite pour restaurer la résistance mécanique du tube corrodé.

Sachant que le développement des méthodes de réparation des canalisations corrodées avec des composites permet de pallier bon nombre des problèmes rencontrés par les systèmes de tuyauterie à base d'acier, le matériau composite est léger, souple, rapide et facile à installer, nécessite peu d'entretien et a une durée de vie de jusqu'à 50 ans. En raison de ces caractéristiques, les véhicules devraient jouer un rôle important dans le transport du pétrole, de l'eau et du gaz, en particulier dans de mauvaises conditions d'exploitation et des conditions météorologiques extrêmes.

# **Références Bibliographiques**

### Références bibliographiques :

- [1] ACHOUR Aida, « Etude de la réparation des pipelines avec patch en composite », Thèse de doctorat LMD en génie civil, Faculté des Sciences et de la Technologie, 2016.
- [2] S. ABDESSALAM, L. CHAREF Eddine, « Analyse Numérique de Réparation des Organes de Production Pétrolière par Patch Composite », Thèse Université KASDI MERBAH OUARGLA 2020.
- [3] « Les pipelines, une longue histoire », (<http://gereports.fr/post/145262222559/les-pipelines-une-longue-histoire>) [archive], sur gereports.fr (consulté le 12 novembre 2018).
- [4] GHOMRIA, HASSAINE.A, « Etudes des effets de surcharge sur la propagation de fissure de fatigue », Thèse d'ingénieur en GM, Université ABBT 2010/2011.
- [5] MERCHERNENE ABDERRAHIM, « Etude du comportement en fatigue des aciers pour pipelines », mémoire de master, Université ABOU BELKAID- TLEMEN, octobre 2013.
- [6] BELLAHCENE TASSADIT, « Etude de la nocivité des défauts dans les canalisations sous environnement hydrogène », Thèse de doctorat de génie mécanique. Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou 2008.
- [7] Fateh AGGOUNE, «évaluation de l'endommagement des tubes dans leurs conditions d'exploitation », Thèse de Magister en Génie Mécanique option: « Mécanique Appliquée en Engineering » : 2010.
- [8] RAMDANI Mohammed, « Etude mécano fiabiliste sur le comportement en corrosion localisée des aciers API -5L- X60 pour pipeline : modèle basé sur la ténacité », Thèse de magister en génie mécanique option : science des matériaux. Université ABOU BEKR BELKAID Tlemcen 2008.
- [9] A.BOUZIANE, « Contribution à la détermination des critères des qualités des tubes soudés soumis à une pression intérieure », Thèse de Magistère en génie mécanique Université M'HAMED BOUGARA BOUMERDES. Année universitaire 2007/2008.
- [10] O. Volkersen, « Die niekraft in zugbeanspruchten mit konstanten laschenquerschritten », Luftfahrtforschung, 15:41-47, 1938.
- [11] BROUN'Guéssan Bahët Stanislas, « Etude du dimensionnement optimal d'un système de protection cathodique, alimenté par énergie solaire », Thèse diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Mécanique, option Transport et Distribution des Hydrocarbures Université M'Hamed BOUGARA de Boumerdès 2009.
- [12] Saïd Hariri, Mansour Afzali & Haïdar Jaffal, « NOCIVITE DES DEFAUTS ET PROPAGATION DE FISSURES DANS LES EQUIPEMENTS SOUS PRESSION », Ecole des Mines de Douai 2007.
- [13] MECHERNENE Abderrahim, « Etude du comportement en fatigue des aciers pour pipelines », Thèse Université université Abou bekr belkaid-Tlemcen- faculté de technologie département de génie mécanique 2013 .
- [14] Mustapha ALLOUTI, « Etude de la nocivité des défauts dans les canalisations de transport de gaz tels les éraflures, les enfoncements ou leurs combinaison », Thèse de doctorat de spécialité Sciences de l'ingénieur, option Mécanique des matériaux, Université Paul Verlaine de Metz, juillet 2010.

- [15] GT3 Composites et Matériaux avancés, Assemblages S. Drapier / C.H. Park – Pr., Mines Saint-Etienne / Douai Dir. Dépt Méca. & Procédés d'Elaboration directe Dir. Fédération de Recherche CNRS CIMReV Titulaire Chaire Hexcel pour la modélisation avancée des procédés par infusion.
- [16] Ahmed BENHAMOUDA, « étude du comportement des fissures dans les tubes sous pression interne », Thèse de magistère en génie mécanique option : Mécanique des surfaces et Matériaux. Université MENTOURI Constantine, 2010.
- [17] PRASSE .T .MICHEL F, MOOK. G, schulte. K, BAUHOFER. W, « A comparative investigation of electrical resistance acoustic emission during cyclic loading of CFRP laminates », Composites science and technology, 2000.
- [18] SOUTIS. C. SMITH. F. C, MATTHEWEUS. K. L, « predicting the compressive engineering performance of carbon fiber reinforced plastics composites. Composites part A: Applied science and manufacturing (Incorporating composites and composites manufacturing) », 1999, Vol 31, PP 531-536.
- [19] FEKIH, « Etude bibliographique sur les défaillances des structures de pipelines et réparation par renforcement par manchons composites », mémoire de Master en génie mécanique, Université de Annaba, 2013.
- [20] [http:// www.csiro.au/ Organisation- structure/ Divisions/ Earth- science- Ressource- Engineering/ PEPE ASSURE. Aspx.](http://www.csiro.au/Organisation-structure/Divisions/Earth-science-Ressource-Engineering/PEPEASSURE.aspx)
- [21] J. Vincent- GENOD, « Le transport des hydrocarbures liquides et gazeux par canalisation. Institut français du pétrole », Société des éditions techniques de Paris. (1989)
- [22] H. M Westergaard, « Bearing Pressures and Cracks », Journal of Applied Mechanics, 6, A 49-53, 1939.
- [23] Mattos Et Al, « Failure Analysis of Corroded Pipelines Reinforced With Composite Repair Systems », Engineering Failure Analysis 59 (2016) 223–236. 22 October 2015.
- [24] Mathieu Hautier, David Lévêque, Cédric Huchette, Philippe Olivier, « Réparation des composites par infiltration de résine », <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00389232>, 11 juin 2009.
- [25] Benziane Et Al, « Finite Element Analysis Of The Integrity Of An Api X65 Pipeline With A Longitudinal Crack Repaired With Single- And Double-Bonded Composites », Composites Part B 77 (2015) 431e439. 11 March 2015.
- [26] Aurélie Pilato, Nicolas Perry, Jean-Christophe Wahl, Christophe Bois, « Modèle de calcul analytique sur des réservoirs composite multicouche épais soumis à une pression interne et à des contraintes thermiques résiduelles », <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal00385379>, version 1 - 19 May 2009.
- [27] M. Mulle, F. Collombet, J. Fajoui, S. Freour, F. Jacquemin, « Etude numérique de la diffusion d'humidité dans les matériaux composites instrumentés par des fibres optiques à réseaux de Bragg », <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00597935>, 2 Juin 2011.
- [28] MackmillanPaim Et Al, « Analysis Of A Glass Fiber Reinforced Polythene Composite Repair System For Corroded Pipelines At Elevated Temperatures », International Symposium On Solid Mechanics Mecsol, 2013.

- [29] P. A. Zugliani, M. D. Banea, S. Budhe, R. J. Carbas, L. F. M. da Silva, N. R. F. Rohem & S. de Barros, « Bonded composite repair of metallic pipeline using energy release rate method », <https://doi.org/10.1080/01694243.2019.1632537>.
- [30] <https://doi.org/10.1515/corrrev-2018-0102> Received November 27, 2018; accepted August 23, 2019; previously published online September 20, 2019.
- [31] H. Fang, K. Yang, Bin Li, P. Tan, F. Wang, X. Du, « Experimental and Numerical Study on Mechanical Analysis of Buried Corroded Concrete Pipes under Static Traffic Loads », Article : 23 October 2019; Accepted: 16 November 2019; Published: 20 November 2019 [33] Dumitrescu, A.; Minescu, M.; Dinita, A.; Lambrescu, I, « Corrosion Repair of Pipelines Using Modern Composite Materials Systems: A Numerical Performance Evaluation », *Energies* 2021, 14,615. <https://doi.org/10.3390/en14030615>.
- [34] CERTIFICATE ASME B31G: Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines, By Authority OF THE UNITED STATES OF AMERICA. Legally Binding Document. CFR Section 49 CFR 192.485, 1991.
- [35] P. Hopkins, « The structural integrity of oil and gas transmission pipelines », Penspen Ltd.UK, Elsevier Publishers, 2002.
- [36] J.F. Kiefner, P.H. Vieth, « Evaluating pipe 1: new method corrects criterion for evaluating corroded pipe », *Oil & Gas Journal*, 88(32), 56-59, 1990.
- [37] J.F. Kiefner, P.H. Vieth, « Evaluating pipe conclusion: PC program speeds new criterion for evaluating corroded pipe », *Oil & Gas Journal*, 88(34), 91-93, 1990.
- [38] T.A. Netto, U.S. Ferraz, S.F. Estefen, « The effect of corrosion defects on the burst pressure of pipelines », *Journal of Constructional Steel Research*, 61, 1185-1204, 2008.
- [39] DNV. RP-F101 Corroded Pipelines. Recommended Practice; Det Norske Veritas A.S.: Hovik, Norway, 2015.
- [40] Dumitrescu, A.; Dinit, ă, A, « Efficiency Assessment of the Composite Material Repair Systems Intended for Corrosion Damaged Pipelines. In Proceedings of the 38th International Conference on Ocean », *Offshore & Arctic Engineering (OMAE 2019)*, Glasgow, Scotland, UK, 9–14 June 2019. Paper No. 96279.
- [41] Zecheru, G.; Drăghici, G.; Dumitrescu, A.; Yukhymets, P, « Design of Composite Material Reinforcing Sleeves Used to Repair Transmission Pipelines », *PGUP Bull. Tech. Ser.* 2014, LXVI, 105–117.
- [42] Zecheru, G.; Dumitrescu, A.; Dinit, ă, A.; Yukhymets, P, « Design of Composite Repair Systems. In *Non-destructive Testing and Repair of Pipelines* », Baranov, E.N., Dumitrescu, A., Parinov, I.A., Eds.; Springer International Publishing AG: Cham, Switzerland, 2018; pp. 269–285.
- [43] José VAZQUEZ, « Systèmes Hydrauliques Urbains – ENGEES », *HYDRAULIQUE A SURFACE LIBRE*.