



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 Electromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electromécanique
Spécialité : Electromécanique Industrielle

Thème

Simulation Numérique de la Réparation par Matériaux Composite
d'un Pipeline Endommagé

Présenté et soutenu publiquement par :

Nom: BENAÏSSA Prénom: Said Abdelkader

Nom: LABLAK Prénom: Abdelwahed

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
...BOUHAFS Mohammed...	...MCB....IMSI.....	Président
...BELKACEM Belkacem....	...MCB....IMSI.....	Encadreur
...BOUHAMRI Nouredine...	...MCB....IMSI.....	Examineur

Septembre 2021

Remerciements

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

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

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

Dédicace

Je dédie ce mémoire

A cette source de tendresse, de patience et de générosité

A ma mère !!

A celui qui a toujours garni mes chemins avec la lumière....mon père

A ma famille pour le respect qu'ils m'ont toujours accordé

A mes amis pour une sincérité si merveilleuse ... jamais oubliable

A toute personne qui m'a aidé à franchir un horizon dans ma vie...

Benaissa said

Dédicace

Je dédie cet ouvrage

*À mes très chers parents, pour m'avoir mis au monde et pour m'avoir
accompagné tout le long de ma vie et m'orienter vers l'aboutissement de
mes études ;*

À mes frères et sœurs et amis qui ont su m'encourager ;

Lablak Abdelwahed

Sommaire

Remerciements	
Dédicaces	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Resume	

Introduction générale.....Error! Bookmark not defined.

CHAPITRE I : Généralité sur les Pipelines

I.1 Introduction.....Error! Bookmark not defined.

I.2 Pipeline.....Error! Bookmark not defined.

I.2.1 Définition d'un pipeline **Error! Bookmark not defined.**

I.2.2 Historique **Error! Bookmark not defined.**

I.2.3 Domaine d'utilisation **Error! Bookmark not defined.**

I.2.4 caractéristiques d'un pipeline **Error! Bookmark not defined.**

I.2.5 l'acier **Error! Bookmark not defined.**

I.2.6 Fabrication du pipeline **Error! Bookmark not defined.**

 I.2.6.1 Les tubes soudés sous la forme en spirale **Error! Bookmark not defined.**

 I.2.6.2 Les tubes soudés sous forme longitudinale..... **Error! Bookmark not defined.**

 I.2.6.3 Le tube formé sans soudure **Error! Bookmark not defined.**

I.3 l'endommagement de pipelineError! Bookmark not defined.

I.3.1 Les dommages mécaniques..... **Error! Bookmark not defined.**

I.3.2 Corrosion **Error! Bookmark not defined.**

 I.3.2.1 Définition **Error! Bookmark not defined.**

 I.3.2.2 Différents processus de la corrosion **Error! Bookmark not defined.**

 I.3.2.3 Corrosions électrochimiques **Error! Bookmark not defined.**

I.4 conclusion.....Error! Bookmark not defined.

CHAPITRE II : Les matériaux composites

II.1 introduction.....Error! Bookmark not defined.

II.2 les matériaux compositesError! Bookmark not defined.

II.2.1 définition	Error! Bookmark not defined.
II.2.2 Les type des mâtereaux composites	Error! Bookmark not defined.
II.3 Avantages du matériau composite.....	Error! Bookmark not defined.
II.4 les différentes formes de composite structuraux	Error! Bookmark not defined.
II.5 Application des matériaux composites	Error! Bookmark not defined.
II.6 Méthodes de réparation des pipelines par composite.....	Error! Bookmark not defined.
II.6.1 Réparation des pipelines par patch en composite	Error! Bookmark not defined.
II.6.1.1 Réparation par collage	Error! Bookmark not defined.
II.6.1.2 réparation par renforcement des fibres composites.....	Error! Bookmark not defined.
II.7 Conclusion.....	Error! Bookmark not defined.
CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique	
III.1 Introduction.....	Error! Bookmark not defined.
III.2 recherche bibliographique	Error! Bookmark not defined.
III.3 l'évaluation de l'état de déformation de la paroi de tuyau	Error! Bookmark not defined.
III.4 Calcul de la pression critique.....	Error! Bookmark not defined.
III.4.1 Norme ANSI/ASME B31G et sa modification ASME B31G Modifiée.....	Error! Bookmark not defined.
III.4.2 le calcul de RSF à l'aide de code NV RP-F101	Error! Bookmark not defined.
III.5 le calcul d'épaisseur	Error! Bookmark not defined.
III.6 le calcul de contrainte équivalente.....	Error! Bookmark not defined.
III.6 Conclusion	Error! Bookmark not defined.
CHAPITRE IV : Simulation numérique, résultats et discussions	
IV.1 introduction	Error! Bookmark not defined.
IV.2 Les méthodes numériques	Error! Bookmark not defined.
IV.2.1 Méthode des différences finis.....	Error! Bookmark not defined.
IV.2.2 Méthode des volumes finis	Error! Bookmark not defined.
IV.2.3 Méthode des éléments finis.....	Error! Bookmark not defined.
IV.3 Le maillage.....	Error! Bookmark not defined.
IV.3.1 Choix du type de maillage	Error! Bookmark not defined.
IV.4 Modélisation et simulation numérique.....	Error! Bookmark not defined.
IV.4.1 introduction sur la simulation	Error! Bookmark not defined.

IV.4.2 Représentation de la géométrie et caractéristiques mécanique	Error! Bookmark not defined.
IV.4.3 Modélisation numérique d'un tube sans défaut	Error! Bookmark not defined.
IV.4.4 Modélisation numérique d'un tube avec défaut	Error! Bookmark not defined.
IV.4.5 Modélisation numérique d'un tube après la réparation par collage en composite	Error! Bookmark not defined.
IV.5 Discussion des résultats	Error! Bookmark not defined.
IV.5.1 Validation des résultats	Error! Bookmark not defined.
IV.5.2 Résultats	Error! Bookmark not defined.
IV.6 l'influence de pression	Error! Bookmark not defined.
IV.7 Effet de choix de matériaux de réparation	Error! Bookmark not defined.
IV.8 Conclusion	Error! Bookmark not defined.
Conclusion générale	Error! Bookmark not defined.
Références bibliographiques	51

**Liste des figures
Et
Des tableaux**

Liste des figures :

Figure I.1. Pipeline dans l'environnement.

Figure I.2. Caractéristiques du tube.

Figure I.3. Les tubes soudés sous la forme en spirale.

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

Figure I.5. Fabrication de pipeline sans soudure.

Figure I.6. Photo réel d'un pipeline endommagé.

Figure I.7. Différente cause d'endommagement des pipelines.

Figure I.8. Photo réel d'une surface extérieure d'un pipeline corrodé.

Figure II.1. La structure d'un matériau composite.

Figure II.2. Diagramme représentant les différents types de matrices.

Figure II.3. Diagramme représentant les différents types de renfort.

Figure II.4. Composite à fibres courtes.

Figure II.5. Composite à fibres longues.

Figure II.6. Constitution d'un stratifié.

Figure II.7. Structure de sandwich.

Figure II.8. L'utilisation de mâtereaux composite dans l'avion.

Figure II.9. Réparation par composite d'un pipeline en acier.

Figure II.10. Emballage de composite flexible pour la réparation sous – marine.

Figure II.11. Réparation par renforcement composite type clockspring.

Figure III.1. Contrainte équivalente en fonction de l'angle de défaillance.

Figure III.2. Coupe micrographique d'un dommage d'impact avec délaminages et fissures Transverses dans un stratifié carbone/époxy d'empilement [02/+602/-602] s.

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

Figure III.4. Distribution de la contrainte circonférentielle par rapport au rayon adimensionnel des trois méthodes utilisées d'un graphite époxy T300/934.

Figure III.5. Evolution de la teneur en eau et de la déformation hygroscopique longitudinale dans différents points du matériau suivant (ox) et dans les positions des capteurs de l'humidité et de la déformation.

Figure III.6. La distribution de contraintes pour les tuyaux GRE en fonction de contrainte circonférentielle.

Figure III.7. Influence de la variation du diamètre de pipe sur le paramètre de flambement en fonction de l'angle d'orientation (θ°).

Figure III.8. Evolution de la contrainte radiale en fonction de l'épaisseur du tube pour une répartition uniforme de la température $T = 50^\circ\text{C}$.

Figure III.9. La déformation en fonction de charge appliquée avec et sans bondage en composite.

Figure III.10. Contrainte équivalente dans la paroi de tuyau pour des différentes tailles de CFRP.

Figure III.11. La relation entre la tension maximum et la profondeur de couverture.

Figure III.12. La contrainte maximum du tuyau en fonction de la pression interne.

Figure III.13. La conception de système de réparation par composite.

Figure III.14. Défaut parabolique.

Figure III.15. Défaut rectangulaire.

Figure III.16. Défaut de corrosion long selon une forme arbitraire selon le code ASME B31G modifiée.

Figure IV.1. Le modèle géométrique de pipe.

Figure IV.2. Le maillage tétraédrique de model.

Figure IV.3. Conditions aux limites considérées dans notre calcul.

Figure IV.4. Géométrie d'un défaut de corrosion rectangulaire dans un pipeline.

Figure IV.5. Modèle géométrique d'un pipe réparée par matériaux composites.

Figure IV.6. Contrainte Von Mises d'un pipe avec une $Drd = 0.3$.

Figure IV.7. Contrainte Von Mises d'un pipe avec un $Drd = 0.5$.

Figure IV.8. Contrainte Von Mises d'un pipe avec un $Drd = 0.7$.

Figure IV.9. Contrainte équivalente en fonction de Drd pour deux différentes méthodes.

Figure IV.10. Contrainte équivalente d'un pipe sain sous une pression interne de 5 MPa.

Figure IV.11. Contrainte équivalente d'un pipe sain sous une pression interne de 12.2 MPa.

Figure IV.12. Contrainte équivalente d'un pipe corrode sous une pression interne de 5 MPa.

Figure IV.13. Contrainte équivalente d'un pipe corrode sous une pression interne de 12.2 MPa.

Figure IV.14. Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 5 MPa.

Figure IV.15. Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 10 MPa.

Figure IV.16. Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 12.2 MPa.

Figure IV.17. Contrainte équivalente en fonction de pression interne.

Figure IV.18. Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 10 MPa.

Figure IV.19. Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 15 MPa.

Figure IV.20. Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 20 MPa.

Figure IV.21. Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 5 MPa.

Figure IV.22. Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 10 MPa.

Figure IV.23. Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 12.2 MPa.

Figure IV.24. Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 15 MPa.

Figure IV.25. Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 20 MPa.

Figure IV.26. Contrainte équivalente en fonction de pression interne

Liste des tableaux :

Tableau III.1. Propriété des matériaux composite.

Tableau IV.1. Géométrie des pipelines.

Tableau IV.2. Propriété mécanique de l'acier API 290L X42.

Tableau IV.3. Caractéristiques mécaniques des fibres de carbone et les fibres de verre.

Tableau IV.4. Caractéristiques mécaniques de Résine Epoxy.

Tableau IV.5. Comparaison de résultat des deux méthodes.

Nomenclature

Nomenclature

Liste des symboles :

symboles	signification	Unité
b_p	rayon extérieur	mm
a_p	rayon intérieur	mm
t_{rp}	l'épaisseur relative de pipeline	mm
D_e	l'épaisseur nominale de la paroi	mm
E_p	module de Young	MPa
μ_p	coefficient de poisson	MPa
R_{mp}	limite d'élasticité	MPa
R_{yp}	la résistance a la traction	MPa
σ_{ap}	Contraint nominal	MPa
p_{ao}	pression d'opération	MPa
f_d	Facteur de service	-
D_{rd}	profondeur relative du défaut	-
S_p	longueur du défaut	mm
RSF	Remaining Strength Factor	-
M	Facteur de Folias	-
p_d	pression critique	MPa
t_{cw}	l'épaisseur de composite	mm
a_{ep}	rayons intérieur équivalant de paroi	mm
b_{ep}	rayons extérieure équivalant de paroi	mm
t_{ep}	l'épaisseur équivalente de paroi	mm
σ_f	La contrainte d'écoulement	MPa
σ_e	La limite d'élasticité	MPa
σ_u	La contrainte de résistance à la traction du matériau	MPa

Liste des abréviations :

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

Résumé

Résumé :

Le pipeline est une Canalisation servant au transport de fluides et de produits fluidifiés sur de longues distances. Le pipeline est sensible à la corrosion, lorsque le métal réagit avec l'environnement. Il se produit une corrosion. Sans protection, le pipeline se corrodera avec le temps.

Notre travail comprend une simulation numérique d'un pipeline en acier x42/L290 après des dommages causés par la corrosion locale. Le procédé consiste à considérer la structure de pipeline sans défaut et à introduire des défauts rectangulaires en variant la pression interne de pipeline et l'épaisseur du défaut.

Les résultats de cette méthode obtenus avec logicielle ANSYS montrent l'efficacité de l'utilisation de patch composite pour réparer le pipeline.

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

INTRODUCTION GENERALE

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 ces 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 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 présente 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 verra 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 c'est différent 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 composites et la deuxième partie s'agit d'une étude analytique sur l'état de déformation de la paroi de tuyau en fin on détermine les lois expérimentales qui nous permettent de calculer la pression critique et l'épaisseur de composite nécessaire pour la réparation de pipeline.
- Dans le quatrième chapitre, dans la première partie, la méthode des éléments finis est utilisée pour modéliser numériquement le comportement de la structure sans défaut et défectueuse, et quand la canalisation est réparée avec le patch de matériau composite.

Introduction générale

- La deuxième partie est faite pour la 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

I.1 Introduction :

Les pipelines affectent la vie quotidienne des gens dans la plupart des régions du monde. La vie moderne repose sur des structures dans lesquelles l'énergie joue un rôle prépondérant. Le pétrole et le gaz sont les principaux acteurs de cet approvisionnement énergétique. Cependant, l'utilisation d'autres formes d'énergie (telles que l'hydrogène, la biomasse, etc.) s'est poursuivie et continuera à dominer l'utilisation de l'énergie à l'avenir, en fonction de l'acceptabilité, de la sécurité, de la technique. Cependant, les pipelines sont des moyens par lesquels la plupart de ces formes d'énergie sont transportées. Ce n'est pas un hasard si partout où il y a le plus grand réseau de pipelines, il y a aussi le plus haut niveau de vie et le progrès technologique.

Par rapport à d'autres formes de transport, les pipelines permettent un approvisionnement en énergie de gaz naturel plus continu, stable et de grande capacité pour atteindre les utilisateurs finaux. Le transport par pipeline présente l'avantage d'être bien établi, rentable et facilement extensible. Sa technologie est bien connue. Le coût en capital d'un projet de pipeline est en grande partie fonction de son diamètre et de sa longueur, bien que d'autres facteurs tels que la géographie et la topographie soient également importants. Les dépenses d'exploitation et l'autoconsommation de produits sont relativement mineures et prévisibles. La faisabilité économique d'un pipeline est limitée par des variables telles que les volumes à transporter, les relations entre l'offre et la demande, la pression d'exploitation, la durée de vie prévue de la réserve et divers facteurs de risque. Ces limitations sont plus restrictives offshore qu'on shore [1]

I.2 Pipeline :

I.2.1 Définition d'un pipeline :

Une canalisation, ou un pipeline (de l'anglais) est une conduite destinée à l'acheminement de matières gazeuses, liquides, solides ou polyphasiques d'un endroit à un autre. Le diamètre nominal d'une canalisation peut aller de trente millimètres environ (un pouce un quart) pour des fluides spéciaux jusqu'à plus de trois mètres vingt (soixante-huit pouces) pour les adductions d'eau.



Figure I.1. Pipeline dans l'environnement

CHAPITRE I : Généralité sur les Pipelines

I.2.2 Historique :

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 XIXe siècle, en 1878-1880 près de Bakou. [2]

I.2.3 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'oxygénoduc ou d'oxyduc.
- Pour l'hydrogène on utilise le terme d'hydrogénoduc.

I.2.4 caractéristiques d'un pipeline :

La plupart des pipelines sont faits d'acier, bien que le plastique et l'aluminium soient parfois utilisés pour les réseaux de distribution de gaz naturel. Les pipelines d'acier sont fabriqués en soudant de courtes sections de tuyaux les uns aux autres (20m). Après la radioscopie de l'assemblage, le tuyau est ensuite enveloppé d'une couche protectrice avant d'être enterré. Tous les pipelines, sans exception, font l'objet d'une inspection en plus d'être soumis à une épreuve de pression avant leur utilisation. Ses caractéristiques principales (diamètres, épaisseur, type d'acier, spécifications de construction, température d'exploitation...) sont régies par tout un ensemble de règles et font l'objet de multiples calculs et de compromis économiques. Le diamètre d'une canalisation est déterminé en fonction du débit des produits à acheminer, de leur viscosité et de leur densité, 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. [3]

Lorsque les considérations technico-économiques ont ainsi permis de fixer le diamètre, et d'ailleurs 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

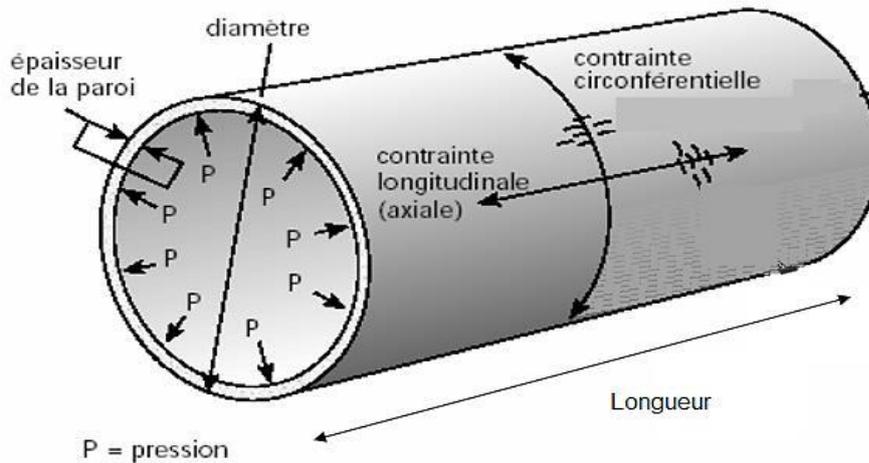


Figure I.2. Caractéristiques du tube [4]

Les autorités administratives des différents pays responsables de la sécurité des populations dont le territoire est traversé par les pipelines, ne restent pas indifférentes à ces calculs qui déterminent le niveau de sûreté de l'installation. Dans la plupart des pays où l'on pose des pipelines, des règlements fixent les lois générales que doivent suivre les constructeurs et les installateurs. Ces réglementations reposent sur les notions de pression maximum de service, de coefficient de sécurité et d'autres conditions de construction comme le mode d'inspection des tubes, les modalités des essais sous pression devant être menées à bien avant la mise en service de toute canalisation, les dispositions spéciales de protection à prendre contre les fuites dans les zones où celles-ci auraient des conséquences particulièrement dangereuses).

I.2.5 l'acier :

L'acier est un alliage de fer et de carbone renfermant au maximum 2 % de ce dernier élément. La fonte contient, quant à elle, de 2 à 5 % de carbone. Contrairement à cette dernière, l'acier est un métal ductile: il peut subir des changements de forme par compression ou extension à chaud ou à froid. Il est caractérisé par une propriété fondamentale : il « prend la trempe », c'est-à-dire qu'il est susceptible d'acquérir une grande dureté lorsqu'il est chauffé à une température suffisamment élevée et refroidi à une vitesse assez grande.

Un des défauts majeurs des aciers ordinaires est l'altération par l'action de l'atmosphère et, plus encore, par l'action des divers produits au contact desquels ils peuvent se trouver. La rouille est la première manifestation de cette altération, mais des attaques beaucoup plus profondes peuvent se produire par l'action de gaz ou de liquides plus réactifs.

I.2.6 Fabrication du pipeline :

On retrouve des réseaux de transport des hydrocarbures sous les formes suivant : [4]

I.2.6.1 Les tubes soudés sous la forme en spirale :

CHAPITRE I : Généralité sur les Pipelines

Les machines de l'unité ALPHAPIPE peuvent traiter des aciers laminés à chaud à très hautes limites d'élasticité dans les nuances X60 à X70. Les bobines utilisées pour la fabrication des tubes spirale sont livrées brutes, ces approvisionnement proviennent principalement de l'Allemagne ou la France. Les bobines utilisées peuvent avoir une épaisseur de 5 à 15 mm, une largeur de 600 à 1800, un poids compris entre 29 et 36 tonnes. Cette unité est conçue pour la transformation à froid des bobines de tôle en tubes soudés en spirales.



Figure I.3. Les tubes soudés sous la forme en spirale [4]

I.2.6.2 Les tubes soudés sous forme longitudinale :

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



Figure I.4. a) : Craquage b): Formage sous forme "U" c): Formage sous forme "O". [5]

a) Craquage et formage: La plaque va être pliée au niveau de l'extrémité, l'objectif de cette opération est de faciliter le processus de pliage par les étapes suivantes, à partir de cela, la tôle ou la plaque unitaire est pliée en deux types de presses : la première confère la plaque sous forme "U" et la seconde lui donne une forme "O"

b) Le soudage du tube : Il s'agit du soudage à l'air submergé sous flux (SAW). Deux tâches de soudage sont effectuées, une à l'extérieur et l'autre à une demi- spire en avant à l'intérieur des tubes à l'accostage des vives.

CHAPITRE I : Généralité sur les Pipelines

c) **Expansion et calibrage** : l'objectif essentiel à atteindre par cette opération est d'avoir des tubes de section parfaitement circulaire, qui subit une augmentation de diamètre de 1 à 1.5%

I.2.6.3 Le tube formé sans soudure :

Les tubes sans soudure sont des produits tubulaires en acier forgés sans ligne de soudure, seront obtenus à partir d'une ébauche cylindrique par un travail du métal à chaud (laminage) en vue de produire la forme, les dimensions et les propriétés requises. Ils sont généralement de petits diamètres (moins de 450 mm). Le principe de fabrication de ce type de tube se base sur la présentation du métal d'une manière qu'il soit contenu entre la filière et l'aiguille. On obtient ainsi un tube monobloc sans soudure. Il existe une variante dite filage sur nez d'aiguille où l'aiguille est fixe.

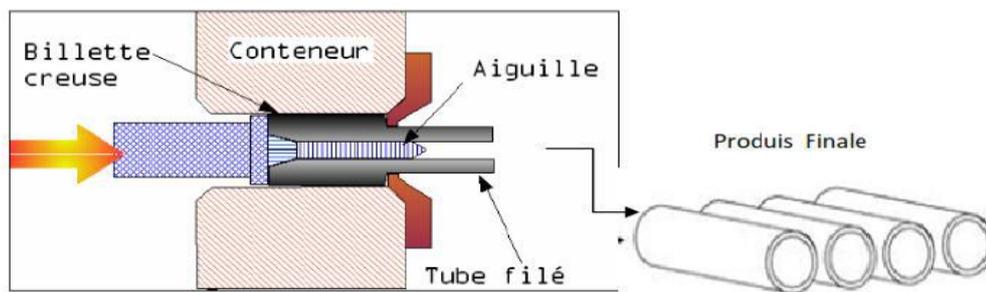


Figure I.5. Fabrication de pipeline sans soudure [6]

I.3 l'endommagement de pipeline :

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 (parfois plusieurs centaines de kilomètres) ;
- La traversée de zones et d'environnement hostiles (terrains géologiquement instables, zone de marnage, milieux sous-marins, zones salifères, circulation de courants vagabonds, etc.) ;
- 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 (traversée souvent de plusieurs pays, guerres etc.).

La première catégorie d'incidents provoqués par des tiers, la solution ne peut être apportée que par l'application de législations strictes définissant un périmètre de protection des ouvrages suivie par une surveillance externe et l'application de procédures opérationnelles strictes. Pour les autres causes d'autres réponses ont été apportées. Les progrès importants faits ces dernières années dans les domaines du contrôle et de la surveillance automatique ont amené les opérateurs et les exploitants à proposer des systèmes de management permettant une gestion des risques plus

CHAPITRE I : Généralité sur les Pipelines

appropriée et surtout plus exhaustive (pipeline integrity management) avec comme principal objective la prévention (intervention et réparation avant l'arrivée de l'incident ou de l'accident), regroupant ainsi dans des grands groupes des dégradations impliquant [7] :

- Les dommages mécaniques (50 %).
- La corrosion externe (25 %).
- La corrosion interne (15 %).
- Les dégradations diverses (ne faisant pas partie des groupes précédents).

I.3.1 Les dommages mécaniques :

Les dommages mécaniques représentent la partie la plus importante des dommages que peut subir une canalisation. Les dommages mécaniques sur les pipelines peuvent être définis comme toute modification de la structure ayant lieu après fabrication et/ou construction et qui peuvent mettre en cause l'intégrité de la structure. Les dommages mécaniques peuvent être directement imputables à des causes mécaniques. (Chocs, chutes, déplacements, etc.) Ou aux résultats d'agressions différentes et indirectes prenant en compte par exemple des phénomènes électrochimiques fragilisant ainsi la structure.



Figure I.6. Photo réel d'un pipeline endommagé

Les conséquences mécaniques et environnementales peuvent aller du simple incident comme par exemple l'enfoncement ou l'éraflure ayant aucune incidence immédiate sur l'environnement, au plus grave comme la rupture de la conduite entraînant la pollution de larges zones. Mais, quelle que soit leur importance, ces incidents peuvent tous avoir à terme des conséquences dramatiques.

Ces dernières peuvent être la conséquence de conditions externes ou internes :

- Les chocs par des outils de levage et de manutention (chutes).
- La présence de matériaux mettant la conduite sous contrainte ou tension (rocher, pierre).
- les glissements de terrain, tremblements de terre.
- les mauvais encrages de la conduite.
- le gel des terrains environnements (permafrost).
- les alternances de périodes chaudes/froides.

CHAPITRE I : Généralité sur les Pipelines

- l'absence de moyen de compensation thermique (lires).
- la corrosion externe.
- les erreurs opérationnelles pendant des opérations de réparation ou de modification de la ligne entraînant une fragilisation de la structure ou des équipements.
- la malveillance.

Les causes internes correspondent à des mauvaises conditions de transit des effluents et en particulier à : [7]

- La corrosion interne.
- L'abrasion interne.
- Aux surpressions incontrôlées de la montée en pression des effluents, ou à des actions incontrôlées de manutention (fermeture brutale de vanne).

Les dommages mécaniques présentent des topologies facilement identifiables qui permettent assez souvent de remonter à l'origine du défaut ou aux causes de l'accident. Ces derniers sont en général catalogués comme des déformations de la structure originelle.

Les fissures (cracks). Elles sont présentes au sein de l'acier et dans les soudures. Elles peuvent être débouchantes ou non et par conséquent dans ce dernier cas difficiles à détecter. Elles peuvent être par ailleurs évolutives. Le point d'équilibre et révolution de la propagation de ces dernières en fonction des conditions d'exploitation peuvent être depuis quelques années prédites grâce à des simulations numériques.

Les enfoncements (dent) ils se caractérisent par des déformations plus ou moins importantes dirigées vers l'intérieur du pipe et dues en général à des chocs ou à des contraintes externes. Les enfoncements sont des cas typiques de difficultés à « piger » une ligne. Ils peuvent par ailleurs induire d'autres types de corrosion (décollements du revêtement, corrosion sous contrainte, etc.) Les arrachements (gouges). Ils se caractérisent par des manques de matière.

Non imputables à des phénomènes électrochimiques (corrosion). Ils sont la conséquence d'accidents de manutention. Les plus petites sont qualifiées d'éraflures.

Les ondulations (buckles). Pendant la construction, une des conséquences de cintrages trop excessifs est la formation d'ondulations qui se traduisent par une modification structurelle et locale de la paroi du pipe, sur son pourtour (anomalie plus ou moins circonférentielle). Les buckles sont assez fréquentes en offshore pendant la pose.

L'ovalisation. L'ovalisation est le résultat de diverses actions ou sollicitations mécaniques (écrasements par exemple) conduisant à la modification différentielle du diamètre de la pipe (anomalie circonférentielle).

Les portées libres (free-span). Elles se rencontrent surtout en offshore mais peuvent être aussi le résultat d'affaissements terrestres plus ou moins soudains provoqués par la formation de dolines (phénomènes karstiques). Le pipe, par son propre poids, se met dès lors sous contrainte en se cintrant sous des rayons de courbure allant de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres. Les déplacements. Ils peuvent être source de dégradations graves pouvant entraîner des ruptures brutales. On peut signaler en particulier :

CHAPITRE I : Généralité sur les Pipelines

- Les déplacements latéraux occasionnés par des mouvements hydrodynamiques météo-océaniques (vagues, tempêtes), des extensions elles-mêmes induite par des variations de pressions ou de températures importantes, des accrochages d'ancrés ou de chaluts, ou bien encore des déplacements de sables (estuaires) ;

Des déplacements longitudinaux provoquer plus spécifiquement par les mouvements en surface de la plate-forme, en fond par les manifolds et les mouvements de terrains. La figure I.7 montre que 36% d'endommagement des pipelines est à cause de la corrosion

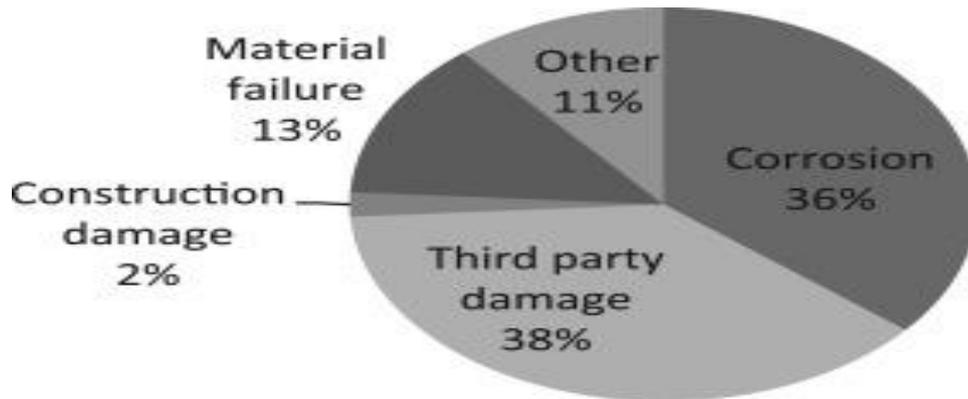


Figure I.7. Différente cause d'endommagement des pipelines

I.3.2 Corrosion :

I.3.2.1 Définition :

La corrosion, du latin "corrodere", Signifie ronger, attaquer. C'est une destruction non voulue des métaux sous l'action de milieux corrosifs (agents atmosphériques ou réactifs chimiques). Après attaque, les métaux ont tendance à retourner à leur état primitif d'oxyde, sulfure, carbonate etc., plus stable par rapport au milieu considéré et ainsi à subir une détérioration de leurs propriétés. [8]

I.3.2.2 Différents processus de la corrosion :

Les causes de la corrosion sont multiples et complexes et elles résultent d'interactions chimiques et /ou physiques entre le matériau et son environnement. La corrosion jusqu'à ce jour n'est pas complètement éclairée et cela est expliqué par les essais de laboratoire qui ne permettent pas de prévoir avec certitude le comportement d'un métal ou d'un alliage donné lorsqu'il exposé à la corrosion et de même il n'y a pas de métal résistant, d'une manière générale un métal résiste à la corrosion dans des conditions bien déterminées.

I.3.2.3 Corrosions électrochimiques : [8]

C'est le phénomène de corrosion le plus important et elle se manifeste lorsque le réactif est un liquide ou lorsqu'il existe une hétérogénéité soit dans le métal ou dans le réactif, présentant une dissymétrie de composition.

Le comportement de la corrosion d'un matériau en service, dépend d'une multitude de facteurs:

CHAPITRE I : Généralité sur les Pipelines

- Composition chimique et microstructure du métal.
- Composition chimique de l'environnement.
- Paramètres physiques (température, convection, irradiation, etc.).
- Sollicitations mécaniques (contraintes, chocs, frottements, etc.).

La résistance à la corrosion n'est donc pas une propriété intrinsèque du métal, mais plutôt une propriété de l'interface métal-milieu, d'où la nécessité de caractériser la composition chimique et la microstructure de celle-ci, ainsi que son comportement électrochimique.

La corrosion dépend donc d'un système extrêmement complexe dont les effets se manifestent, en pratique, sous une multitude d'aspects, parfois inattendus.



Figure I.8. Photo réel d'une surface extérieure d'un pipeline corrodé

I.4 conclusion :

Les pipelines sont le moyen le plus utilisé dans le transport d'hydrocarbure. Dans ce chapitre, notre travail s'est porté sur tout ce qui concerne les pipelines, il était construit de deux parties, dans la première partie on a donné une petite définition sur les pipelines leur domaine d'utilisation en suite on a cité leurs caractéristiques mécaniques et tout ce qui concerne les différentes étapes de leur fabrication.

Dans la deuxième partie on a fait une petite recherche sur les différents endommagements qui subissent un pipeline spécialement la corrosion car c'est le cas le plus commun.

CHAPITRE II

Les matériaux composites

CHAPITRE II : Les matériaux composites

II.1 introduction :

Le développement de nouveaux matériaux est soumis à la demande Utilisateur (constructeur). Ils veulent toujours plus de matériel Plus efficace, plus économique et plus durable Les chercheurs sont le plus souvent amenés à optimiser les solutions déjà utilisées, mais dans certains cas, Ils doivent repenser complètement 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.

II.2 les matériaux composites :

II.2.1 définition :

Un matériau composite est une combinaison d'au moins deux matériaux non miscibles (mais ayant une forte capacité d'adhésion) cela constitue un nouveau matériau avec des caractéristiques supplémentaires que tous les éléments ne possèdent pas. Par conséquent, le phénomène qui se produit peut améliorer la qualité des matériaux pour certaines applications. Le matériau devient ainsi plus léger, rigide, etc. Pour toutes ces raisons et la qualité des matériaux, les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans diverses applications.

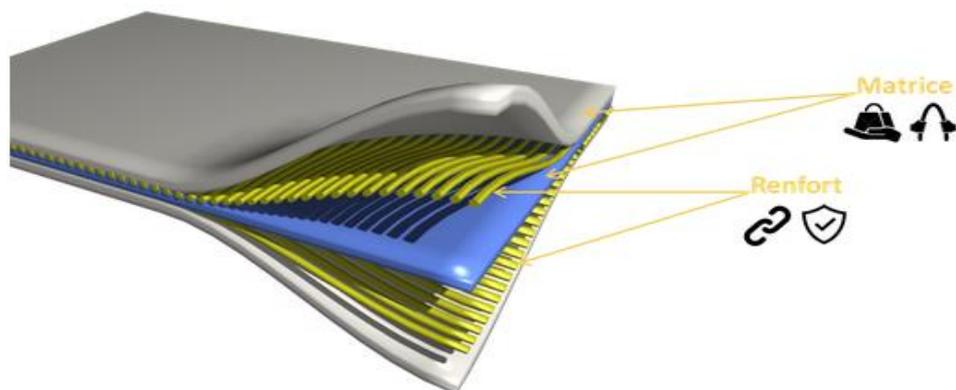


Figure II.1. La structure d'un matériau composite

Un matériau composite est constitué d'une ossature souvent sous forme de fibres appelée **renfort** qui assure la tenue mécanique, et d'une protection du renfort appelée **matrice**, qui permet aussi d'obtenir une cohésion de la pièce et de transmettre les efforts mécaniques au renfort, qui est généralement une matière plastique-résine thermodurcissable.

- **Matrice :** Dans de nombreux cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère, qui existe en grande quantité et à chacune un domaine d'utilisation spécifique. Le rôle de la matrice est d'associer les fibres de renfort, de disperser les contraintes, d'apporter une résistance chimique structurelle et de donner au produit la forme souhaitée.

Les deux types de résines qui sont, actuellement utilisées présentent des propriétés différentes :

CHAPITRE II : Les matériaux composites

Les résines thermodurcissables (TD) : qui se présentent sous forme liquide visqueuse et que l'on met en forme en déclenchant une réaction chimique de polymérisation par ajout d'un durcisseur, ce qui entraîne une solidification

Les résines thermoplastiques (TP) : qui se présentent sous forme solide (granulés, plaques...) et que l'on met en forme en les ramollissant par chauffage, puis en les solidifiant par refroidissement.

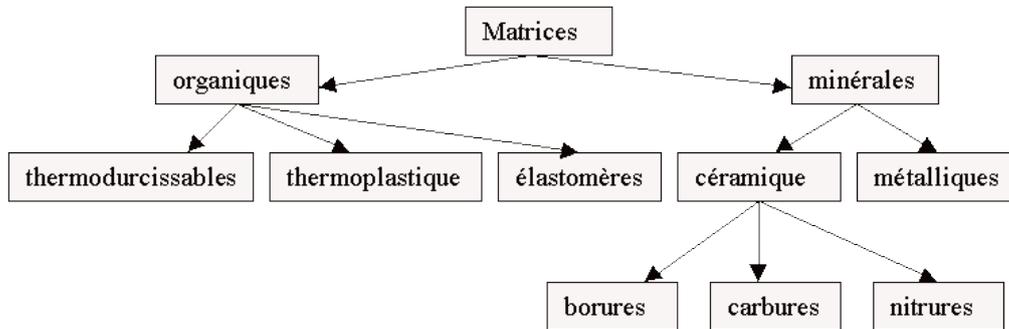


Figure II.2. Diagramme représentant les différents types de matrices.

- Renfort :

C'est une armature qui assure la tenue mécanique (rigidité et résistance) du matériau composite, la plus courante est sous forme fibreuse ou filamenteuse. Les renforts sont par exemple : la **fibre de verre**, le carbone, le chanvre, le lin ou le **kevlar** (appelé aussi fibre d'aramide).

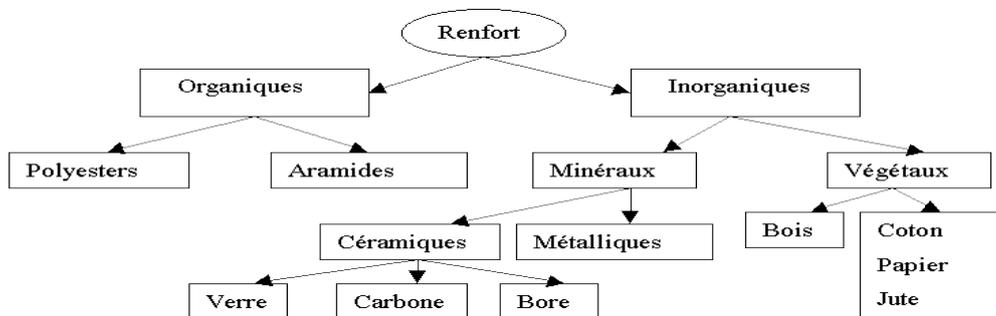


Figure II.3. Diagramme représentant les différents types de renfort

II.2.2 Les types des matériaux composites :

Différents types de matériaux composites Il existe 3 grandes séries, qui répertorient les matériaux composites selon la matrice qui constitue le matériau composite :

- Le CMO (ou matériau composite à matrice organique) est le plus couramment utilisé aujourd'hui en raison de son faible coût et de sa production en série.
- CMC (ou matériau composite à matrice céramique), principalement utilisé dans des domaines très particuliers de haute technologie et haute température : spatial, militaire ou nucléaire.
- CMM (ou matériau composite à matrice métallique), par exemple composé d'aluminium, de zinc ou de magnésium, peut être utilisé dans diverses applications

CHAPITRE II : Les matériaux composites

telles que l'automobile, les loisirs ou encore les produits électroniques. Pour chacune de ces familles, les matériaux de renfort utilisés pour compléter la matrice sont différents.

Dans la famille de composite la plus répandue aujourd'hui, le composite à matrice organique, on distingue deux catégories :

- Le composite à grande diffusion : est le moins coûteux à produire et est utilisé dans la fabrication de pièces de toutes sortes.
- Le composite à haute performance : est plus cher à produire bien qu'il ait des qualités mécaniques supérieures. Il est ainsi utilisé dans les secteurs de l'aéronautique, le nautisme, le sport et les loisirs.

II.3 Avantages du matériau composite :

Par rapport à d'autres matériaux pouvant être utilisés dans la même application, les matériaux composites présentent de nombreux avantages en raison de leurs propriétés supérieures :

- Taille plus petite : La qualité est plus compacte, vous pouvez donc obtenir un produit plus petit avec les mêmes performances.
- Plus fort : Grâce au renforcement, le matériau est très résistant aux charges et aux chocs.
- Plus rigide.
- Plus durable : grâce à la matrice protectrice, le matériau peut également résister aux intempéries et aux attaques chimiques.
- Meilleure durée de vie : Au fil du temps, la résistance du matériau est très bonne et il n'y a pas de corrosion.
- Forme libre : le matériau est plus malléable et plus facile à créer des formes spécifiques.
- Le matériau est également plus imperméable, plus isolant, etc.

II.4 les différentes formes de composite structuraux :

Composites à fibres courtes : Fibres dispersées dans une matrice isotrope, généralement sans orientation préférentielle, comportement macroscopique isotrope.

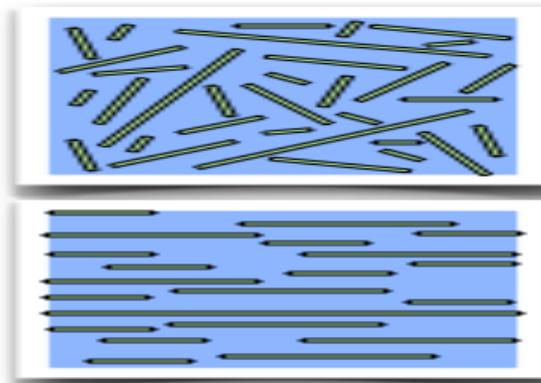


Figure II.4. Composite à fibres courtes

CHAPITRE II : Les matériaux composites

Composites à fibres longues : Les fibres longues sont noyées dans une matrice isotrope et ont une orientation définie et un comportement anisotrope macroscopique.

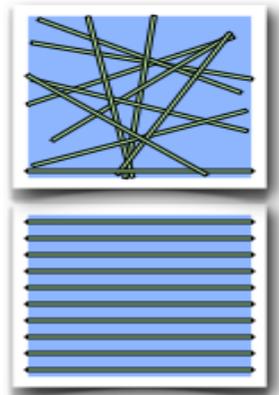


Figure II.5. Composite à fibres longues

Stratifiés : La superposition des couches dans le matériau composite (la couche de base dans la composition stratifiée) les unes par rapport aux autres (un ensemble de couches empilées dans le même sens) de quelque manière que ce soit, le comportement macroscopique doit être conçu selon les besoins.

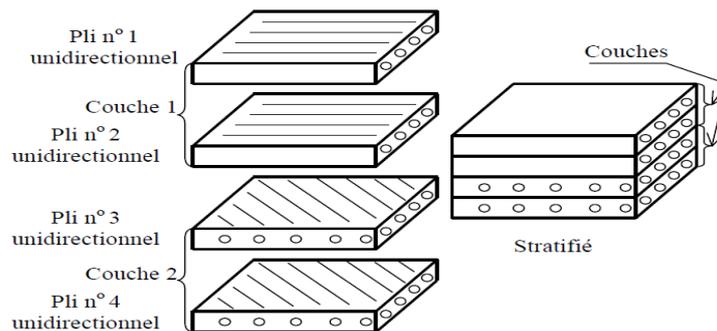


Figure II.6. Constitution d'un stratifié [9]

Sandwiches : 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.

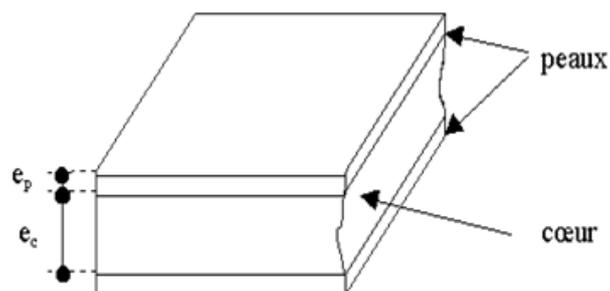


Figure II.7. Structure de sandwich [9]

CHAPITRE II : Les matériaux composites

II.5 Application des matériaux composites : [10]

Les matériaux composites sont aujourd'hui présents dans tous les secteurs industriels telle que :

L'aéronautique: L'aéronautique utilise principalement des matériaux composites « haute performance », qui sont constitués d'une matrice époxy associée à un fort taux de matériaux renforcés de fibres de carbone. L'aéronautique utilise des matériaux composites "haute performance" pour fabriquer les principaux composants structurels de l'avion car ils sont légers, de forme flexible et peuvent réduire les coûts de maintenance.

Les applications rencontrées concernent : radome de radar, bords d'attaque, volets, dérives, pales d'hélicoptères, disques de freins d'avion...etc.

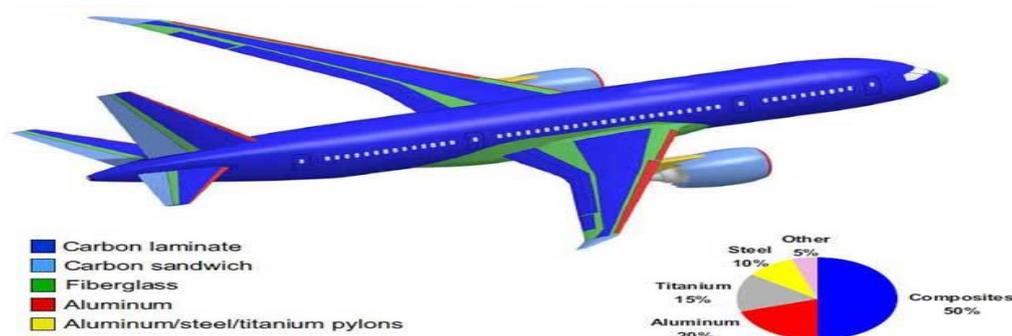


Figure II.8. L'utilisation de matériaux composites dans l'avion

Automobile: L'utilisation des matériaux composites dans l'industrie automobile remonte à des origines relativement anciennes (fin des années 1980), mais elle ne s'est généralisée que récemment. 95% de l'industrie automobile utilise des matériaux composites à base de fibre de verre et de polyester. Les matériaux composites apportent facilité d'entretien et liberté de conception à l'industrie automobile.

Nucléaire: Dans les centrales nucléaires, les matériaux composites sont utilisés pour fabriquer les conduites d'eau de refroidissement des réacteurs nucléaires.

Secteur médical: L'application des matériaux composites dans le domaine médical et de la sécurité n'est apparue que récemment, impliquant principalement des matériaux composites hautes performances à matrice en résine époxy et fibre de carbone.

II.6 Méthodes de réparation des pipelines par composite :

Après l'évaluation de l'endommagement des pipelines, s'effectuera le choix du type de réparation selon :

- La géométrie de la canalisation (diamètre, cintrage...)
- La nuance de fabrication de l'acier
- La localisation de la canalisation
- Les conditions d'exploitation
- La localisation du défaut
- La nature et dimension du défaut.

Ainsi donc nous disposons d'une panoplie de technique de réparation. Nous pouvons citer les principales techniques de réparations par patch en composite telle que

CHAPITRE II : Les matériaux composites

- Les réparations par collage
- Système de réparation par renforcement des fibres composites
- Cependant il existe d'autres techniques de réparation telles que
- La méthode de meulage
- La méthode de perçage
- La réparation par demi-coquille soudée
- Ré-enrobage
- Coupe et remplacement après vidange.

II.6.1 Réparation des pipelines par patch en composite : [12]

Les matériaux composites sont utilisés depuis de nombreuses années pour réparer les structures de pipelines et d'autres équipements. Cependant, l'utilisation initiale de matériaux composites était de réparer des pipelines corrodés, dans le but de renforcer les parties endommagées du pipeline. En plus de réparer la corrosion, les matériaux composites ont été utilisés avec succès pour réparer les entailles, les fissures et les pipelines offshore. Aujourd'hui, la plupart des sociétés pipelinières utilisent principalement des matériaux composites dans leurs plans de réparation et d'entretien.

II.6.1.1 Réparation par collage :

Les matériaux composites sont des matériaux performants constitués par l'association à l'échelle microscopique de plusieurs matériaux aux caractéristiques complémentaires, Ceci permet d'associer un ensemble de caractéristiques mécaniques ou physiques impossibles à atteindre dans des composants isolés. En plus de réduire le poids, un autre avantage des matériaux composites est que leurs propriétés orthotropes leur confèrent des propriétés multifonctionnelles. En fait, ils sont plus largement utilisés comme connaissance des procédés de fabrication, de leurs propriétés mécaniques et physiques, de leur durabilité et de leur comportement sous charge. Dans notre exemple, nous nous concentrerons davantage sur les matériaux, les composites de fibres et les résines. La caractérisation des composites à base de fibres et de résines est souvent complexe. Contrairement aux matériaux métalliques qui nécessitent relativement peu de tests, les matériaux composites à base de fibres-résine se caractérisent par la nécessité de tests approfondis pour obtenir des propriétés mécaniques. La Figure. II.9 présente la réparation par composite d'un pipeline en acier

CHAPITRE II : Les matériaux composites



Figure II.9. Réparation par composite d'un pipeline en acier

II.6.1.2 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 « Pré-cured-layered » et système de réparation par matériaux composites flexible « Flexible wet-lay-up system » qui sont appliqués dans la réparation des pipelines défectueux.

- Système de réparation par matériaux composites flexible :

Le système de réparation par matériaux composites flexible est intensivement utilisé pour l'industrie de réparation des pipelines enterrés sous la forme de suremballage des pipes d'acier même aux angles ou des courbures pour une vaste gamme d'application de pression. Cette application utilise la matrice de résine qui est généralement à l'état non solidifié. Leurs solidifications sont réalisées après leur mise en place sur la structure. Ce système de restauration utilise un matériau composite imprégné de différents systèmes de résine (verre, carbone, imine...) pour tenir compte des conditions environnementales spécifiques telles que les applications sous-marines, les températures élevées et le froid. Le système de réparation composite flexible est adapté pour réparer la surface externe ou la progression possible de la corrosion et restaurer la résistance de la canalisation contenant des défauts de paroi. Le système est également adapté aux conditions souterraines dans des applications à pression relativement basse et moyenne. Cependant, en raison de la complexité de la préparation de la résine, de l'application et du durcissement des systèmes flexibles, il est généralement nécessaire d'utiliser un manchon en spirale pré-durci. [12], [13]



Figure II.10. Emballage de composite flexible pour la réparation sous – marine [12], [13]

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

Le système de réparation composite pré-durci consiste à lier un matériau composite pré-durci renforcé de fibres avec un adhésif appliqué sur place. La figure II.11 montre le système de réparation Clockspring qui est largement utilisé dans l'industrie de la réparation de pipelines. Ce système de maintenance 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 avec un adhésif puissant. Avant l'installation, remplissez les défauts avec un scellant visqueux pour faciliter le roulement et le transfert de charge.

Cette méthode de réparation est fiable pour les défauts externes. La plupart des techniques de réparation générales sont basées sur ce principe. Cependant, l'utilisation de ce système pour les réparations est généralement limitée aux sections de tuyaux droites. L'application de ce système aux canalisations défectueuses nécessite beaucoup d'espace. De plus, l'application sous l'eau de ce système est difficile car elle comprend l'application interne d'un système de colle en couches. Ainsi, la liaison des couches et leurs performances et leur installation sont les principaux inconvénients de ce système de réparation.

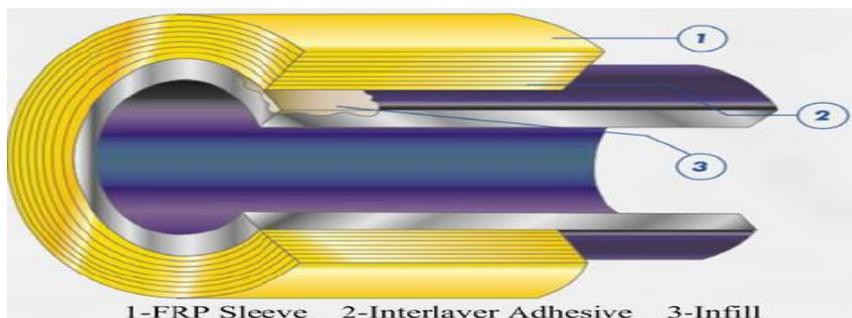


Figure II.11. Réparation par renforcement composite type clockspring [11]

II.7 Conclusion :

Au début, la seule solution possible aux tuyaux endommagés était de le remplacer ou de souder de nouvelles pièces. Parmi toutes les réparations recensées, la réparation par collage d'un patch composite est désormais utilisée pour résoudre les problèmes industriels liés Au pipeline. À notre avis, cette technique de réparation est la solution la plus prometteuse pour

CHAPITRE II : Les matériaux composites

résoudre rapidement et à moindre coût les dommages de canalisation. A partir de sa on a devise notre chapitre en différentes parties au début on a donne une petite définition sur les matériaux composites avec tout se qui concerne leur constitution leur type et forme ensuite on a parle sur l'avantage de l'utilisation de ces matériaux dans des différentes domaines et a la fin on a bien parle sur l'importance de la réparation par collage d'un patch composite sur les pipelines endommagé.

CHAPITRE III

**Recherche bibliographique et calcule
analytique**

CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

III.1 Introduction :

Les pipelines élaborent le moyen le plus sûr de transporter des produits, tels que le gaz naturel, le pétrole et d'autres hydrocarbures, d'un bout à l'autre du pays. Toutefois, si des dommages sont causés aux pipelines, cela peut compromettre gravement l'environnement. Pour permettre une meilleure maintenance, il est nécessaire de faire un bon dimensionnement des différents paramètres géométriques du bondage en composite pour assurer une bonne restauration.

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

III.2 recherche bibliographique :

1-Le travail de A. Dumitrescu est de trouver la meilleure méthode pour la modulation du bondage en composite (le dimensionnement de patch (longueur et épaisseur)). La méthode des éléments finis tridimensionnelle FEM a été utilisée pour avoir la valeur optimale de l'épaisseur du composite. [14]

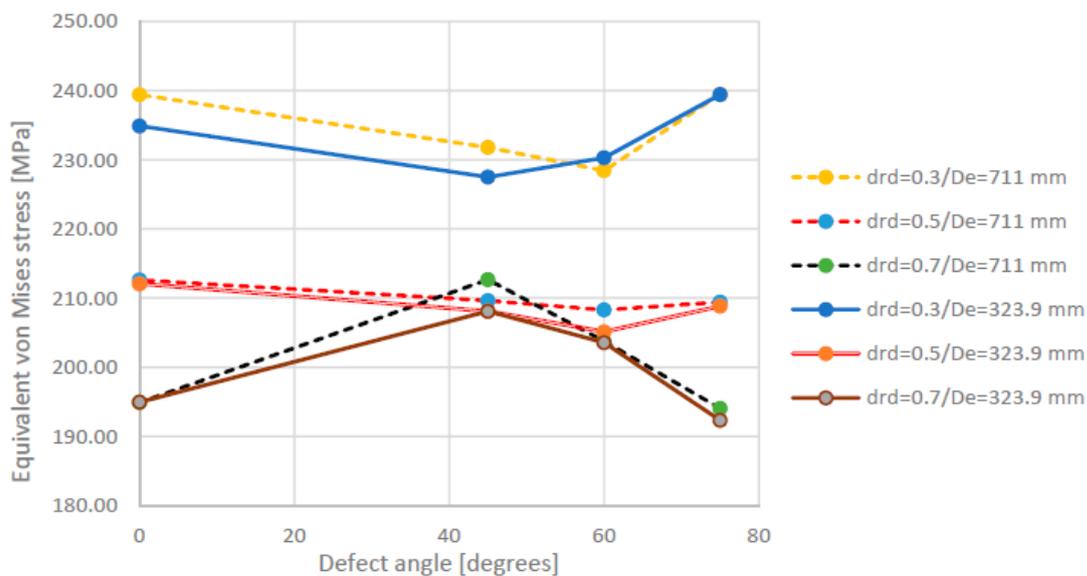


Figure III.1. Contrainte équivalente en fonction de l'angle de défaillance

2-M. Hautier et al ont proposé un procédé de réparation original basé sur l'infiltration de résine dans le réseau de fissures créé par un impact. Un modèle analytique a été développé pour assurer une bonne combinaison physico-chimique de la résine de réparation et du matériau à réparer. Des tests mécaniques ont également été effectués sur les emplacements réparés pour prouver la capacité du processus de réparation. Le test de compression après impact a été choisi, car il est largement utilisé dans l'industrie [15]

CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

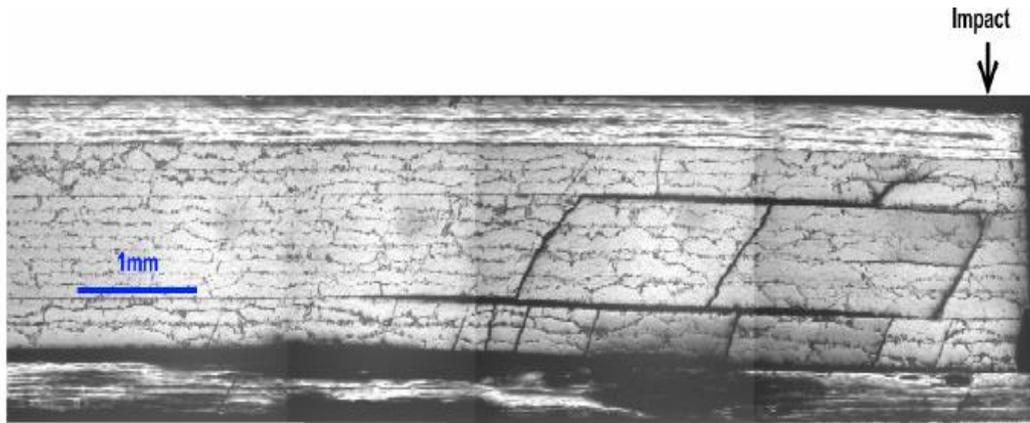


Figure III.2. Coupe micrographique d'un dommage d'impact avec délaminages et fissures Transverses dans un stratifié carbone/époxy d'empilement [02/+602/-602] s.

3-A. Pilato et al ont utilisé des calculs analytiques pour optimiser un ensemble de paramètres (matériaux, épaisseurs et directions des différentes couches) et retrouver les valeurs de pression observées dans le test. Pour cela, ils ont utilisé un modèle analytique qui s'est enrichi en considérant l'état de contrainte résiduelle d'origine thermique et l'irrégularité des propriétés mécaniques dans l'épaisseur de la structure. [16]

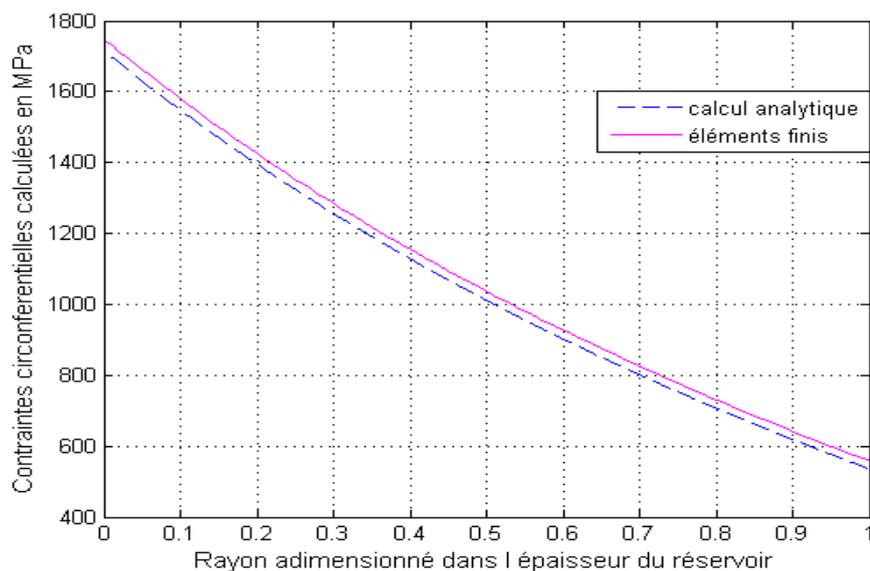


Figure III.3. Comparaison des contraintes dans l'épaisseur de la structure à partir du calcul analytique et du calcul par éléments finis Abaqus

4-M. Bouhafis et al ont proposé un modèle d'analyse basé sur la formule de Tsai pour réduire les contraintes circonférentielles causées par les charges mécaniques sur les tuyaux composites, et ont proposé une étude paramétrique pour évaluer ces contraintes à travers l'épaisseur du tuyau.[17]

CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

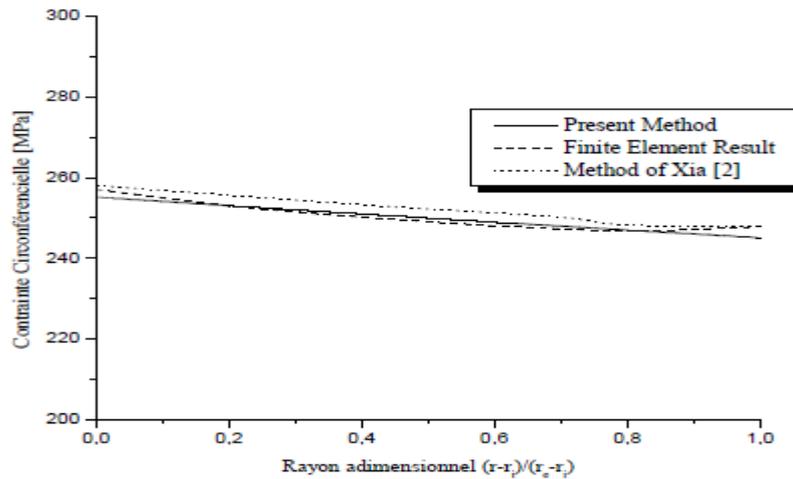


Figure III.4. Distribution de la contrainte circonférentielle par rapport au rayon adimensionnel des trois méthodes utilisées d'un graphite époxy T300/934.

5-Mulle et Collombet ont réalisé des mesures par réseaux de Bragg. Cette méthode est historiquement dédiée à la mesure des déformations locales, et elle permet également de suivre l'évolution des déformations causées par les changements d'humidité au cours du temps sans soustraire l'échantillon du milieu à l'aide d'une simulation par Éléments Finis.[18]

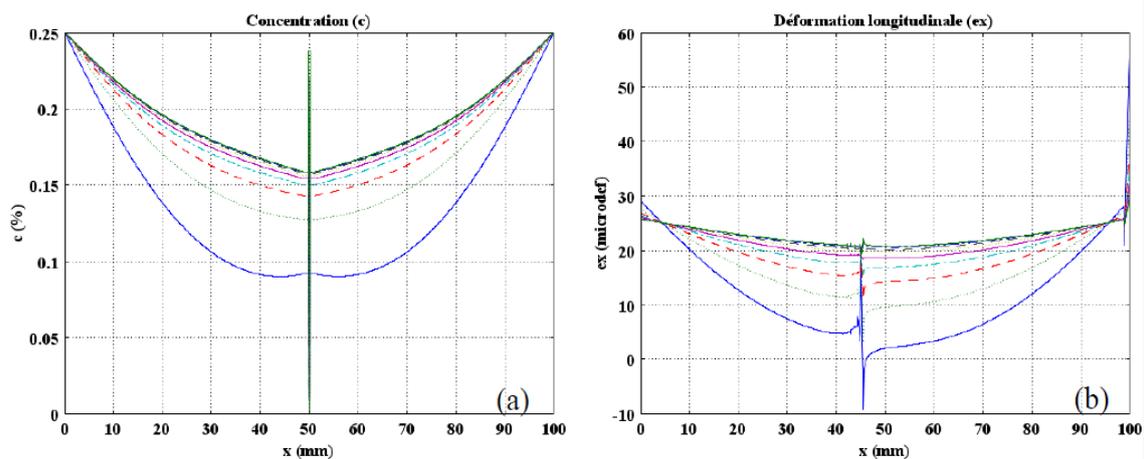


Figure III.5. Evolution de la teneur en eau et de la déformation hygroscopique longitudinale dans différents points du matériau suivant (ox) et dans les positions des capteurs de l'humidité et de la déformation

6-Z.S. Nazirah et M.S. Abdul Majid ont étudié les effets de la pression et les charges axiales sur la performance de l'époxy renforcé de fibre de verre (GRE), à l'aide de la méthode des éléments finis. Les résultats montrent que les tubes en matière GRE sont les meilleurs à utiliser pour les transports des fluides à haute pression. [19]

CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

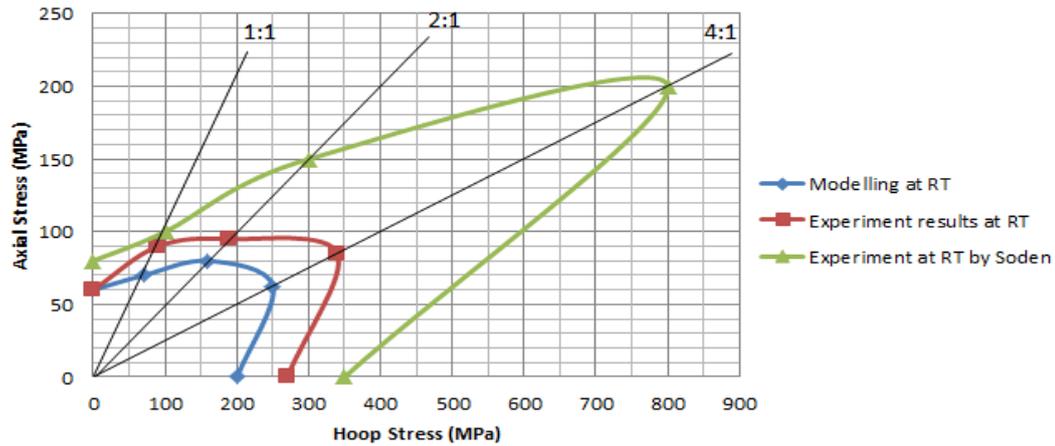


Figure III.6. La distribution de contraintes pour les tuyaux GRE en fonction de contrainte circonférentielle.

7-H. Chenine et al ont effectué une analyse du flambage sur des pipes en composite stratifiés a l'aide de la MEF. Les résultats montrent que la charge de flambage est plus grande pour les plus petits diamètres, ce qui augmente le risque de la rupture. Pour la distribution des contraintes de Von mises, la concentration la plus importante est celle pour les orientations des fibres ($20^{\circ}/-20^{\circ}$), tandis que, les plus faibles se localise au niveau de l'orientation 90° . Donc l'ampleur des contraintes dépend fortement de l'angle d'orientation des fibres de chaque pli. [20]

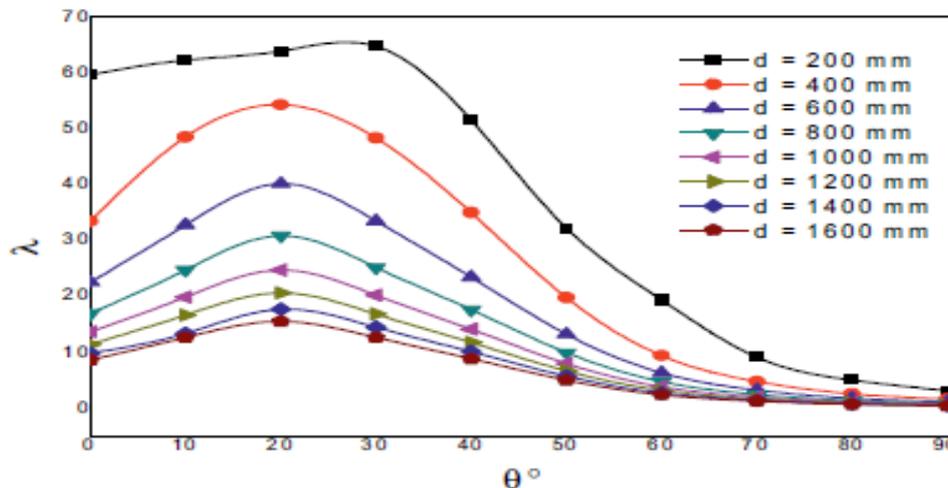


Figure III.7. Influence de la variation du diamètre de pipe sur le paramètre de flambement en fonction de l'angle d'orientation (θ°).

8-M. Bouhafis et al, leur but était de faire un calcul de la contrainte radiale subit par un pipe en composite sous des conditions de chargement mécanique et environnemental. [21]

CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

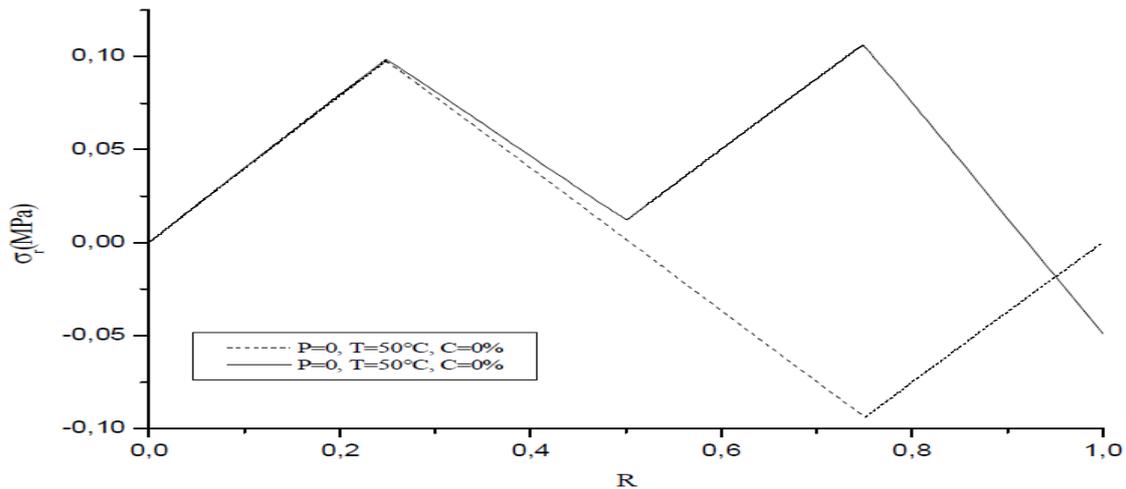


Figure III.8. Evolution de la contrainte radiale en fonction de l'épaisseur du tube pour une répartition uniforme de la température $T = 50^\circ\text{C}$.

9-R. W. Bianchi et Y. W. Kwon ont effectué une étude numérique et expérimentale sur l'efficacité de réparation par matériaux composite pour les structures sous-marine et spécialement les structures fabrique par l'alliage d'aluminium, les résultats montre l'efficacité de réparation par les matériaux composites. [22]

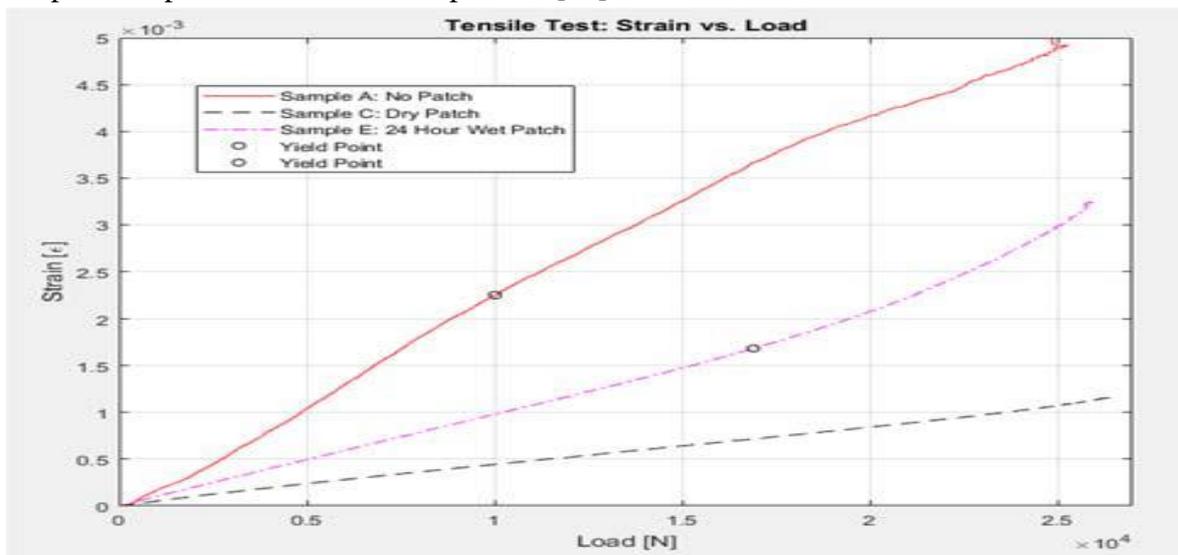


Figure III.9. La déformation en fonction de charge applique avec et sans bondage en composite

10-J. Chen et H. Wang ont évalué le comportement mécanique d'un pipeline endommagé et réparé par un bandage en polymère renforcé de fibre de carbone (CFRP) à l'aide de la méthode des éléments finis. Les résultats indiquent que la faisabilité de la maintenance avec matériaux composite pour les pipelines endommagé fait en acier. [23]

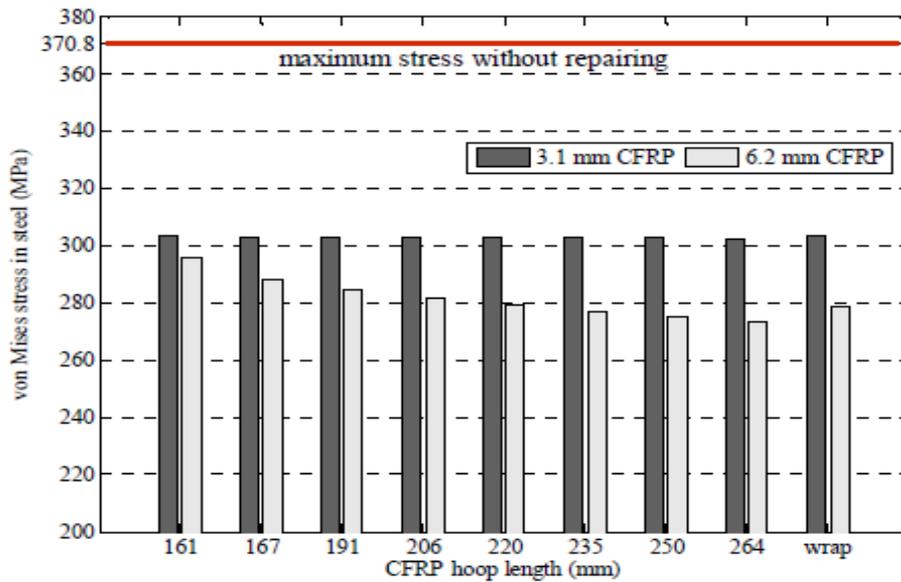


Figure III.10. Contrainte équivalente dans la paroi de tuyau pour des différentes tailles de CFRP

11-H. Fang et K. Yang ont étudié l'influence de la corrosion et des charges sur les propriétés mécaniques d'un tuyau en béton en utilisant la méthode des éléments finis sur Abaqus. Les résultats montrent que la paroi intérieure du tuyau est plus fragile que l'extérieur du tuyau. [24]

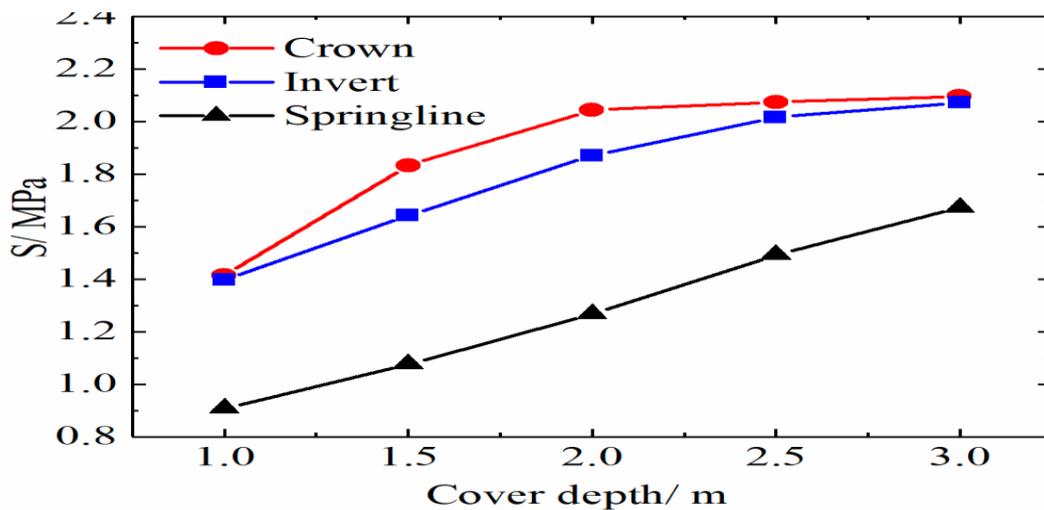


Figure III.11. La relation entre la tension maximum et la profondeur de couverture

12-Y. Zhang et al, ont analysé les charges de rupture du tuyau réparé avec composite sous tension et pression interne à travers des expériences, la méthode des éléments finis (FEM) et des méthodes théoriques, et ont obtenu une formule simple vérifiée par les expériences et la méthode précédente. [25]

CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

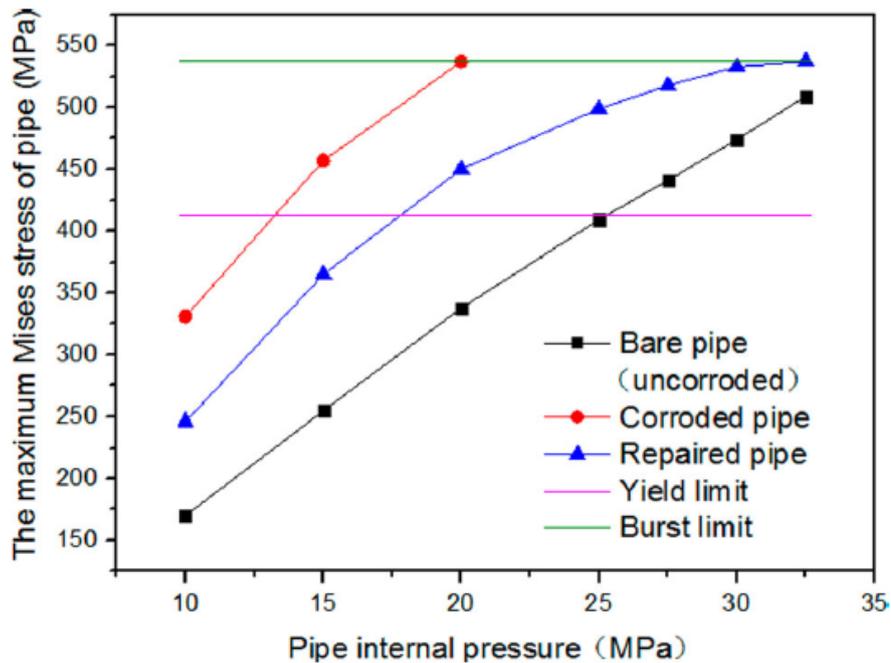


Figure III.12. La contrainte maximum du tuyau en fonction de la pression interne

III.3 l'évaluation de l'état de déformation de la paroi de tuyau :

Pour évaluer l'état de déformation dans la paroi on a besoin de quelques données :

1- Caractéristique dimensionnelle de tuyau représentée par la figure III.13, on calcule le rayon extérieur b_p et intérieur a_p , l'épaisseur relative du tuyau t_{rp} et l'épaisseur nominale de la paroi D_e par les équations suivantes : [14]

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

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

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

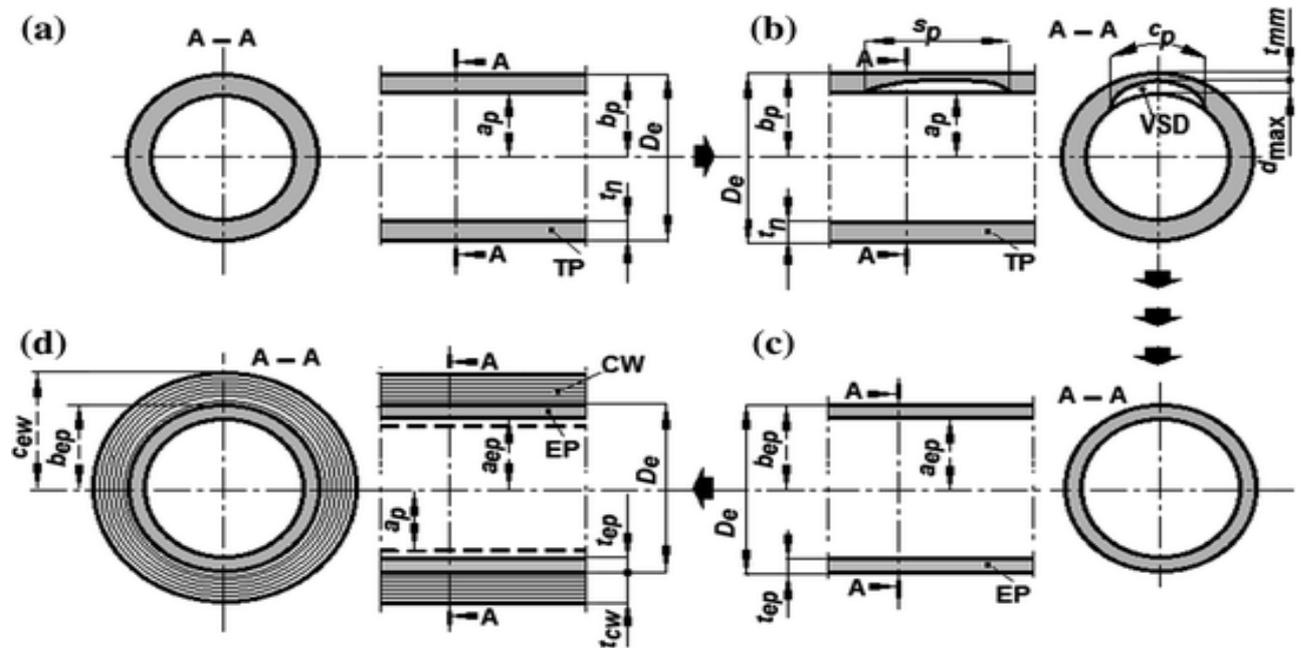


Figure III.13. La conception de système de réparation par composite.

2-Les propriétés mécaniques du tuyau, parmi c'est propriétés on a le module de Young E_p , le coefficient de poisson μ_p , limite d'élasticité R_{mp} et la résistance a la traction R_{yp} .

3-Les conditions réelles et les conditions de travail du tuyau réparé On peut calculer la contrainte nominale σ_{ap} et la pression d'opération p_{ao} par la loi suivante : [14]

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

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

Où f_d est le facteur de service de pipeline correspondant à une valeur supposée, $f_d = 0.72$

4-Les Dimensions caractéristique du défaut de perte détecté On peut calculer la profondeur relative du défaut D_{rd} et sa longueur S_p par l'équation :

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

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

5-Les propriétés des matériaux composites pour la réparation des tuyaux sont représentées par le tableau III.1 :

CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

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

Tableau III.1. Propriété des matériaux composite [14]

III.4 Calcule de la pression critique :

Avant de calcule la pression critique on a besoin de calcule le RSF (Remaining Strength Factor). À laide du code ASME B31G et DNV RP-F101

On peut dire que le (RSF) est utilisé comme indice pour évaluer l'assurance de la sécurité, RSF = 0,8 exprime le fait que 80% de la force reste dans l'équipement, ou pour le dire autrement, 20 % de la force a été perdue.

III.4.1 Norme ANSI/ASME B31G et sa modification ASME B31G Modifiée :

Le document le plus largement utilisé pour évaluer la résistance résiduelle des tuyaux corrodés est ANSI/ASME B31 G [26]. Il est basé sur le montage empirique d'une série complète d'essais effectués sur de vrais tuyaux avec des rainures d'usinage étroites. La base de l'équation utilisée dans B31G est relativement simple et consiste à :

- Supposer que la contrainte circonférentielle maximale, est égale à la limite d'élasticité du matériau,
- Caractériser la géométrie du défaut de corrosion par une forme projetée parabolique pour un défaut court, et une forme rectangulaire pour un défaut long.

L'équation de RSF sera exprimée comme suit :

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

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

$$M = \sqrt{1 + 0.8 \left(\frac{L}{Dt}\right)^2} \quad (III.9)$$

CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

Ces dernières équations ne sont valables que pour un défaut de corrosion court, donc de forme considérée comme parabolique ou $S_{rd}^2 = \left(\frac{L}{Dt}\right)^2 \leq 20$ qui implique :

$$\sqrt{0.8\left(\frac{L}{\sqrt{Dt}}\right)^2} \leq 4 \quad (III.10)$$

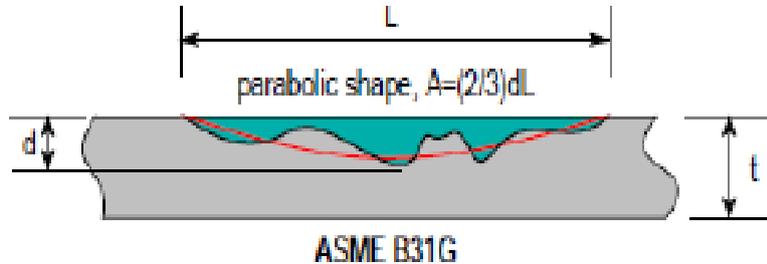


Figure III.14. Défaut parabolique

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

$$\sqrt{0.8\left(\frac{L}{\sqrt{Dt}}\right)^2} > 4 \quad (III.11)$$

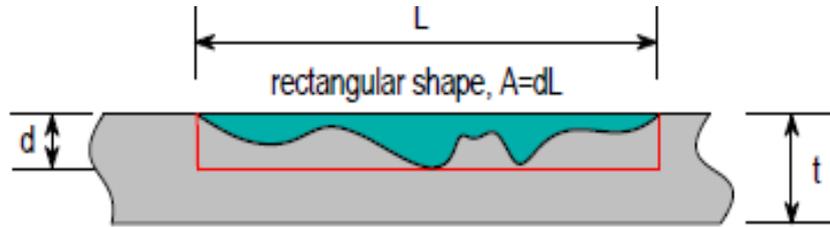


Figure III.15. Défaut rectangulaire

Et L'équation est donnée par :

$$RSF = 1.1[1 - (d)] \quad (III.12)$$

Kiefner et Vieth [27] [28] ont reconnu plus tard que la méthode d'analyse de la corrosion dans le code B31G pourrait être trop conservatrice pour certains types de défauts constatés dans la pratique. Pour cela Ils ont modifié le code pour développer ce qui est connu comme la méthode 0.85dL [29].

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

$$RSF = 1.1 \left[\frac{1 - \left(0.85 \frac{d}{t}\right)}{1 - \left(0.85 \frac{d}{t}\right)^{\frac{1}{M}}} \right] \quad (III.13)$$

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

CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

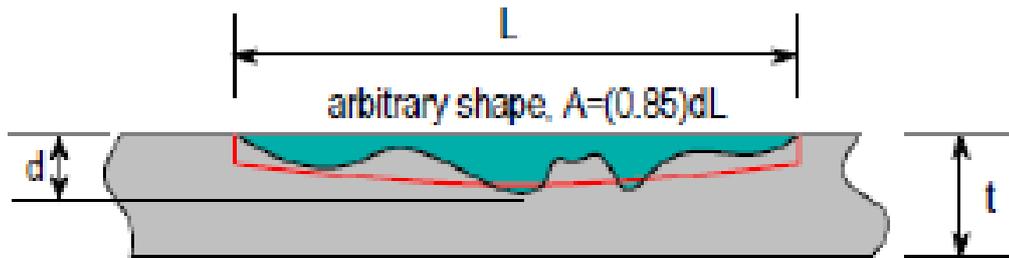


Figure III.16. Défaut de corrosion long selon une forme arbitraire selon le code ASME B31G modifiée

Pour le facteur de Folias, il y'a deux cas à considérer ;

$$\text{1er cas : } \left(\frac{L}{\sqrt{Dt}}\right)^2 \leq 50 \quad (III.14)$$

$$M = \sqrt{1 + 0.6275 \left(\frac{L}{Dt}\right)^2 - 0.003375 \left(\frac{L}{\sqrt{Dt}}\right)^4} \quad (III.15)$$

$$\text{2eme cas : } \left(\frac{L}{\sqrt{Dt}}\right)^2 > 50 \quad (III.16)$$

$$M = 0.032 \left(\frac{L}{\sqrt{Dt}}\right)^2 + 3.3 \quad (III.17)$$

III.4.2 le calcul du RSF à l'aide de code NV RP-F101 :

Le développement du DNV. RP-F101 décrit deux approches alternatives avec une philosophie de sécurité différente pour l'évaluation de la corrosion dans les pipelines. La première approche est conforme à la philosophie de sécurité adoptée dans la norme DNV Offshore Pipeline (DNV OS-F101). Les incertitudes liées au dimensionnement du défaut et aux propriétés du matériau sont spécifiquement prises en compte dans la détermination de la pression de fonctionnement admissible. La deuxième approche est basée sur le format de conception de contrainte admissible, où la pression de fonctionnement admissible est déterminée à partir de la capacité et multipliée par un seul facteur d'utilisation basé sur le facteur de conception d'origine.

A laide du DNV. RP-F101 L'équation du RSF sera exprimée comme suit :

$$RSF = 1.1 \left[\frac{1 - \left(\frac{d}{t}\right)}{1 - \left(\frac{d}{t}\right)^{\frac{1}{M}}} \right] \quad (III.18)$$

Ou Le facteur de Folias(M) est donné par:

$$M = \sqrt{1 + 0.31 \left(\frac{L}{\sqrt{Dt}}\right)^2} \quad (III.19)$$

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

$$p_d = RSF \cdot p_{ao} \quad (III.20)$$

CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

III.5 le calcul d'épaisseur :

Pour calculer l'épaisseur de bondage on a plusieurs méthodes différentes parmi c'est méthodes on a la méthode proposée par ASME et ISO ou la valeur de l'épaisseur composite minimum requis doit être calculée comme la valeur maximale résultante des deux équations suivantes :

$$t_{cw} = \frac{D_e E_p}{2 E_{cc} \sigma_{ap}} (p_c - p_d) \quad (III.21)$$

$$t_{cw} = \frac{D_e E_p}{2 E_{ac} \sigma_{ap}} (p_c - p_d) \quad (III.22)$$

Et on a la méthode développée par A. Dumitrescu qui a considéré le tuyau comme un tube multicouche (avec le bondage en composite comme une couche externe et le tuyau en acier comme la couche interne) et formulé la condition analytique pour que ce tube résiste la pression p_c :

L'équation sera exprimée comme suit : [14]

$$t_{cw} = \frac{D_e}{2} \left[\frac{\sqrt{K_{EP} - \mu_c + 1}}{\sqrt{K_{EP} - \mu_c - 1}} \right] - 1 \quad (III.23)$$

Où :

$$K_{EP} = \frac{E_{cc}}{E_p} \frac{1}{K_{ep}^2 - 1} \left[\frac{8t_{rp} K_{ep}^2}{t_{rp} (3K_{ep}^2 + 1) - K_{ep}^2 + 1} - K_{EP0} \right] \quad (III.24)$$

$$K_{EP0} = (K_{ep}^2 - 1)(1 - \mu_p) + 2 \quad (III.25)$$

$$K_{EP} = \frac{b_{ep}}{a_{ep}} \quad (III.26)$$

a_{ep} et b_{ep} sont les rayons intérieur et extérieur correspondant à un tuyau équivalent sans aucun défaut, fait du même acier que le tuyau endommagé, défini comme ayant la même résistance mécanique que la zone du tuyau présentant un défaut.

Les valeurs a_{ep} et b_{ep} et l'épaisseur équivalente de paroi de ce tuyau t_{ep} , sont obtenues en utilisant les équations suivantes :

$$a_{ep} = \frac{D_e}{2} - t_{ep} \quad (III.27)$$

$$b_{ep} = b_p \quad (III.28)$$

$$t_{ep} = \frac{p_d}{2\sigma_{ap} + p_d} D_e \quad (III.29)$$

III.6 le calcul de contrainte équivalente :

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

CHAPITRE III : Recherche bibliographique et calcul analytique

radiale σ_r , la contrainte circonférentielle σ_θ et la contrainte de traction σ_z . Celles-ci s'expriment par les relations III.30 et III.31 et III.32 :

$$\sigma_{rr} = \frac{r_i^2 p_i}{r_e^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_e^2}{r^2}\right) \quad (\text{III.30})$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{r_i^2 p_i}{r_e^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_e^2}{r^2}\right) \quad (\text{III.31})$$

$$\sigma_{zz} = \frac{r_i^2 p_i}{r_e^2 - r_i^2} \quad (\text{III.32})$$

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.

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{rr})^2 + (\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta})^2} \quad (\text{III.33})$$

III.6 Conclusion :

Dans notre chapitre la recherche bibliographique nous a permis d'avoir une approche sur l'efficacité de la réparation en composite sur la restauration de la résistance mécanique d'une canalisation endommagée (corrodée). Ainsi que les méthodes et les codes de calcul ont été représentés dans ce chapitre.

CHAPITRE IV

**Simulation numérique, résultats et
discussions**

CHAPITRE IV : Simulation numérique, résultats et discussions

IV.1 introduction :

Dans ce chapitre nous allons procéder à une étude numérique en utilisant le logiciel ANSYS Workbench pour un pipeline corrodé, dont l'objectif est d'avoir les dimensions nécessaire du bondage en composite pour la restauration des propriétés mécaniques du tuyau et nos résultats seront validés avec les résultats du model de A. Dumitrescu [14].

IV.2 Les méthodes numériques :

Les équations aux dérivées partielles (EDP) existent dans toutes les sciences car elles apparaissent également dans la dynamique des structures, la mécanique des fluides et la théorie de la gravitation. Ils sont indispensables dans tous les domaines tels que la simulation aéronautique, la synthèse d'images ou la finance. Ce sont les équations de base qui résolvent presque tous les problèmes dans ces domaines. Les solutions de ces équations aux dérivées partielles peuvent être calculées numériquement en appliquant les méthodes suivantes :

- Des différences finies.
- Des éléments finis.
- Des volumes finis.

IV.2.1 Méthode des différences finis :

La méthode des différences finies, présente une technique de résolution des équations aux dérivées partielles, par l'approximation de dérivées par des différences finies. Cette méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude en un nombre déterminé de nœuds et à représenter la fonction recherchée en chacun des nœuds du domaine par un développement limité en série de Taylor. Ainsi, l'équation différentielle est transformée en équation algébrique pour chaque nœud. La résolution du système d'équations algébriques permet d'obtenir la distribution de la fonction étudiée dans le domaine d'étude.

La méthode de différence finie ne permet pas la prise en compte des conditions de passage d'un milieu physique à un autre et des non-linéarités, cela nécessite un traitement spécifique. D'autre part, elle s'adapte mal aux objets de la géométrie complexe à cause de la rigidité du maillage.

IV.2.2 Méthode des volumes finis :

La méthode des volumes finis est une version spéciale de la méthode des résidus pondérés où la fonction de projection égale à l'unité. Cette méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude en volumes élémentaires de telle manière que chaque volume entoure un nœud principal P. Chaque volume est délimité par : deux interfaces dans le cas monodimensionnel noté (e, w), quatre interfaces dans le cas bidimensionnel (e, w, s, n) et six interfaces dans le cas tridimensionnel (e, w, s, n, t, b). Chaque nœud principal P est limité par des nœuds voisins (E, W) dans le cas monodimensionnel, (E, W, S, N) dans le cas bidimensionnel, et (E, W, S, N, T, B) dans le cas tridimensionnel. L'équation différentielle est intégrée dans chaque volume élémentaire finis. Pour calculer l'intégrale dans ce volume élémentaire l'inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, parabolique, exponentielle, de puissance etc.) entre

CHAPITRE IV : Simulation numérique, résultats et discussions

deux nœuds consécutifs. Ensuite, la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude. Le résultat de discrétisation donne une équation algébrique qui est constituée par les valeurs nodales.

IV.2.3 Méthode des éléments finis :

Cette méthode consiste à transformer les équations différentielles sous des formes intégrales basées sur le concept de minimisation d'une quantité (comme l'énergie...), conduisant à la solution exacte. En d'autre terme elle s'agisse de trouver une fonction globale représentant le modèle mathématique dans le domaine étudié. Le principe fondamental de la méthode des éléments finis consiste a :

- Définir une partition du domaine d'étude c'est-à-dire subdivisé le domaine d'étude en régions élémentaires (Eléments Finis).
- Représenter la fonction inconnue sur chacun de ces éléments par une approximation polynomiale.
- Construire les formes intégrales.
- Minimiser l'intégrale.
- Une organisation matricielle des calculs.
- Une résolution du système algébrique.

La MEF est une méthode très puissante pour la résolution des équations aux dérivées partielles surtout dans les géométries complexes.

IV.3 Le maillage :

Le maillage est la discrétisation spatiale du milieu continu, ou la modélisation géométrique du domaine par des éléments d'échelle finis et bien définis compte tenu de l'influence du maillage sur la solution de calcul, la génération du maillage (2D ou 3D) est une étape très importante dans l'analyse CFD. Des maillages de très bonne qualité sont indispensables pour obtenir des résultats de calcul précis. La plupart des méthodes numériques reposent sur des maillages tétraédriques ou hexaédriques pour discrétiser leurs domaines de recherche.

IV.3.1 Choix du type de maillage :

Il dépend principalement de la géométrie, des contraintes extérieures, des conditions aux limites à imposer, mais aussi de l'information recherchée : locale ou globale, structurés et non structurés.

IV.4 Modélisation et simulation numérique :

IV.4.1 introduction sur la simulation:

La simulation numérique, est une série de calculs effectués sur un ordinateur et reproduisant un phénomène physique. Elle aboutit à la description du résultat de ce phénomène, comme s'il s'était réellement déroulé. Elle peut représenter des phénomènes physiques complexes dont la description repose sur un modèle mathématique comportant des équations aux dérivées partielles. L'ordinateur résout alors ces équations numériquement en utilisant la méthode des éléments finis. C'est le cas de notre étude ou on a utilise le code de calcul ANSYS Workbench.

CHAPITRE IV : Simulation numérique, résultats et discussions

IV.4.2 Représentation de la géométrie et caractéristiques mécanique :

On a un pipeline de type API 290L X42 à étudier représenté dans le tableau IV.1

pipe	/
diamètre extérieur D_{ext}	323.9 mm
diamètre intérieur D_{int}	314.4mm
longueur L	2240mm
d'épaisseur t	9.5mm

Tableau IV.1. Géométrie des pipelines

Les caractéristiques mécaniques du pipeline sont présentées dans le tableau IV.2

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

Tableau IV.2. Propriété mécanique de l'acier API 290L X42

IV.4.3 Modélisation numérique d'un tube sans défaut :

La figure IV.1 présente le modèle géométrique de pipe.

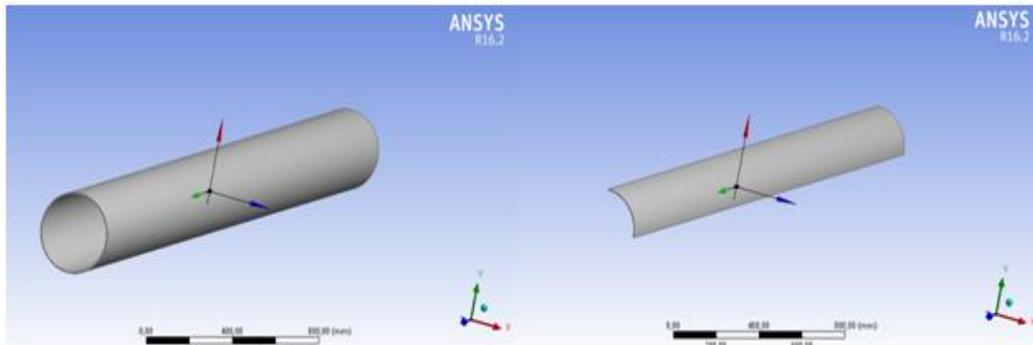


Figure IV.1. Le modèle géométrique de pipe

Le maillage effectué sur la structure pour la modélisation est tétraédrique et il est représenté dans la figure IV.2. Pour des résultats bien précis le maillage nous a calculé 450620 nœuds.

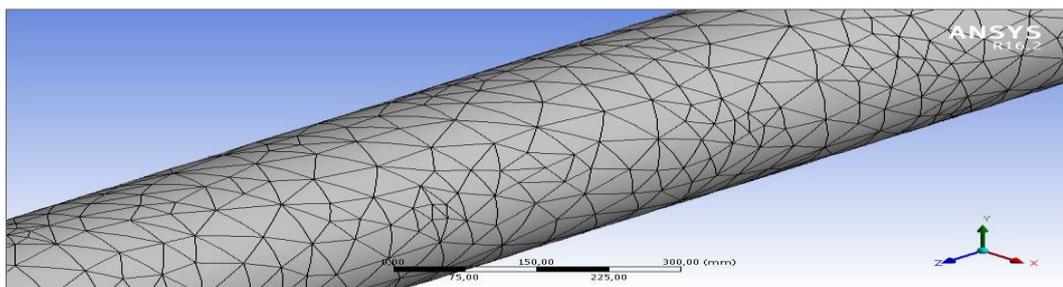


Figure IV.2. Le maillage tétraédrique de model

CHAPITRE IV : Simulation numérique, résultats et discussions

La figure IV.3 représente les conditions aux limites d'un pipeline sans défaut

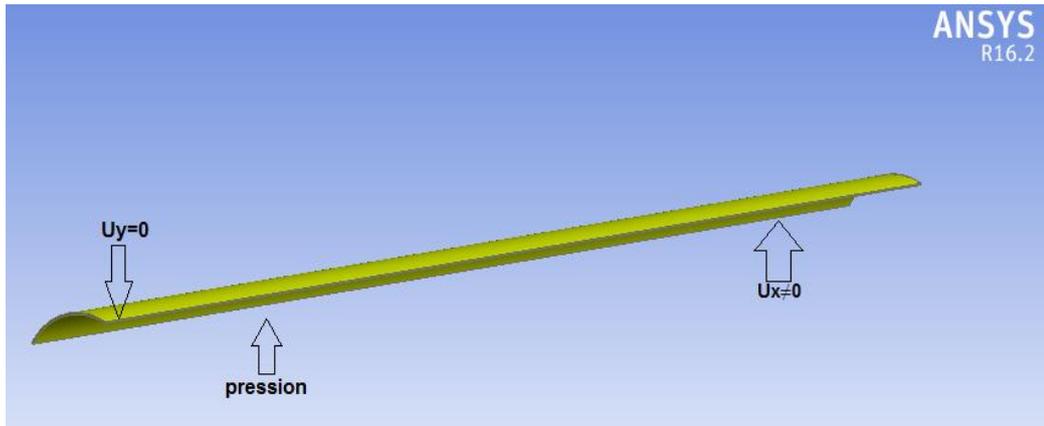


Figure IV.3. Conditions aux limites considérées dans notre calcul

IV.4.4 Modélisation numérique d'un tube avec défaut :

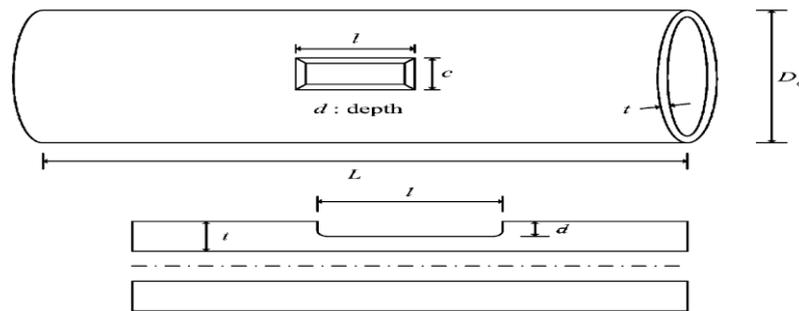


Figure IV.4. Géométrie d'un défaut de corrosion rectangulaire dans un pipeline

IV.4.5 Modélisation numérique d'un tube après la réparation par collage en composite :

La réparation était réalisé par le remplissage du volume corrodé par la résine et l'entouré avec un bondage en composite. Le tableau IV.3 présente les caractéristiques mécaniques de composite utilise.

Type	E_x (MPa)	E_y (MPa)	E_z (MPa)	ν_{xy}	ν_{xz}	ν_{yz}	G_{xy} (MPa)	G_{yz} (MPa)	G_{xz} (MPa)
Fibre de carbone	123340	7780	7780	0.27	0.27	0.42	5000	30820	5000
Fibre de verre	45000	10000	10000	0.3	0.4	0.3	5000	3846.2	5000

Tableau IV.3. Caractéristiques mécaniques des fibres de carbone et les fibres de verre

Type	E(MPa)	ν
Résine Epoxy	3000	0.35

Tableau IV.4. Caractéristiques mécaniques de Résine Epoxy

CHAPITRE IV : Simulation numérique, résultats et discussions

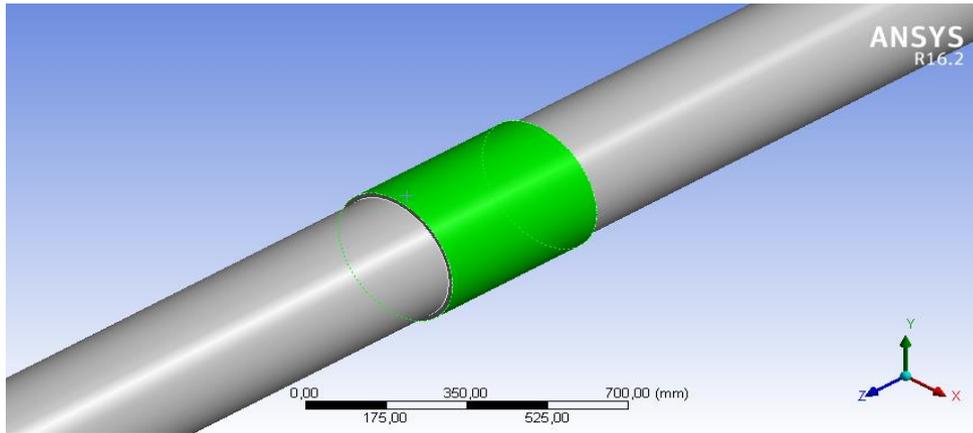


Figure IV.5. Modèle géométrique d'un pipe réparée par matériaux composites

IV.5 Discussion des résultats :

IV.5.1 Validation des résultats :

Notre modèle a été validé numériquement avec le modèle de Dumitrescu, où on a observé l'effet de l'épaisseur relative de défaut (D_{rd}) sur l'évolution de la contrainte équivalente dans les extrémités de la zone corrodée. On a pris trois niveaux de D_{rd} 0.3, 0.5, 0.7 pour un pipeline d'épaisseur de 9.5 mm.

- $D_{rd}=0.3$

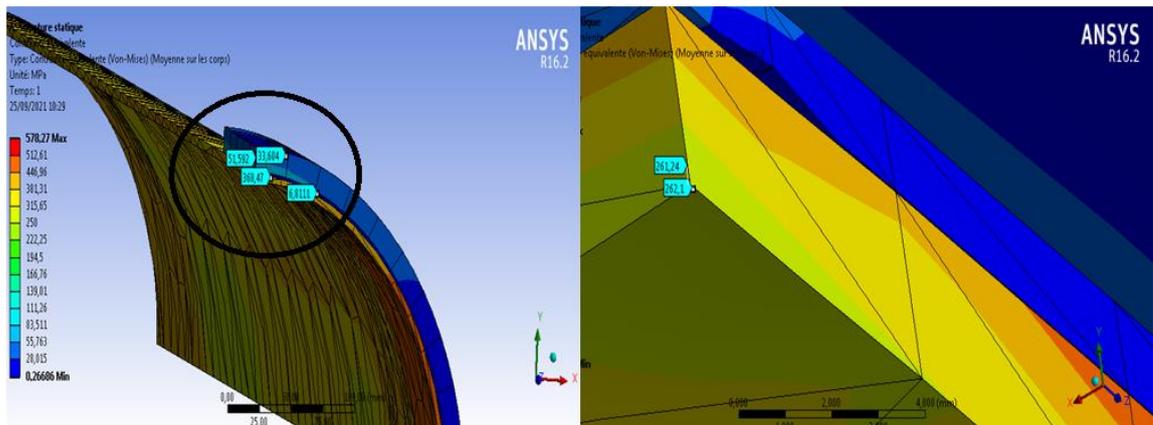


Figure IV.6. Contrainte Von Mises d'un pipe avec une $D_{rd} = 0.3$

La figure IV.6 représente la contrainte Von Mises d'une pipe corrodée avec un défaut d'une longueur de 220 mm et 2.85 mm de profondeur, la contrainte équivalente au niveau d'extrémité de la partie corrodée égale à 242.9MPa.

- $D_{rd}=0.5$

CHAPITRE IV : Simulation numérique, résultats et discussions

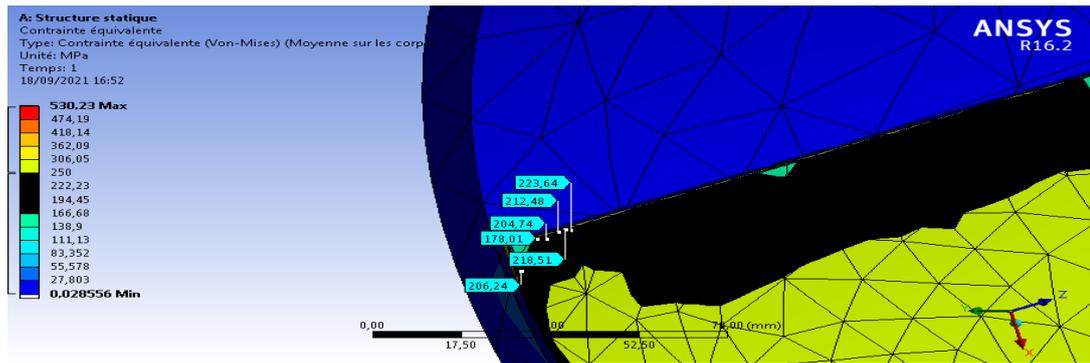


Figure IV.7. Contrainte Von Mises d'un pipe avec un $Drd = 0.5$

La figure IV.7 représente la contrainte Von Mises d'un pipe corrodée avec un défaut d'une longueur de 220 mm et 4.75 mm de profondeur, la contrainte équivalente au niveau d'extrémité de la partie corrodée égale à 212.5MPa.

- **Drd=0.7**

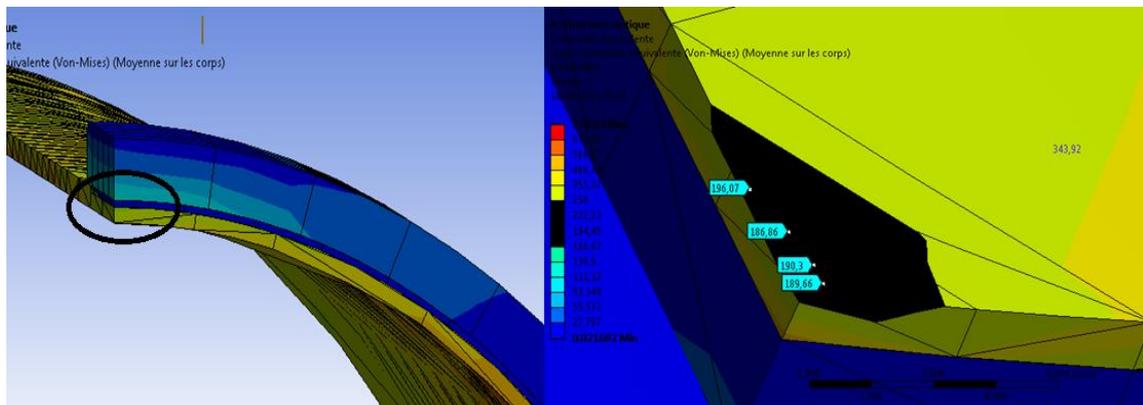


Figure IV.8. Contrainte Von Mises d'un pipe avec un $Drd = 0.7$

La figure IV.8 représente la contrainte Von Mises d'une pipe corrodée avec un défaut d'une longueur de 220 mm et 6.65 mm de profondeur. La contrainte équivalente au niveau d'extrémité de la partie corrodée égale à 196.07MPa

IV.5.2 Résultats :

Les résultats obtenue pour chaque Drd , nous a permis de faire une comparaison avec le travail de Dumitrescu qui va nous permettre de réaliser une validation. Ce qui est illustré dans le tableau IV.5 et la Figure IV.9

Drd	/	0.3	0.5	0.7
Contrainte équivalente (MPa)	Méthode de Dumitrescu	235	213	196
	Méthode présente	242.9	212.5	196.07
	Différence	7.9 (3.36%)	0.5 (0.235%)	0.7 (0.036%)

Tableau IV.5. Comparaison de résultat des deux méthodes

CHAPITRE IV : Simulation numérique, résultats et discussions

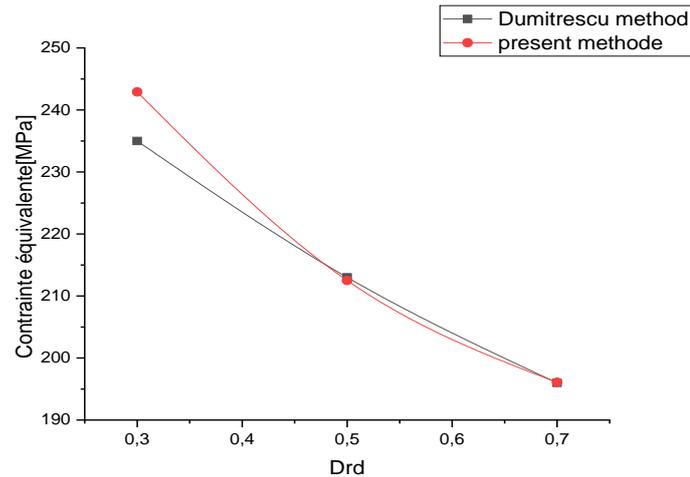


Figure IV.9. Contrainte équivalente en fonction de Drd pour deux différentes méthodes

La figure IV.9 montre les résultats obtenus, comparés avec ceux des travaux de Dumitrescu, Nous remarquons une similitude de nos résultats avec ceux de Dumitrescu. Pour le Drd égale a 0.5 et 0.7 (différence de 0.235% pour Drd=0.5, et pour le Drd=0.7 on a une différence de 0.036%), la courbe de nos résultats est presque la même avec la courbe des résultats de Dumitrescu avec un écart d'une erreur de 3.26 % pour la Drd=0.3.

IV.6 l'influence de pression :

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

- Pipe sain

Les figures IV.10 et IV.11 représentent la répartition de la contrainte équivalente d'un pipeline sain pour une pression interne qui varie de 5 MPa à 12.2 MPa.

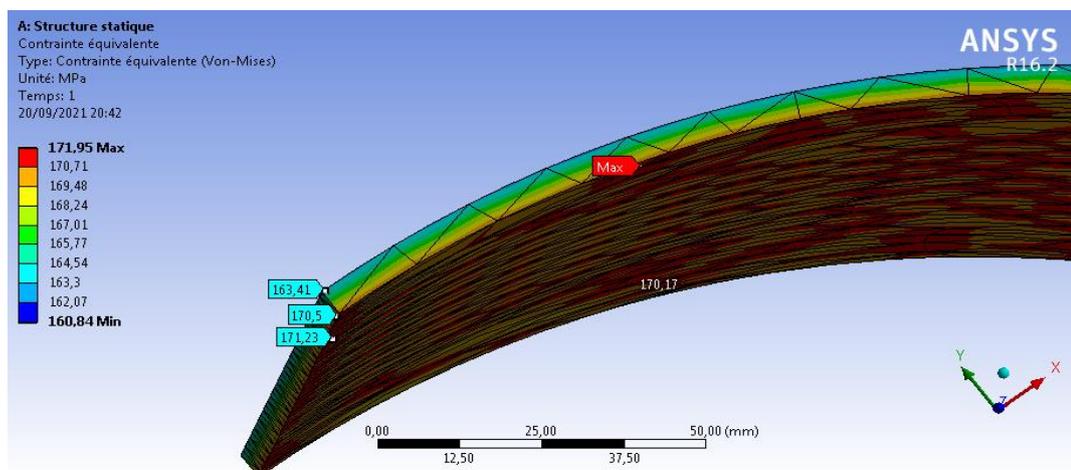


Figure IV.10. Contrainte equivalente d'un pipe sain sous une pression interne de 5 MPa

CHAPITRE IV : Simulation numérique, résultats et discussions

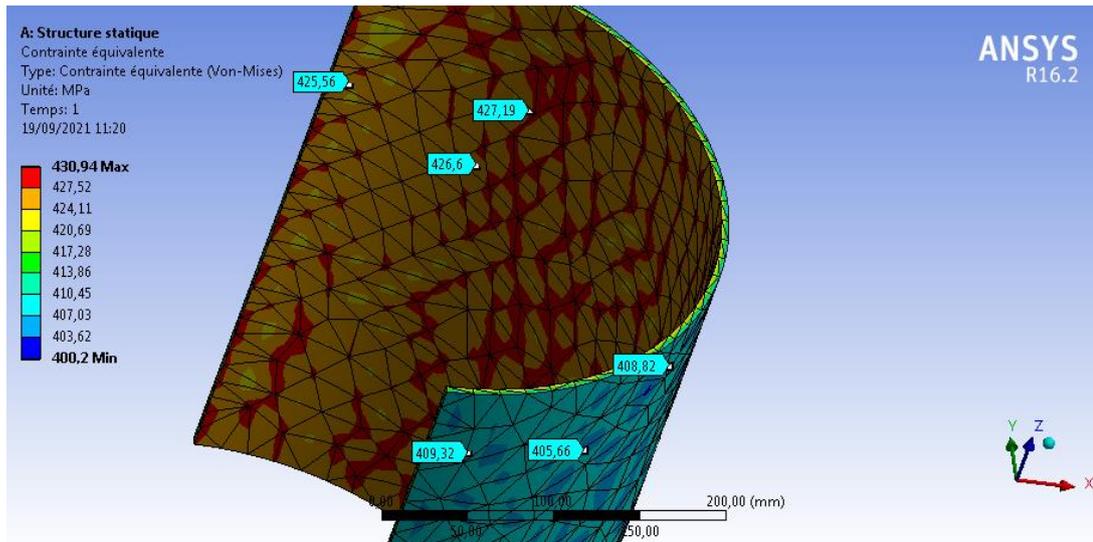


Figure IV.11. Contrainte équivalente d'un pipe sain sous une pression interne de 12.2 MPa

Les figures IV.10 et IV.11 montre que la contrainte équivalente augmente avec l'augmentation de la pression interne, ainsi que la valeur maximale de la contrainte équivalente du pipe situé sur la surface interne et la valeur minimale de la contrainte équivalente situé sur la surface externe. Pour le cas d'une pression interne de 5MPa la contrainte équivalente est maximale de 171.95 MPa (paroi interne) grâce au contact direct avec la charge interne et diminue jusqu'à 160.84 MPa (paroi externe)

- Pipe corrodé

Les figures IV.12 et IV.13 représente la contrainte équivalente d'un pipeline avec un défaut rectangulaire d'une profondeur de 2.85 mm et une longueur de 220mm pour une pression interne qui varie de 5 MPa à 12.2 MPa.

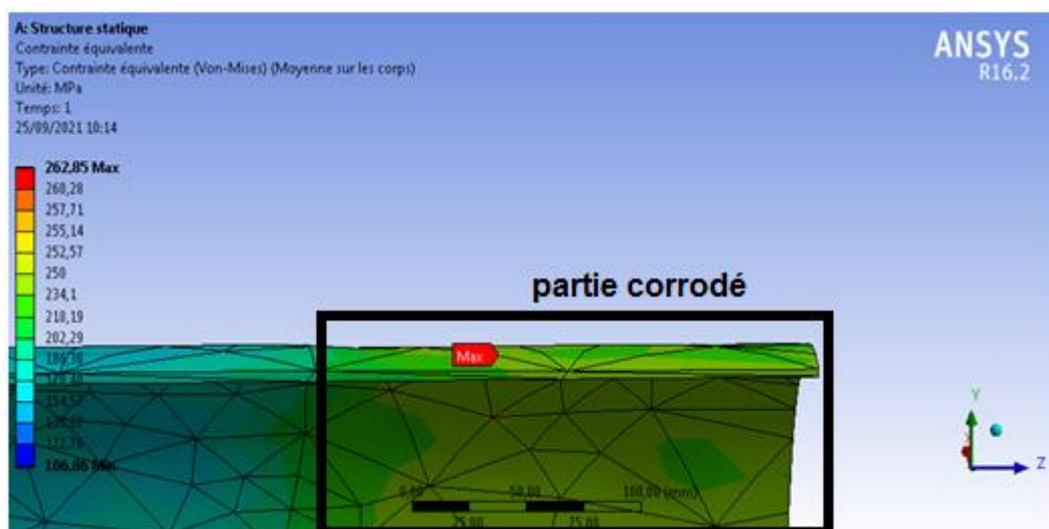


Figure IV.12. Contrainte équivalente d'un pipe corrodé sous une pression interne de 5 MPa

CHAPITRE IV : Simulation numérique, résultats et discussions

La figure IV.12 illustre la Contrainte équivalente d'un pipe avec défaut rectangulaire de 2.85mm de profondeur. Elle montre que la contrainte maximale est située sous la zone corrodée présentée en rouge, sa valeur est $\sigma_{\theta_{max}} = 262.85\text{MPa}$. La valeur minimale $\sigma_{\theta_{min}} = 106.86\text{MPa}$. La figure IV.13 montre que la contrainte maximale égale $\sigma_{\theta_{max}} = 641.35\text{MPa}$ et la valeur minimale $\sigma_{\theta_{min}} = 260.74\text{MPa}$.

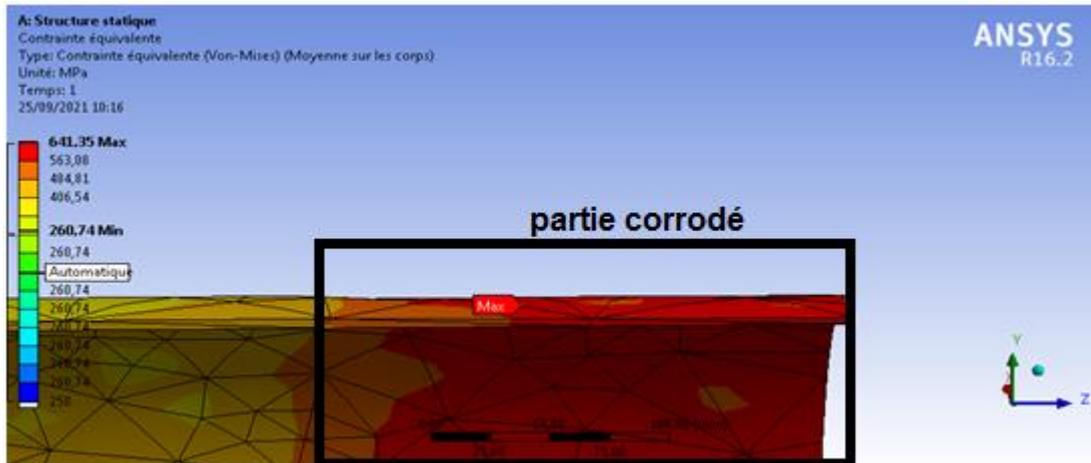


Figure IV.13. Contrainte équivalente d'un pipe corrodé sous une pression interne de 12.2 MPa

Les figures IV.12 et IV.13 montre que la contrainte maximum situe sous la zone corrodé et que l'augmentation de la pression interne implique l'augmentation de la contrainte équivalente qui peut provoquer une défaillance (déformation puis éclatement) si elle dépasse la limite d'élasticité de pipeline ce qui nécessite une réparation.

- Pipe réparé

Les figures IV.14, IV.15 et IV.16 représente la contrainte équivalente d'un pipeline avec un défaut rectangulaire d'une profondeur de 2.85 mm et une longueur de 220mm réparé par une enveloppe de composite d'épaisseur 26 mm pour trois différentes valeurs de la pression interne 5MPa, 10MPa et 12.2MPa.

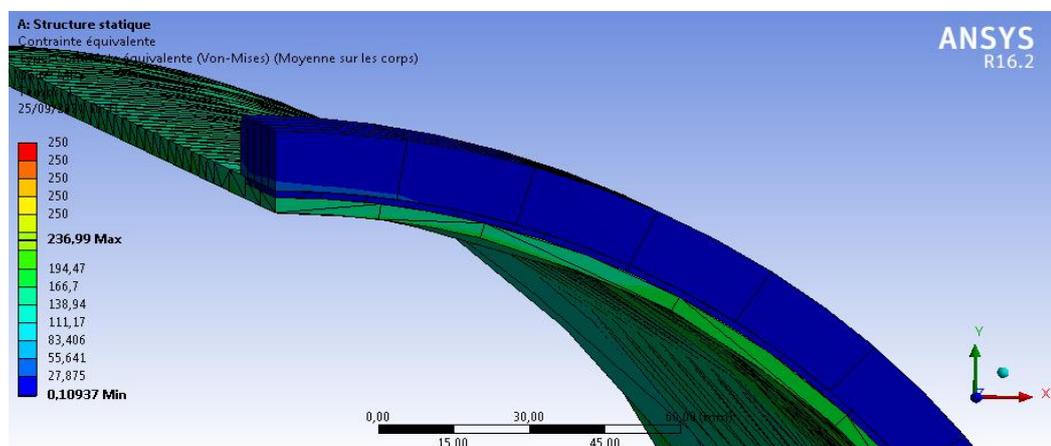


Figure IV.14. Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 5 MPa

CHAPITRE IV : Simulation numérique, résultats et discussions

La figure IV.14 montre que la contrainte maximale est située sous la zone corrodée sa valeur est $\sigma_{\theta\max} = 236.99\text{MPa}$. La valeur minimale est située dans la paroi extérieure de bondage de composite $\sigma_{\theta\min} = 0.10937\text{ MPa}$

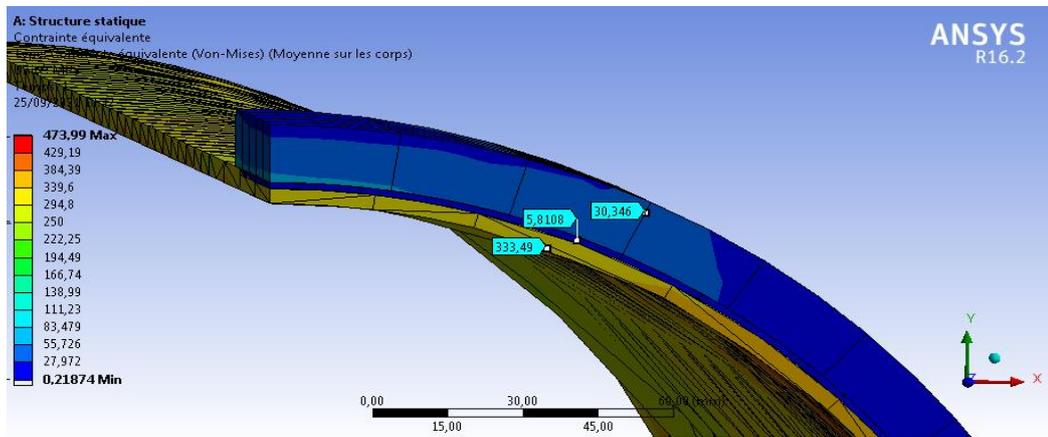


Figure IV.15. Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 10 MPa

Pour La figure IV.15 la contrainte maximale a une valeur de $\sigma_{\theta\max} = 473.99\text{MPa}$. La valeur minimale est $\sigma_{\theta\min} = 0.21874\text{ MPa}$, La figure IV.16 montre que la contrainte maximale égale $\sigma_{\theta\max} = 578.27\text{MPa}$ et la valeur minimale $\sigma_{\theta\min} = 0.26686\text{MPa}$.

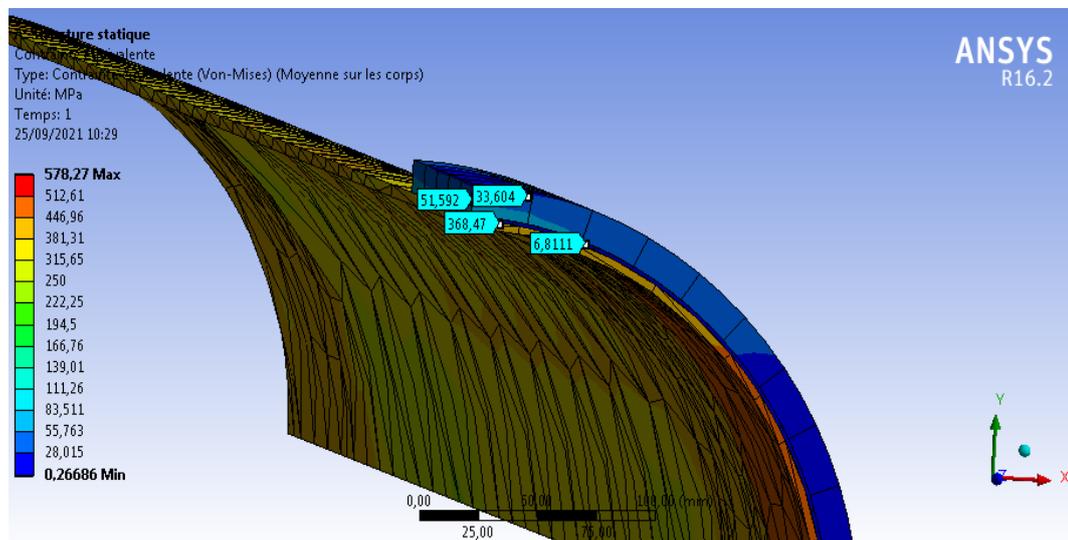


Figure IV.16. Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 12.2 MPa

D'après Les figures IV.14, IV.15 et IV16, la contrainte équivalente se diminue avec la dégradation de pression interne, on remarque la concentration de contrainte sur la paroi interne de pipe par rapport à la paroi extérieure de matériaux, la contrainte minimum se situe au niveau de résine.

CHAPITRE IV : Simulation numérique, résultats et discussions

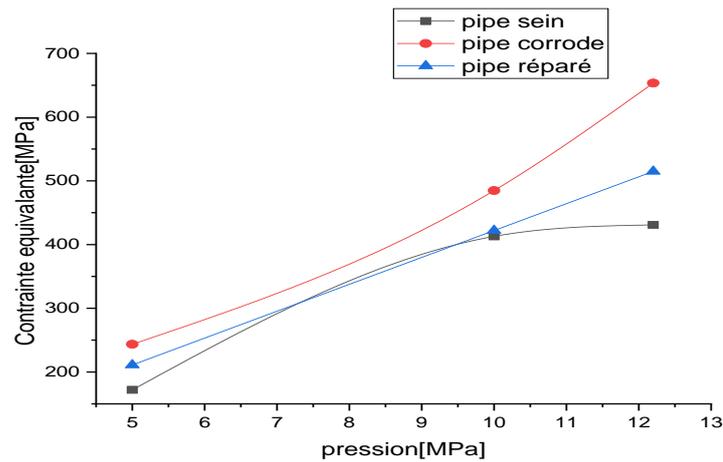


Figure IV.17. Contraite equivalente en fonction de pression interne

La figure IV.17 représente la contraintes equivalente de Von-moses par rapport à la pression interne pour un pipe sain, un pipe corrodé et un autre repare. La figure indique que la contrainte équivalente pour un pipe qui comporte un défaut a atteint une valeur maximale $\sigma_{\text{max}} = 641.35$ MPa pour une pression interne de 12.2 MPa tandis que la contrainte pour un pipe sans défaut atteint une valeur $\sigma_{\text{max}} = 430.94$ MPa pour la même valeur de pression. Apres une réparation avec patch en composite d'épaisseur de 26 mm, la contrainte équivalente a diminué jusqu'à 587.27 MPa.

IV.7 Effet de choix de matériaux de réparation :

Dans cette partie, on a essai de montrer l'importance du choix du type de matériaux composite, on a pris un pipeline avec un défaut rectangulaire d'une épaisseur de 2.85 mm réparé avec deux type de materiaux composite d'une epaisseur de 22 mm dans des differents cas de pression interne.

- Fibre de verre :

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

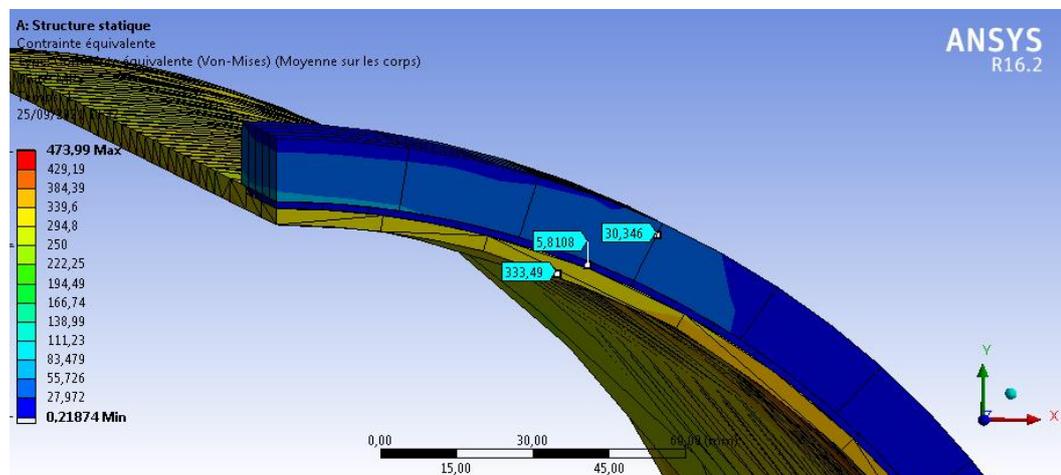


Figure IV.18. Contraite equivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 10 MPa

CHAPITRE IV : Simulation numérique, résultats et discussions

La figure IV.18 présente la contrainte équivalente d'un pipeline avec défaut 2.85 mm réparé avec une couche de composite « fibre de verre » 22 mm d'épaisseur, avec une pression interne de 10MPa. La contrainte maximale $\sigma_{\text{rmax}} = 473.99$ MPa. Elle est concentrée au niveau de l'épaisseur de pipe. La contrainte minimale égale $\sigma_{\text{rmin}} = 0.21874$ MPa.

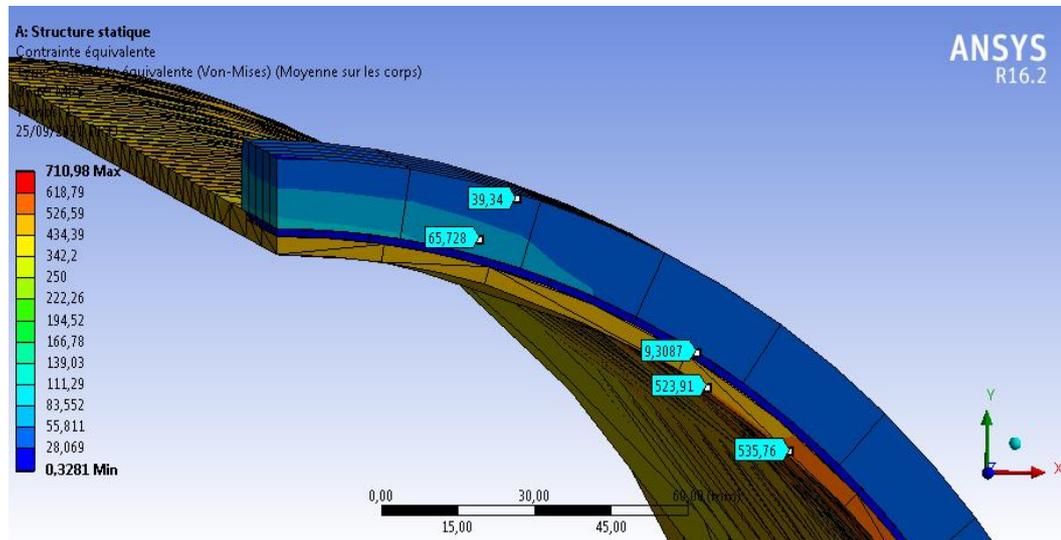


Figure IV.19. Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 15 MPa

La figure IV.19 montre la contrainte équivalente d'un pipeline avec défaut 2.85 mm réparé avec une couche de composite « fibre de verre » 22 mm d'épaisseur, avec une pression interne de 15 MPa. La contrainte maximale $\sigma_{\text{rmax}} = 710.98$ MPa. La contrainte minimale égale $\sigma_{\text{rmin}} = 0.3281$ MPa.

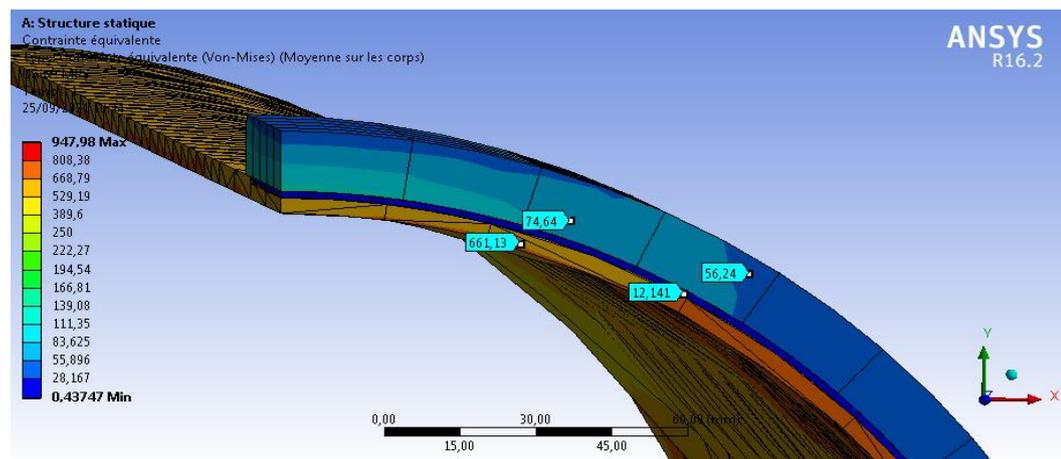


Figure IV.20. Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 20 MPa

La figure IV.20 montre la contrainte équivalente d'un pipeline avec défaut 2.85 mm réparé avec une couche de composite « fibre de verre » 22 mm d'épaisseur, avec une

CHAPITRE IV : Simulation numérique, résultats et discussions

pression interne de 20MPa La contrainte maximale $\sigma_{\text{max}}= 947.98\text{MPa}$. La contrainte minimale égale $\sigma_{\text{min}} = 0.43747\text{MPa}$.

- **Fibre de carbone**

Pour le deuxième cas le pipeline est réparé avec les fibres de carbone

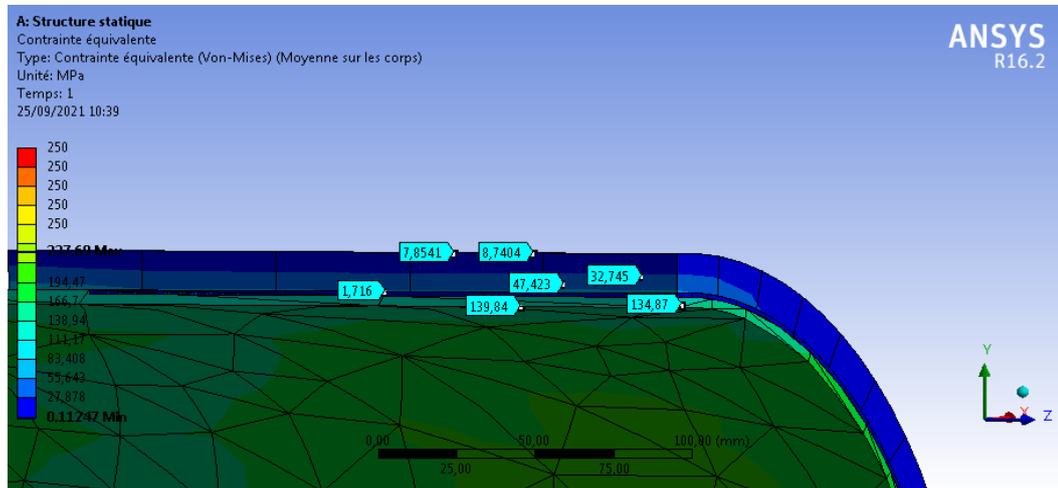


Figure IV.21. Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 5 MPa

La figure IV.21 montre la contrainte équivalente d'un pipeline avec défaut 2.85 mm réparé avec une couche de composite « fibre de carbone »22 mm d'épaisseur, avec une pression interne de 5MPa La contrainte maximale $\sigma_{\text{max}}=237.69$ MPa. La contrainte minimale égale $\sigma_{\text{min}} = 0.11247\text{MPa}$.

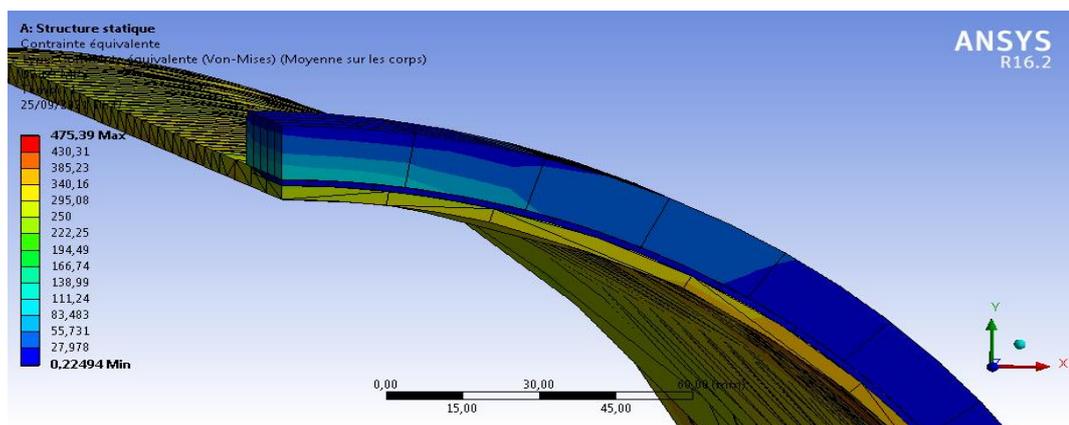


Figure IV.22. Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 10 MPa

La figure IV.22 montre la contrainte équivalente d'un pipeline avec défaut 2.85 mm réparé avec une couche de composite « fibre de carbone »22 mm d'épaisseur, avec une pression interne de 10MPa La contrainte maximale $\sigma_{\text{max}}= 475.34\text{MPa}$. La contrainte minimale égale $\sigma_{\text{min}} = 0.22494\text{MPa}$. On remarque sur la figure IV.22 indique que la

CHAPITRE IV : Simulation numérique, résultats et discussions

contrainte équivalente a augmenté de 473.99 MPa jusqu'à 475.34 MPa au fur et à mesure qu'on a change de matériaux composite.

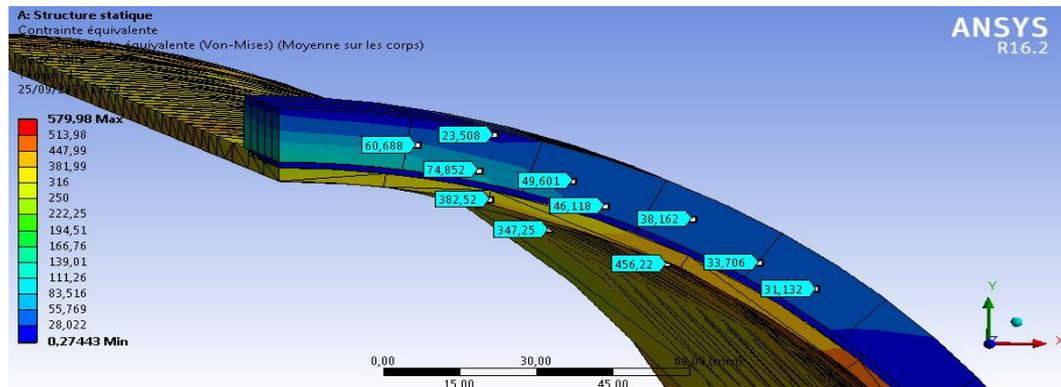


Figure IV.23. Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 12.2 MPa

La figure IV.23 montre la contrainte équivalente d'un pipeline avec défaut 2.85 mm réparé avec une couche de composite « fibre de carbone » 22 mm d'épaisseur, avec une pression interne de 12.2 MPa. La contrainte maximale $\sigma_{\max} = 579.98 \text{ MPa}$. La contrainte minimale égale $\sigma_{\min} = 0.27443 \text{ MPa}$.

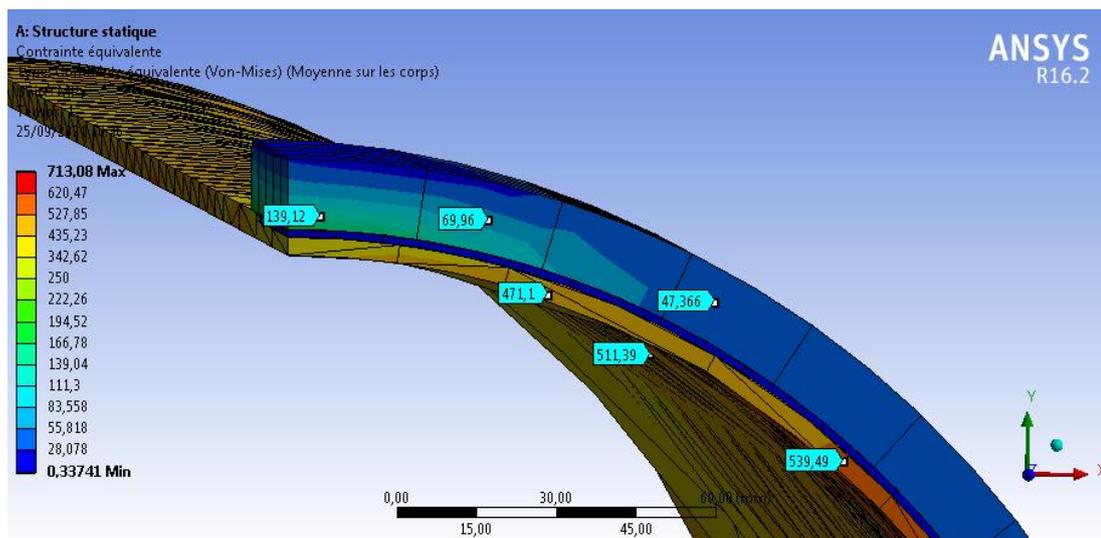


Figure IV.24. Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 15 MPa

La figure IV.24 montre la contrainte équivalente d'un pipeline avec défaut 2.85 mm réparé avec une couche de composite « fibre de carbone » 22 mm d'épaisseur, avec une pression interne de 15 MPa. La contrainte maximale $\sigma_{\max} = 713.08 \text{ MPa}$. La contrainte minimale égale $\sigma_{\min} = 0.33741 \text{ MPa}$.

CHAPITRE IV : Simulation numérique, résultats et discussions

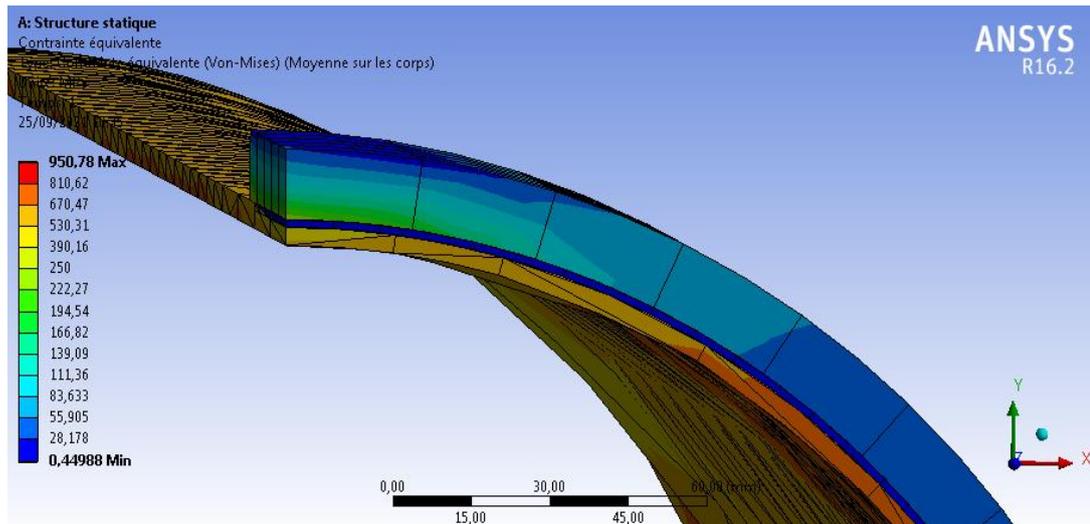


Figure IV.25. Contrainte équivalente d'un pipe réparé sous une pression interne de 20 MPa

La figure IV.25 montre la contrainte équivalente d'un pipeline avec défaut 2.85 mm réparé avec une couche de composite « fibre de carbone » 22 mm d'épaisseur, avec une pression interne de 20MPa. La contrainte maximale $\sigma_{rmax} = 950.78$ MPa. La contrainte minimale égale $\sigma_{rmin} = 0.44988$ MPa. On remarque sur la figure IV.25 indique que la contrainte équivalente a augmenté de 947.98 MPa jusqu'à 950.78 MPa au fur et à mesure qu'on a change de matériaux composite. Tandis que les résultats constatés sur la figure IV.26 montrent que le choix de type de matériaux composite joue un rôle très important dans la réparation.

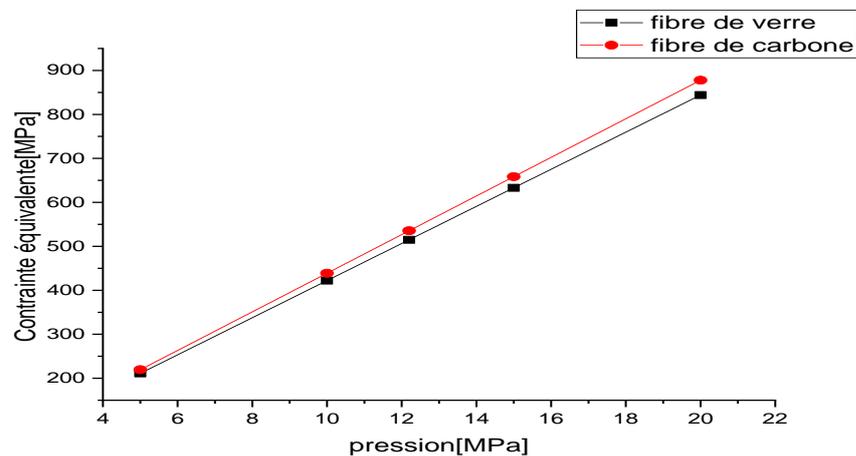


Figure IV.26. Contrainte équivalente en fonction de pression interne

La figure IV.26 montre la contrainte équivalente d'un pipeline réparé avec deux types de composite en fonction de pression interne on conclut que les fibres de verre sont plus efficace que les fibres de carbone pour la réparation des pipelines.

CHAPITRE IV : Simulation numérique, résultats et discussions

IV.8 Conclusion :

Ce travail sert à étudier le comportement mécanique de la structure des pipelines en présence de défaut de corrosion ainsi que la réparation de ces derniers par un bondage en matériaux composite. Nous avons réalisé une étude numérique pour évaluer la contrainte équivalente de Von-Mises, Les résultats obtenus ont été comparés à ceux obtenus expérimentalement de A. Dumitrescu.

Nous avons fait une simulation numérique avec le logiciel ANSYS Workbench afin d'étudier le comportement d'un pipe sans défaut, avec défaut rectangulaire et un autre avec défaut réparé par enveloppe en composite types carbone-époxy et verre-époxy.

On a étudié l'influence de la pression interne et le type de matériaux composite sur la contrainte équivalente dans les trois états de pipeline (sain, corrodé et réparé). Les résultats obtenus ont montrés :

- La contrainte équivalente de Von Mises augmente avec l'augmentation de pression interne
- La concentration de contrainte est maximale au niveau de la zone du défaut.
- Le choix de type de matériaux composite a un grand impact sur l'efficacité de la réparation
- Dans la pression utile du pipeline, la contrainte équivalente pour un pipeline réparé en matériaux composite atteint presque la même valeur qu'un pipeline sain.

CONCLUSION GENERALE

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 collage de matériaux composites et déduire l'épaisseur de collage.

L'étude de la contrainte équivalente d'un pipe corrodé avec trois différentes profondeurs relatives du défaut, a montré des résultats dont nous avons comparé avec le travail de Dumitrescu. Pour effectuer une validation.

Il existe plusieurs méthodes de réparation. Une des méthodes utilisées est de les renforcer par collage de 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 (carbone- fibre de verre) révèle que les niveaux des contraintes équivalentes sont réduits, et selon les résultats la réparation en fibre de verre est plus efficace par rapport aux autres matériaux.

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.

Chercher des méthodes de résoudre notre problème tel que les méthodes analytiques.

Références

Bibliographiques

- [18] M. Mulle, F. Collombet, J. Fajoui, S. Freour, F. Jacquemin, «Etude numérique de la diffusion d'humidité dans les matériaux composites instrumentés par des fibres optiques à réseaux de Bragg », <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00597935>, 2 Juin 2011.
- [19] Z. S. Nazirah, M. S. Abdul Majid, R. Daud. « Effets des températures élevées sur le verre renforcé Tuyaux époxy sous multiaxe Charges », *Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES)* ISSN (Print): 2289-4659; e-ISSN: 2231-8380 Volume 10, Issue 1, pp. 1846-1856, June 2016 © Universiti Malaysia Pahang, Malaysia.
- [20] Halima Chenine, Djamel Ouinas, Saadi Mohamed, Beladam Djamel. « Effet du flambage sur les pipes en composite stratifiés munis d'entailles », *MATEC Web of Conferences* 11-01028, 2014.
- [21] Bouhafs mohamed, Sereir zouaoui. « Calcul de la contrainte radiale pour le dimensionnement des pipelines en composite sous chargement environnemental », 12ème congrès de mécanique 21-24 avril 2015 casablanca (maroc)
- [22] R. W. Bianchi, Y. W. Kwon composite patch repair for underwater aluminum structures December 2019.
- [23] Chen, J.; Wang, H.; Salemi, M.; Balaguru, P.N. Finite Element Analysis of Composite Repair for Damaged Steel Pipeline. *Coatings* 2021, 11, 301. <https://doi.org/10.3390/coatings11030301>.
- [24] H. Fang et K. Yang mdpi(experimental and numerical study on mechanical analysis of buried corroded concrete pipes under statit traffic loads) 20/11/2019.
- [25] Yu Zhang , Ziyun Cheng & Zhike Jia (2020): Failure loads analysis of corroded pipe repaired by composite material under tension and internal pressure, *Journal of Marine Engineering & Technology*, DOI: 10.1080/20464177.2020.1826675
- [26] P.Hopkins, “The structural integrity of oil and gas transmission pipelines”, Penspen Ltd.UK, Elsevier Publishers, 2002.
- [27] J.F.Kiefner, P.H Vieth, “Evaluating pipe 1: new method corrects criterion for evaluating corroded pipe”, *Oil & Gas Journal*, 88(32), 56-59, 1990.
- [28] J.F Kiefner, P.H Vieth, “Evaluating pipe conclusion: PC program speeds new criterion for evaluating corroded pipe”, *Oil & Gas Journal*, 88(34), 91-93, 1990.
- [29] T.A Netto, U.S Ferraz, S.F Estefen, “The effect of corrosion defects on the burst pressure of pipelines”, *Journal of Constructional Steel Research*, 61, 1185-1204, 2008.