



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد

Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي

Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Électromécanique

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière :

Spécialité : Maintenance-Fiabilité-Qualité

Thème

**Simulation numérique du comportement
mécanique d'un pipeline en acier réparé par
matériaux composite**

Présenté et soutenu publiquement par :

Nom : Raik

Prénom : Mohamed El amine El mokhtar

Nom : Djadouni

Prénom : Mohamed Riad

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
MEGHDIR Abed		UNIV.D'ORAN 2	Président
BOUHAFS Mohammed	MCA	UNIV.D'ORAN 2	ENCADRANT
CHARAF Djillali		UNIV.D'ORAN 2	examinateur

JUIN 2024

REMERCIEMENTS

**JE REMERCIE EN PREMIER LIEU LE BON DIEU DE M'AVOIR DONNÉ LE COURAGE
D'ALLER AU BOUT DE MON OBJECTIF.**

**JE TIENS À EXPRIMER MA PROFONDE GRATITUDE À MES PARENTS ET TOUTE
MA FAMILLE, QUI GRÂCE À LEURS AIDES, MON TRAVAIL A VU LE JOUR.**

**JE REMERCIE PROFONDÉMENT MON ENCADRANT MR.BOUHAFS
D'AVOIR ACCEPTÉ DE DIRIGER MON TRAVAIL, PAR SON SOUTIEN ET SES
CONSEILS PERTINENTS QUI M'ONT PERMIS DE TRAVAILLER TRANQUILLEMENT.
JE REMERCIE LES MEMBRES DU JURY QUI ME FONT L'HONNEUR D'EXAMINER
TRAVAIL.**

JE REMERCIE MES CAMARADES DE PROMOTION POUR LEUR SOUTIEN.

MES SINCÈRES REMERCIEMENTS VONT À TOUS MES ENSEIGNANTS.

**MES REMERCIEMENTS VONT ÉGALEMENT À TOUS CEUX ET CELLES QUI DE,
PRÈS OU DE LOIN, MON PORTÉ AIDE ET ENCOURAGEMENT.**

DÉDICACE

JE DÉDIE CE TRAVAIL

**À CELLE QUI M'A DONNÉ LA VIE, LE SYMBOLE DE TENDRESSE, QUI S'EST
SACRIFIÉE POUR MON BONHEUR ET MA RÉUSSITE, À MA MÈRE ...
À MON PÈRE, ÉCOLE DE MON ENFANCE, QUI A ÉTÉ MON OMBRE DURANT
TOUTES LES ANNÉES DES ÉTUDES, ET QUI A VEILLÉ TOUT AU LONG DE MA
VIE À M'ENCOURAGER, À ME DONNER L'AIDE ET À ME PROTÉGER. QUE DIEU
LES GARDES ET LES PROTÈGES.**

À MES FRÈRES ET SŒURS ET LEURS FAMILLES.

À MON GRAND-PÈRE, ET MES DEUX GRAND-MÈRES

À MES ONCLES, MES TANTES À QUI JE DOIS BEAUCOUP DE RESPECT.

**À MES AMIS SNOUCI ET ABDELNOUR ET ABDELDJALIL ET AMINE ET BRAHIM
ET AZIZ .**

À TOUS CEUX QUI M'AIMENT.

À TOUS CEUX QUE J'AIME

À VOUS ...

Sommaire

Remercement.....	
Dédicaces.....	
Liste des figures	
Liste des tableaux.....	
Introduction générale	

Chapitre I :Généralité sur les pipelines

I-Introduction	6
I .1.Définition	6
I-2 Type des pipelines	7
I-3Domaine d'utilisation	8
I-4 Caractéristiques d'un pipeline	8
I-5Caractéristique des tubes	8
I-6 Procédé de fabrication des tubes de pipelines	9
I .6.1. Les tubes soudés sous forme spirale	9
I .6.2Les tubes soudés sous forme longitudinale	10
I .6.3Les tubes sans soudure	12
I-7 Défaillances et dégradation des pipelines	13
I-7-1Dommage mécanique	14
I-7-2Corrosion externe	14
I-7-3Corrosion interne	14
I-7-4Décollement de l'enrobage	14
I-7-5Dégradation diverses	14
I-8Techniques de détection des défauts dans les pipelines	14
Conclusion	15

Chapitre II : Les matériaux composites

II-Introduction	17
II-1 Définition	17
II-2 Constituants des matériaux composites	17
II-2-1Le renfort	17
II-2-1-1Renfort en fibres discontinues	18
II-2-1-2 Renfort continu	18
II-2-2 Matrice	19
II-3 Les types des matériaux composite	19

II-3-1/Composites à Matrice Organique (CMO)	19
II-3-2/Composites à Matrice Céramique (CMC).....	19
II-3-3/Composites à Matrice Métallique (CMM)	19
II-4-Les avantages d'un matériaux composite.....	20
II-4-1Avantages structurels des matériaux composites	20
II-4-2Légèreté et flexibilité	20
II-4-3Radiodensité	20
II-4-4Résistance et durabilité	20
II-4-5Résistance chimique	20
II-4-6Résistance aux chocs	20
II-4-7Avantages fonctionnels	20
II-4-7-1Conception à la carte	20
II-4-8Écologique	21
II-4-9Avantages économiques	21
II-5Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types	21
II-5-1Monocouches	21
II-5-2Stratifiés	22
II-5-3Sandwichs	22
II-6-Les applications du matériaux composite	22
II-6-1Aérospatiale	22
II-6-2Architecture	23
II-6-3Automobile	23
II-6-4Production d'énergie	23
II-6-5Infrastructure	24
II-6-6Marine	24
II-6-7Équipements industriels	24
II-6-8Médecine et prothèses	24
II-7-Méthodes de réparation des pipelines	24
II-7-1 Réparation des pipelines par patch en composite	24
II-7-2 Réparation par collage	24
II-7-3 Système de réparation par renforcement des fibres composites	25
II-7-4 Système de réparation par matériaux composites flexible	25
II-7-5Système de réparation par matériaux composites pré –durci	26
Conclusion	27
Chapitre III :Recherche bibliographique et calcul mathématique	
III-1 INTRODUCTION	29
III-2 Recherche bibliographique	29

III-3 Étude analytique de la variation des rapports des contraintes en fonction de la pression interne	36
III-3-2 La contrainte de Von Mises	
.....	36
III-4 L'ASME B31G	36
III-5 Conclusion	39
Chapitre IV :Simulation numérique et discussion des résultats	
IV-1 Introduction	40
IV-2 ANSYS Workbench	40
IV-3 Le Maillage	40
IV-4 Modèle géométrique d'un pipe sans défaut.....	43
IV-5 1 Représentation de la géométrie du défaut.....	44
IV-6 Modélisation numérique d'une pipe comportant un défaut réparée par matériaux composite.....	45
IV-7 Discussion et validation des résultats.....	46
IV-7-1 l'influence de pression.....	46
IV-7-2 L'effet de profondeur du défaut	52
IV-7-3 Optimisation de l'épaisseur de la réparation.....	54
IV-7-4 Effet du choix de matériaux de réparation	55
IV-16 conclusion.....	59
Conclusion Générale.....	

Liste des figures et tableaux

Liste des figures :

Chapitre 1 :

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] : répartition en pourcentage de la dégradation des pipelines

Figure[I-12]: Outil intelligent d'inspection

Chapitre 2 :

Figure[II-1] : Composants du matériaux composite

Figure[II-2] : Organigramme présente Différents familles de renfort.

Figure[II-3] : Différentes formes de renforts continus.

Figure[II-4] : Classification des matrices.

Figure[II-5] : composite Monocouches.

Figure[II-6] : composite stratifié.

Figure[II-7] : Composite sandwichs.

Figure[II-8] : L'utilisation de matériaux composite dans l'avion

Figure[II-9] : L'utilisation de matériaux composite dans la voiture

Figure[II-10] : Réparation par composites d'une pipe en acier

Figure[II-11] : Emballage de composite flexible pour la réparation sous – marine

Figure[II-12] : réparation par renforcement composite type clockspring

Chapitre 03 :

Figure[III-1] : Variation de P_f en fonction de la pression de service P_0

Figure [III-2] : Effet du module de remplissage sur (a) la contrainte de von Mises dans le tuyau et (b) la contrainte circulaire dans le CFRP.

Figure [III-3] : ($P_{theoretical}/P_{experimental}$) per test using proposed methodology with and without account axial stress

Figure [III-4] : Contrainte maximale de Mises de trois tuyaux sous différentes pressions interne

Figure[III-5] : (P theoretical /P experimental) per test with conservative and non-conservative burst pressure using selected semi-empirical mode

Figure[III-6] : Time dependence of corrosion potential of X100 steel under various pre-strains in NS4 solution

Figure[III-7] : Effect of defect width on the burst strength-axial load interaction ($1/\sqrt{Dt} = 2.23$, $d/t = 0.2$).

Figure [III-8] : Comparison of pressure bearing before and after the repair of the defective pipeline.

Figure[III-9] : Maximum principal stress evolution with sleeve number

Figure[III-10] : charge-déformation d'un pipe sain, corrodé et corrodé réparé avec différentes orientation des fibres

Figure[III-11] : Effet de la corrosion sur la fiabilité du pipeline.

Figure[III-12] : Défaut de corrosion court projeté selon une forme parabolique.

Figure[III-13] : Défaut de corrosion long projeté selon une forme rectangulaire

Figure[III-14] : Face longitudinale imaginaire d'un défaut de corrosion.

Figure [III-15] : Surface corrodée parabolique supposé pour le défaut relativement court de corrosion (selon ASME B31G).

Figure[III-16] : Secteur rectangulaire supposé corroder pour un plus long défaut de corrosion (selon ASME B31G /34/).

Chapitre 4 :

Figure[IV-1] : Maillage hexadérique

Figure[IV-2] : Maillage tétraédrique

Figure[IV-3] : Le modèle géométrique de pipe

Figure[IV-4] : maillage Hexadérique sur pipe sein

Figure [IV-5] : courbe graphique représentant la contrainte équivalente d'un pipeline en fonction de la taille d'éléments de maillage

Figure[IV-6] : Dimension du défaut pipe corrodé (avec défaut)

Figure [IV-7] : pipe corrodé (avec défaut)

Maillage d'une pipe avec défaut

Figure [IV-8] : Maillage d'une pipe avec défaut

Figure[IV-9] : Modèle géométrique d'un pipe réparée par matériaux composites

Figure[IV-10] : Contrainte équivalente d'un pipe sain sous une pression interne de 20MPa

Figure [IV-11] : Contrainte équivalent d'un pipe sain sous une pression interne de 32,61MPa.

Figure [IV-12] : Contrainte équivalente d'un pipe corrodé sous une pression interne de 40MPa

Figure [IV-13] : Contrainte équivalente d'un pipe corrodé sous une pression interne de 5 MPa

Figure[IV-14] : Contrainte équivalente d'un pipe corrodé sous une pression interne de 6,69MPa

Figure[IV-15] : Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous pression interne de 32,61Mpa

Figure[IV-16] : Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous pression interne de 20MPa

Figure [IV-17] : Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous pression interne de 32,61Mpa

Figure[IV-18] : Contrainte équivalente en fonction de pression interne de 40Mpa

Figure[IV-19] : Contrainte équivalente en fonction de pression interne

Figure[IV-20] : Contrainte équivalente d'un pipe sous une pression interne de 32,61MPa et profondeur de défaut 5,65mm.

Figure[IV-21] : Contrainte équivalente d'un pipe sous une pression interne de 32,61MPa et profondeur de défaut 7mm.

Figure[IV-22] : Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression de 32,61MPa et l'épaisseur du composite 8,4mm

Figure[IV-23] : Contrainte équivalente en fonction de L'épaisseur du matériaux composite

Figure [IV-24] : Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 20MPa

Figure [IV-25] : Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 32,61MPa

Figure[IV-26] : Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 40MPa

Figure[IV-27] : Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 20MPa

Figure[IV-28] : Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 32,61MPa

Figure [IV-29] : Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 40MPa

Figure [IV-30] : contrainte équivalente en fonction de pression interne

Liste des tableaux :

Tableau [IV-1] Géométrie des pipelines

Tableau [IV-2] Propriété mécanique de l'acier API-5L X56

Tableaux [IV-3] Résultats obtenue pour chaque taille d'éléments.

Tableau [IV-4] Caractéristiques mécaniques des fibres de verre

Tableau [IV-5] Comparaison de résultat des deux méthodes du pipe sein

Tableau [IV-6] Comparaison de résultat des deux méthodes du pipe corrodé

Tableau [IV-7] Comparaison des résultats de notre travail entre pipe sein et corrodé

Tableau [IV-8] Résultat obtenue pour chaque épaisseur

Tableau [IV-9] : comparaison

Introduction Générale:

Introduction générale :

Un pipeline est un ouvrage destiné à transporter, sous pression et sur de grandes distances, des matières fluides (liquides, gaz, mélanges poly phasiques). C'est un système industriel constitué de tubes et souvent organisés en réseau. Avec le temps les pipelines subissent une dégradation des caractéristiques mécaniques et chimiques. À cause du contact avec l'environnement soit l'eau ou la terre les pipelines seront endommagés et corrodés. Durant des nombreuses années les seules solutions pour les pipelines endommagés étaient de les remplacer avec d'autres ou de leur souder une nouvelle section mais ce n'était pas pratique car cette solution impose généralement des arrêts de production ou des défauts métallurgiques causés par la soudure. Afin d'éviter c'est des solutions pour des raisons économiques et techniques. Une alternative a été proposée pour l'utilisation de matériaux composites pour renforcer ou réparer des structures métalliques, le matériau composite ayant une matrice polymère liée extérieurement à une structure défectueuse ou dégradée. Les matériaux composites, en particulier ceux à base de fibre de carbone ou de verre, ont suscité un grand intérêt pour la restauration en raison de leur rigidité spécifique. De plus, malgré leur prix élevé, ils présentent des avantages économiques car ils peuvent être utilisés directement dans les structures en cours de fonctionnement. Cela réduit considérablement les coûts de maintenance. La structure métallique est entourée d'une coque en matériaux composites en fibres de verre, de carbone ou d'aramide. Ces enveloppes appliquées à la structure peuvent améliorer l'étanchéité à l'air, la ductilité et la résistance du métal. Différents matériaux composites peuvent fournir différents modules d'élasticité et de rigidité, ce qui peut modifier le comportement axial et radial des métaux restreints.

Dans ce projet, nous intéressons à l'étude du 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.

La mémoire sera présentée en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre on parlera des pipelines et leur importance économique dans le domaine du transport des hydrocarbures ensuite la méthode de fabrication des tubes en fin on cite les différentes caractéristiques mécaniques et chimiques de ce pipeline et les causes principales de leur dégradation .

Le deuxième chapitre présente une recherche sur les matériaux composites ou on parle sur leur composition son rôle principal et ces différents avantages afin de citer les différentes méthodes de la réparation de pipeline qui utilisent les matériaux composites.

Le troisième chapitre inclut 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 .

Dans le quatrième chapitre , nous utilisons 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 matériau composite et fait une discussion des résultats obtenus par la modélisation numérique. Et en termine notre mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I :

Généralité sur les pipelines

CHAPITRE I : Généralité sur les pipelines

Introduction

Les premières formes de pipelines ont été utilisées par les civilisations anciennes, bien que ces premiers systèmes étaient beaucoup plus rudimentaires que ceux que nous utilisons aujourd'hui. Par exemple, les anciens Égyptiens utilisaient des canaux en argile pour transporter l'eau des rivières vers les champs pour l'irrigation. Les Romains ont également construit des systèmes de canalisations sophistiqués, appelés "aqueducs", pour transporter l'eau sur de longues distances vers les villes et les zones urbaines.

Cependant, le développement des pipelines modernes tels que nous les connaissons aujourd'hui a vraiment pris de l'ampleur à partir du 19^e siècle avec l'avènement de la révolution industrielle. Le premier concept de pipeline aurait été formulé par le Russe Dimitri Mendeleïev en 1863. Il suggéra d'utiliser des tubes pour transporter du pétrole. Un autre Russe, Vladimir Choukhov aurait construit l'un des premiers oléoducs à la fin du XIX^e siècle, en 1878-1880 près de Bakou .

depuis lors, l'utilisation et le développement des pipelines ont considérablement progressé, avec des améliorations continues dans la conception, les matériaux et les techniques de construction. Aujourd'hui, les pipelines sont devenus un élément essentiel de l'infrastructure mondiale pour le transport de liquides et de gaz sur de longues distances. [1]

I-1 Définition d'un pipeline :

Un pipeline est souvent utilisé pour désigner un système de transport de fluides ou de matières à travers une série d'étapes ou de processus.

Plus spécifiquement, un pipeline peut être défini comme une infrastructure composée de tuyaux, de pompes, de vannes et d'autres équipements nécessaires pour transporter des liquides ou des gaz sur de longues distances, souvent entre des installations de production et de consommation, telles que des raffineries, des usines chimiques, des terminaux de stockage, des centres de distribution, etc . Les pipelines sont couramment utilisés dans l'industrie pétrolière et gazière pour transporter le pétrole brut, le gaz naturel et d'autres produits pétroliers sur de longues distances, souvent à travers différents pays ou régions. Ils offrent un moyen efficace, économique et sécurisé de transporter ces produits sur de grandes distances.

CHAPITRE I : Généralité sur les pipelines



Figure [I-1] : pipeline dans l'environnement

I-2 Type des pipelines :

Dans le secteur de l'énergie, il existe deux grands types de pipelines : les pipelines de liquides et les gazoducs. Les pipelines de liquides transportent du pétrole brut ou du gaz naturel sous forme de liquide vers les raffineries, où ils sont soumis à la distillation et à d'autres processus de production. Certains pipelines de liquides sont également utilisés pour transporter des produits pétroliers distillés, tels que l'essence, vers des centres de distribution.

Les gazoducs sont utilisés uniquement pour le transport du gaz naturel vers des usines de traitement et pour la distribution. Le gaz naturel est aussi souvent acheminé directement aux foyers par le biais de pipelines.

En plus de ces deux principaux types de pipelines, il en existe également quatre autres sous-catégories :[2]

Pipelines de collecte : Ces lignes servent à transporter du gaz naturel, du pétrole brut et des liquides de gaz naturel sur de courtes distances. Elles existent principalement pour collecter des produits depuis les puits et les déplacer pour le traitement.

Pipelines d'alimentation : Les lignes d'alimentation transportent du pétrole brut, du gaz naturel et des liquides de gaz naturel des réservoirs de stockage et des installations de traitement vers les pipelines de transport.

Pipelines de transport : leur diamètre peut varier de 10 centimètres à plus d'un mètre. Ils transportent du gaz naturel, des liquides de gaz naturel, du pétrole brut et des produits raffinés (selon qu'il s'agit de pipelines de liquides ou de gazoducs). Ces pipelines transportent des produits pétroliers sur de longues distances, y compris au-delà des frontières internationales.

Pipelines de distribution : Ils ont un diamètre de 1 à 15 centimètres et sont utilisés pour distribuer du gaz naturel aux foyers et aux entreprises.

CHAPITRE I : Généralité sur les pipelines

I-3 Domaine d'utilisation :

Le type et le nom d'une canalisation dépendent des caractéristiques physiques et des conditions d'acheminement du produit à déplacer : [3]

Pour le gaz naturel, on parle de gazoduc.

Pour le pétrole, on parle d'oléoduc.

Pour l'eau industrielle, il s'agit de conduite ou d'émissaire Le terme d'aqueduc est plutôt réservé aux ouvrages maçonnés, avec écoulement libre de l'eau.

Pour l'eau salée, on utilise le terme de samuduc.

Pour l'oxygène on utilise le terme d'oxygénéoduc ou d'oxyduc.

Pour l'hydrogène on utilise le terme d'hydrogénéoduc.

I-4 Caractéristiques d'un pipeline :

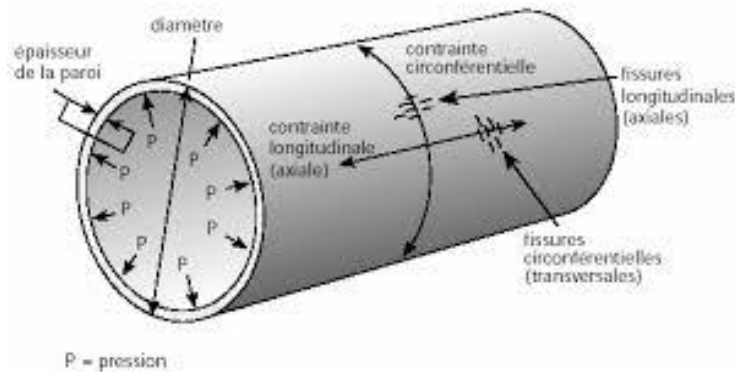
On désigne par < pipelines >, les oléoducs ou gazoducs qui sont des canalisations de diamètres pouvant aller de 1 à 42 pouces. Celles-ci sont le plus souvent en acier, Constituées d'éléments linéaires soudés aux extrémités et revêtus. dans les quelles transitent sous des pressions relativement élevées, 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].

I-5 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 [5]. 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.

CHAPITRE I : Généralité sur les pipelines



Figure[I-2] : caractéristique dimensionnelles et les Contraintes s'exerçant sur un pipeline

I-6 Procédé de fabrication des tubes de pipelines :

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

- 1- Les tubes soudés sous la forme en spirale
- 2- Les tubes soudés sous forme longitudinale
- 3- Les tubes formés sans soudure [4]

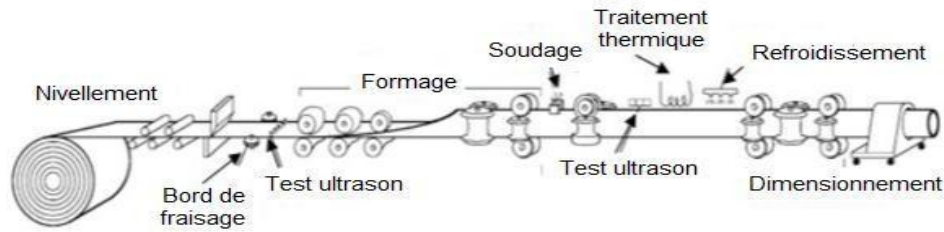
I-6-1 Les tubes soudés sous la forme en spirale :

La fabrication des tubes soudés en spirale est réalisée en continu sur des machines à souder. Après déroulement de la bobine en bande par un train d'entraînement, la tôle est poussée dans la cage de formage où elle subit une déformation de cintrage sous l'action d'un vérin. L'obtention du formage en spirale est réalisée par l'inclinaison d'un angle α entre l'axe initial de la bande et l'axe de sortie du tube .

L'enroulement des tubes en spirale permet d'obtenir des tubes calibrés sans avoir besoin de recourir à des étapes de fabrication supplémentaires telles que l'expansion ou le calibrage. De ce fait, le tube précontraint lors de la phase de pliage le reste par la suite.

Pour des épaisseurs de paroi au-dessus de 20 mm, on utilise habituellement des tôles fortes. Ce procédé permet une exploitation économique optimale de la largeur de bande disponible, par le rapport largeur de bande-diamètre.

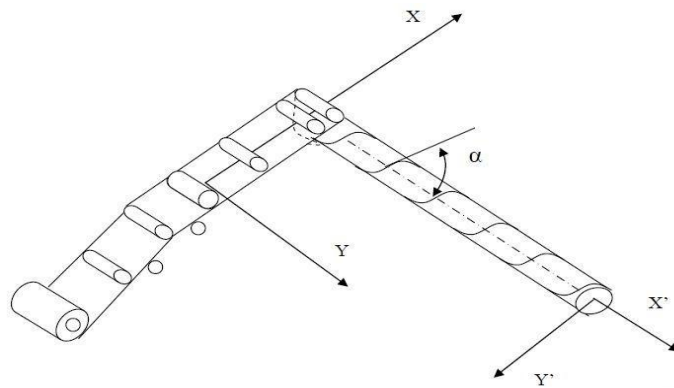
CHAPITRE I : Généralité sur les pipelines



Figure[I-3] : Technique de fabrication des tubes soudés en spirale

Le processus de formage ou de cintrage du tube est conditionné par l'angle

d'introduction de la bande selon la relation : $\sin \alpha = \frac{B}{D \cdot \pi}$



Figure[I-4] : L'angle d'introduction de la bande

I-6-2 Tubes soudés sous forme longitudinale :

La technologie de fabrication des tubes soudés longitudinaux est généralement le formage à froid à partir d'une tôle par le procédé "UOE", particulièrement adapté aux tubes d'un diamètre supérieur à 406,4 mm. La technique comprend trois étapes de formage :

I-6-2-1 Croquage et formage :

Cette étape où la plaque va être pliée aux niveaux de l'extrémité, l'objectif de cette opération est de faciliter le processus de pliage par les étapes suivantes, à partir de 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".

CHAPITRE I : Généralité sur les pipelines

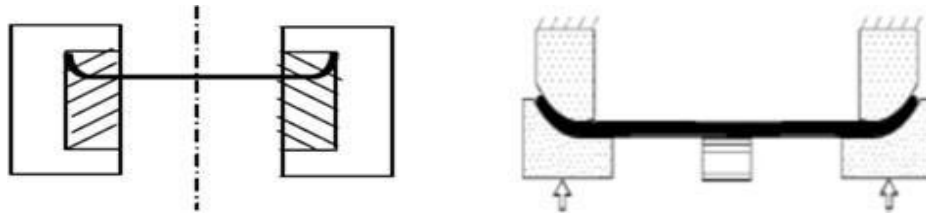


Figure [I-5] : Croquage

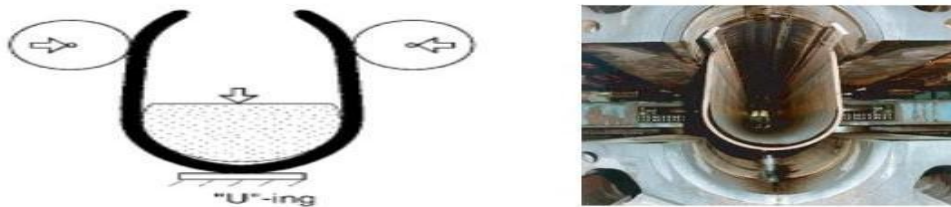


Figure [I-6] : Formage sous forme "U"

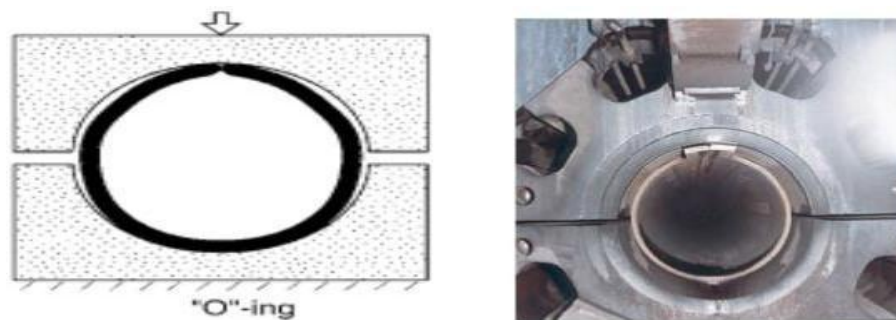


Figure [I-7] : Formage sous forme "O"

I-6-2-2 Soudage :

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

CHAPITRE I : Généralité sur les pipelines



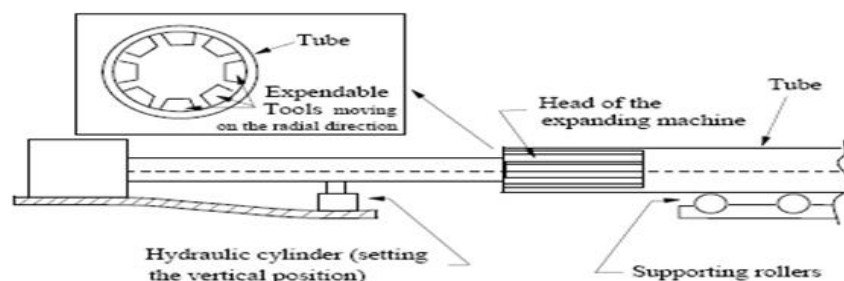
Figure[I-8] : Soudage manuelle et automatique des tubes

Il existe trois grandes familles de tubes soudés :

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

I-6-2-3 Expansion et calibrage

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

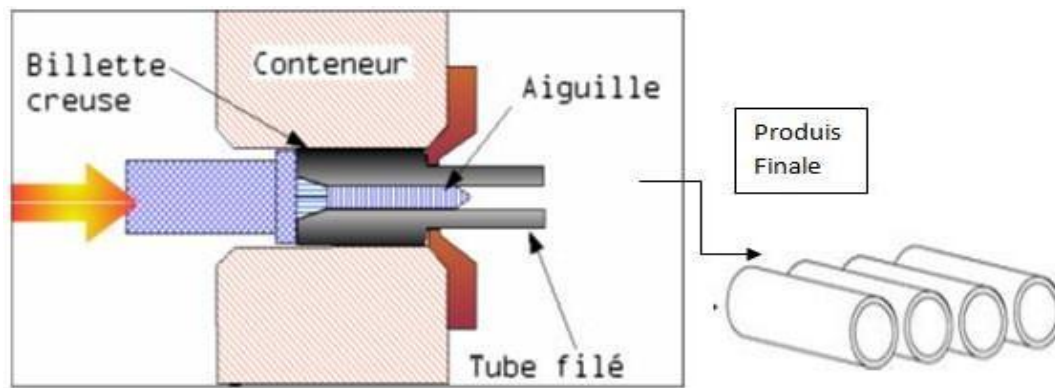


Figure[I-9] : Machine d'expansion

I-6-3 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.

CHAPITRE I : Généralité sur les pipelines



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

I-7 Défaillances et dégradation des pipelines :

Les pipelines sont des structures soumises à un grand nombre d'aléas pouvant leur occasionner des dommages plus ou moins sérieux et très souvent irréversible. Ces ouvrages sont caractérisés par [7] :

Une très grande longueur

La traversée de zones et d'environnement hostiles

Des conditions d'exploitation difficiles (transport d'effluents plus ou moins agressifs et corrosifs, basse température, pression élevées, etc.)

Des interventions humaines fréquentes volontaires (construction et maintenances) ou involontaires (accident, malveillance)

Des problèmes géopolitiques Les dommages mécaniques, la corrosion externe et interne ont essentiellement pour origines l'agressivité du milieu et de l'environnement immédiat (contrainte physicochimiques des terrains et des fluides transporté), on distingue [7] :



Figure[I-11] : répartition en pourcentage les défaillances des pipelines

CHAPITRE I : Généralité sur les pipelines

I-7-1 Dommages mécaniques :

Les dommages mécaniques représentent la partie la plus importante des dommages que peut subir une canalisation. Ils sont souvent induits par des actions liées à la construction de la ligne et à la maintenance ainsi qu'aux actions de la pesanteur sous toutes ses formes. Ainsi ces dommages sur les pipelines peuvent être définis comme toute modification de la structures ayant lieu après fabrication et /ou construction et qui peuvent mettre en cause l'intégrité de la structure. Ils peuvent être imputables à des causes mécaniques (chocs, chutes, déplacement, corrosion, abrasion etc.)[7].

I-7-2 Corrosion externe :

La corrosion externe est en partie due à des actions de dégradations électrochimiques du au milieu environnant sur l'acier de la conduite. Les causes sont multiples et les mécanismes de détérioration sont décrits dans de nombreux ouvrages consacrés à la corrosion. En conséquent, ces multiples corrosions peuvent aller jusqu'au percement en quelques mois et avoir des conséquences dramatiques pour l'environnement [7].

I-7-3 Corrosion interne :

La corrosion interne peut être définie comme le résultat d'actions physique, chimiques ou physico-chimique internes dues essentiellement à la présence et au transport des influents (pétrole, gaz, eau, matières solides) entraînant des pertes de matières aussi bien que générales. En conséquent, ces multiples corrosions peuvent être graves [7].

I-7-4 Décollement de l'enrobage :

Le d'écoulement de l'enrobage est un phénomène extrêmement difficile à voire, impossible à détecter en l'état des techniques actuelles ; il peut exposer le pipeline à des dégradations sévères dès sa mise en place au moment de la pose, là où ce dernier n'est pas encore couvert par la protection cathodique [7]

I-7-5 Dégradation diverses :

Les dégradations diverses concernent des éléments de structures ou d'équipements positionnés singulièrement le long de la conduite et qui peuvent être inspectés en ligne ; ce sont [7]:

Les soudures

Les divers joints présents sur la ligne

Les anodes sacrificielles

Les renforts mécaniques (sur épaisseurs, extenseurs, etc.).

I-8 Techniques de détection des défauts dans les pipelines :

La détection des défauts consiste à l'inspection des réseaux de pipelines dans les canalisations, en effet, L'inspection est l'ensemble des théories et procédés aptes à fournir les informations sur la santé d'une pièce ou d'une structure sans qu'il en résulte des altérations préjudiciables à leur utilisation ultérieure.[8]

Les pipelines étant soumis à des efforts internes des produits [gaz ou pétrole] (boostés par des pompes) et des efforts externes comme il a été indiqué auparavant, des inspections deviennent plus que nécessaire.

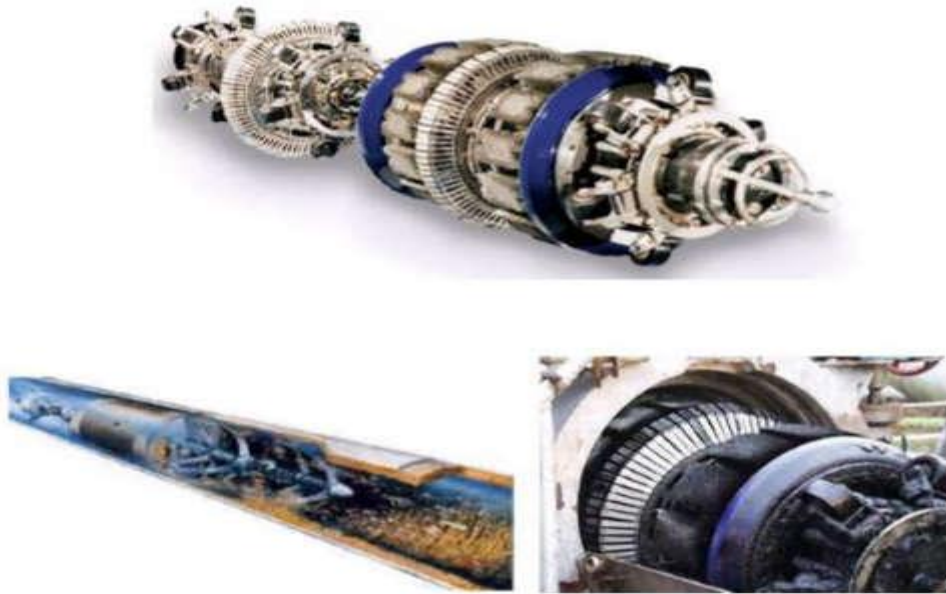
La détection visuelle

La détection par radiographie

La détection par ultrason

CHAPITRE I : Généralité sur les pipelines

La détection par outils intelligent)



Figure[I-12] : Outil intelligent d'inspection

Conclusion :

Les pipelines sont un moyen essentiel de transporter les hydrocarbures à travers le monde. Dans ce chapitre, nous avons abordé la technologie des pipelines, et les méthodes de fabrication des tubes. Nous avons également examiné les principales causes de défaillance des pipelines, telles que la corrosion interne et externe, ainsi que les techniques de détection des défauts.

Chapitre II :

Les matériaux composites

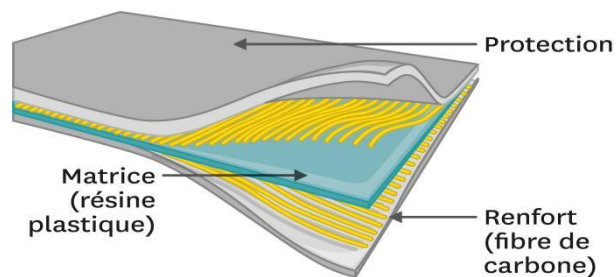
CHAPITRE II : Les matériaux composites

Introduction :

Le développement de nouveaux matériaux est soumis aux besoins des utilisateurs (constructeurs). Ceux-ci veulent toujours des matériaux plus performants, plus économiques et qui durent plus longtemps. Les chercheurs sont le plus souvent amenés à optimiser les solutions déjà utilisés, mais dans certains cas, ils doivent complètement repenser le problème et envisager de nouveaux matériaux. En effet, on ne découvre plus de nouveaux matériaux, mais on crée plutôt des nouvelles associations de matériaux. L'un des résultats de cette association est l'aboutissement à un matériau composite.

Les Matériaux composite:

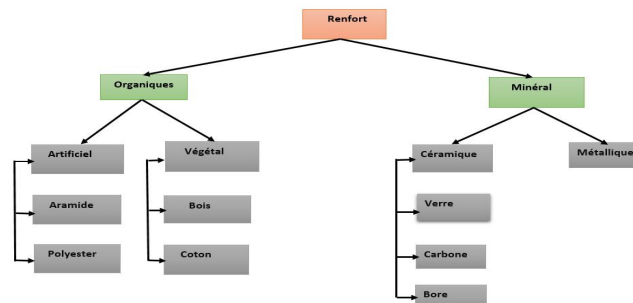
II-1 Définition : Un matériau composite est un assemblage ou un mélange hétérogène d'au moins deux composants non miscibles mais ayant une forte capacité d'interpénétration et d'adhésion . La finalité est d'obtenir un matériau présentant des caractéristiques que les deux matériaux utilisés n'avaient pas seuls. le phénomène qui se produit permet d'augmenter la qualité de la matière pour certaines utilisations. La matière devient ainsi plus légère, rigide, etc. Pour toutes ces raisons et pour la qualité du matériau, Le Composite est de plus en plus utilisé et pour de diverses applications.



Figure[II-1] : Composants du matériaux composite

II-2 Constituants des matériaux composites :

II-2-1Le renfort :c'est une armature qui assure la tenue mécanique (rigidité et résistance) du matériau composite, généralement composé de matériaux plus dur que la résine.les renforts sont par exemple : Fibres de carbone, Fibres de okverre , Fibres d'aramide (comme le Kevlar), Fibres naturelles (comme le lin ou le chanvre)



Figure[II-2] : Organigramme présente Différents familles de renfort. [8]

II-2-1-1Renfort en fibres discontinues: Des fibres courtes, ou particules (charges sous forme de microbilles, de fibres broyées, d'écaillés ou de poudre), permettent

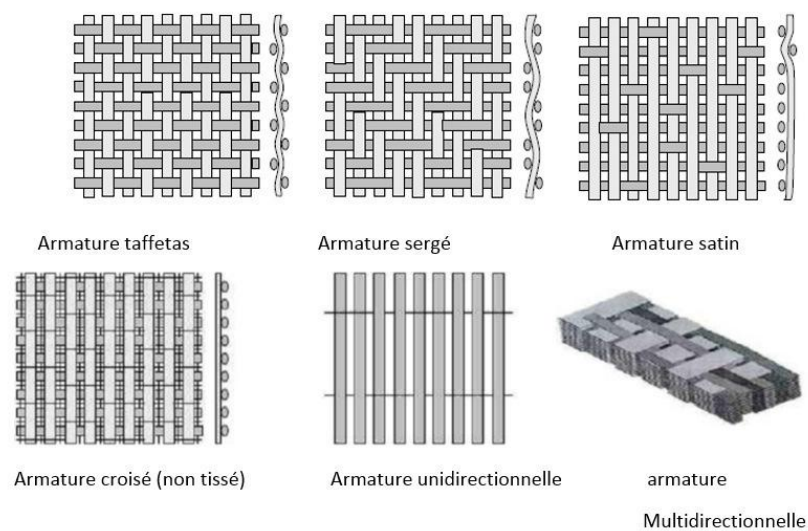
CHAPITRE II : Les matériaux composites

d'améliorer certaines propriétés de la matrice (résistance à l'usure, propriétés thermiques, poids). Celle-ci reste l'élément de base et on obtient alors un « polymère renforcé ». [9]

II-2-1-2 Renfort continu: Sous forme de fibres longues qui sont généralement utilisées pour des composites HP. Cette forme fibreuse offre une résistance à la rupture et souvent un module d'élasticité beaucoup plus élevée que ceux du même matériau massif, avec une augmentation de la longueur de 10000 fois, ou bien pour le même volume, la surface est multiplié par 100 dans le cas des fibres de verre .[9]

Ces renforts ont le rôle d'assurer la bonne tenue mécanique des composites et sont disposés au sein du matériau en fonction des propriétés recherchées. Pour créer une structure résistante adaptée aux contraintes mécaniques, il existe plusieurs architectures de renforts :

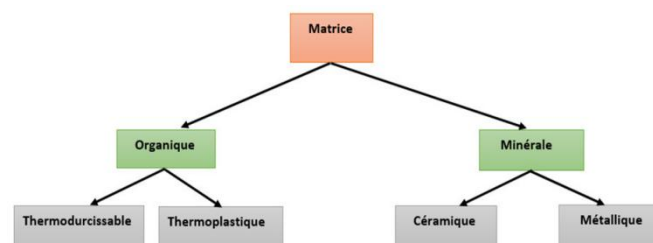
- Unidirectionnelle (nappes ou roving), bidirectionnelle (tissus ou complexes 2D),
- Tridimensionnelle (fibres orientées suivant trois directions).



Figure[II-3] : Différentes formes de renforts continus. [9]

II-2-2 Matrice:

La matrice a pour principal but de transmettre les efforts mécaniques au renfort. Elle assure aussi la protection du renfort vis-à-vis des diverses conditions environnementales. Elle permet en outre de donner la forme voulue au produit réalisé.



Figure[II-4] : Classification des matrices. [10]

CHAPITRE II : Les matériaux composites

II-3 Les types des matériaux composite :

Il est d'usage de classer les composites par la nature de leur matrice, pour deux raisons : la matrice assure toutes les fonctions autres que la tenue mécanique, et conditionne le choix du procédé de mise en forme. On distingue habituellement trois familles : Les composites à matrice organique (CMO), Les composites à matrice céramique (CMC), Les composites à matrice métallique (CMM). Chacune de ces familles possède des propriétés différentes et pour chacune d'entre elles, différents types de renforts sont employés.

II-3-1/Composites à Matrice Organique (CMO) :Ces composites sont les plus courants à l'échelle industrielle. Ils sont constitués d'une matrice organique (comme une résine) associée à un renfort (généralement des fibres).Les renforts peuvent être en verre, en carbone, en aramide (comme le Kevlar), etc.Les CMO sont utilisés dans l'aérospatiale, l'automobile, la construction, etc.

on distingue généralement deux types de CMO :

- Les composites à grande diffusion, peu coûteux et représentant près de 95% des CMO fabriqués, utilisés pour toutes sortes de pièces faiblement sollicitées.

Les composites à haute performance, plus onéreux mais présentant des qualités mécaniques supérieures, notamment employés dans l'aéronautique, le nautisme, les sports et loisirs ou encore la construction industrielle

II-3-2/Composites à Matrice Céramique (CMC) :Dans ces composites, la matrice est en céramique (par exemple, oxyde d'alumine ou carbure de silicium).Les CMC sont appréciés pour leur résistance à la chaleur, leur résistance à l'abrasion et leur légèreté.Ils sont utilisés dans les moteurs d'avions, les freins, etc.

II-3-3/Composites à Matrice Métallique (CMM) :La matrice des CMM est en métal (comme l'aluminium, le titane ou le magnésium).Ils combinent la résistance mécanique des métaux avec la légèreté des composites.On les trouve dans les applications aérospatiales, les pièces automobiles, etc.

II-4-Les avantages d'un matériaux composite :

II-4-1Avantages structurels des matériaux composites :

Les avantages structurels permettent l'utilisation des matériaux composites dans de nombreux secteurs.

II-4-2Légèreté et flexibilité :La masse volumique des matériaux composites est très faible. Ils sont 50 % plus légers que l'acier et 30 % plus légers que l'aluminium. Remplacer un élément métallique par une pièce en matériaux composites, permet un allègement global de la structure. La légèreté garantit une flexibilité facilitant les manipulations : transport, agencement. La flexibilité se retrouve aussi dans la conception grâce au modelage. Les matériaux composites peuvent prendre les formes les plus diverses et variées.

II-4-3Radiodensité :La radio densité est l'opacité aux ondes radio et aux rayons X. Ces rayonnements électromagnétiques ne passent pas à travers les composites qui en font des matériaux idéaux dans la conception d'avion ou de navire "furtifs" non détectables par des radars.

CHAPITRE II : Les matériaux composites

II-4-4 Résistance et durabilité : Les matériaux composites ont des capacités de résistance variées qui participent à leur durabilité :

II-4-5 Résistance chimique : Ils résistent aux attaques chimiques par différents milieux agressifs tels que l'eau, l'oxygène, les agents chimiques ou l'environnement. Les composites sont donc parfaits pour une utilisation en zone humide, côtière et pour les conceptions architecturales en extérieur.

II-4-6 Résistance aux chocs : Elle peut atteindre des jusqu'à 1000 MPa pour les composites à fibres longues.

Les matériaux composites s'avèrent idéaux pour améliorer la résistance et la sécurité dans secteurs allant des véhicules de loisirs jusqu'à des secteurs plus spécifiques comme la défense avec des véhicules militaires, les gilets pare-balles, des sous-marins...

-Résistance aux rayons UV et à toutes les conditions météorologiques

-Résistance à la pression hydrostatique

-Résistance aux phénomènes de cavitation

-Résistance au feu

-Isolation

II-4-7 Avantages fonctionnels :

II-4-7-1 Conception à la carte : Les matériaux composites peuvent être conçus « à la carte », ils ont une forte anisotropie. Ils permettent une ingénierie sur mesure grâce aux divers procédés de mise en forme : moulage, compression, injection etc. Ainsi, pour répondre à des applications spécifiques, la conception de pièces de formes géométriques atypiques de toute taille est permise. Il en va de même pour la conception haut de gamme avec des finitions diverses : mates, rugueuses, satinées, etc.

II-4-8 Écologique : Les matériaux composites participent favorablement à la protection de l'environnement. En effet, ils ne demandent aucun entretien et sont, pour certains, recyclables. Après broyage, ils ont un volume de stockage limité. La légèreté des constructions avec matériaux composites engendre aussi un allègement des consommations énergétiques et donc d'émission de CO₂. C'est le cas dans le transport des pièces elle-même mais aussi lors de leur utilisation par exemple grâce à la mise en œuvre de fondations réduites, préservant ainsi les sols et limitant le nombre d'engins. L'impact de l'utilisation des matériaux composites est aussi notable dans la conception des véhicules de transport eux-mêmes.

II-4-9 Avantages économiques :

Comparé au coût des conceptions avec des matériaux traditionnels, celui avec des matériaux composites s'avère compétitif. En effet :

-Moindre coût de transport, d'assemblage, de manipulation du fait de la légèreté des composites.

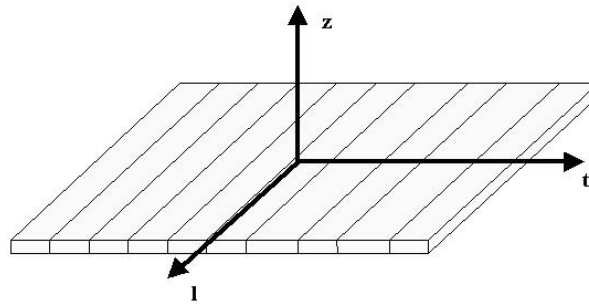
-Moindre coût du produit lui-même par rapport à certains autres, d'autant que la quantité de matière nécessaire est limitée.

-Pas de coût d'entretien comme pour le bois ou l'acier pour lesquels le renouvellement des traitements de surface de façon régulière est nécessaire.

CHAPITRE II : Les matériaux composites

II-5 Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types :

II-5-1 Monocouches: Représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de mono couches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes. [11]

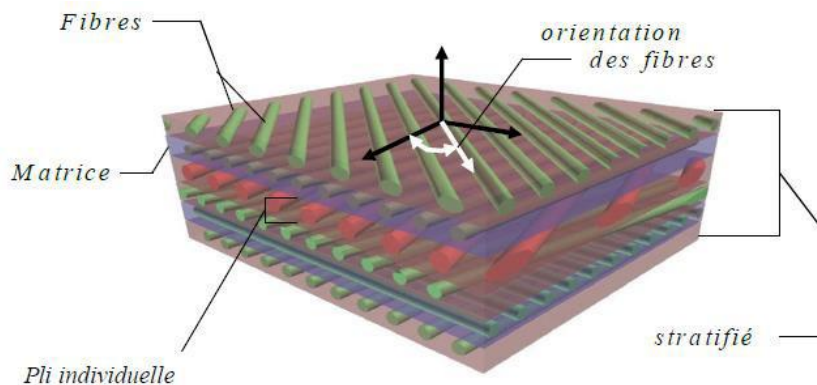


Figure[II-5] : composite Mono couches. [11]

II-5-2 Stratifiés:

Un stratifié est constitué d'un empilement de mono couches ayant chacun une orientation propre à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié.

En jouant sur l'ordre et l'orientation de ces couches. Il est possible d'adapter finement les propriétés mécaniques du stratifié aux sollicitations extérieures, et donc d'atteindre un haut niveau d'optimisation en mettant la matière là où elle est le plus utile.

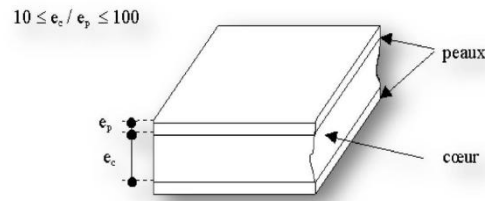


Figure[II-6] : composite stratifié. [12]

II-5-3 Sandwichs

Matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou cœur) de forte épaisseur et faible résistance. L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une grande légèreté en flexion et c'est un excellent isolant thermique.

CHAPITRE II : Les matériaux composites

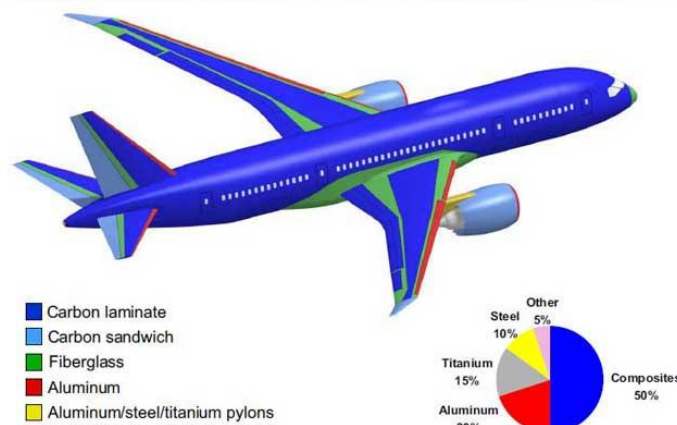


Figure[II-7] : Composite sandwichs. [13]

II-6-Les applications du matériaux composite :

Les matériaux composites sont utilisés dans une variété de secteurs d'application en raison de leurs propriétés uniques. Voici quelques domaines où les composites jouent un rôle essentiel :

II-6-1Aérospatiale :Les grands fabricants d'équipements d'origine (OEM) tels qu'Airbus et Boeing ont montré le potentiel des applications à grande échelle des composites dans l'aviation. Chaque génération d'avions développée par Boeing a eu une proportion croissante de matériaux composites, atteignant jusqu'à 50 % dans le cas du Boeing 787 Dreamliner. Les éléments structuraux majeurs du Dreamliner sont fabriqués à partir de composites de carbone, ce qui permet d'alléger l'avion et d'améliorer ses performances

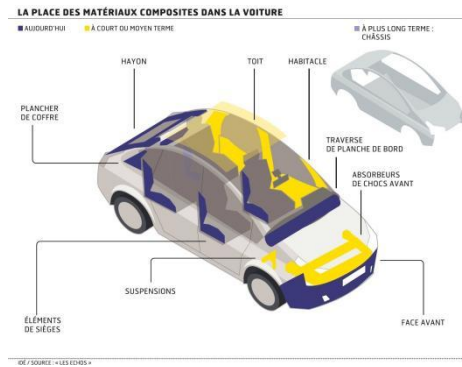


Figure[II-8] : L'utilisation de matériaux composite dans l'avion

II-6-2Architecture :Les composites sont utilisés dans la construction de bâtiments, de ponts et de structures telles que les coques de bateaux, les panneaux de piscine, les carrosseries de voitures de course, les cabines de douche, les baignoires, les réservoirs de stockage, les éviers en imitation granit et en marbre reconstitué. Ils offrent une combinaison de légèreté et de résistance.

II-6-3Automobile :Les réglementations sur les émissions de CO₂ à l'échelle mondiale ont conduit à l'utilisation croissante des composites dans le secteur automobile. Réduire le poids des véhicules est l'un des moyens les plus simples de réduire les émissions, et les composites sont des matériaux de choix pour cette tâche

CHAPITRE II : Les matériaux composites



Figure[II-9] : L'utilisation de matériaux composite dans la voiture

II-6-4 Production d'énergie :

Les composites sont utilisés dans les éoliennes, les pales de turbines, les générateurs et les équipements de production d'énergie renouvelable. Leur résistance et leur durabilité les rendent adaptés à ces applications.

II-6-5 Infrastructure :

Les composites contribuent à la durabilité des structures de génie civil, notamment les ponts, les passerelles et les éléments de construction. Ils aident à maintenir l'intégrité des structures existantes sur le long terme.

II-6-6 Marine :

Le secteur maritime a été l'un des premiers à comprendre les avantages des composites, en particulier leur facilité d'application et leur résistance à la corrosion. Les bateaux soumis à des millions de cycles lors de traversées transatlantiques sont un laboratoire extraordinaire pour tester la durabilité des composites.

II-6-7 Équipements industriels :

Les fabricants d'équipements industriels se tournent de plus en plus vers les composites en raison de leur légèreté, de leur rigidité et de leur résistance à la corrosion. Ces propriétés améliorent le rendement de la production.

II-6-8 Médecine et prothèses :

Les composites offrent une conformabilité, une légèreté, une biocompatibilité et une transparence aux rayons X. Ils sont utilisés dans les prothèses et les dispositifs médicaux.

II-7-Méthodes de réparation des pipelines:

II-7-1 Réparation des pipelines par patch en composite:

Les matériaux composites ont été employés pour la réparation des structures des pipelines et d'autres équipements pendant plusieurs années. Cependant, l'utilisation originale des matériaux composites était de réparer les canalisations corrodées avec l'intention de renforcer la section endommagée de la canalisation. En plus de réparer la corrosion, les matériaux composites ont été utilisés avec succès pour réparer des entailles, des fissures et des canalisations offshore. Aujourd'hui, la plupart des compagnies d'exploitation de pipelines utilisent principalement les matériaux composites dans les programmes de réhabilitation et de réparation. [13]

CHAPITRE II : Les matériaux composites

II-7-2 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. Dans notre cas, nous allons nous axer plus sur les matériaux composites à fibre et résines. 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. La figure suivante présente la réparation par composite d'une pipe en acier [13].



Figure[II-10] : Réparation par composites d'une pipe en acier

II-7-3 Système de réparation par renforcement des fibres composites :

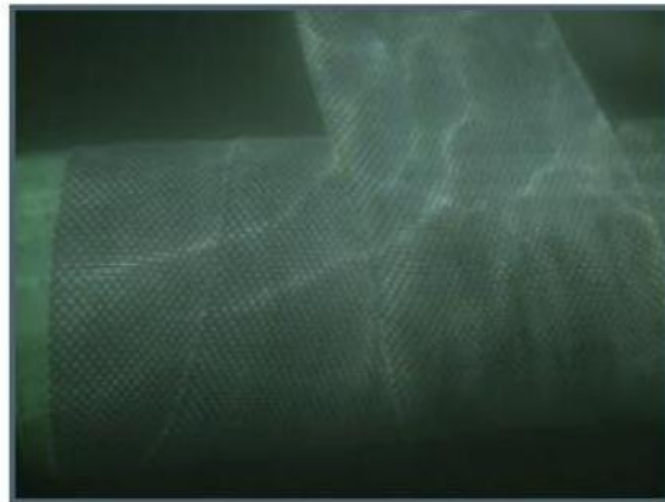
Généralement, les systèmes de réparation par collage de composite peuvent être classés en deux types : Système de réparation par matériaux composites pré-durci « Pre-cured layered » et système de réparation par matériaux composites flexible « Flexible wetlay-up system » qui sont appliqués dans la réparation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

II-7-4 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

CHAPITRE II : Les matériaux composites

pression. Cette application utilise la matrice de résine qui est généralement à l'état non solidifié. Leurs solidifications sont réalisées 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, aramide...) 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 paroi. 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. La figure) présente l'emballage d'un composite flexible pour la réparation d'une conduite sous - marine.



Figure[II-11] : Emballage de composite flexible pour la réparation sous – marine

II-7-5Système 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 montre le système de réparation Clockspring R qui est intensivement utilisé dans l'industrie de réparation des pipelines. 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 scellées 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. 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 limitée à des sections droites de

CHAPITRE II : Les matériaux composites

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.



Figure[II-12] : réparation par renforcement composite type clockspring

Conclusion:

La réparation des pipelines avec des matériaux composites est une solution efficace qui nécessite une attention particulière aux propriétés des matériaux et aux contraintes thermiques. L'analyse par éléments finis aide à comprendre l'impact des contraintes résiduelles sur la réparation, tandis que la compatibilité entre les coefficients de dilatation thermique des composites et du métal est cruciale pour assurer la durabilité de la réparation. En somme, une conception minutieuse et une compréhension approfondie des interactions matérielles sont essentielles pour garantir le succès de la réparation des pipelines par patch composite.

Chapitre III :

Recherche bibliographique et calcul mathématique

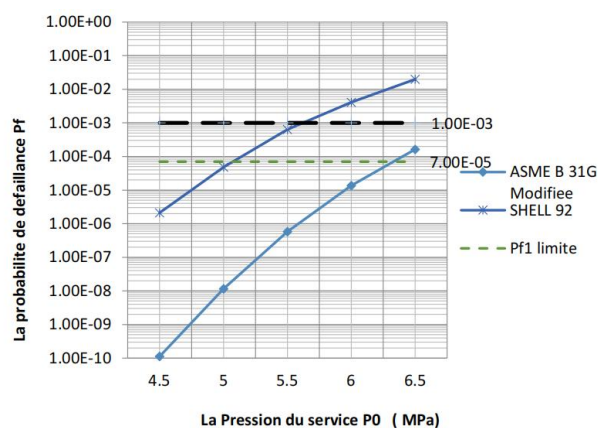
CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

III-1 INTRODUCTION :

La détermination des contraintes dans les canalisations est un sujet d'intérêt majeur pour les chercheurs du monde entier. Les pipelines, essentiels pour le transport de fluides, sont soumis à diverses sollicitations telles que la pression interne, les charges externes et les défauts de corrosion. Dans ce chapitre, nous explorerons les aspects liés aux contraintes et à la réparation des pipelines, en mettant l'accent sur l'utilisation de matériaux composites.

III-2 Recherche bibliographique

1/ Mourad BETTAYEB et al ont fait une analyse fiabilité d'un oléoduc de 45 km de longueur et de 26 pouces de diamètre en acier API 5L X52. ils ont utilisé une approche probabiliste pour calculer la probabilité de défaillance (P_f) en présence de défauts de corrosion externes, en se basant sur les normes ASME B31G Modifiée et SHELL 92. Les résultats montrent que la P_f augmente avec la pression de service (P_0). L'ASME B31G Modifiée autorise des pressions de service entre 45 et 50 bar, tandis que la norme SHELL 92 est plus restrictive. Si l'on adopte une P_f plus élevée ($P_f = 10^{-3}$), les deux normes autorisent des pressions de service entre 45 et 55 bar. Cette étude est cruciale pour garantir la sécurité des pipelines et prendre des décisions éclairées en matière de maintenance et de sécurité.[14]



Figure[III-1] : Variation de P_f en fonction de la pression de service P_0

2/L'analyse de Jiaqi Chen et al. exploré l'efficacité des composites inorganiques comme alternative à l'époxy pour la réparation des conduites en acier. Ils ont révélé que le module d'élasticité des matériaux de remplissage est crucial pour le transfert de charge et la réduction de la déformation sous contrainte. Les résultats suggèrent qu'un matériau de remplissage plus rigide améliore la durabilité et l'efficacité du renforcement des systèmes de réparation en PRFC, offrant une meilleure performance à long terme pour les conduites

CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

endommagées.[15]

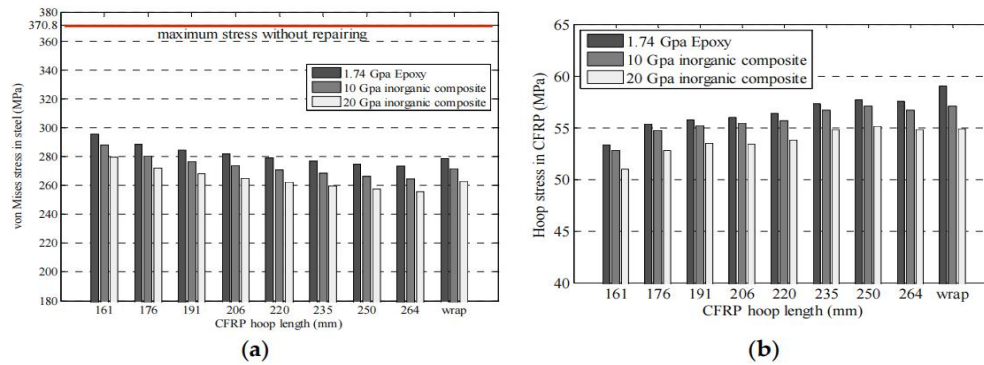


Figure [III-2] : Effet du module de remplissage sur (a) la contrainte de von Mises dans le tuyau et (b) la contrainte circulaire dans le CFRP.

3/La nouvelle méthodologie développée par Silvio De Barros, et al vise à prédire de manière conservatrice la pression d'éclatement des pipelines en se focalisant sur leur section la plus faible. Les tests ont confirmé que les valeurs réelles d'éclatement sont souvent plus élevées que celles prédites. L'inclusion de la contrainte axiale dans l'analyse augmente la précision des prédictions, par une augmentation de 1,15 fois de la pression d'éclatement. Pour affiner davantage ces prédictions, les chercheurs recommandent de prendre en compte la contrainte radiale et le comportement élasto-plastique éloigné du défaut.[16]

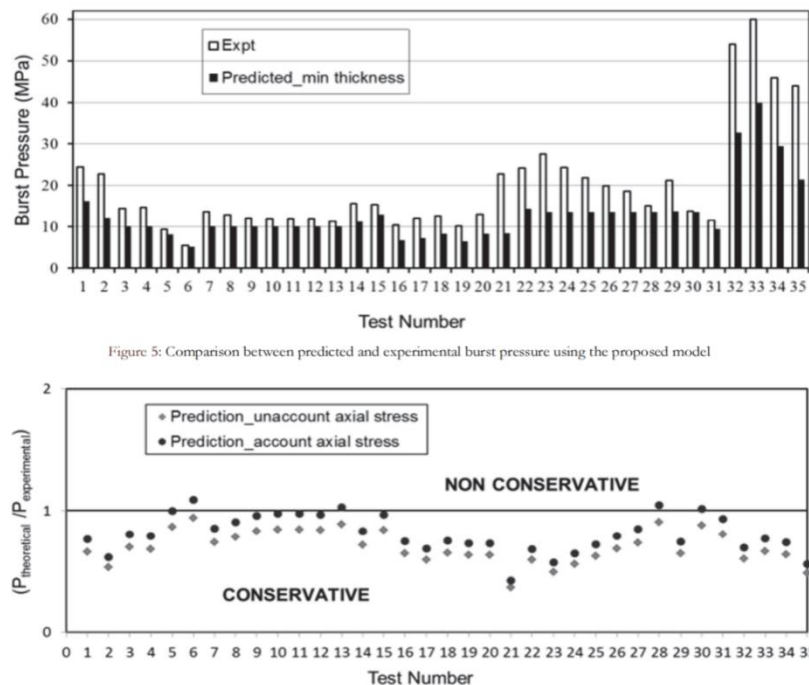


Figure 5: Comparison between predicted and experimental burst pressure using the proposed model

Figure[III-3] : $(P_{théorique} / P_{éxpérimentale})$ par test en utilisant la méthodologie proposé avec et sans tenir compte la contrainte axial

CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

4/L'étude menée par Yu Zhang, et al a utilisé la méthode des éléments finis (FEM) pour simuler la défaillance des conduites sous pression interne. Ils ont établi une relation entre la contrainte maximale de Mises et la pression interne pour des conduites corrodées, nues et réparées. Leurs résultats, illustrés dans la figure 13, montrent que la contrainte maximale de Mises dans une conduite réparée est nettement inférieure à celle d'une conduite corrodée. Cela indique que la réparation réduit considérablement la contrainte dans la conduite, améliorant ainsi sa résistance à la pression interne. Toutefois, ils ont également observé que l'écart entre les contraintes de Mises des conduites réparées et corrodées diminue lorsque la conduite devient plus ductile.[17]

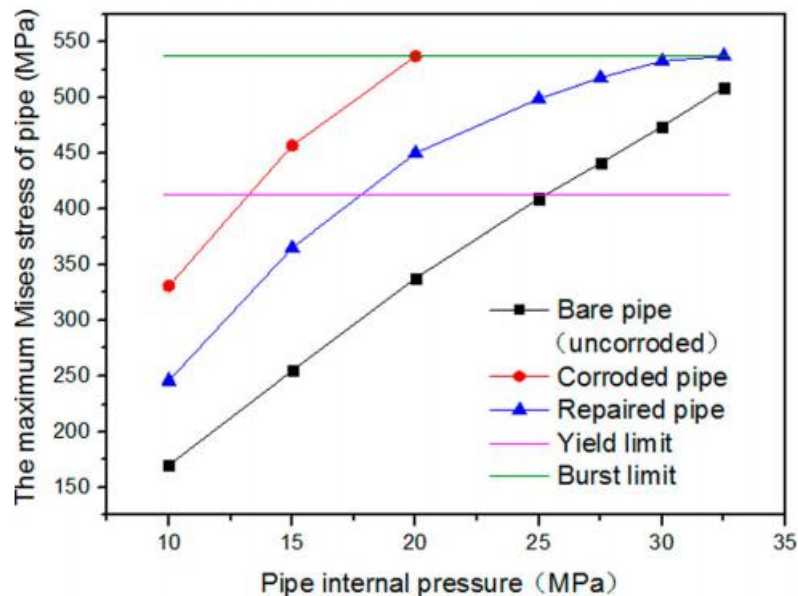
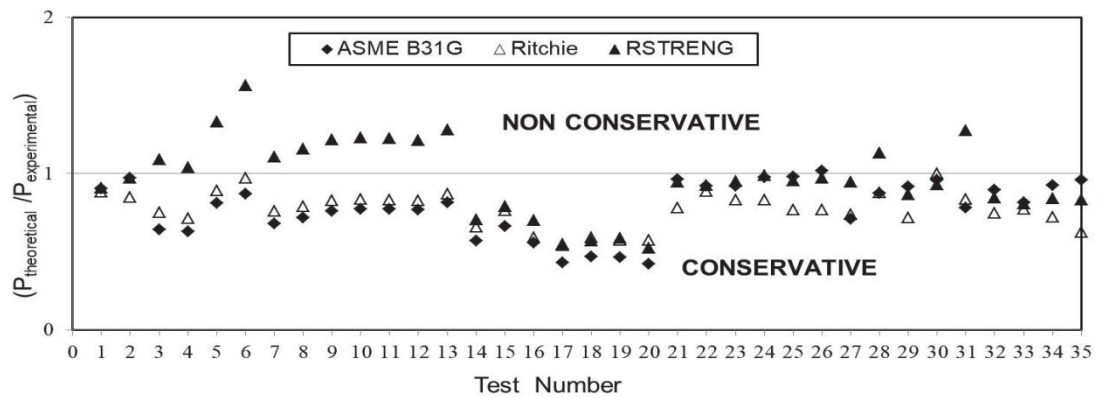


Figure [III-4] : Contrainte maximale de Mises de trois tuyaux sous différentes pressions interne

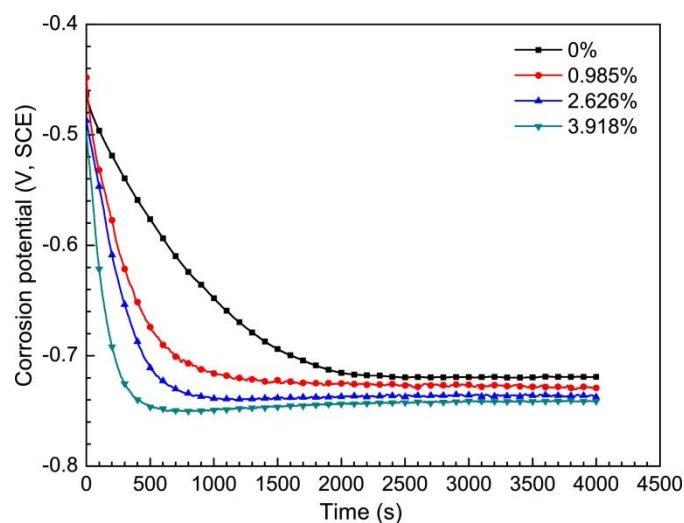
5/D.Silvio et al ont fait une comparaison des modèles ASME B31G, Ritchie et RSTRENG pour la prédiction de la pression de rupture. L'ASME B31G et le modèle de Ritchie ont montré des prédictions plus conservatrices de la pression de rupture dans l'ensemble des 35 tests hydrostatiques. Cela signifie que leurs estimations étaient généralement plus élevées que les valeurs réelles observées. En revanche, le modèle RSTRENG a donné des prédictions mixtes. Certaines de ses estimations étaient conservatrices, tandis que d'autres étaient plus non conservatrices . voici la figure .[18]

CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique



Figure[III-5] : (P théorique / P expérimental) par test avec conservateur et non conservateur pression d'éclatement en utilisant le mode semi-empirique sélectionné

6/Y.Wang et al ont mené une étude sur l' influence de la déformation plastique sur l'activité électrochimique des aciers de pipelines , les résultats théoriques montrent que le potentiel devient plus négatif avec l'augmentation de la précontrainte plastique. Sur le plan thermodynamique, l'activité de corrosion accrue due à la déformation plastique des aciers de pipelines ne doit pas être négligée. Voici la figure[19]

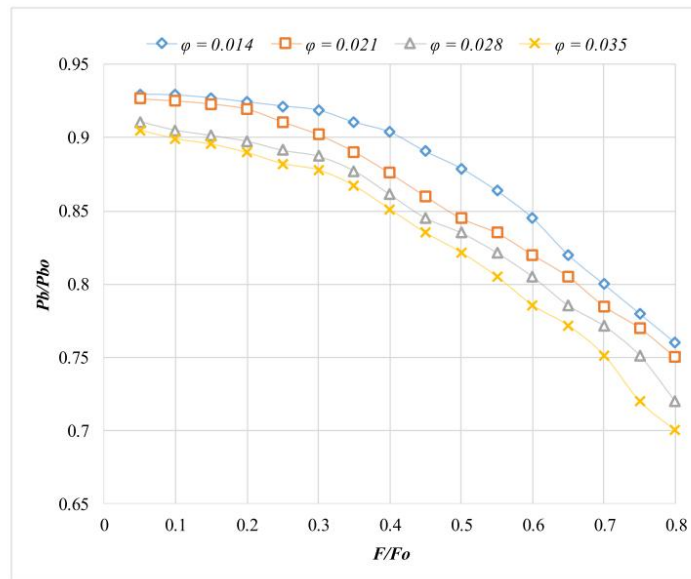


Figure[III-6] : Dépendance temporelle du potentiel de corrosion de l'acier X100 sous diverses conditions pré-déformations dans la solution NS4

7/U. Bhardwaj et al ont mené une étude sur la largeur du défaut de corrosion a peu d'impact sur la pression de rupture des pipelines et est donc souvent négligée dans les formulations de résistance Cependant, il est intéressant de comprendre comment la largeur du défaut de corrosion affecte le comportement de rupture sous charges combinées. À cette fin, des modèles structuraux par éléments finis sont modifiés avec différentes largeurs de défaut, puis analysés numériquement. Pour la comparaison, différentes largeurs de corrosion sont examinées. D'autres paramètres tels que la longueur et la profondeur de la corrosion sont maintenus constants, avec l'équation

CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

$l/\sqrt{Dt} = 2,23$ et $d/t = 0,2$. En général, on observe que l'augmentation de la largeur de la corrosion réduit légèrement la pression de rupture .[20]



Figure[III-7] : Effet de la largeur du défaut sur l'interaction résistance à l'éclatement-charge axiale ($l/\sqrt{Dt} = 2,23$, $d/t = 0,2$).

8 /Xinhui Wang et al ont fait une comparaison des résultats de pression interne supportée par des tuyaux défectueux mécaniquement rayés sur la paroi extérieure avant et après réparation . Avant réparation (courbe noire), la contrainte maximale augmente rapidement et atteint une valeur maximale de 360,00 MPa lorsque la pression interne est de 7,30 MPa. Le tuyau réparé avec des composites en fibre de carbone (courbe bleue) voit sa contrainte maximale augmenter plus lentement. À une pression interne de 13,80 MPa, la contrainte maximale atteint progressivement 360,00 MPa.

Le tuyau réparé avec un manchon de type B (courbe rouge) se situe entre les deux. À une pression interne de 11,40 MPa, la contrainte maximale atteint son maximum.[21]

CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

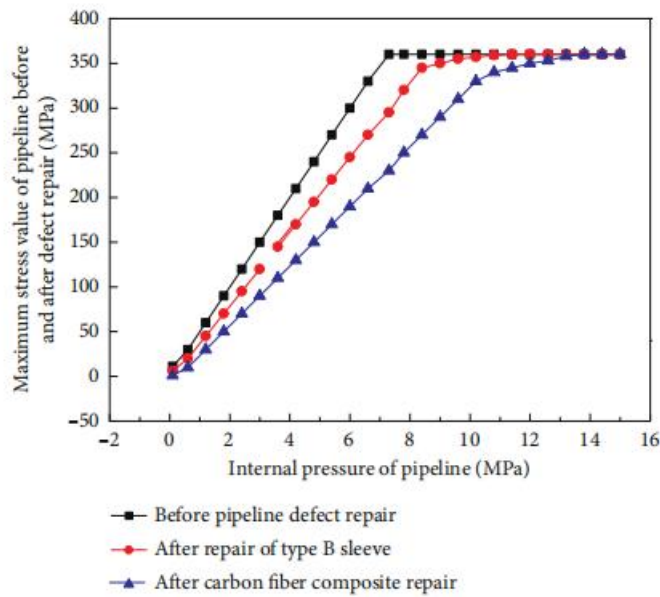
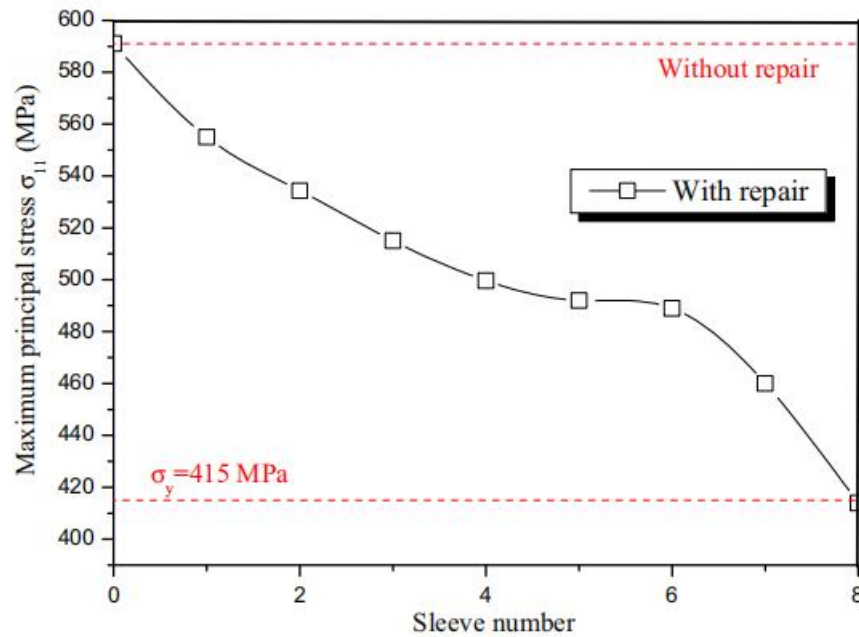


Figure [III-8] : Comparaison de la pression avant et après la réparation de la canalisation défectueuse.

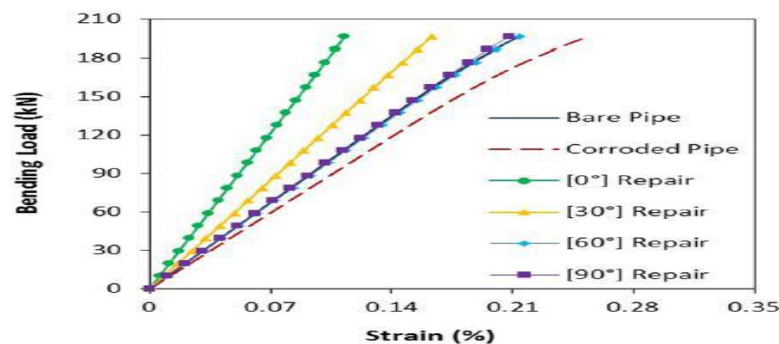
9/M. Amara et al ont fait une étude numérique de la réparation d'un tuyau soumis à une pression interne à l'aide d'une méthode de réparation composite. Un manchon composite fabriqué à partir de fibres de verre E et de résine de polyester est utilisé. Les fibres sont orientées de manière à suivre la direction circonférentielle du tuyau pour maximiser la résistance dans cette direction. Le manchon composite a les dimensions suivantes : 500 mm de largeur et 2 mm d'épaisseur pour chaque manchon. Les contraintes maximales sont localisées à l'extrémité du défaut, comme présenté dans la Figure. Le nombre de manchons a un effet sur la valeur maximale de contrainte. La Figure montre la diminution de la contrainte principale maximale avec le nombre de manchons.[22]

CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique



Figure[III-9] Evolution de la contrainte principale maximale avec numéro de manchon

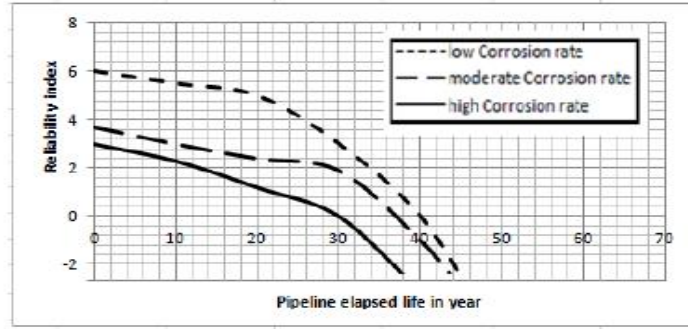
10/ Le travail de Chan et al est une étude de la performance d'un pipe en acier réparée avec un composite polymère renforcé de fibres soumis à une charge de flexion. L'analyse par éléments finis a été utilisée pour simuler le comportement charge-déformation du système réparé. Le modèle a été validé par un travail expérimental de la flexion en quatre points. Les paramètres étudiés dans le cadre de la simulation FE et les tests expérimentaux sont basés sur trois conditions d'un pipe non corrodé, corrodé et corrodé réparé par patch en composite carbone/époxy. Leurs résultats montrent que l'orientation de fibre suivant un angle de 0° est la méthode la plus efficace pour la réparation avec un patch.[23]



Figure[III-10]: charge-déformation d'un pipe sain, corrodé et corrodé réparé avec différentes orientation des fibres

11 / R. Khelif et al ont présenté une étude d'un modèle élément fini qui simule le phénomène de la corrosion et son influence sur la rupture des pipelines en utilisant une méthode fiabiliste. Un modèle numérique a été développé sous le code Ansys, afin de simuler les différentes charges pour déterminer le facteur de concentration des contraintes. A la base de ce modèle, la contrainte de Von Mises est déterminée.[24]

CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique



Figure[III-11] : Effet de la corrosion sur la fiabilité du pipeline.

III-3 Étude analytique de la variation des rapports des contraintes en fonction de la pression interne:

Les pipelines sont des tubes minces, cela est dû au fait que l'épaisseur de la conduite est inférieure au diamètre extérieur $t/D_{ext} < 0.05$. Les contraintes dans le tube sont les contraintes radiale σ_r , la contrainte circonférentielle σ_θ et la contrainte de traction σ_z . Celles-ci s'expriment par les relations III.1 et III.2 et III.3 :

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

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

$$\sigma_{zz} = \frac{r_i^2 p_i}{r_e^2 - r_i^2} \quad (III.3)$$

III-3-2 La contrainte de Von Mises σ_e

Pour le calcul des tubes 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.

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{rr})^2 + (\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta})^2} \quad (III.4)$$

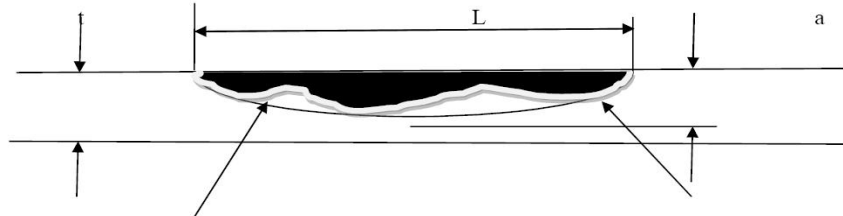
III-4 L'ASME B31G : [25]

Le code ASME B31G est un code destiné à évaluer la résistance à la rupture résiduelle d'un pipe corrodée. Il constitue un additif au code ASME B31 utilisé pour les tubes. Ce code a été développé dans les années 60 au Battelle Memorial Institute (USA) et donne des méthodes semi empiriques pour vérifier la tenue en service de pipe corrodés. Basé sur un nombre relativement important d'essais sur des sections du pipe corrodées, il a été constaté que les aciers utilisés pour les pipes ont en générale une ténacité suffisante pour permettre la rupture ductile et donc que la ténacité n'est pas le paramètre essentiel mais la profondeur de corrosion. La rupture amorcée sur des défauts de corrosion émoussés est contrôlée par leur taille et la contrainte d'écoulement du matériau R_c . Les paramètres d'entrée comportent le diamètre extérieur du pipe (D_{ext}), l'épaisseur (t), la limite d'élasticité minimale requise, la pression de service maximale, l'extension maximale longitudinale de la corrosion ($2c$) et la profondeur du défaut (a). Selon le

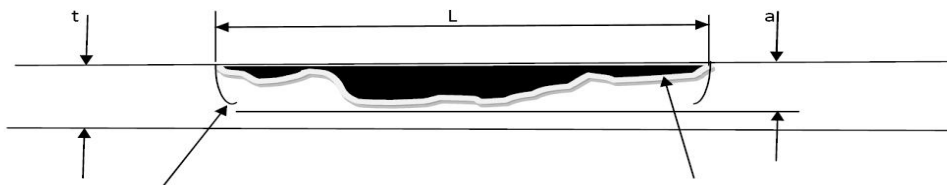
CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

Code ASME B31G, l'équation de la rupture de tubes corrodés est établie à partir des données expérimentales et exprimée à partir des deux conditions suivantes :

- Premièrement, la contrainte circonférentielle globale maximale ne peut pas excéder la limite d'élasticité du matériau.
- Deuxièmement, un défaut de corrosion court est assimilé à sa projection selon une forme parabolique et un défaut de corrosion long est projeté selon une forme rectangulaire.

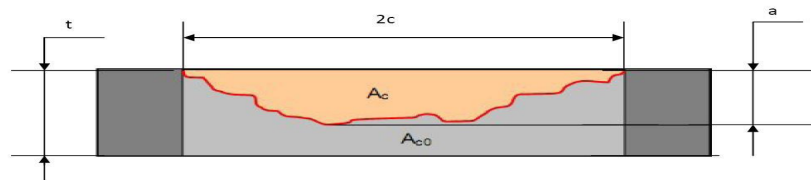


Figure[III-12] : Défaut de corrosion court projeté selon une forme parabolique.



Figure[III-13] : Défaut de corrosion long projeté selon une forme rectangulaire

La surface de corrosion est calculée par cette formule $A_{C0} = t * 2c$ représentée sur la figure III.14



Figure[III-14] : Face longitudinale imaginaire d'un défaut de corrosion.

Selon ASME B31G la longueur de défaut de corrosion peut être sous forme parabolique ou rectangulaire. Pour des secteurs plus courts de corrosion, quand la longueur axiale de la surface affectée L est inférieure ou égale à $(\sqrt{20 * D * t})$ la forme parabolique est employée.

Si $2c \leq \sqrt{20 * D * t}$ la forme est parabolique (III.5)

La figure [III-15] présente la surface corrodée sous forme parabolique pour un défaut de corrosion relativement court (selon ASME B31G).

CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

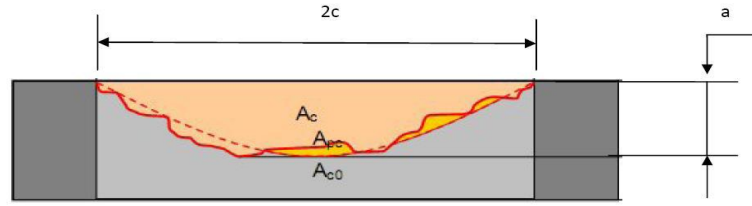


Figure [III-15] : Surface corrodée parabolique supposée pour le défaut relativement court de corrosion (selon ASME B31G).

La projection de la surface A_c de défaut est définie par la relation (III.6) :

$$A_c = \frac{2}{3} a * 2c \quad (III.6)$$

La pression ultime pour des défauts courts est définie comme :

$$P_{ult} = \frac{2(1.1R_e)*f*T*t}{D_{ext}} \left[\frac{(1 - \frac{2}{3}(\frac{a}{t}))}{(1 - \frac{2}{3}(\frac{a}{t\sqrt{1+A^2}}))} \right] \quad (III.7)$$

- f : facteur de conception approprié d'ASME B31.4 et d'ASME B31.8 ou d'ASME B31.11 (normalement égale à 0.72).
- T : la température sous sollicitant.

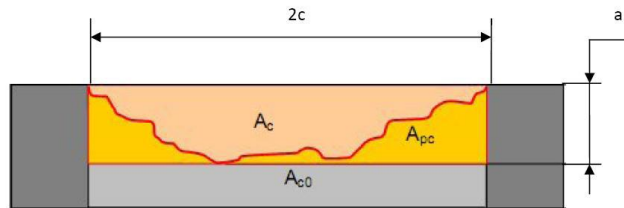
Dans les équations (III.7) les facteurs f et T ne sont pas pris en compte. La plupart des auteurs supposent que les compagnies emploient leurs propres facteurs de sûreté de toute façon.

Le coefficient de flambage est défini comme :

$$M = \sqrt{1 + 0.8 * \frac{(2a)^2}{D_{ext}*t}} \quad (III.8)$$

Quand la longueur axiale de la surface affectée L est supérieure ou égale à $(\sqrt{20 * D * t})$ la forme parabolique est employée.

$$2c > \sqrt{20 * D * t} \quad (III.9)$$



Figure[III-16] : Secteur rectangulaire supposé corroder pour un plus long défaut de corrosion (selon ASME B31G /34/).

CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

Pour ces longs défauts le secteur projeté A_{PC} est définie par :

$$A_c = a * 2c \quad (III.10)$$

La pression ultime est décrite par l'équation (III.19):.

$$P_{ult} = \frac{2(1.1R_e)*f*T*t}{D_{ext}} \left[1 - \left(\frac{a}{t} \right) \right] \quad (III.11)$$

La valeur de facteur de flambage est définie à l'infinie ($M = \infty$)

Récapitulant, ASME B31G contient des limitations, qui le rendent impossible de couvrir tous les défauts de corrosion, matériaux de pipe et charges.

III-5 Conclusion:

En conclusion mettent en lumière l'importance de la sélection appropriée des matériaux composites et des méthodes de réparation pour assurer l'intégrité structurelle et la sécurité des pipelines. Les avancées dans la modélisation et la prédiction de la performance des réparations contribuent à optimiser les stratégies de maintenance et à prolonger la durée de vie des infrastructures de transport de fluids.

Chapitre IV :

Simulation numérique et discussion des résultats

IV-1 Introduction :

Face aux défis posés par les dommages sur les structures et les canalisations dans des environnements corrosifs, des réponses efficaces et économiques sont nécessaires pour assurer la réparation. Ces solutions doivent garantir la sécurité et permettre une utilisation fiable et durable des infrastructures. Cela requiert des ingénieurs de développer des logiciels de plus en plus sophistiqués et performants pour une gestion précise de ces problématiques.

Dans le cadre de cette étude, nous procédons à une analyse numérique par la méthode des éléments finis pour évaluer la corrosion d'un pipe en utilisant le logiciel ANSYS Workbench. L'objectif est de déterminer l'épaisseur idéale de renforcement en composite pour restaurer les propriétés mécaniques du tube. Les résultats obtenus seront ensuite comparés avec les résultats du modèle de M.Khaisem[27] pour validation.

IV-2 ANSYS Workbench :

ANSYS Workbench est une plate-forme d'intégration pour la simulation qui permet de coordonner et de gérer toutes les données de simulation d'ingénierie en un seul endroit. Elle facilite la création de modèles plus précis et plus efficaces en intégrant les données de différentes simulations physiques. ANSYS Workbench est conçu pour aider les ingénieurs à prendre des décisions de conception plus éclairées en centralisant toutes les données de simulation, ce qui permet de gérer facilement les données de tous les produits ANSYS. C'est un outil polyvalent qui peut être utilisé pour une large gamme d'analyses, y compris la mécanique des fluides, la mécanique des structures, et les simulations électromagnétiques.

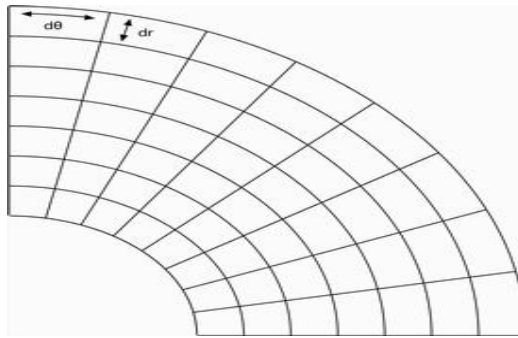
Donc, nous exploitons les capacités avancées d'ANSYS Workbench. Bien que les programmes de calcul par éléments finis exigent généralement une expertise approfondie en ingénierie de calcul, ANSYS Workbench se distingue par sa facilité d'accès, même pour ceux qui n'ont pas de connaissances préalables en éléments finis. Son interface conviviale et ses fonctionnalités d'automatisation, telles que la détection automatique des interfaces de contact et la création de maillages, permettent une familiarisation rapide et efficace avec le logiciel.

IV-3 Le Maillage :

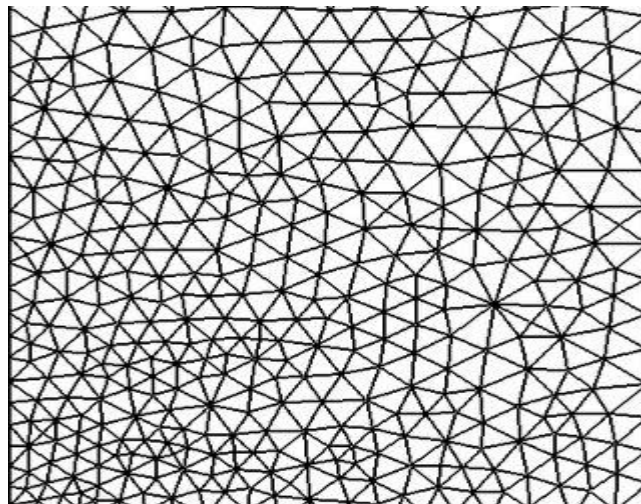
Le maillage, également connu sous le nom de génération de maillage, est le processus de génération d'une grille bidimensionnelle et tridimensionnelle; il divise des géométries complexes en éléments qui peuvent être utilisés pour discrétiser un domaine. Les capacités d'Ansys Mesh sont souvent désignées comme l'étalon-or pour la modélisation et la simulation de flux de travail pour le maillage de pièces complexes.[28]

Et il existe 5 types de maillage sont: Maillage Hexaédrique (ou Cartésien), Le maillage tétraédrique, Maillage Prismatique, Maillage Pyramidal et Maillage Mixte

CHAPITRE IV : Simulation numérique , résultats et discussion



Figure[IV-1] : Maillage hexadérique



Figure[IV-2] : Maillage tétraédrique

On a un pipe de type API-5L X56 à étudier représenté dans les tableaux [IV-1] et [IV-2]

Pipe	Mesures
Diamètre extérieur Dextre	168.3 mm
Diamètre intérieure Dint	154.08 mm
Longueur L	600 mm
Épaisseur t	7.11 mm

Tableau [IV-1] : dimension de pipe

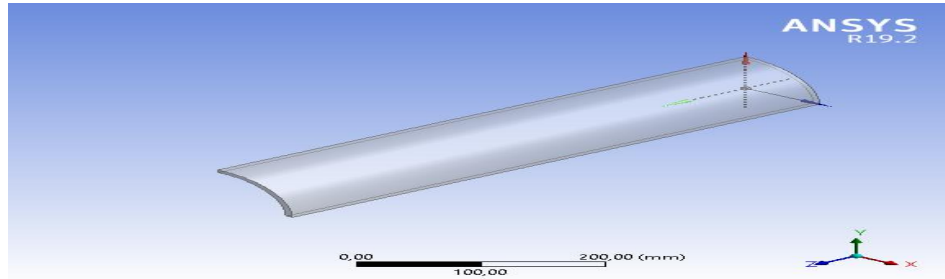
	Module de young	Limite d'élasticité	Contraint de traction ultime
pipe	210 Gpa	386 Mpa	625 Mpa

Tableau[IV-2] : Propriété mécanique de l'acier API-5L X56

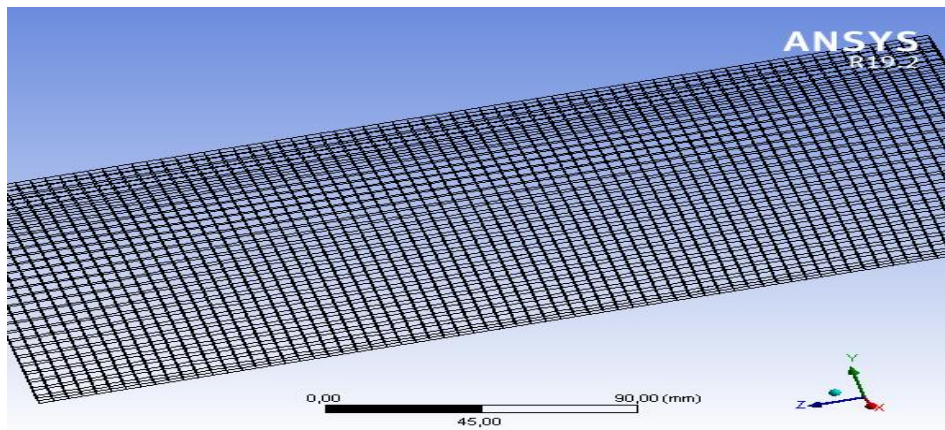
CHAPITRE IV : Simulation numérique , résultats et discussion

IV-4Modèle géométrique d'un pipe sans défaut :

Pour minimiser les calculs, nous allons utiliser dans notre simulation la technique de simulation par symétrie, notre géométrie sera donc un quart de pipe illustré sur la figure [IV-3]



Figure[IV-3] : Le modèle géométrique d'un quart pipe



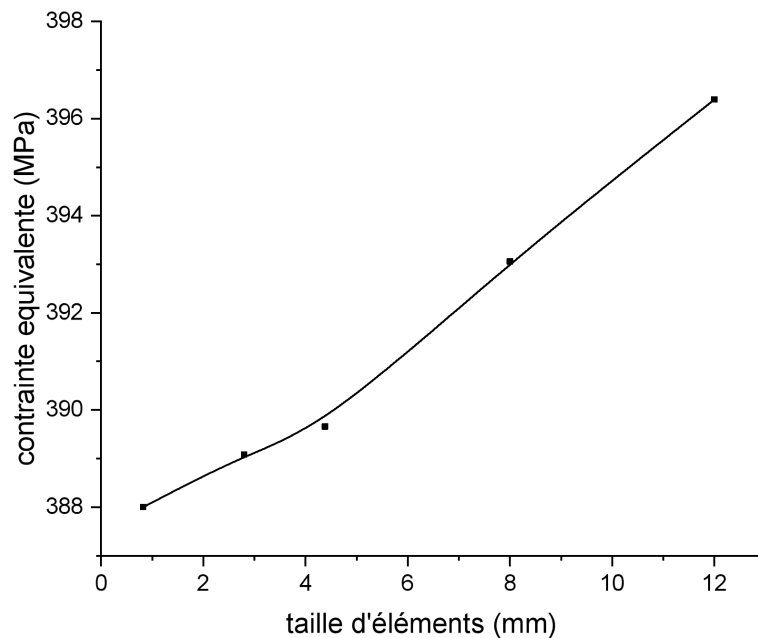
Figure[IV-4] : maillage Hédérrique

Le maillage effectué sur la structure pour la modélisation est hexadérrique de taille éléments 4,38mm il est représenté dans la figure IV.4 pour des résultats bien précis le maillage à calculer 4944 noueds .

Nous avons prédéterminé la taille des éléments a 4,38mm que nous trouvons la plus optimale pour la simulation avec un rapport (nombre d'élément/temps de calcul). Nous avons imposé une pression interne de 32,61 Mpa, nous obtenons les résultats suivants dans le tableau [IV-3].

Taille d'élément	Temps de calcul	Contrainte équivalente
0,82 mm	12min11s	388MPa
2,8 mm	3min20s	389,08MPa
4,38 mm	20s	389,66MPa
8 mm	7s	393,06MPa
12 mm	3,8s	396,39MPa

Tableau[IV-3] : Résultats obtenue pour chaque taille d'éléments.



Figure[IV-5] : courbe représentant la contrainte équivalente d'un pipeline en fonction de la taille d'éléments de maillage

L'analyse des simulations révèle trois valeurs de contrainte très proches, soit 388, 389.08 et 389.66 MPa, correspondant respectivement à des tailles d'éléments de 0.82, 2.8 et 4.38 mm. La différence de contrainte entre les éléments de 4.83 mm et 0.82 mm est de 1.66 MPa, mais le temps de calcul est réduit de 11 minutes et 50 secondes, rendant le choix d'une taille d'élément de 4.38 mm judicieux. En comparant les éléments de 4.38 mm à ceux de 2.8 mm, on constate que la taille plus grande offre un temps de calcul plus court tout en ne sacrifiant que 0.60 MPa en précision, ce qui représente un compromis très avantageux.

IV-5 Représentation de la géométrie du défaut :

Dans notre structure, on a modélisé la partie corrodé par un défaut qui a les dimensions suivantes : une longueur $L = 86,82$ mm, une largeur $S = 39,11$ mm et une épaisseur $e = 5.65$ mm.

CHAPITRE IV : Simulation numérique , résultats et discussion

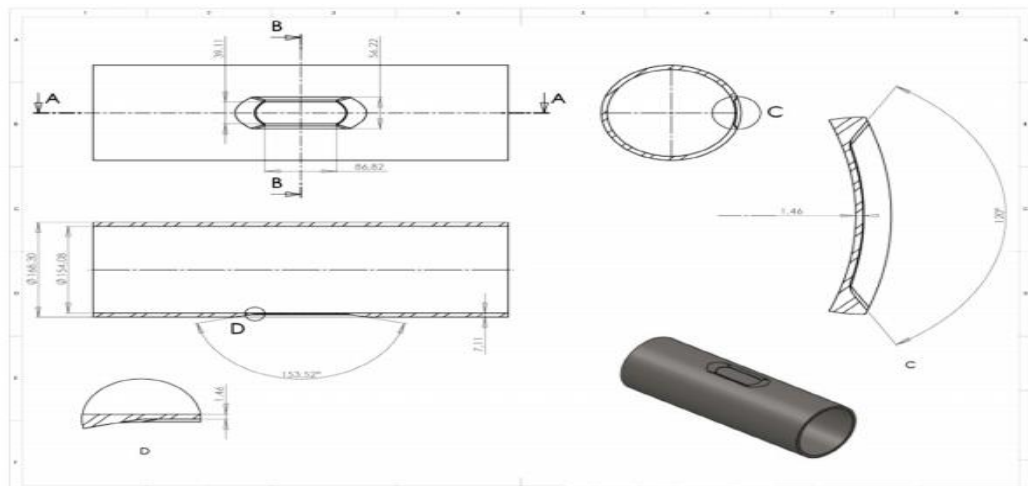
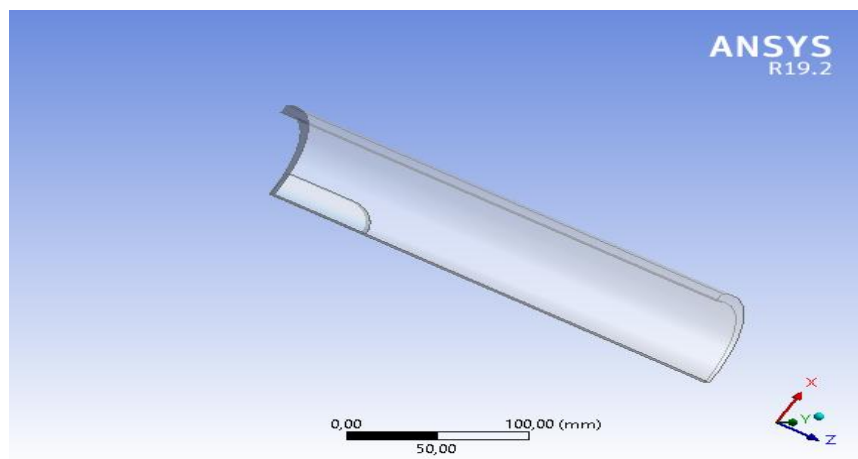


Figure [IV-6] : Dimension du défaut



Figure[IV-7] :un quart de pipe corrodé (avec défaut)

Un maillage automatique sera effectué sur la structure, le type d'élément utilisé pour la modélisation est Héxadérique. La figure[IV-8] représente le maillage de la structure.

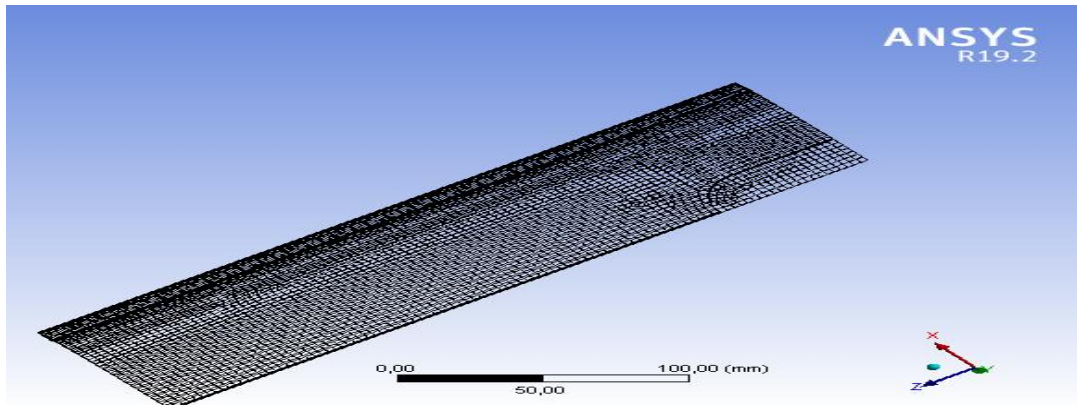


Figure [IV-8] : Maillage d'une pipe avec défaut

IV-6 Modélisation numérique d'un pipe comportant un défaut réparée par matériaux composite :

On réalise la réparation par remplissage de volume de la corrosion avec la résine (epoxy résine) puis l'entouré avec un bondage des fibres de verre .

matériaux	Density	Module de young	Ration de poisson	Résistance à la traction
Fibre de verre	2,55	72	0,21	3300
Epoxy resin	1,18	3,5	0,3	72

Tableaux[IV-4] : Caractéristiques mécaniques des fibres de verre

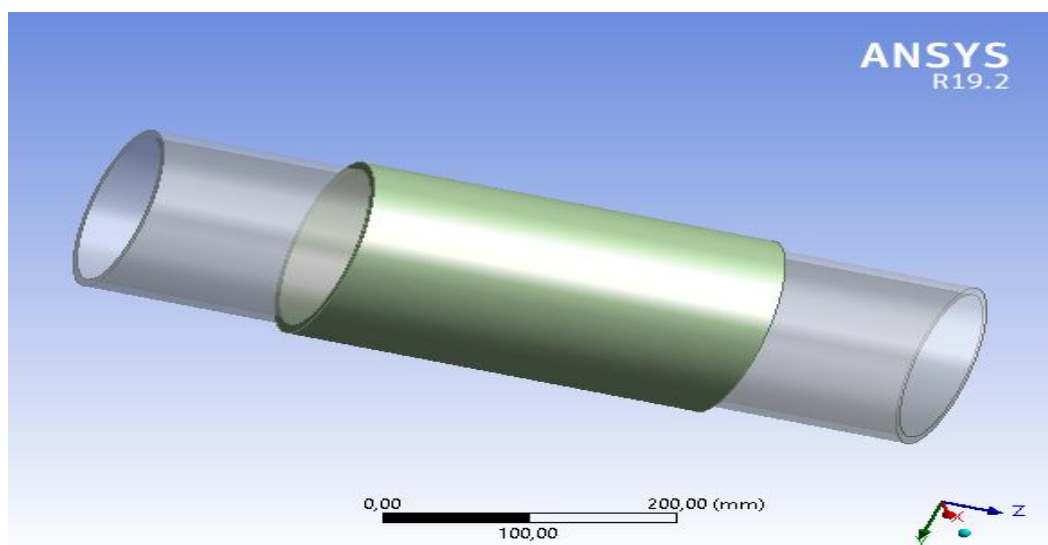


Figure [IV-9] : Modèle géométrique d'un pipe réparée par matériaux composites

CHAPITRE IV : Simulation numérique , résultats et discussion

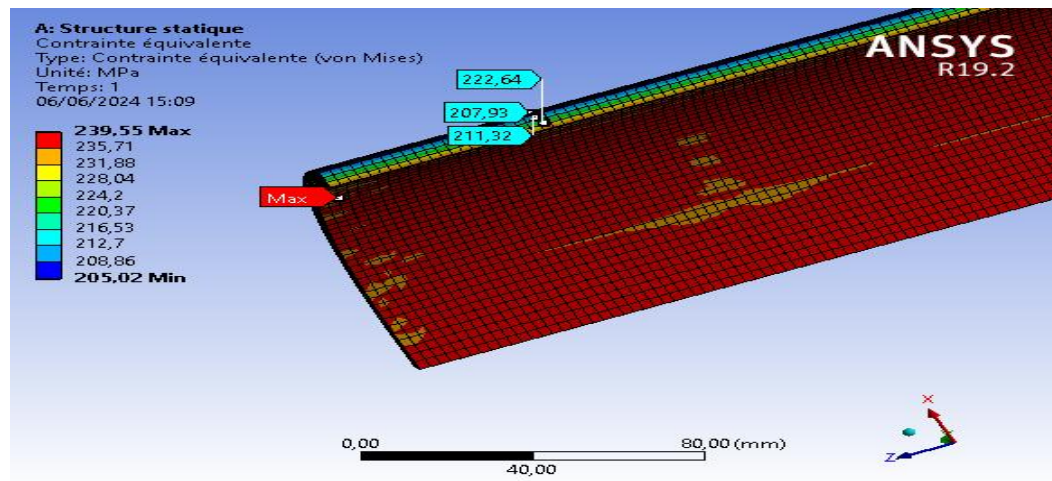
IV-7 Discussion et validation des résultats :

IV-7-1 l'influence de pression :

Dans cette partie, nous allons étudier l'influence de la pression interne sur la contrainte équivalente (Von-Mises) pour les différents cas de pipe (sain, corrodé, et réparé).

pipe sain :

Les figures [IV-10], [IV-11] et [IV-12] représentent la répartition de la contrainte équivalente d'un pipeline sain pour une pression interne telle que 20 MPa et 32,61 MPa et 40 MPa



Figure[IV-10] : Contrainte équivalente d'un pipe sain sous une pression interne de 20MPa

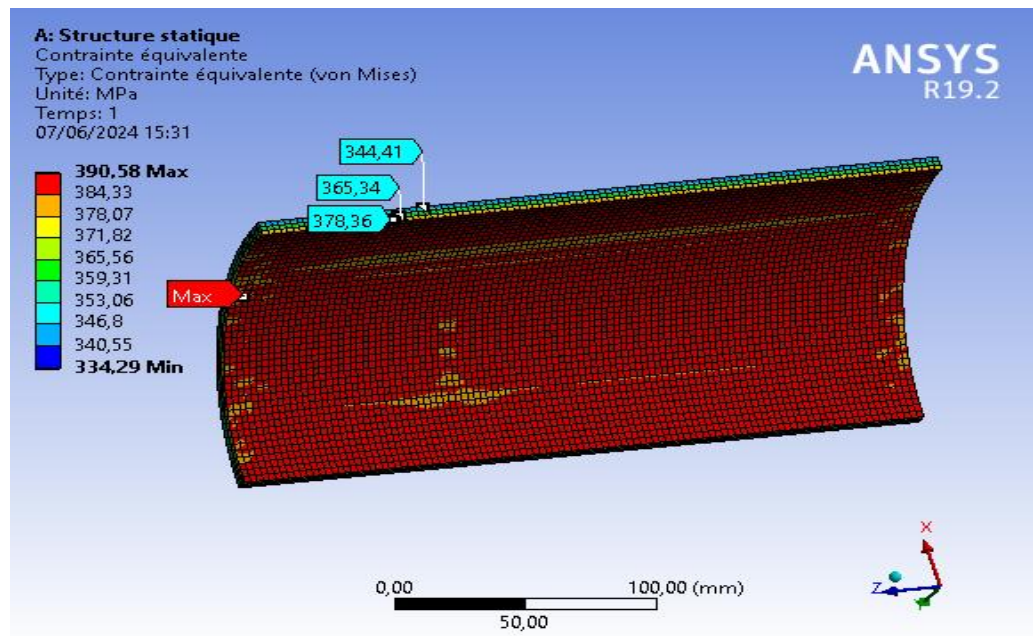


Figure [IV-11] : Contrainte équivalent d'un pipe sain sous une pression interne de 32,61MPa.

CHAPITRE IV : Simulation numérique , résultats et discussion

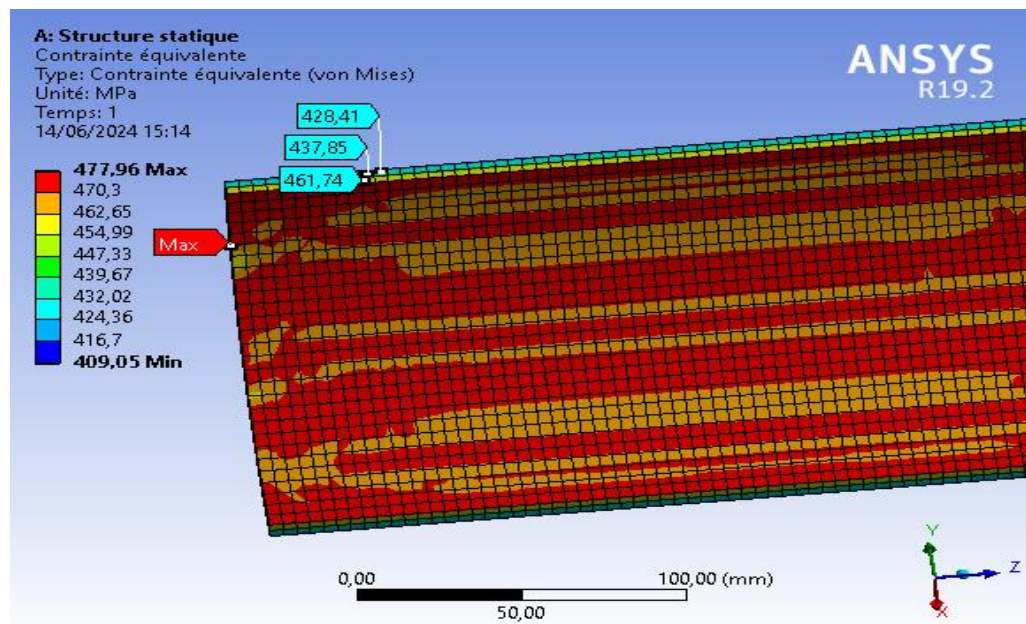


Figure [IV-12] : Contrainte équivalente d'un pipe sain sous une pression interne de 40MPa.

Les figures [IV-10], [IV-11] et [IV-12] illustrent l'augmentation de la contrainte équivalente en fonction de la pression interne. La valeur maximale de cette contrainte est observée sur la surface interne du pipeline, atteignant 239,55 MPa à une pression de 20 MPa, en raison de l'interaction directe avec la charge interne. Cette valeur diminue progressivement vers la surface externe, avec une contrainte minimale de 208,86 MPa. Lorsque la pression interne atteint 32,61 MPa, seuil ultime avant défaillance, la contrainte équivalente s'élève à 390,58 MPa, frôlant ainsi la limite d'élasticité du matériau fixée à 386 MPa. Ce point marque le début de la défaillance du pipeline. À une pression de 40 MPa, la contrainte dépasse nettement la limite d'élasticité, entraînant une rupture par éclatement du pipeline.

Résultats :

Nous ont fait une comparaison avec le travail de M. Khaisem qui va nous permettre de réaliser une validation et on remarque une petite différence de 1,17%. Ce qui est illustré dans le tableau IV.5

	Contrainte équivalente
Model présent	390,58 MPa
Model de M. Khaisem	386 MPa
différence	1,17%

Tableau[IV-5]Comparaison de résultat des deux méthodes du pipe sein

Pipe corrodé :

Les figures[IV-13] ,[IV-14]et [IV-15] représente la contrainte équivalente d'un pipeline avec un défaut d'une profondeur de 5,65 mm et une longueur de 86,82mm et

CHAPITRE IV : Simulation numérique , résultats et discussion

une largeur de 39,11mm pour une pression interne qui varie de 5 MPa et 32,61 MPa et 6,69MPa qui est une pression ultime du pipe corrodé d'après l'article .

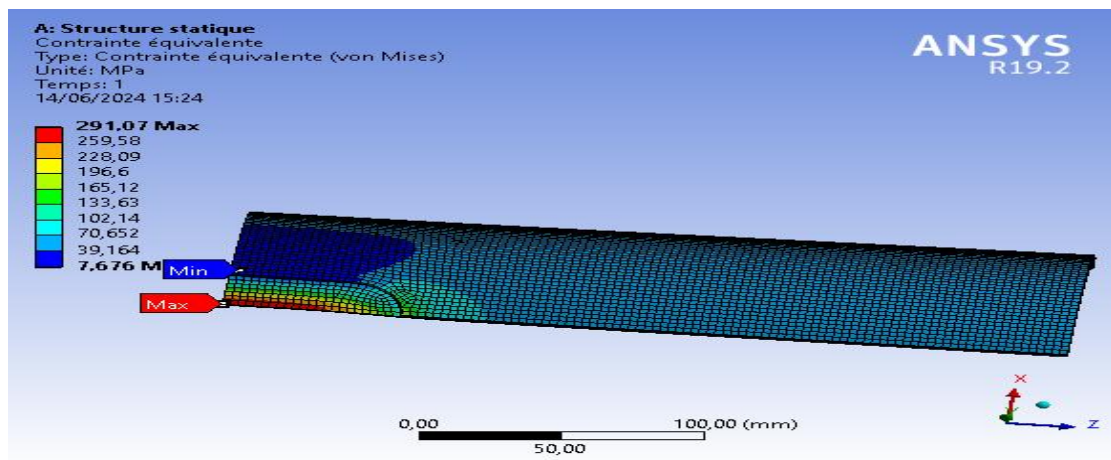


Figure [IV-13] : Contrainte équivalente d'un pipe corrodé sous une pression interne de 5 MPa

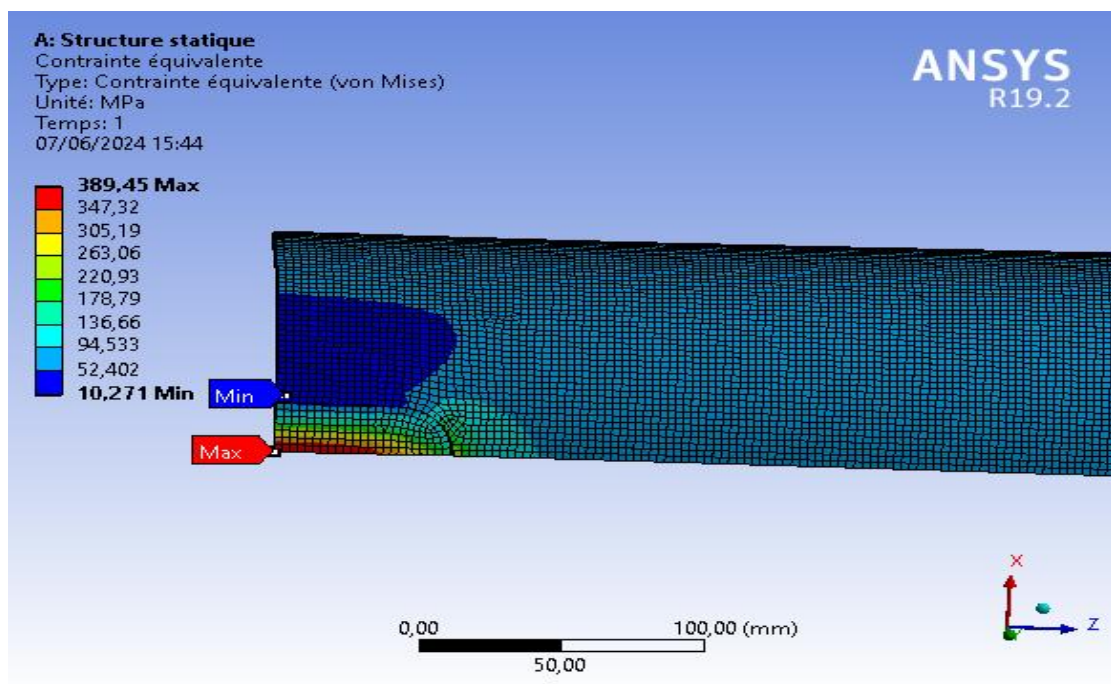
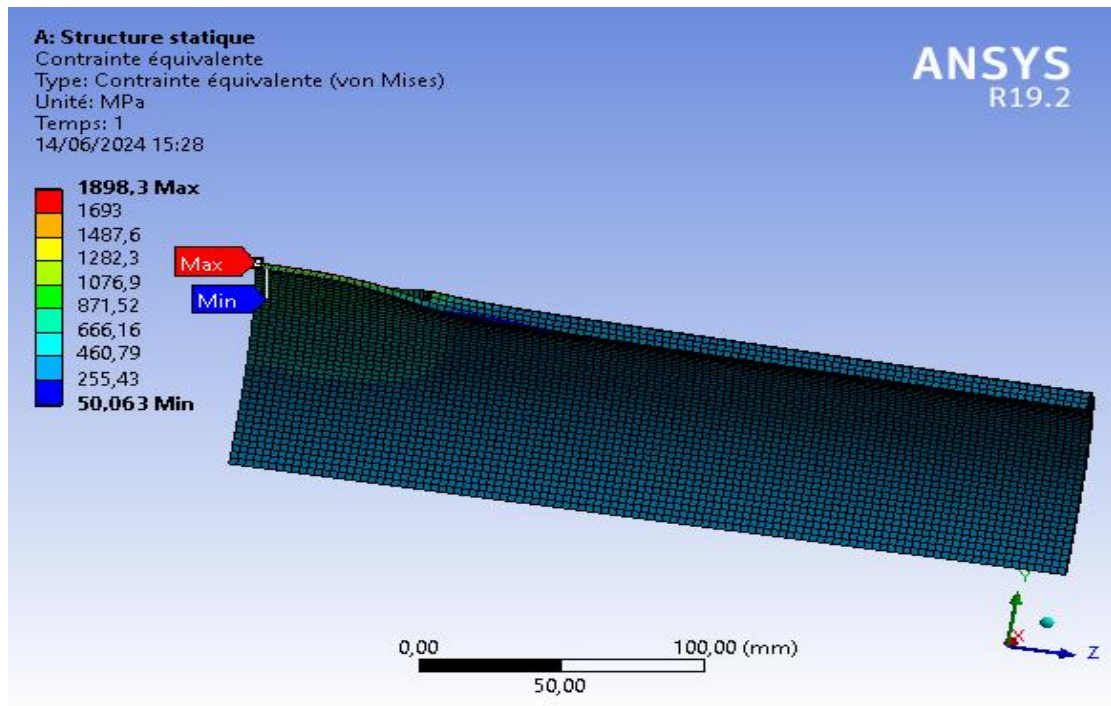


Figure [IV-14] : Contrainte équivalente d'un pipe corrodé sous une pression interne de 6,69 MPa

CHAPITRE IV : Simulation numérique , résultats et discussion



Figure[IV-15] : Contrainte équivalente d'un pipe corrodé sous une pression interne de 32,61MPa

Les figures [IV-13], [IV-14] et [IV-15] révèlent que la contrainte maximale se localise sous la zone corrodée, soulignant l'impact direct de la corrosion sur l'intégrité structurelle du pipeline. L'augmentation de la pression interne entraîne une hausse proportionnelle de la contrainte équivalente, risquant une défaillance mécanique par déformation ou éclatement si cette dernière surpasse la limite d'élasticité du matériau. La figure [IV-15] illustre ce phénomène, indiquant la nécessité d'une réparation lorsque la contrainte atteint des seuils critiques. En particulier, la figure [IV-14] montre une contrainte équivalente de 389,45 MPa sous une pression interne de 6,69 MPa, avoisinant dangereusement la limite d'élasticité de 386 MPa et marquant ainsi la pression ultime supportable par le pipeline corrodé avant défaillance.

Résultats :

Nous ont fait une comparaison avec le travail de M. Khaisem sur le pipe corrodé qui va nous permettre de réaliser une validation. Ce qui est illustré dans le tableau[IV-6]

	Contrainte equivalente
Model present	389,45MPa
Model de M. Khaisem	386MPa
deference	0,88%

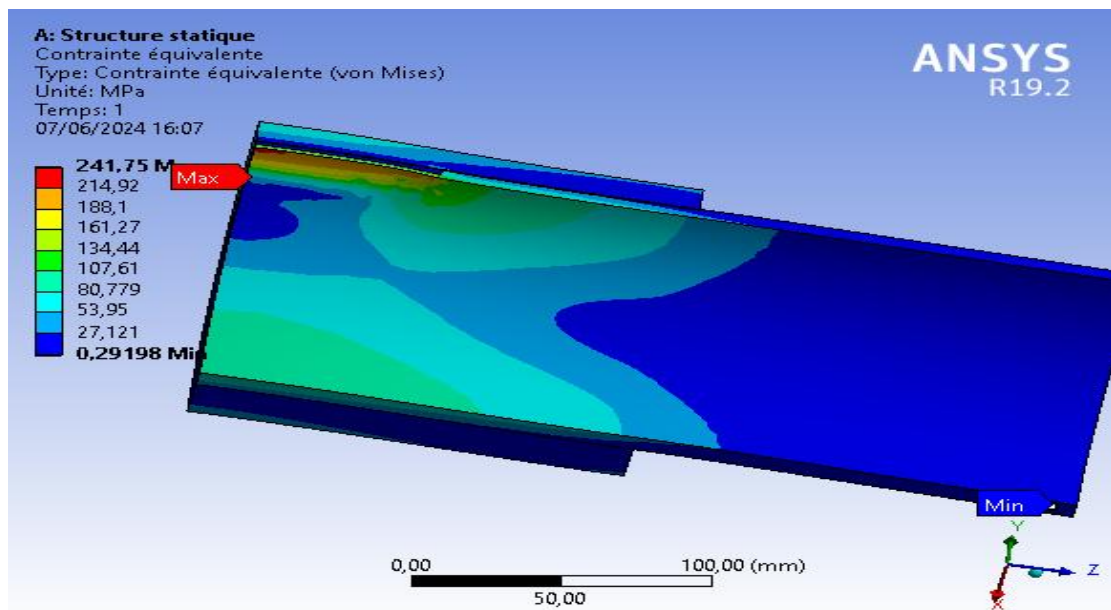
Tableau[IV-6] Comparaison de résultat des deux méthodes du pipe corrodé

Pipe réparé :

Les figures[IV-16],[IV-17] et[IV-18] représente la contrainte équivalente d'un pipeline avec un défaut d'une profondeur de 5,65 mm et une longueur de 86,82 et

CHAPITRE IV : Simulation numérique , résultats et discussion

largeure de 39,11mm réparé par matériaux composite d'épaisseur 16,2mm pour trois valeurs de la pression interne 20Mpa,32,61MPa et 40MPa .



Figure[IV-16] : Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous pression interne de 20Mpa

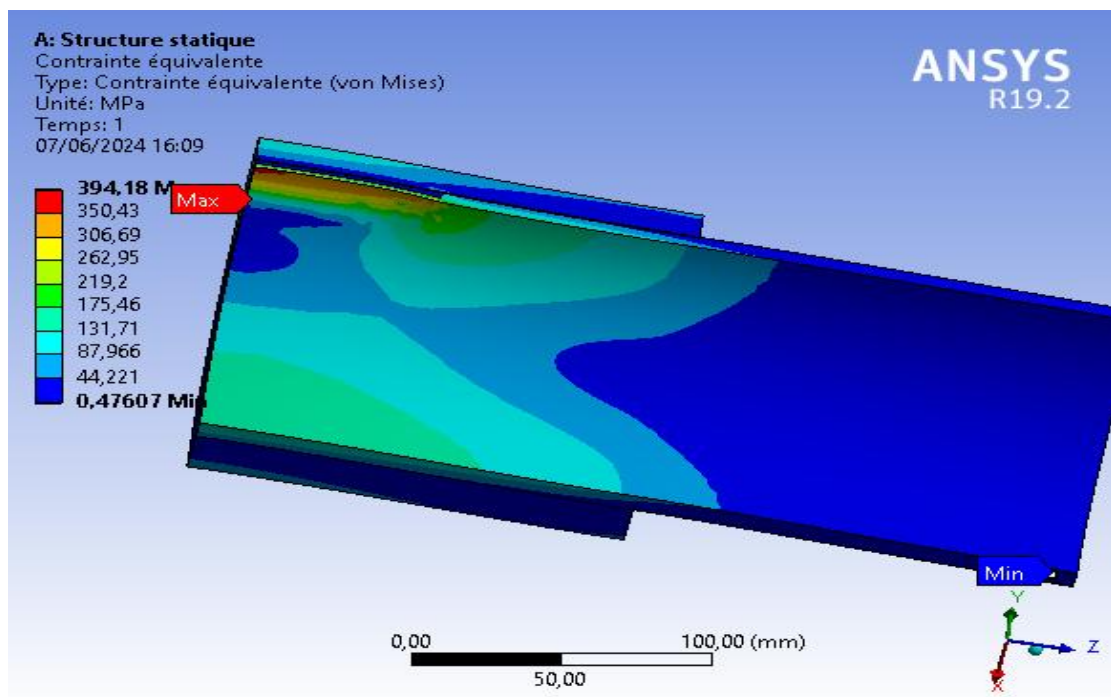
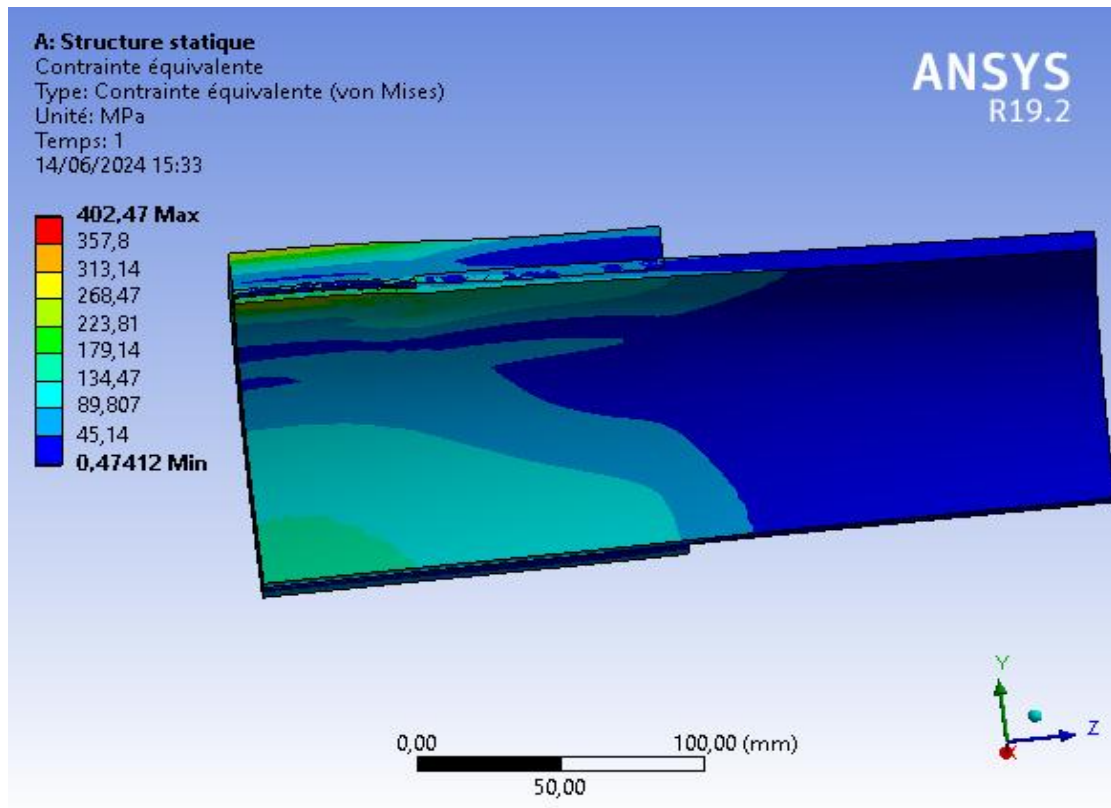


Figure [IV-17] : Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous pression interne de 32,61Mpa

CHAPITRE IV : Simulation numérique , résultats et discussion



Figure[IV-18] : Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous pression interne de 40Mpa

D'après les figures [IV-16], [IV-17] et [IV-18], nous observons une augmentation de la contrainte équivalente avec l'augmentation de la pression appliquée sur le pipeline réparé. Cette tendance est cohérente avec les résultats obtenus pour les cas sein. Il est également remarquable que les valeurs maximales de contrainte dans le cas du pipeline réparé sont presque équivalentes à celles du pipeline sain, ce qui démontre l'efficacité de la méthode de réparation utilisée. Cela peut être attribué à la bonne adhérence entre le matériau composite et l'acier, ainsi qu'à la distribution homogène des contraintes grâce à la conception optimisée de la réparation. Ces observations sont cruciales car elles valident l'intégrité structurelle du pipeline après réparation et renforcent la confiance dans l'utilisation des matériaux composites pour prolonger la durée de vie des infrastructures existantes. Ces résultats sont encourageants et ouvrent la voie à des études plus approfondies sur le comportement à long terme des réparations en composites sous diverses conditions de service, y compris les variations cycliques de pression et les impacts environnementaux tels que la corrosion interne et les changements de température.

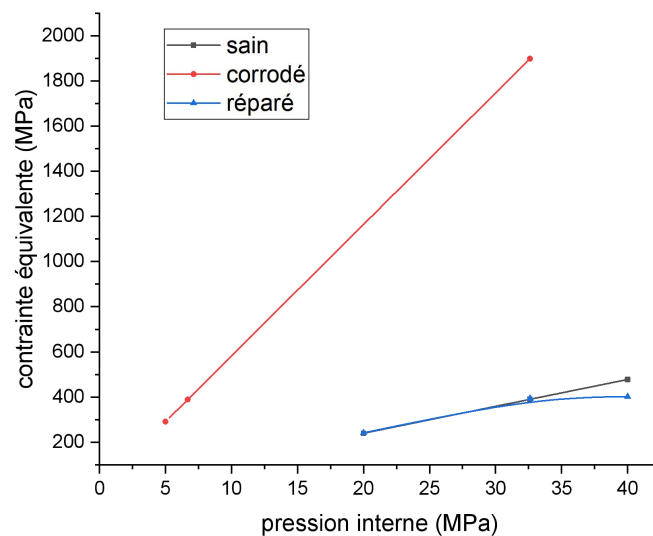
CHAPITRE IV : Simulation numérique , résultats et discussion

Résultats:

On fait la comparaison entre le pipe sein et le pipe corrodé de notre travail

	Contrainte équivalente
Model réparé	394,18Mpa
Model sain	390,58Mpa
différence	0,91%

Tableau [IV-7] : Comparaison des résultats de notre travail entre pipe sein et corrodé



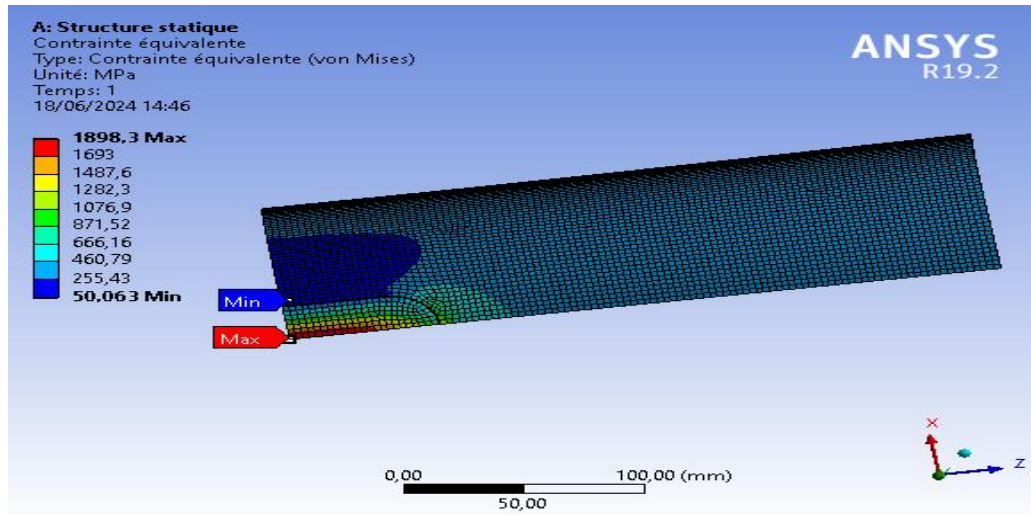
Figure[IV-19] : Contrainte equivalent en fonction de pression interne

D'après la figure [IV-19] On remarque que le pipe réparé devient mieux que le pipe sain donc la réparation est opérationnelle.

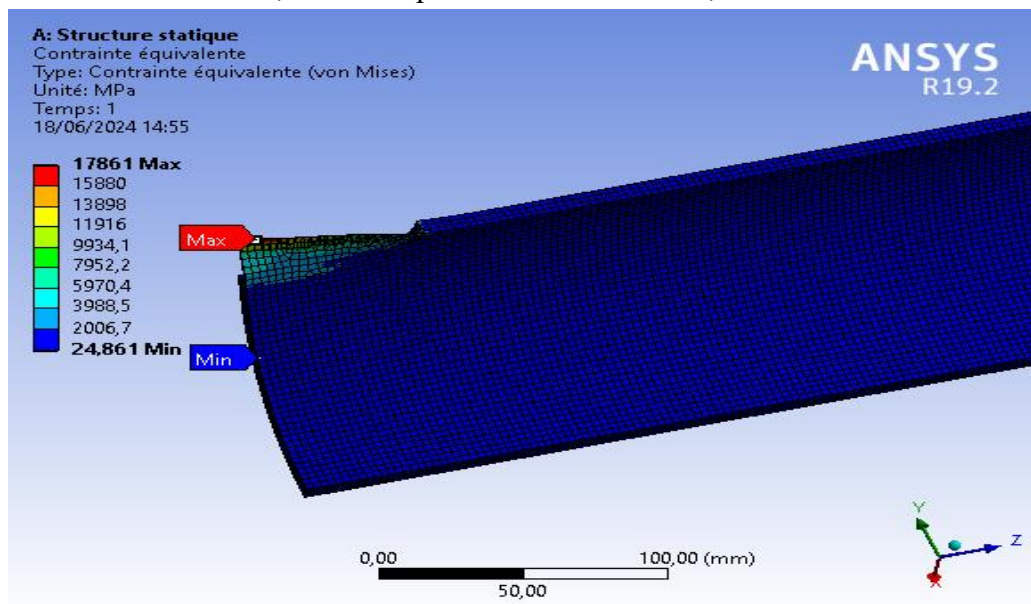
IV-7-2 L'effet de profondeur du défaut :

Pour observer l'effet du profondeur de corrosion sur l'évolution de la contrainte équivalente dans les extrémités de la zone corrodé. on a pris deux niveau de profond 5,65 mm et 7 mm pour un pipeline d'une épaisseur de 7,11 mm et une pression interne de 32,61 MPa .

CHAPITRE IV : Simulation numérique , résultats et discussion



Figure[IV-20] : Contrainte équivalente d'un pipe sous une pression interne de 32,61MPa et profondeur de défaut 5,65mm.



Figure[IV-21] : Contrainte équivalente d'un pipe sous une pression interne de 32,61MPa et profondeur de défaut 7mm.

L'analyse des figures IV-20 et IV-21 révèle une corrélation directe entre la profondeur du défaut dans le pipeline et l'augmentation de la contrainte équivalente. Cette relation indique que plus le défaut est profond, plus la concentration de contrainte autour du défaut est élevée, ce qui réduit la pression d'éclatement du pipeline. En d'autres termes, un défaut plus profond affaiblit la structure du pipeline, augmentant ainsi sa vulnérabilité aux dommages sous pression opérationnelle. Cette observation est cruciale car elle souligne l'importance de la détection précoce des défauts et de la réparation pour maintenir l'intégrité structurelle du pipeline. Elle met également en évidence le besoin de considérer la profondeur des défauts lors de la conception des stratégies de réparation, car elle influence directement la performance et la sécurité du système de pipeline.

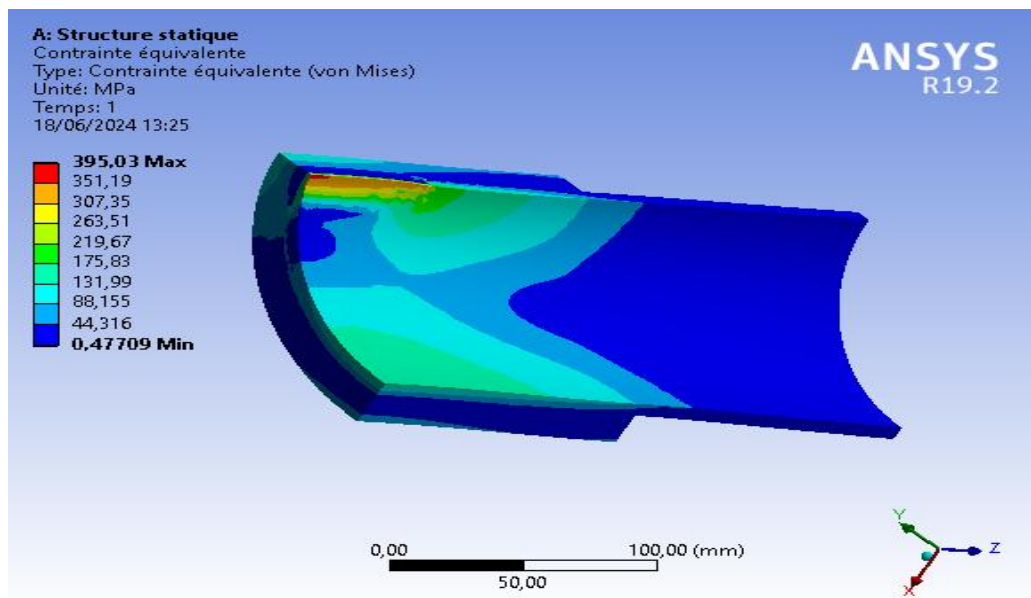
CHAPITRE IV : Simulation numérique , résultats et discussion

IV-7-3 Optimisation de l'épaisseur de réparation des composites :

Afin d'améliorer l'épaisseur du matériaux composite Et pour réduire les coûts de réparation, nous faisons une expérience pour réduire l'épaisseur de réparation, en tenant compte des résultats obtenus :

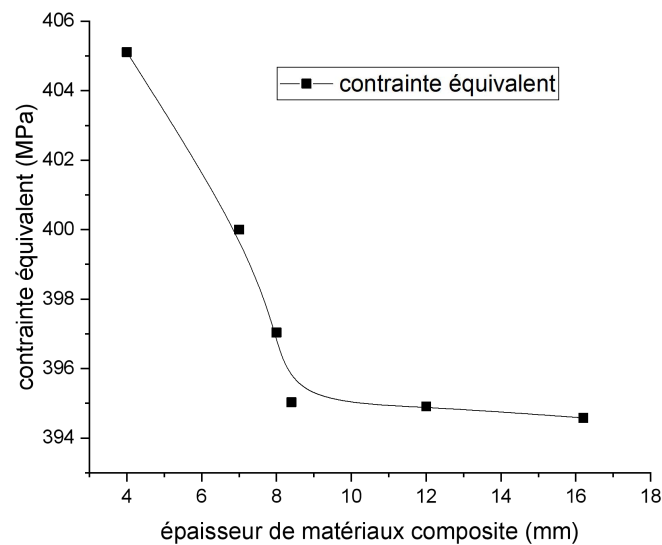
Épaisseur	Pression interne	Contrainte équivalente
16,2mm (utilisé par M.khaisem)	32,61 MPa	394,58 MPa
12mm	/	394,91 MPa
8,4mm	/	395,03 MPa
8mm	/	397,04 MPa
7mm	/	400MPa
4mm	/	405,11MPa

Tableau [IV-8] : Résultat obtenue pour chaque épaisseur



Figure[IV-22] : Contrainte équivalent d'un pipe réparé sous une pression de 32,61MPa et l'épaisseur du composite 8,4mm

CHAPITRE IV : Simulation numérique , résultats et discussion



Figure[IV-23] : Contrainte equivalent en fonction de L'épaisseur du matériaux composite

épaisseurs	Déférence d'épaisseurs %	Déférence de contrainte équivalente %
8,4 mm et 16,2 mm	48,14 %	0,11 %

Tableau [IV-9] : comparaison d'épaisseurs

L'examen de la courbe de la contrainte équivalente présentée sur la figure [IV-23] indique que les valeurs de contrainte pour les épaisseurs de réparation de 16,2 mm et 8,4 mm et 12mm sont comparables, suggérant une efficacité similaire dans la distribution des contraintes à ces épaisseurs. Cependant, une augmentation notable de la contrainte est observée pour des épaisseurs inférieures à 8,4 mm, ce qui implique une diminution de l'efficacité de la réparation. Par conséquent, il est déduit que 8,4 mm représente une épaisseur optimale qui équilibre efficacement la performance mécanique et l'économie de matériau. Cette épaisseur permet d'atteindre l'objectif de réduire les coûts sans compromettre l'intégrité structurelle du pipeline réparé.

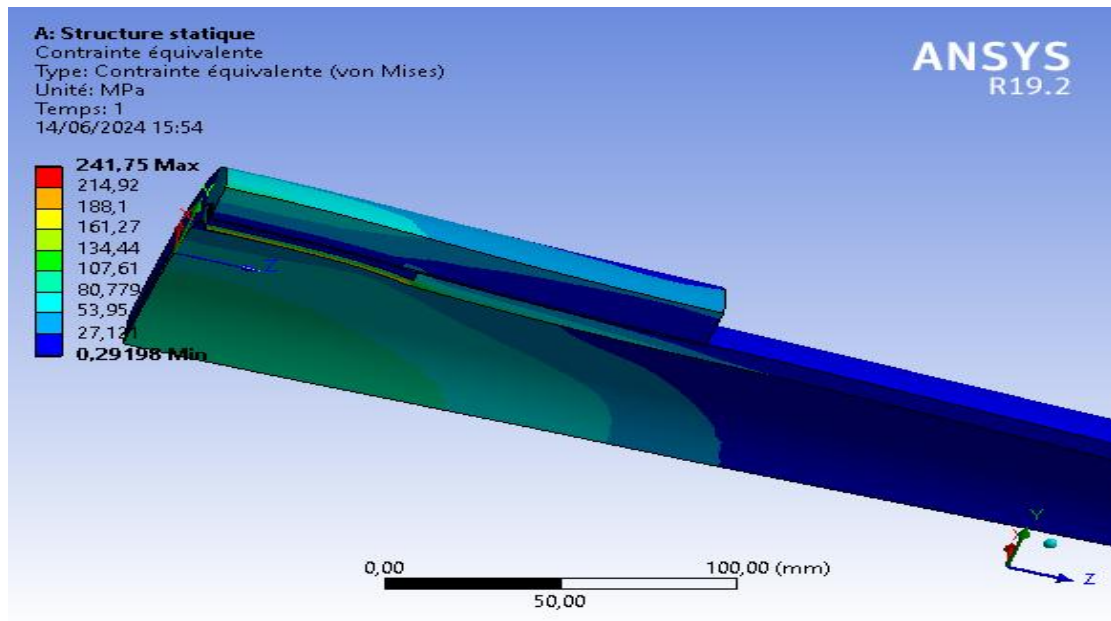
IV-7-4 Effet du choix de matériaux de réparation :

Dans cette partie, on a essayé de montrer l'importance du choix du type de matériaux composite, on a pris un pipe avec un défaut d'une épaisseur de 5,65mm réparé avec deux types de matériaux composite (Fibre de verre, Fibre de carbone)

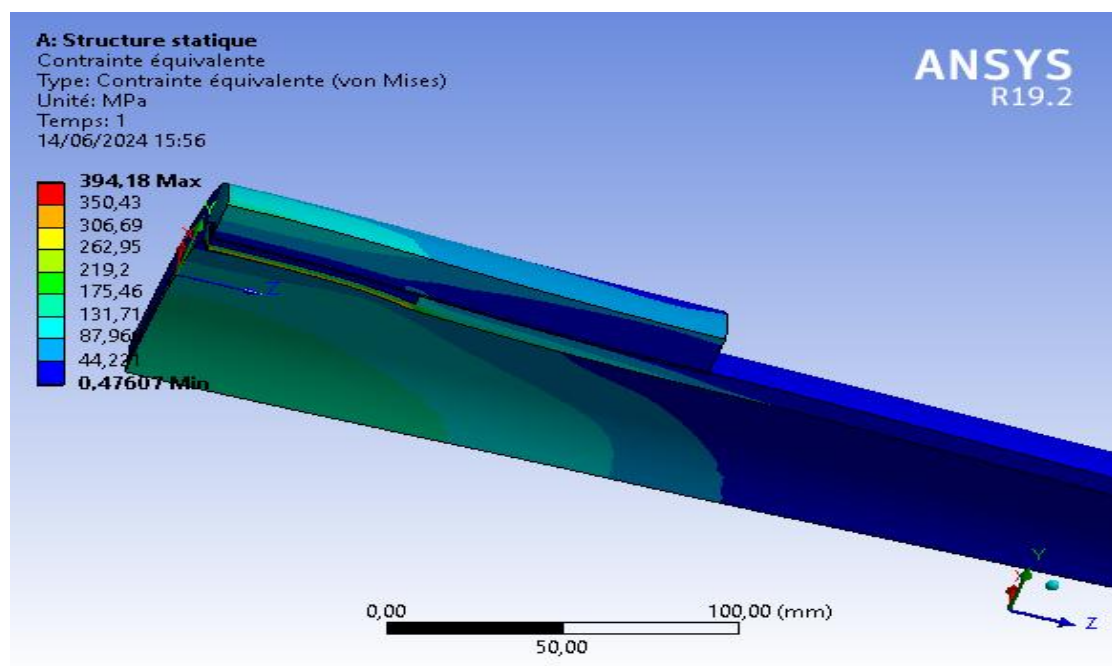
Fibre de verre :

Pour le premier cas on a choisi la fibre de verre comme un matériaux de réparation .

CHAPITRE IV : Simulation numérique , résultats et discussion

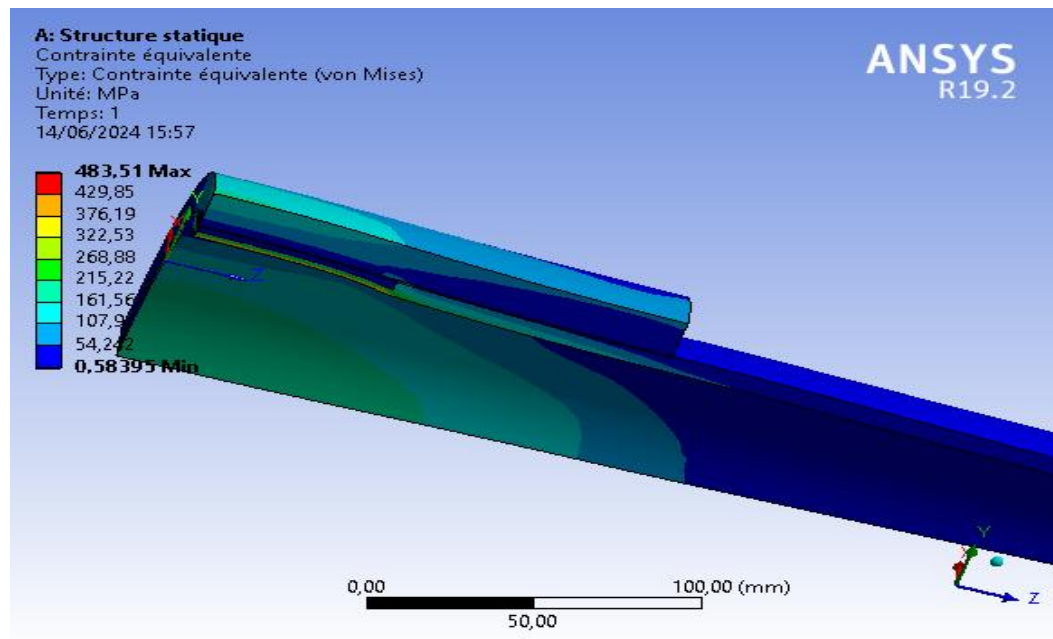


Figure[IV-24] : Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 20MPa



Figure[IV-25] : Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 32,61MPa

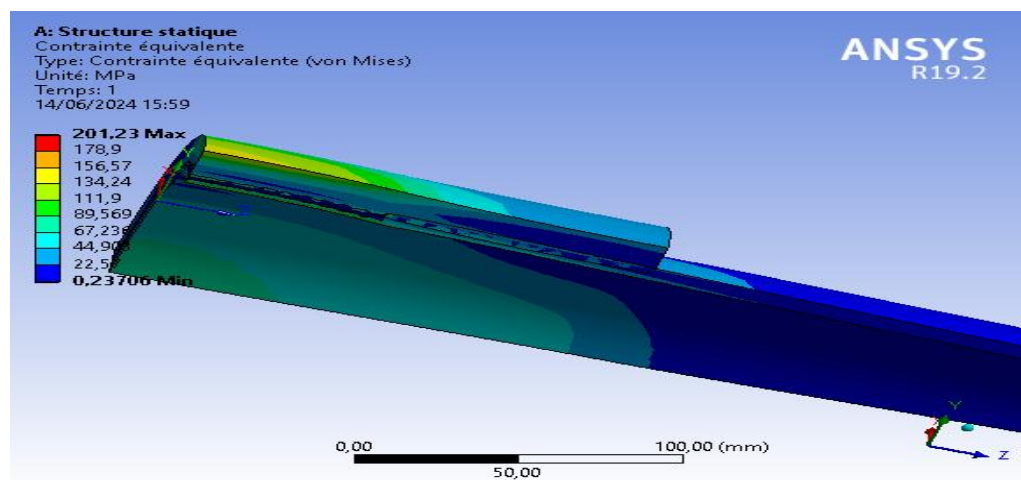
CHAPITRE IV : Simulation numérique , résultats et discussion



Figure[IV-26] : Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 40MPa

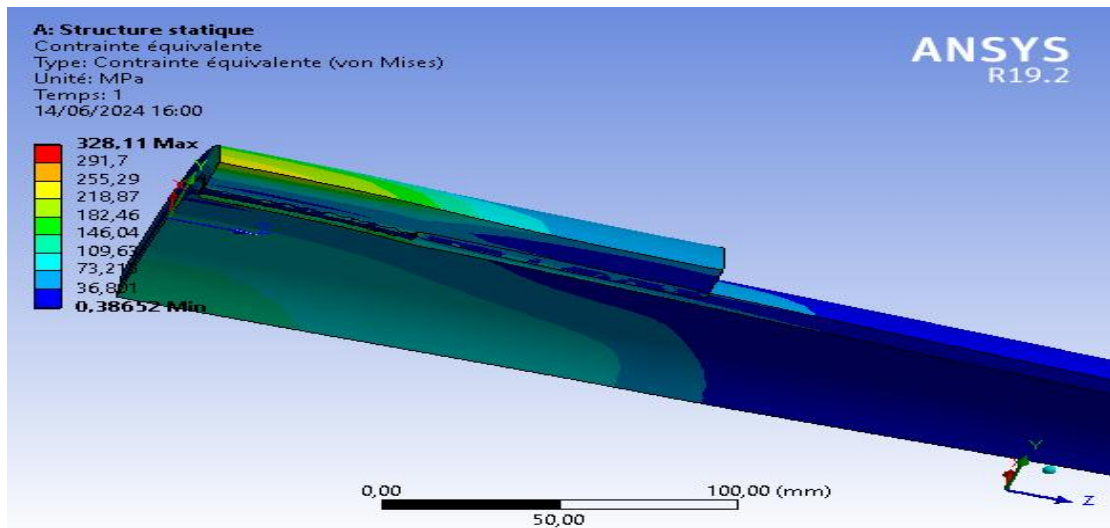
Fibre de carbone :

Dans ce cas le pipeline est réparé avec les fibres de carbone .



Figure[IV-27] : Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 20MPa

CHAPITRE IV : Simulation numérique , résultats et discussion



Figure[IV-28] : Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 32,61MPa

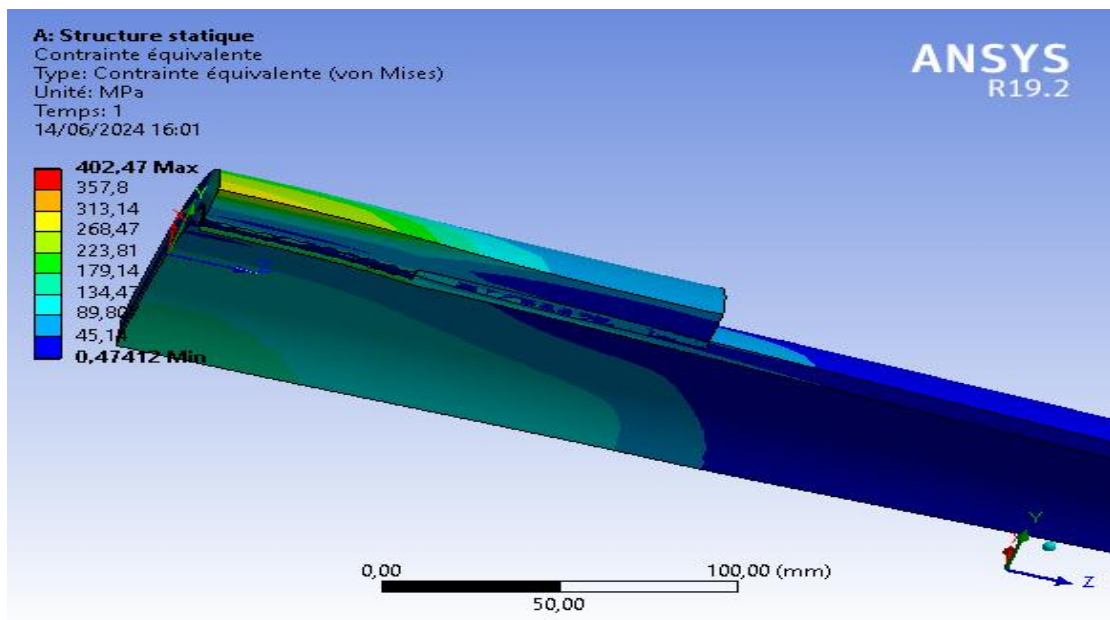


Figure [IV-29] : Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 40MPa

CHAPITRE IV : Simulation numérique , résultats et discussion

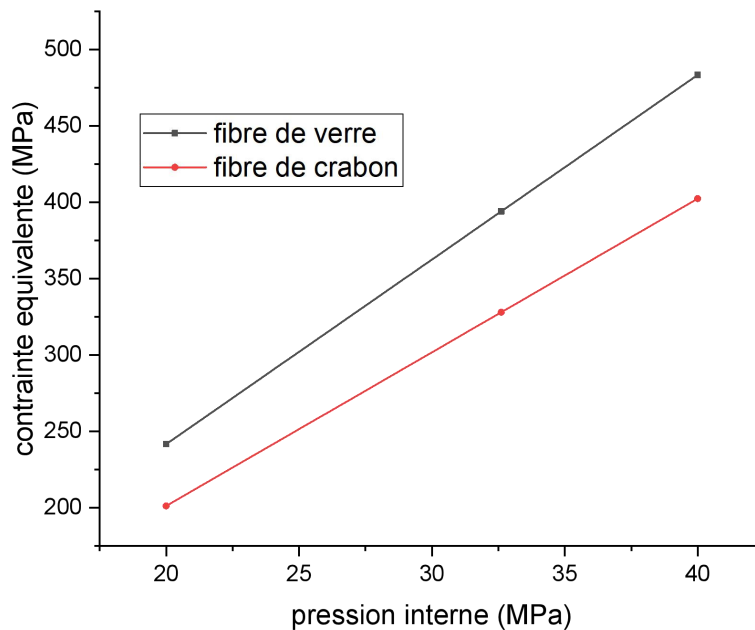


Figure [IV-30] : contrainte équivalente en fonction de pression interne

La figure [IV-30] est le résultat de l'expérience du effet du choix de matériaux composite pour la réparation et cette figure montre la contrainte équivalente d'un pipe réparé avec deux types de matériaux composite en fonction de pression interne on conclu que les fibres de carbone sont plus efficace que les fibres de verre pour la réparation des pipelines.

IV-8 conclusion:

Ce travail a eu pour but d'analyse de simulation numérique effectuée sur la structure mécanique du pipeline s'est articulée autour de trois axes :

- L'évaluation numérique d'un pipeline en acier sans défaut.
- L'évaluation numérique d'un pipeline présentant un défaut de corrosion .
- L'évaluation numérique d'un pipeline avec un défaut de corrosion, renforcé par un matériaux composite de type carbone-époxy, verre-époxy.

Dans un premier temps, nous avons analysé la structure du pipeline sans défaut en modifiant la pression interne. Ensuite, nous avons examiné la structure avec un défaut considéré comme une perte de métal due à la corrosion. Enfin, nous avons achevé cette simulation en évaluant la structure réparée avec un matériaux composite, en variant le type de matériau composite utilisé. L'étude a révélé que les structures présentant des défauts se caractérisent par une concentration de contraintes au niveau du défaut. Cela peut entraîner la propagation de l'anomalie et la détérioration de la structure, rendant nécessaire sa réparation.

CHAPITRE IV : Simulation numérique , résultats et discussion

Les résultats ont indiqué que la contrainte de Von Mises pour un pipeline réparé avec un matériau composite atteint presque la valeur équivalente à celle d'un pipeline sans défaut.

Conclusion

Générale :

CHAPITRE IV : Simulation numérique , résultats et discussion

Conclusion générale :

Ce mémoire avait pour but d'étudier à l'aide d'une simulation numérique les contraintes équivalentes d'un pipe sain, un pipe corrodé et un pipe réparé par deux matériaux composites et fait la comparaison.

L'étude de la contrainte équivalente d'un pipe sain et corrodé, a montré des résultats dont nous avons comparé avec le travail de M.khaisem pour effectué une validation.

Il existe plusieurs méthodes de réparation. Une des méthodes utilisées est de les renforcer par matériaux composites. Cette technologie a fait ses preuves dans le cas de canalisations présentant des défauts de corrosion. L'analyse numérique montre que cette technologie de réglage de pipeline renforcé a sa résistance initiale.

Nous avons remarqué que la contrainte équivalente augmente de manière significative avec le changement de pression interne de tuyau, ce qui indique l'effet de pression interne sur la réparation.

L'application des différents types de matériaux composites constituant le matériau de réparation (fibre de carbone, fibre de verre) révèle que les niveaux des contraintes équivalentes sont réduits, et selon les résultats la réparation en fibre de carbon est plus efficace par rapport au fibre de verre .

Au total, ce travail de mémoire vise principalement à montrer que l'application de cette méthode de réparation peut augmenter la résistance et la durée de vie de la canalisation.

Il est souhaitable d'étudier d'autre facteur comme l'influence de pression externe ou de la température.

Référence bibliographie:

CHAPITRE IV : Simulation numérique , résultats et discussion

[1] historique des pipelines par michel *Joanny-Furtin*

[2] MERCHERNENE ABDERRAHIM, Etude du comportement en fatigue des aciers pour pipelines, mémoire de master, Université ABOU BELKAID- TLEMCEN, octobre 2013.

[3] A. MECHERNENE, « Etude du comportement en fatigue des aciers pour pipelines », mémoire de master En Génie Mécanique. UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID-TLEMCEN, année 2016.

[4] 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.

[5][MERCHERNENE ABDERRAHIM, Etude du comportement en fatigue des aciers pour pipelines, mémoire de master, Université ABOU BELKAID- TLEMCEN, 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] Stéphane SAINSON, « Inspection en line des pipelines, édition TEC&DOC », 2007

[8] Marie- Pierre FOULC, José ALCORTA DURABILITE DES ASSEMBLAGES PAR COLLES : ETAT DE L'ART. (Module Ma5), 2008

[9]A. AL-Maghribi, « Comportement des matériaux composites à fibres courtes : applications à l'impact basse vitesse », thèse de doctorat, l'université Paul Sabatier, 2008.

[10]J.M. Berthelot. « Composite Matériels. Mechanical Behavior and Structural Analysis », New York ,1999.

[11] Laurent gormet, « Généralités sur les matériaux composites », ECN, Centre Nantes 2008.

[12] Hadadi. Manel, « Etude numérique avec comparaison expérimentale des propriétés » mémoire de magister, Université de Ferhat Abbas, Setif, Algérie.

[13] A. R. Blythe, « Electrical resistivity measurements of polymer materials », Poly Test, 4 195-209, 1984.

[14]P. V. Joeseph, G. Mathew, K. Joeseph, G. Groeninckx, S. Thomas, « Dynamic Mechanical Properties of short sisal fibre reinforced polypropylene composites », Comp. Part A. 34, 275-290, (2003).

[15]Caleyo F., Gonzalez J.L., Hallen J.M. A Study on the Reliability Assessment Methodology for Pipelines with Active Corrosion Defects. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2002. 79. 77-86.

[16]Schnerch, D.; Stanford, K.; Sumner, E.A.; Rizkalla, S. Strengthening Steel Structures and Bridges with High-Modulus Carbon Fiber-Reinforced Polymers Resin

CHAPITRE IV : Simulation numérique , résultats et discussion

Selection and Scaled Monopole Behavior. Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board 2004, 1892, 237–245. [CrossRef]

[17] da Costa Mattos, H.S., Reis, J. M. L., Paim, L. M., da Silva, M.L., Amorim, F. C. and Perrut, V.A. (2014). Analysis of a glass fibre reinforced polyurethane composite repair system for corroded pipelines at elevated temperatures, Compos. Struct., 114, pp.117-123.

[18] da Costa Mattos, H. S., Paim, L. M., and J. M. L. Reis. (2012). Analysis of burst tests and long- term hydrostatic tests in produced water pipelines, Eng. Fail. Anal., 22, pp. 128-140.

[19][Silvio DE BARROS, Sandip Budhe, M D Banea. Prediction of the burst pressure for defective pipelines using different semi-empirical models. Frattura ed Integrità Strutturale / Fracture and Structural Integrity, 2020, 14 (52), pp.137-147. [ff10.3221/IGF-ESIS.52.12ff. fihal-04256996ff](#)]

[20][Journal of Pipeline Science and Engineering 1 (2021) 1–16 Mechano-electrochemical interaction for pipeline corrosion: A review Yicheng Wang, Luyao Xu, Jialin Sun, Y. Frank Cheng*]

[21][Bhardwaj, U., Teixeira, A.P., Guedes Soares, C., 2021d. Uncertainty in collapse strength prediction of sandwich pipelines. In: 40th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2021).]

[22][Simulation Analysis of External Damage and Repair of the Gas Transmission Pipeline Xinhui Wang,1 Heng Li ,1 Bing Li,1 Jie Sheng ,2 Jinqiang Zhao,1 Yanlong Ding,1 and Duhui Lu1]

[23][M. Amara · O. Bouledroua · M. Hadj Meliani · Z. Azari · M. Tahar Abbess · G. Pluvinage · Z. Bozic Effect of corrosion damage on a pipeline burst pressure and repairing methods]

[24]M. Dubois, “Application des méthodes de calcul à l’admissibilité des défauts dans les appareils à pression”, Journée d’information SNCT-CETIM, France, 1995.

[25]R. khelif, « Effet de la corrosion et des contraintes résiduelles sur la fiabilité des pipelines », 12ème congrès de mécanique 21-24 avril 2015 Casablanca (Maroc).

[26]M.Fekih, « Etude sur la méthode de réparation des ouvrages métalliques par collage de matériau composite cas de la ligne de pipeline Gz1 40"», thèse de doctorat.

[27] M. Khaisem S. Budhe National Institute of Technology Calicut, 673601, India

[28]Loïc MARÉCHAL INRIA, Projet Gamma, Domaine de Voluceau, Rocquencourt, BP 105, 78153 Le Chesnay Cedex, France.

CHAPITRE IV : Simulation numérique , résultats et discussion

CHAPITRE IV : Simulation numérique , résultats et discussion

CHAPITRE IV : Simulation numérique , résultats et discussion