

---

## Table des matières :

---

ملخص .....	6
Abstract : .....	7
Résumé : .....	8
Nomenclature.....	9
Introduction générale.....	10

<b>Chapitre I : Étude bibliographique sur les défaillances des structures de pipelines et réparation par renforcement par manchons composites.</b>
--

I	Introduction : .....	12
I.1	Défaillances dans les ouvrages de pipelines : .....	14
I.1.1	Corrosion dans les pipelines : .....	15
I.1.2	Types de corrosion : .....	16
I.1.3	Fissuration des pipelines : .....	19
I.1.4	Défaillances par déformation plastique: .....	19
I.1.5	Défaillances par rupture fragile : .....	20
I.1.6	Défaillances par rupture ductile : .....	21
I.2	Traitements de réparation : .....	21
I.2.1	Traitements mécaniques de surface: .....	22
I.2.2	Traitement chimique de surface : .....	23
I.2.3	Traitement électrochimique de surface : .....	23
I.3	Réparation par collage : .....	24
I.4	Systèmes de réparation par renforcement des fibres composites : .....	25
I.4.1	Système de réparation par matériaux composites flexible : .....	25
I.4.2	Système de réparation par matériaux composites pré -durci : .....	26
I.5	Matériaux des composants pour une réparation par renforcement de composite: ....	27
I.5.1	Fibres de renforcement : .....	27
I.5.2	Les matrices : .....	30
I.5.3	Remplissage « Infill » : .....	31
I.6	Synthèse bibliographique : .....	33
I.7	Conclusion : .....	35

<b>Chapitre II : Contexte industriel.</b>
---

II	Introduction : .....	36
II.1	Description de la STT : .....	37

II.2	Réalisations de la STT :.....	37
II.3	Activités de la STT :.....	38
II.4	Caractéristiques des aciers (norme API 5L) :.....	39
II.4.1	Description de la ligne GZ1 40'' :.....	40
II.4.2	Caractéristiques du matériau de l'étude X60 :.....	46
II.5	Inspection des canalisations :.....	49
II.5.1	Principales causes des dégradations de canalisations:.....	49
II.5.2	Méthodes d'inspection des tubes :.....	49
II.6	Méthodes de traitement des surfaces :.....	50
II.6.1	Décapage :.....	50
II.6.2	Sablage :.....	51
II.7	Méthodes de réparation des tubes :.....	52
II.7.1	Réparation par demi-coquilles soudées :.....	52
II.7.2	Réparation par Clock spring :.....	53
II.8	Conclusion :.....	57

### **Chapitre III : Modélisation et simulation numérique.**

III	Introduction :.....	58
III.1	Différentes étapes du comportement mécanique du matériau :.....	59
III.2	Étude analytique de la variation des rapports contrainte, pression interne et celle des diamètres moyens et épaisseur pour les tubes spéciaux mince à l'état idéal :.....	60
III.3	Analyse élastique des éléments de conduites avec corrosion:.....	63
III.3.1	Codes d'évaluation :.....	63
III.3.2	ASME B31G modifié ou 085DL :.....	69
III.4	Modélisation et simulation numérique :.....	70
III.4.1	Modélisation numérique d'un tube sans défaut :.....	70
III.4.2	Modélisation numérique d'un tube comportant un défaut :.....	72
III.4.3	Modélisation numérique d'un tube comportant un défaut parabolique réparé par collage de composite :.....	73
III.5	Conclusion :.....	76

### **Chapitre IV : Résultats et discussions**

IV	Introduction :.....	77
IV.1	Analyse élastique des éléments de conduites sans corrosion :.....	78
IV.1.1	Répartition des contraintes équivalentes de VON MISES :.....	78
IV.1.2	Validation des résultats :.....	82

IV.2 Répartition des contraintes équivalentes de Coque cylindrique avec défaut parabolique : .....	83
IV.3 Répartition des contraintes équivalentes de Coque cylindrique avec défaut parabolique réparée par collage de composite : .....	84
IV.4 Conclusion : .....	87
V Bibliographie : .....	90

---

## Liste des figures :

---

Figure I. 1 : pipelines à l'état de stockage (STT) station de traitement des tubes Sonatrach. ...	13
Figure I. 2 : causes des incidents significatifs des pipelines souterrain et sous-marin .....	14
Figure I. 3 : causes des incidents significatifs des pipelines de transmission de gaz naturel souterrain et sous-marin.....	15
Figure I. 4 : corrosion dans le pipe. (a) :interne_(b) : externe. ....	15
Figure I. 5 : corrosion par piqûration.....	17
Figure I. 6 : corrosion bactérienne .....	18
Figure I. 7 : Fissuration par corrosion sous contrainte. ....	19
Figure I. 8 : courbe rationnelle de traction <sup>[source : LAROUSSE]</sup> .....	20
Figure I. 9 : Modes de ruptures. ....	21
Figure I. 10 : traitement mécanique par abrasion, (a) : grenailage, (b) : sablage.....	23
Figure I. 11 : Réparation par composite d'une pipe en acier. ....	24
Figure I. 12 : Spécimens en CFRP enveloppés durcis sous l'application sous-marine. ....	26
Figure I. 13 : réparation par renforcement composite type Clock Spring . ....	27
Figure I. 14 : processus de réparation extérieur d'une pipe utilisant remplissage et enveloppe souple . ....	32
Figure II. 1 : Réseau de transport des Hydrocarbures en Algérie (d'après sonatrach).....	37
Figure II. 2 : stockage des tubes (STT).....	38
Figure II. 3 : Station de compression de la ligne GZ1.....	45
Figure II. 4 : éprouvette de l'essai. ....	47
Figure II. 5 : éprouvette de traction avant et après essai . ....	47
Figure II. 6 : Courbe effort allongement .....	48
Figure II. 7 : Outil intelligent d'inspection .....	50
Figure II. 8 : Décapage manuelle (STT).....	51
Figure II. 9 : Sableuse automatique (STT). ....	51
Figure II. 10 : Sableuse manuelle (STT). ....	52
Figure II. 11 : Géométrie de demi-coquilles . ....	52
Figure II. 12 : Opération de soudages de demi coquilles (STT). ....	53
Figure II. 13: Réparation par clock spring.....	54

Figure II. 14 : installation de Clock Spring (STT). .....	55
Figure III. 1 : Comportement d'un acier au carbone. ....	59
Figure III. 2 : Variation des contraintes en fonction du rayon r. ....	61
Figure III. 3 : Représentation de la fissure sur un tube. ....	63
Figure III. 4 : Défaut de corrosion court projeté selon une forme parabolique. ....	64
Figure III. 5 : Défaut de corrosion long projeté selon une forme rectangulaire. ....	64
Figure III. 6 : Face longitudinale imaginaire d'un défaut de corrosion. ....	65
Figure III. 7 : Surface corrodée parabolique assumée pour le défaut relativement court de corrosion (selon ASME B31G). ....	66
Figure III. 8 : Secteur rectangulaire supposé corrodé pour un plus long défaut de corrosion (selon ASME B31G /34/). ....	67
Figure III. 9 solid 186. ....	71
Figure III. 10 : le modèle coque cylindrique-maillage retenu pour le ¼ de coque- ....	71
Figure III. 11 : conditions aux limites pour la pression intérieure. ....	72
Figure III. 12 : Coque cylindrique avec défaut parabolique. ....	72
Figure III. 13 : Maillage d'un domaine cylindrique en éléments finis tétraédriques <sup>[64]</sup> . ....	73
Figure III. 14 Tube réparé par un manchon composite ....	74
Figure III. 15 Maillage d'un tube cylindrique réparé par collage de composite en éléments finis tétraédriques. ....	75
Figure IV. 1 : distribution des contraintes radiale, circonférentielle et axiale en fonction de l'épaisseur .....	78
Figure IV. 2 : tube sous pression interne (acier grade API 5L X60, $P_i=1$ MPa, $D_{ext}=1016$ mm, $t=12.7$ mm).....	79
Figure IV. 3 : tube sous pression interne (acier grade API 5L X60, $P_i=5$ MPa, $D_{ext}=1016$ mm, $t=12.7$ mm).....	79
Figure IV. 4: tube sous pression interne (acier grade API 5L X60, $P_i=1$ MPa, $D_{ext}=459.4$ mm, $t=8$ mm). ....	80
Figure IV. 5 : tube sous pression interne (acier grade API 5L X60, $P_i=5$ MPa, $D_{ext}=459.4$ mm, $t=8$ mm).....	80
Figure IV. 6 : tube sous pression interne (acier grade API 5L X60, $P_i=1$ MPa, $D_{ext}=219$ mm, $t=6$ mm). ....	81
Figure IV. 7: tube sous pression interne (acier grade API 5L X60, $P_i=3$ MPa, $D_{ext}=219$ mm, $t=6$ mm). ....	81
Figure IV. 8 : Tube sous pression interne comportent un défaut parabolique $p_i = 5$ MPa .....	83
Figure IV. 9 : contrainte maximal de Von Mises en fonction de perte d'épaisseur avec une pression interne $P_i=5$ MPa. ....	84
Figure IV. 10: Tube sous pression comportent un défaut parabolique réparé par collage de 8 couches de composite remplie. ....	85
Figure IV. 11 Tube sous pression comportent un défaut parabolique réparé par collage de 8 couches de composite sans remplissage. ....	85

---

## Liste des tableaux :

---

Tableau I. 1 : Moyenne annuelle des conséquences d'incidents significatives de corrosion entre 1988 et 2007.....	16
Tableau I. 2 : Récapitulatif sur les propriétés des fibres .....	29
Tableau I. 3 : Comparaison entre ces deux types de résines.....	31
Tableau I. 4 : les avantages et les inconvénients de la méthode de réparation par renforcement de composite. ....	32
Tableau I. 5 : Recherche, développement et pratiques sur la réparation des pipelines par renforcement des fibres composites. ....	34
Tableau II. 1 : Propriétés mécanique des aciers pour tubes selon la norme API .....	39
Tableau II. 2 : Composition chimiques en % de l'acier X60 et X100 .....	39
Tableau II. 3 : caractéristiques des canalisations du sud algérien (TRC-DRC. Sonatrach). ...	41
Tableau II. 4 : Implantation des stations de compressions GZ1. ....	45
Tableau II. 5 : Spécification technique de la ligne GZ1 40'' (DRC). ....	46
Tableau II. 6 : paramètre énergétiques maximums d'écoulement du gaz a la sortie des stations de compression SC de GZ1.....	46
Tableau II. 7 : Composition chimique (en %). ....	46
Tableau II. 8 : Résultat d'essai de traction.....	48
Tableau II. 9: Qualité d'activateur pour l'adhésif .....	56
Tableau III. 1 : variation des dimensions et de pression.....	62
Tableau III. 2 : caractéristique des matériaux. ....	74
Tableau IV. 1 : comparaison entre les résultats analytique et résultats numériques de la contrainte équivalente de Von Mises.	82

## ملخص:

نقل الطاقة عبر خطوط أنابيب يعتبر أكثر أداة فعالة لنقل المحروقات . ولكن لسوء الحظ الاستغلال المفرط لخطوط الأنابيب يزيد من احتمال حدوث إخفاقات مثل التآكلات الداخلية والخارجية، والتكسير، والشوّهات. تشمل دراستنا محاكاة في الصلب بعد الضرر الناجم عن التآكل الموضعي. المنهجية هو النظر في هيكل API 5L X60 العديدة للبنية خط أنابيب خط الانابيب من دون عيوب وبعد إدخال عيب بيضاوي الشكل، وأخيرا للنظر في سلوك هيكل متعدد الطبقات بعد إصلاح الاختلاف حالة التوتر. أظهرت ANSYS مركب قدرة القائمة. وقد أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها بواسطة برنامج مجال الإجهاد فون ميزس يحدده حساب كفاءة إصلاح الصلب بنسبة تعزيز مركب

*الكلمات الرئيسية: التآكل، ، والضرر، وتعزيز مركب، ansys والمحاكاة API 5L X60 الفولاذ*

# A

## **bstract:**

---

Energy transmission by pipelines is more significant tool for hydrocarbons industries. However pipelines exploitation increases probability of occurrence by failures such as internal and external corrosions, cracking, and deformation. . Our study includes a numerical simulation of a pipeline structure in API 5L X60 steel after damage by localized corrosion. The methodology is to consider a pipeline structure without defects and after introduction of an elliptical defect and finally to consider the behavior of the multilayer structure after repair capacity based composite. The results obtained by the ANSYS software have been showed the stress state variation. The Von Mises stress field determined by calculation showed the efficiency of steel repair by composite reinforcement.

***Keywords:*** *corrosion, steel API 5L X60, ANSYS softwre, damage, composite reinforcement.*

# Résumé :

---

La transmission d'énergie par pipelines est l'outil le plus fiable pour les industries d'hydrocarbures. Cependant l'exploitation des pipelines augmente la probabilité d'occurrence des défaillances telles que les corrosions internes et externes, la fissuration, et la déformation. Notre étude comprend une simulation numérique d'une structure de pipeline en acier API 5L X60 après les dommages causés par la corrosion localisée. La méthode consiste à envisager une structure de pipeline sans défauts et après l'introduction d'un défaut elliptique et enfin à examiner le comportement de la structure multicouche après la capacité de réparation à base de composite. Les résultats obtenus par le logiciel ANSYS ont montré la variation de l'état de contrainte. Le champ de contrainte de Von Mises déterminé par le calcul a montré l'efficacité de la réparation de l'acier par un renforcement de composite.

**Mots clés :** *corrosion, acier API 5L X60, logiciel ANSYS, endommagement, renforcement par composite.*

# N

## OTATIONS ET SYMBOLES :

---

$R_c$	Contrainte d'écoulement du matériau ou la limite d'écoulement
$D_{ext}$	Diamètre extérieur du tuyau
$D_{int}$	Diamètre interne du tuyau
$t$	épaisseur
$2c$	L'extension maximale longitudinale de la corrosion
$A$	Profondeur du défaut
$M$	Coefficient du flambage
$Q$	Facteur de correction
$P_{ult}$	Pression ultime d'un tuyau en acier
$R_e$	Limite d'élasticité
$R_m$	Dans le code ASME B31G modifié la limite d'écoulement,
$\sigma$	Stress d'ingénierie total
$E$	Module de Young
$\sigma_\theta$	Contrainte circonférentielle
$\sigma_e$	Contrainte équivalentes de Von Mises
$\sigma_{zz}$	Contrainte de traction
$\sigma_r$	Contrainte radiale
$A_{pc}$	La surface de défaut
$A_c$	La surface corrodée
$A_{co}$	La surface non corrodée
$T$	La température sous sollicitant le facteur du code B31 approprié
$f$	Facteur de conception approprié d'ASME B31.4, d'ASME B31.8, ou d'ASME B31.11, (normalement égale à 0.72)
API:	American Petroleum Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
M.E.F	Méthode des éléments finis
MEC	Méthyléthylcétone
PRF	Polymère renforcé en fibre
CRFP	Polymère renforcé en fibre de carbone

# I ntroduction générale

---

La maintenance des ouvrages métalliques consiste à les protéger en limitant les défaillances tel que la corrosion, à les réparer en cherchant à compenser les pertes de rigidité ou de résistance due aux pics de corrosion et à les renforcer en améliorant les performances et la durabilité des ouvrages.

C'est un problème préoccupant dans l'industrie pétrolière dans la mesure où le coût des ouvrages neufs est de plus en plus élevé et les conditions de réparation de plus en plus difficiles.

Parmi les techniques de réparation des pipelines endommagés est la réparation des structures métalliques par renforcement d'un matériau composite. Depuis une dizaine d'année, une alternative est proposée : il s'agit de renforcer ou de réparer les ouvrages métalliques par des matériaux composites à matrice polymère collés extérieurement sur des structures défectueux ou dégradées. Les matériaux composites, en particulier à base de fibres de carbone ou de verre, de part leur rigidité spécifique, présentent un grand intérêt pour la réparation. De plus, malgré leur prix élevé, ils présentent un avantage économique car ils peuvent être mis en œuvre directement sur les structures pendant l'exploitation. Ceci permet de réduire considérablement les coûts de maintenance.

Le confinement des ouvrages métalliques se réalise à l'aide d'enveloppes en matériaux composites à base de fibres de verre, de carbone ou d'aramide. Ces enveloppes appliquées aux ouvrages améliorent le confinement du métal, ainsi que sa ductilité et sa résistance. Les différents composites offrent des modules d'élasticité et des rigidités variés pouvant modifier le comportement axial et radial du métal confiné.

Nous sommes intéressés dans ce projet à étudier le comportement de la structure métallique de pipelines GZ1 sous sollicitations par les sols aboutissant à des pics de corrosion (pitting corrosion) et les réparations par collage de manchons à base de matériaux composites.

L'objectif de notre travail est de montrer l'efficacité de la réparation par collage par matériaux composites par une modélisation numérique du comportement de la structure sans défaut, avec défaut, et avec défaut réparé par collage de composite. Cette étude sera menée sur les méthodes de réparation par Clock Spring de la ligne GZ1 en acier API 5L X60

exploitée par la société SONATRACH – DRC Algérie. Cette ligne relie le gisement de gaz naturel à Hassi R'Mel au sud à la GNL d'Arzew au nord.

Le mémoire sera présenté en quatre chapitres :

*Le premier chapitre* sera consacré aux études bibliographiques. Nous présenterons dans un premier temps les principales causes de la dégradation des ouvrages métalliques. Ensuite les méthodes de traitement de surface qui sont réalisées avant la réparation, finalement la méthodologie et les méthodes de réparation par collage de composite et nous terminerons ce chapitre par une synthèse bibliographique.

*Le deuxième chapitre* présentera une description du contexte industriel, la ligne de pipeline GZ1 de la station de traitement des tubes (STT) exploité par la société SONATRACH Bethioua.

*Le troisième chapitre s'articulera autour de deux parties distinctes :*

La première partie comporte une étude analytique de l'état des contraintes d'un tube sans défaut en fonction de leur épaisseur et leur pression interne, ensuite en déterminant l'ensemble des lois expérimentales qui ont mis un seuil de pression critique pour un tube comportant un défaut de corrosion.

La deuxième partie comporte une modélisation numérique par la méthode des éléments finis du comportement de la structure sans défaut, avec défaut, avec défaut réparé avec collage de composite.

Le quatrième chapitre sera consacré aux discussions des résultats obtenus par la modélisation numérique.

Nous terminerons le mémoire par une conclusion et les perspectives.

# C HAPITRE I :

Étude bibliographique sur les défaillances des structures de pipelines et réparation par renforcement par manchons composites.

## I Introduction :

Dans l'industrie pétrolière, l'objectif principal est d'extraire, transporter, raffiner les produits pétroliers en très grandes quantités dans les conditions économiques les plus performantes et pour des conditions de sécurité et de fiabilité des équipements optimales. Le transport des hydrocarbures sous forme liquide ou gazeuse (gazoducs) se fait par pipelines qui sont des canalisations enterrées ou aériennes.

**Les pipelines** sont le plus souvent construits à partir de tubes d'acier soudés bout à bout, revêtus extérieurement voire intérieurement et généralement enfouis dans le sol. Ces pipelines s'avèrent coûteux et parfois difficiles à mettre en œuvre selon les caractéristiques des terrains traversés, en zone de risque sismique ou politiquement instable. Au contraire de leur investissement initial ; leur utilisation est relativement peu coûteuse par rapport à d'autres formes de transport concurrentes, au moins sur de petites et moyennes distances<sup>[1]</sup>.

Pour **les gazoducs**, ils sont des canalisations qui acheminent du gaz naturel entre les zones d'extractions et les zones de consommation ou d'exportation. On estime la longueur totale des gazoducs dans le monde à un million de kilomètres, soit plus de 25 fois la circonférence terrestre. En Algérie, le réseau de pipelines est estimé à plus de 18 000 Kms tout diamètre confondu. Les gazoducs sont en majorité terrestres, soit enfouis à environ un mètre de profondeur dans les zones habitées, soit posés à même le sol en zone désertique, ou en zone à sol dur. Leur diamètre varie entre 50 mm (2 pouces) et 1400 mm (56 pouces) pour les plus importants<sup>[1]</sup>. Toutefois, le tarissement des sources de proximité et l'éloignement croissant des zones d'exploitation ont conduit à l'établissement de gazoducs sous-marins., ils sont des canalisations transportant uniquement le gaz.

Les structures métalliques dans l'industrie pétrolière sont particulièrement sensibles aux défaillances par corrosion et fissuration et à l'instabilité géométrique. Leur dimensionnement s'opère en ayant recours à des règles simplifiées, cette approche est généralement conservatrice. En effet ces structures sont très sensibles à la moindre imperfection de forme (défauts géométriques). Le dimensionnement s'appuie en général sur la connaissance de l'état initial réel ou supposé. Or cette configuration évolue dans le temps, on constate généralement l'adjonction de nouveaux défauts de forme dus au fonctionnement (charges accidentelles, déformation) mais aussi à des pertes de matière localisées dans les zones corrodées. La prise en compte de ces divers dommages conduits généralement à une perte de capacité portante. Afin de préserver le potentiel de charge de la structure, il est alors nécessaire de la réparer ou de **la renforcer**.

Dans ce chapitre nous envisageons de présenter les défaillances et les traitements de réparation comme les traitements de surface, le renforcement à l'aide de matériau composite à base des fibres (verre/carbone). Une ou plusieurs couches de composite sont simplement collées sur la coque métallique. Pour l'ensemble des résultats obtenus par des différents recherche , il y a un accroissement important de la capacité portante de la structure renforcée dès lors que certaines dispositions constructives sont respectées en ce qui concerne la couche de renfort en composite.

La figure suivante représente les pipelines a l'état de stockage (STT) station de traitement des tubes Sonatrach.



**Figure I. 1 : pipelines à l'état de stockage (STT) station de traitement des tubes Sonatrach.**

## I.1 Défaillances dans les ouvrages de pipelines :

Les principales causes des défaillances dans les canalisations sont de diverses natures. Elles peuvent se manifester soit par une rupture, soit par une fuite. La plupart de ces défaillances sont causées par des piqûres de corrosion (pitting corrosion) ou par des fissurations comme la corrosion sous contrainte (cracking corrosion), mais il existe également des problèmes liés aux défauts de soudage. Les mouvements de terrain (glissement du sol, tremblement de terre,...) peuvent aussi être la cause de dommage sur les gazoducs enterrés.

Les exploitants de gazoducs étudient ces problèmes depuis longtemps et possèdent une bonne connaissance des méthodes permettant de les gérer. Ces causes sont enregistrées par les membres de PHMSA <sup>[Source : PHMSA]</sup> dans les années entre 1988 à 2008 cf. Aux figures I.2 & I.3.

La figure suivante présente les causes des incidents significatifs des pipelines souterrain et sous-marin.

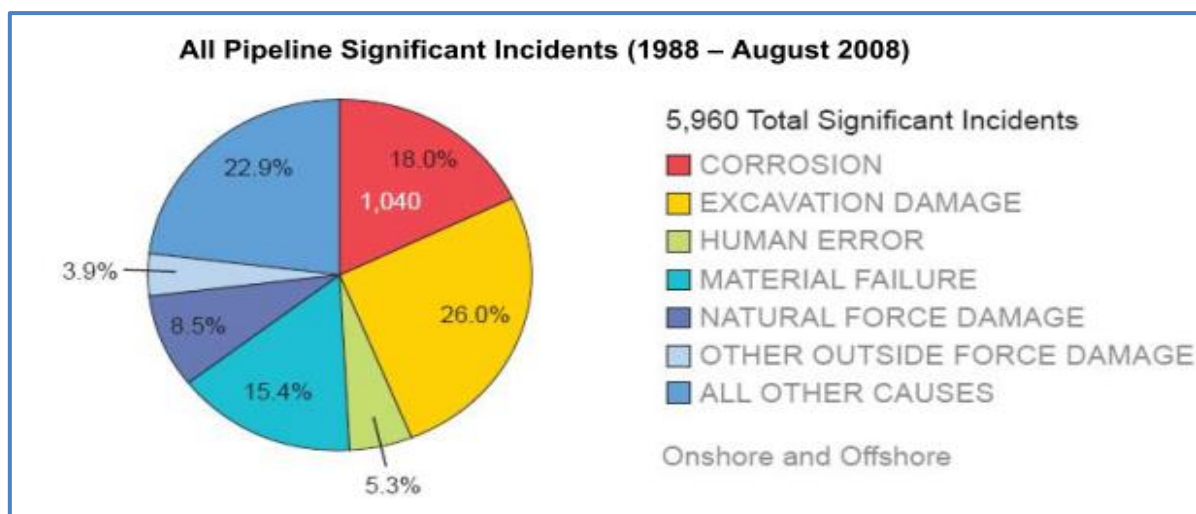
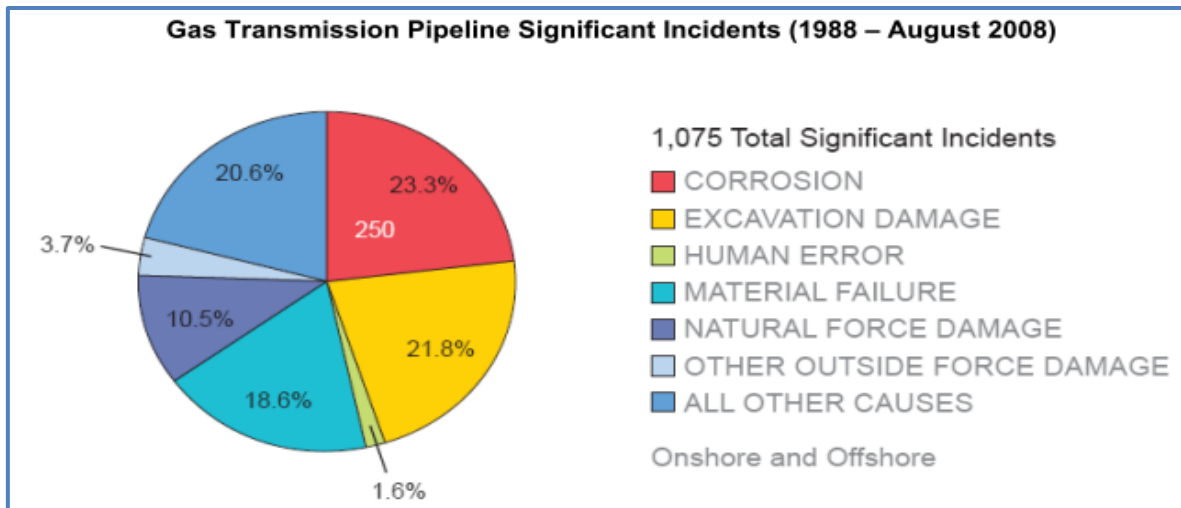


Figure I. 2 : causes des incidents significatifs des pipelines souterrain et sous-marin<sup>1</sup> .

La figure suivante présente les causes des incidents significatifs des pipelines de transmission de gaz naturel souterrain et sous-marin.

<sup>1</sup> Source : PHMSA Filtered Files



**Figure I. 3 : causes des incidents significatifs des pipelines de transmission de gaz naturel souterrain et sous-marin.**

### I.1.1 Corrosion dans les pipelines :

La corrosion des pipelines de pétrole et de gaz est la dégradation de celui-ci ou de ses propriétés mécaniques sous l'effet de l'environnement immédiat qui peut être le sol, l'atmosphère, l'eau ou d'autres Fluides. Compte tenu du nombre important de paramètres intervenant dans le processus électrochimique, la corrosion est un phénomène très complexe.

La figure suivante présente des exemples de la corrosion interne et externe.



**Figure I. 4 : corrosion dans le pipe. (a) :interne\_(b) : externe.<sup>2</sup>**

<sup>2</sup> <http://www.corrosioncost.com/pdf/gasliquid.pdf>

Le tableau suivant illustre la Moyenne annuelle des conséquences d'incidents significatives de corrosion entre 1988 et 2007.

**Tableau I. 1: Moyenne annuelle des conséquences d'incidents significatives de corrosion entre 1988 et 2007<sup>3</sup>**

Type of Pipeline	Mileage		Number	Fatalities	Injuries	Property Damage
	1988	2007				
<b>Hazardous Liquid</b>	153K	166K				
Onshore			33	0.05	0.8	\$14M
Offshore			0.9	0	0	\$1.7M
<b>Gas Transmission</b>						
Onshore	284K	294K	7.7	0.6	0.2	\$8.2M
Offshore	7K	7K	4.4	0	0	\$1.2M
<b>Gas Gathering</b>	32K	20K	2.7	0	0.2	\$1.2M
<b>Gas Distribution</b>	802K	1172K	3.4	0.8	3.9	\$0.6M
<b>Total</b>	1278K	1659K	51.9	1.4	5.2	\$25M

## I.1.2 Types de corrosion :

### I.1.2.1 Corrosion uniforme :

La corrosion uniforme est caractérisée par un taux de corrosion relativement uniforme sur l'ensemble d'une surface exposée. Ce type de corrosion est habituellement prévu pour les pièces faisant partie d'élément structural qui peuvent être sacrifiés au fil du temps, mais elle affecte tous les métaux communs. Dans le cas des aciers au carbone, le fer réagit avec l'oxygène pour former de la magnétite minérale, qui est de l'oxyde de fer dont la formule chimique est  $Fe_3O_4$ .

### I.1.2.2 Corrosion par piqûres et corrosion caverneuse :

La corrosion par piqûres et la corrosion caverneuse sont des cas particuliers de la **corrosion galvanique** dans lesquels la perte de métal est localisée sur une zone de métal relativement petite. Dans de tels cas, la corrosion se produit à cause des différences de concentration localisées de l'oxygène ou d'un ion agressif, par exemple un ion de chlore, ou encore à cause d'une différence de pH. La corrosion par piqûres est associée au tartre et aux dépôts d'impuretés qui forment une barrière entre l'écoulement principal et l'eau stagnante piégée sous le tartre ou les dépôts d'impuretés. Dans ces conditions, l'oxygène dissous dans l'eau industrielle ne peut pénétrer le tartre. En l'absence relative d'oxygène, le métal sous le dépôt devient anodique, c'est-à-dire qu'il tend à se dissoudre et à former une piqûre profonde.

<sup>3</sup> Source: PHMSA filtered incident files

La figure suivante présente la corrosion par piqûration.

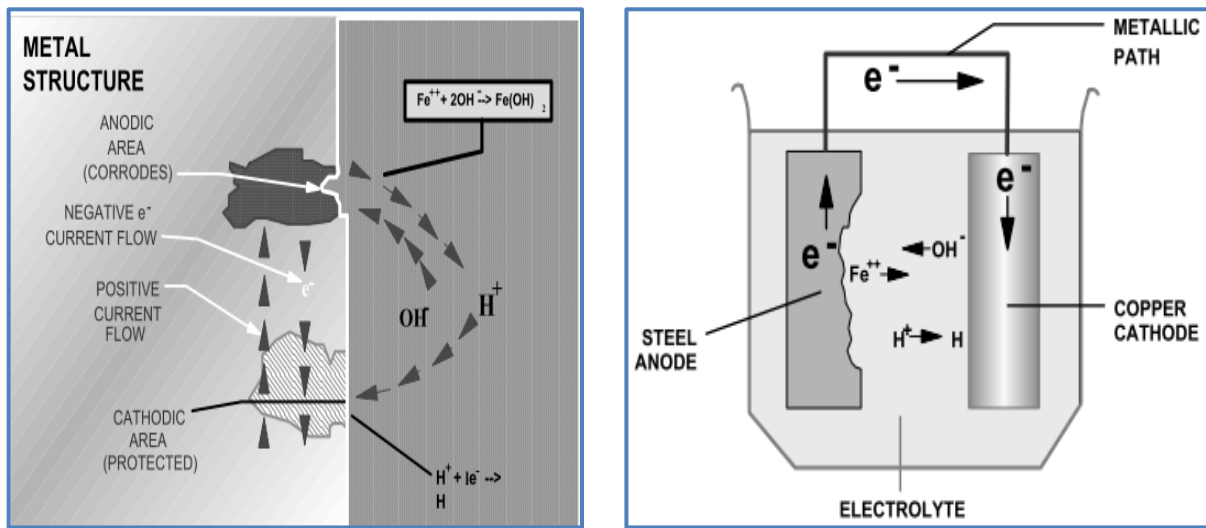


Figure I. 5 : corrosion par piqûration.

### I.1.2.3 Corrosion induite microbiologiquement (CIM) :

Les bactéries, que l'on trouve couramment dans l'eau stagnante, favorisent la corrosion induite microbiologiquement (CIM). Le phénomène peut se produire avec ou sans oxygène, parce que certaines bactéries ont évolué de manière à se reproduire dans l'une ou l'autre condition.

La figure suivante présente la corrosion bactérienne.

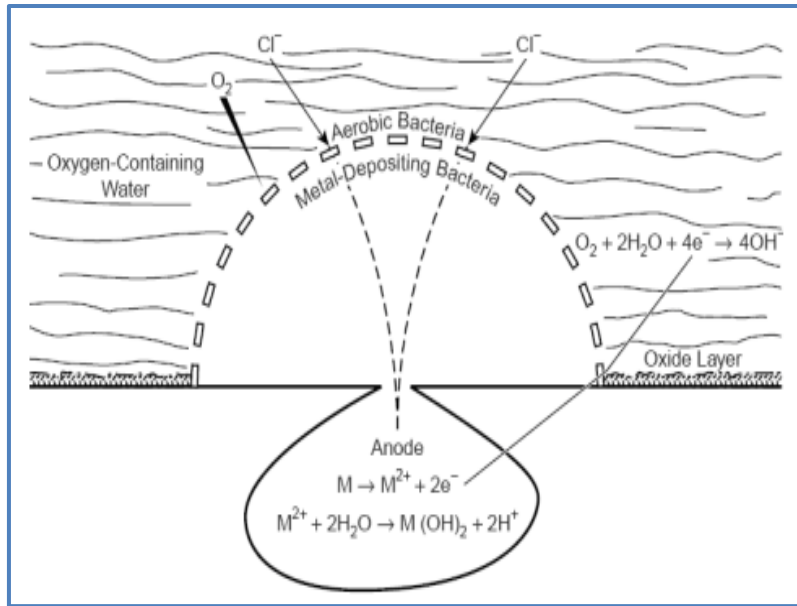


Figure I. 6 : corrosion bactérienne <sup>4</sup>.

#### I.1.2.4 Mécanisme de la corrosion :

Le principal agent corrosif dans l'industrie pétrolière est l'hydrogène sulfuré ( H<sub>2</sub>S) qui provient à la fois du brut mais aussi principalement de la décomposition thermique des composés soufrés . Cette corrosion est essentiellement fonction de la concentration en H<sub>2</sub>S et de la température, mais elle est indépendante de la pression <sup>[2]</sup>.

Si la concentration en H<sub>2</sub>S dans le gaz est supérieure à 0.5 mol/l et supérieure à 5 ppm dans l'eau la corrosion par H<sub>2</sub>S est provoquée selon le mécanisme suivant :

La réaction à l'anode :	$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{++} + 2 \text{e}^{-}$
Dissociation de :	$\text{H}_2\text{S} \rightleftharpoons \text{H}^{+} + \text{HS}^{-}$ $\text{HS}^{-} \rightleftharpoons \text{S}^{2-} + \text{H}^{+}$
La réaction à la cathode :	$2\text{H}^{++} + 2 \text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{H}_2$ $\text{Fe}^{++} + \text{S}^{2-} \rightleftharpoons \text{FeS}$
Réaction globale :	$\text{Fe} + \text{H}_2\text{S} \rightleftharpoons \text{FeS} + \text{H}_2$

<sup>4</sup> Source: Peqbody4s Control of Pipeline Corrosionm. 2<sup>nd</sup> Edition p.280.

### I.1.3 Fissuration des pipelines :

La fissure est un défaut ou une discontinuité brutale apparue ou apparaissant dans un matériau sous l'effet de contraintes internes ou externes, où la matière est séparée sur une certaine surface. Tant que les forces de contraintes ne sont pas libérées, elle entraîne une grande concentration de contrainte à son fond. Sa propagation, sous l'effet de contraintes suffisantes, combinée ou non avec un environnement agressif (corrosion sous contrainte) mène à la rupture.

La figure suivante présente fissuration par corrosion sous contrainte.

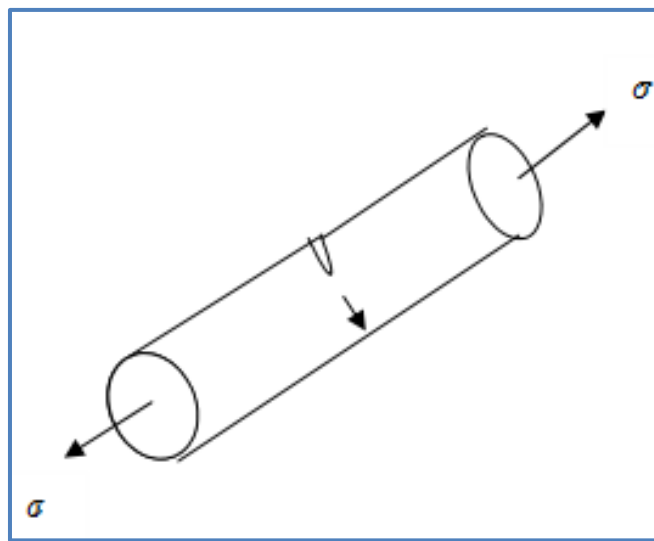


Figure I. 7 : Fissuration par corrosion sous contrainte.

### I.1.4 Défaillances par déformation plastique:

Tout solide auquel est appliqué un effort mécanique se déforme. Différents essais de laboratoire (traction, compression, torsion...) permettent d'étudier les modes de déformation des matériaux d'un point de vue macroscopique et phénoménologique, et de déterminer leurs lois de comportement. Lors de tels essais, tant que le matériau est soumis à une contrainte inférieure à une valeur spécifique (appelée limite d'élasticité), il va se comporter de manière réversible : si l'on effectue une décharge (annulation de la contrainte appliquée), le matériau recouvre sa forme initiale. A l'inverse, si l'on contraint le matériau au-delà de sa limite d'élasticité, une déformation persiste après la décharge : c'est la déformation plastique (Figure. I.8). La déformation plastique est donc (essentiellement) irréversible. En général, elle est isochoire : le volume de l'objet qui se déforme reste inchangé tout au long du processus de déformation plastique <sup>[3]</sup>.

La figure suivante présente la courbe rationnelle de traction.

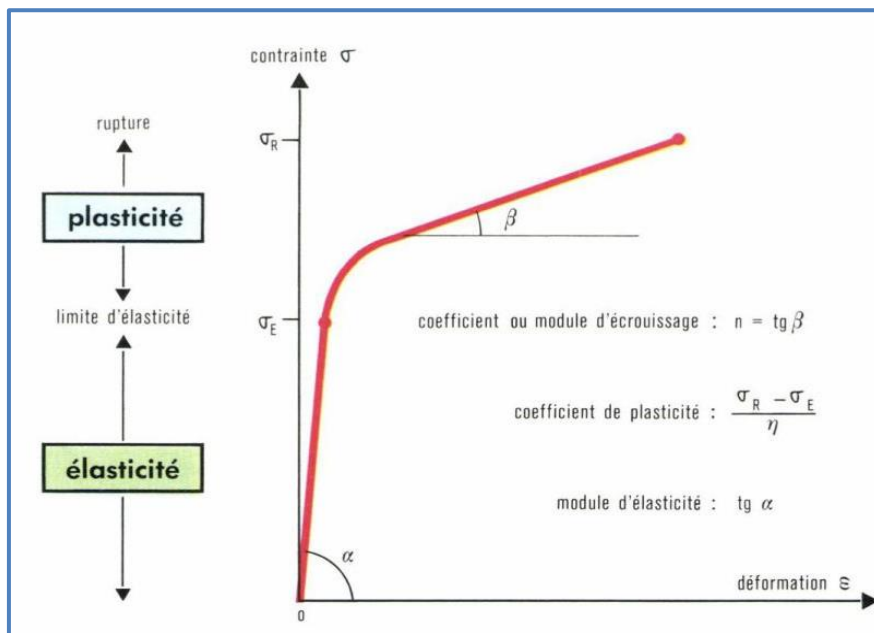


Figure I. 8 : courbe rationnelle de traction [source : LAROUSSE].

Déformations plastiques sous contrainte mécanique : dues à un dépassement de la limite élastique du matériau. Une inspection des pièces vérifiant l'apparition d'une zone de striction peut prévenir le risque d'une rupture prochaine. Déformation plastique sous contrainte thermique et dans le temps : c'est le fluage qui est une déformation apparaissant sous contrainte mécanique associée à des températures de service supérieures à 40% de la température de fusion.

### I.1.5 Défaillances par rupture fragile :

La rupture fragile ou la rupture par clivage s'accompagne de très peu de déformation plastique. La rupture se produit alors que les déformations sont purement élastiques. Dans les alliages métallique ce type de rupture est soit :

- *Transgranulaire* : rupture par clivage ou par glissement dans un grain.
- *Intergranulaire* : rupture par glissement le long des joints de grain.

Le *clivage* se produit préférentiellement le long de plan cristallographique bien définis selon les matériaux, les cubiques centrées (CC) alors que les cubiques a face centrée (CFC) clive difficilement. Dans les cristaux HC à basse température se produit également par clivage.

### I.1.6 Défaillances par rupture ductile :

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

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

La figure suivante présente les modes de rupture.

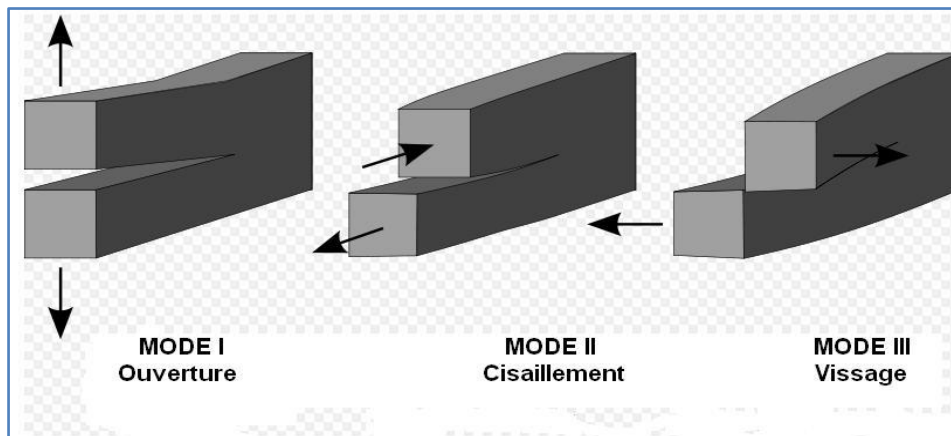


Figure I. 9 : Modes de ruptures.

### I.2 Traitements de réparation :

Les prétraitements de surfaces ont pour but d'éliminer les couches superficielles peu adhérentes et d'améliorer le mouillage du substrat par la colle, ainsi d'augmenter la rugosité du substrat pour favoriser l'accrochage de l'adhésif. C'est pourquoi il est nécessaire dans la plupart des cas de recourir à des traitements de surface (mécanique , chimique, etc... ) du

substrat pour améliorer la qualité du collage. de nombreuses méthodes de préparation de surface sont disponibles (traitements chimiques, mécaniques, etc...).

### **I.2.1 Traitements mécaniques de surface:**

Les traitements mécaniques des surfaces de pipelines sont des procédés qui permettent d'améliorer les performances des matériaux par une action combinée de durcissement superficiel, de modification structurale et d'introduction de contraintes résiduelles de compression grâce à une déformation plastique hétérogène à la surface des composants mécaniques.

*Parmi ces procédés on peut citer quelques procédés comme **le sablage et l'abrasion** qui est le plus souvent utilisé dans le traitement de surfaces des ouvrages pétroliers.*

#### **I.2.1.1 Le sablage :**

Le sablage est une technique industrielle de nettoyage des surfaces, il se fait par projection d'une poudre abrasive (oxydes durs, corindons ou alumine) à grande vitesse sur la surface à encoller à l'aide d'air comprimé au travers d'une buse, sur le matériau à décaper. On recouvre ensuite la surface traitée par un film protecteur ou par les premières enductions de colle pour éviter qu'elle ne soit endommagée ou contaminée.

#### **I.2.1.2 L'abrasion :**

Afin de rendre la surface rugueuse et plus facile à mouiller par l'adhésif, et d'éliminer la couche superficielle qui contient des impuretés, on procédera souvent à une abrasion de la surface avec un papier abrasif. Après abrasion, on doit bien sûr dépoussiérer et nettoyer soigneusement la surface avec un solvant adapté.

La figure suivante présente le traitement mécanique.

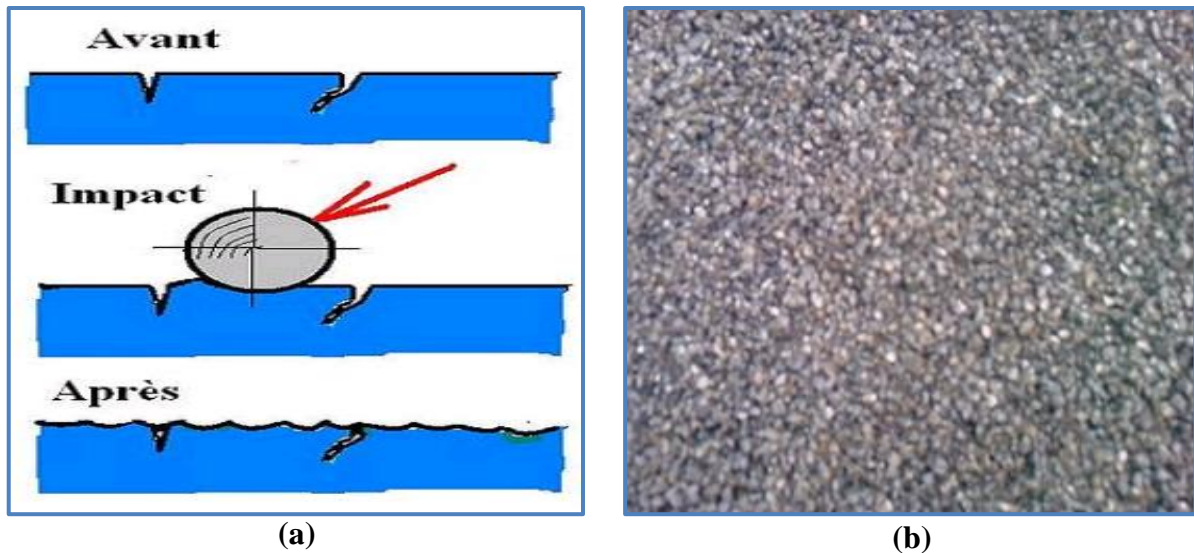


Figure I. 10 : traitement mécanique par abrasion, (a) : grenailage, (b) : sablage.

## I.2.2 Traitement chimique de surface :

### I.2.2.1 Nettoyage par un solvant :

Il permet d'éliminer les contaminants macroscopiques comme les corps gras, les poussières, le dégraissage peut se faire en application, en phase vapeur ou encore en immersion. La (MEC) est le solvant organique le plus couramment employée notamment pour les substrats composites <sup>[4]</sup>.

### I.2.2.2 Décapage chimique :

Il permet l'élimination des couches d'oxyde fragilisées, polluées ou peu actives qui se trouvent à la surface d'un substrat métallique. Il permet d'en reformer une autre avec des propriétés spécifiques à la solution acide utilisée. L'épaisseur de la nouvelle couche d'oxyde, ainsi que sa rugosité (à l'échelle du nm) en dépendent <sup>[4]</sup>. Il existe une grande variété de solutions acides utilisées pour le décapage. Citons par exemple les acides sulfuriques, chlorhydriques, sulfochromiques, phosphoriques, etc....

## I.2.3 Traitement électrochimique de surface :

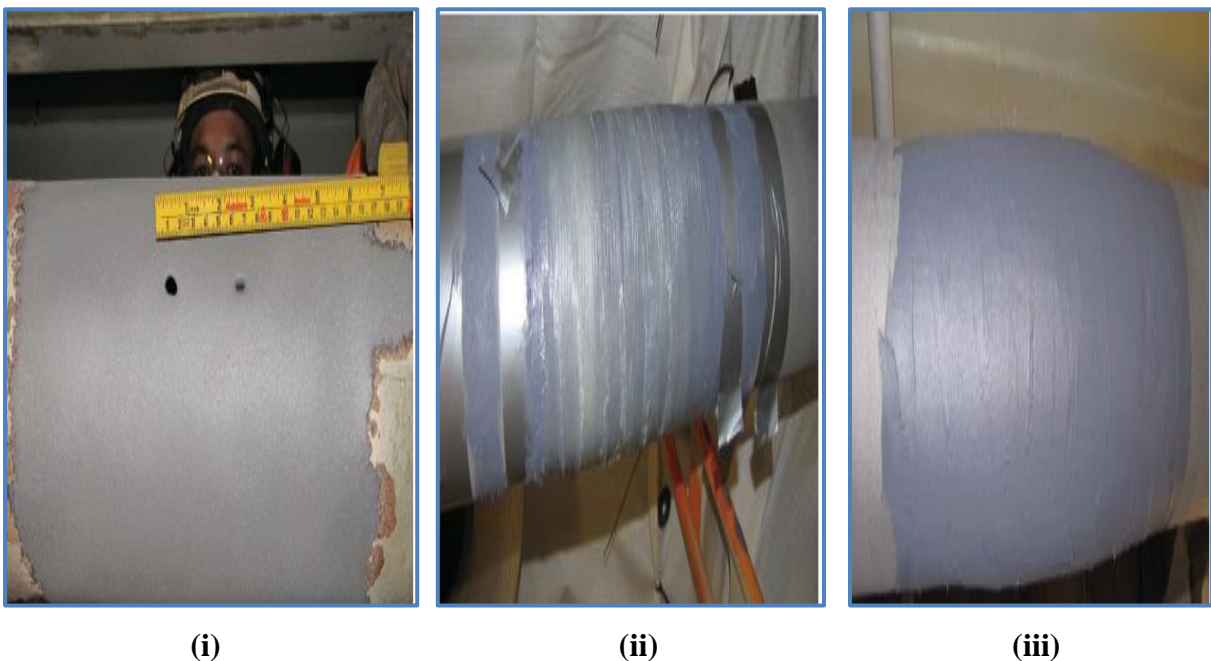
En plus d'une attaque chimique, on peut pratiquer une anodisation du substrat. Une couche d'oxyde est ainsi formée, dont l'épaisseur varie suivant la solution d'anodisation. Par exemple, pour l'aluminium, on peut citer l'acide chromique, l'acide sulfurique ou l'acide phosphorique. Le métal joue le rôle de l'anode, et l'oxygène réagit par échange ionique pour produire un film d'alumine <sup>[4]</sup>.

### I.3 Réparation par collage :

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

La caractérisation des matériaux composites à base de fibre et de résines est généralement complexe. Contrairement aux matériaux métalliques qui demandent un nombre relativement restreint d'essais, les composites à base de fibres et de résines se distinguent par la nécessité d'une multitude d'essai afin d'aboutir aux caractéristiques mécaniques et pour caractériser l'effet de l'endommagement <sup>[5] et [6]</sup>.

La figure suivante présente la réparation par composite d'une pipe en acier.



**Figure I. 11 : Réparation par composite d'une pipe en acier.**

#### **I.4 Systèmes de réparation par renforcement des fibres composites :**

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

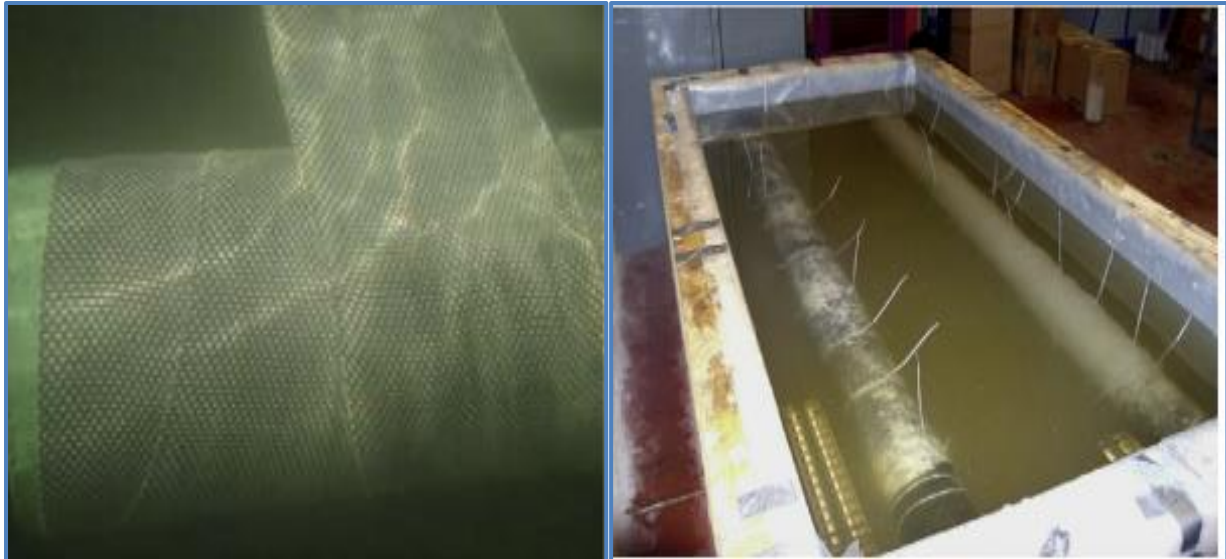
##### **I.4.1 Système de réparation par matériaux composites flexible :**

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

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

Le système de réparation par matériaux composites flexible est adapté pour les réparations externes ou pour la progression future de la corrosion et de rétablir la résistance du pipeline contenant un défaut à la paroi. Cependant, le confinement de pression est l'une des lacunes du système. Ce système est également adapté aux conditions souterraines pour des applications relativement à faible et à moyenne pression. Toutefois, en raison de la complexité de préparation, l'application et le durcissement de la résine pour les systèmes flexibles, il est souvent souhaitable d'utiliser un manchon spiral pré-durci. L'application de système d'emballage dans un espace confiné est très difficile.

La figure I.12 présente Spécimens en CFRP enveloppés durcis sous l'application sous-marine.



(a) L'emballage de composite flexible pour la réparation sous-marine <sup>[28]</sup>

(b) Spécimens en CFRP enveloppés durcie dans des conditions d'eau de mer <sup>[12]</sup>

Figure I. 12 : Spécimens en CFRP enveloppés durcis sous l'application sous-marine.

#### I.4.2 Système de réparation par matériaux composites pré-durci :

Système de réparation par matériaux composites pré-durci comprend le collage de matériaux composites renforcés par des fibres pré-durcis qui est tenu ensemble avec un adhésif appliqué sur le terrain. La figure I.13 montre le système de réparation : Clock Spring<sup>R</sup> qui est intensivement utilisé dans l'industrie de réparation des pipelines <sup>[10]</sup>.le système WeldWrap<sup>TM</sup> est un autre exemple de système de réparation par matériaux composites pré-durci disponible dans le marché <sup>[31]</sup>. Ce type de système de réparation est un enroulement de matériau composite à haute résistance avec une structure qui lui permet d'envelopper en toute sécurité autour des pipelines. Les couches sont scellées ensemble avec un agent de liaison solide. Le défaut est rempli avec du mastic adhésif pour aider à l'appui et le transfert de charge avant leur installation.

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

La figure I. 13 représente la réparation par renforcement composite type Clock Spring.

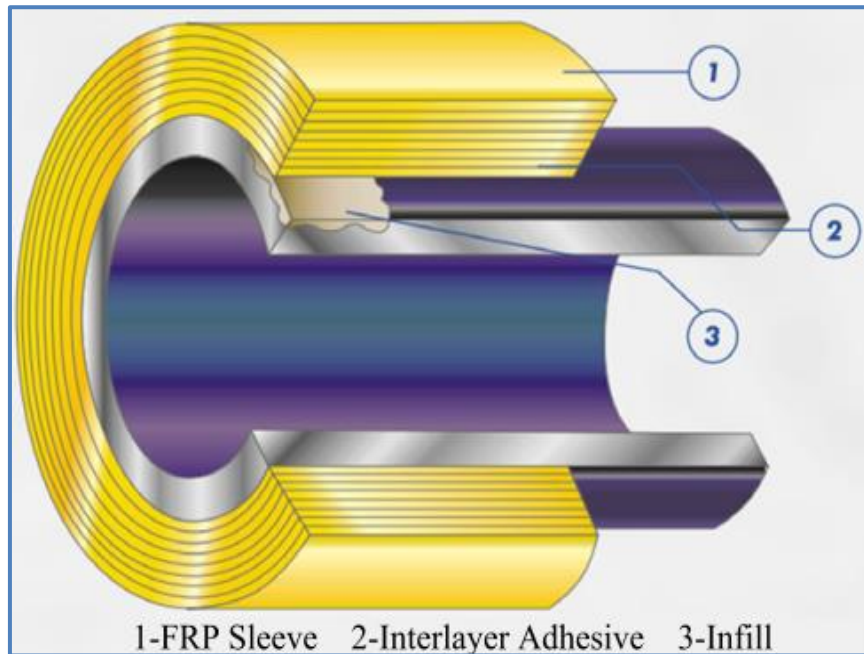


Figure I. 13 : réparation par renforcement composite type Clock Spring <sup>[10]</sup>.

## I.5 Matériaux des composants pour une réparation par renforcement de composite:

Les éléments d'une réparation sont choisis en fonction de la performance requise du produit composite sous des conditions de service. Les sections suivantes présentent les caractéristiques matérielles des différents composants d'une réparation par composite et leurs problèmes de performance qui visent à faciliter le choix de matériaux appropriés pour chaque type de système de réparation par composite et l'application destinée.

### I.5.1 Fibres de renforcement :

Les fibres sont la charge primaire de la réalisation des composants de matériaux composites. L'orientation des fibres détermine la force et la rigidité directionnelle pour une application particulière. Les fibres de renforcement les plus couramment utilisés pour les composites sont le verre, carbone, aramide, le polyéthylène, le bore, le polyester, le nylon, des fibres naturelles, etc. dans l'industrie de réparation des pipelines, les fibres de verre, carbone et aramides sont les plus couramment utilisés vue leurs performances et leurs disponibilité sur le marché.

**Les fibres de carbone** possèdent de très bonnes caractéristiques mécaniques, d'autant plus que leur masse volumique est faible. En outre, il faut noter que les fibres de carbone ont une

excellente tenue à haute température. En effet leurs caractéristiques mécaniques sont maintenues jusqu'à 1500°C environ.

**Les fibres de verre** conservent leurs caractéristiques mécaniques jusqu'à des températures assez élevées, de l'ordre de 846 °C pour le verre de type E, et de 1056°C pour le verre de type S-2. Ces fibres sont donc bien adaptées pour le renforcement des résines à tenue thermique élevée. Cependant, le coût, la disponibilité et la compatibilité sont des problèmes dans les applications de fibres de carbone.

**Les fibres d'aramide** se dégradent dans les conditions d'humidité riches, Néanmoins, leur utilisation est limitée par diverses faiblesses des matériaux composites à fibres aramides: Résistance faible à la compression, à la flexion, au flambement et sensibilité au cisaillement.

Hausrath <sup>[39]</sup> a présenté un résumé comparatif des propriétés des fibres de verre, carbone et aramide, qui sont présentés dans le [tableau I.2](#). Le tableau montre la comparaison typique de propriétés ainsi que les avantages et les inconvénients des fibres les plus couramment utilisées pour la réhabilitation des pipelines.

Le tableau I. 2 présente récapitulatif sur les propriétés des fibres.

**Tableau I. 2 : Récapitulatif sur les propriétés des fibres <sup>[39]</sup>.**

Propriété		Verre		Carbone	Aramide
		Type E	Type S-2	T700 SC	K49
Densité	Gm/cc	2.58	2.46	1.80	1.45
résistance à la traction	MPa	3445	4890	4900	3000
le module de traction	GPa	72.3	86.9	230	112.4
résistance à la compression	MPa	1080	1600	1570	200
contrainte à la rupture	%	4.8	5.7	1.5	2.4
point de ramollissement	°C	846	1056	>350	>150
<b>Avantages</b>	faible coût. facilement disponible. très compatible.		Faible densité, une haute résistance, rigidité, faible densité et une forte résistance à la fatigue.		Une forte performance d'impact. Difficilement inflammable. résistant aux produits chimiques.
<b>Inconvénients</b>	faible module. sensibles à la fatigue, fluage et rupture.		Cout élevé, la disponibilité et la compatibilité		Faible résistance à la compression. sensibles dans l'UV. Sensibles à l'humidité.

## I.5.2 Les matrices :

La matrice se compose d'une résine (polyester, époxy etc.) et de charges dont le but est d'améliorer les caractéristiques de cette résine tout en diminuant le coût de production. D'un point de vue mécanique l'ensemble résine-charges se comporte comme un matériau homogène et le composite est constitué de ce matériau homogène (la matrice) et d'un renfort. Le renfort apporte au matériau composite ses performances mécaniques élevées, alors que la matrice a pour rôle de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de protéger les fibres vis –vis des agressions extérieures.

### A. Les résines :

Les résines utilisées dans les matériaux composites ont pour rôle de transférer les sollicitations mécaniques aux fibres et de les protéger de l'environnement extérieur, les résines doivent donc être assez déformables et présentent une bonne compatibilité avec les fibres. En outre elles doivent avoir une masse volumique, et des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées. Compte tenu des contraintes, les résines utilisées sont des polymères modifiés par différents adjuvants et additifs (agents de démoulage stabilisant etc.), les résines sont livrées en solution sous forme de polymères non réticulés en suspension dans des solvants qui empêchent le pontage entre les macromolécules prépolymérisées.

Deux grandes familles de résines polymères existent: les résines thermoplastiques et les résines thermodurcissables :

❖ **Les résines thermodurcissables (TD)** : Sont associées à des fibres longues, leur structure a la forme d'un réseau tridimensionnel qui se pontage (double liaison de polymérisation) pour durcir en forme, de façon définitive lors d'un échauffement (la transformation est donc irréversible). Ces résines conduisent à une structure géométrique qui ne peut être détruite que par un apport important d'énergie thermique, ainsi elles possèdent des propriétés mécaniques et surtout thermomécaniques plus élevées que les résines thermoplastiques.

❖ **Les résines thermoplastiques (TP)** : La famille des résines thermoplastiques est très vaste, elles possèdent la propriété d'être mises en forme plusieurs fois par chauffage, et par refroidissement successifs, donc elles peuvent être récupérées et facilement recyclées. L'intérêt des résines thermoplastiques réside dans leur faible coût, résultant à la fois des

matières premières disponible et des procédés de la fabrication, toutefois ce faible coût est lié à des propriétés mécaniques, et thermomécaniques faibles.

Ces diverses résines peuvent être renforcées par des fibres courtes, cependant dans le domaine des composites ces résines ont un développement limité du fait de la nécessité de faire appel à des transformations à haute température de produits solides.

Le tableau I. 3 présente Comparaison entre ces deux types de résines.

**Tableau I. 3 : Comparaison entre ces deux types de résines.**

<b>TP (Thermoplastiques)</b>	<b>TD (Thermodurcissables)</b>	<b>Matrices</b>
Solide prêt à l'emploi	Liquide visqueux à polymériser	État de base
illimité	Réduit	Stockage
Difficile	Facile	Mouillabilité des renforts
Chauffage + refroidissement	Chauffage continue	Moulage
Court	Long (polymérisation)	Cycle
Assez bonne	Limitée	Tenue au choc
Réduite	Meilleure	Tenue thermique
Recyclables	Perdus ou utilisés en charge	Chutes et déchets
Propreté	Émanations de solvants	Conditions de travail

### **B. Les charges :**

Il y a plusieurs types de charges parmi elles :

- ❖ **les charges organiques** : Les charges cellulosiques utilisées comme étant des charges de résines thermodurcissables. Ces avantages sont d'un coût peu élevé et d'une faible densité.
- ❖ **les charges minérales** : Sont les craies et les carbonates. Les craies sont à 99% de calcite, de la silice et d'autres minéraux, Les carbonates de calciums ou de magnésium sont utilisés comme des charges et aussi comme des retardateurs de flamme.

### **I.5.3 Remplissage « Infill » :**

Tous les systèmes de réparation de pipeline utilisent une couche de résine de mastic qui fournit un lit pour le manchon composite renforcé par des fibres qui est soit souple ou rigide.

Le mastic est utilisé pour combler les défauts sur le tube d'acier. L'application de remplissage ayant pour but de répartir les contraintes d'une façon homogène et transférer la charge à partir d'acier au composite. La figure I.12 représente un processus de réparation extérieur d'une pipe utilisant remplissage et enveloppe souple.

La figure I. 14 présente processus de réparation extérieur d'une pipe utilisant remplissage et enveloppe souple.



(a) Remplissage défaut avec du mastic

(b) enveloppement époxy tissu de carbone mouillé autour du défaut.

Figure I. 14 : processus de réparation extérieur d'une pipe utilisant remplissage et enveloppe souple <sup>[49]</sup>.

Tableau I. 4 : les avantages et les inconvénients de la méthode de réparation par renforcement de composite <sup>[52]</sup>.

Avantages	Inconvénients
renforce le pipeline dans la zone défectueuse pour éviter l'éclatement du défaut.	Expérience limitée sur le mur à travers (fuites) des défauts.
Éprouvée en service, et actuellement largement acceptée	La plupart des systèmes ne seront pas assurer une résistance axiale
Permanente	
simple	
En utilisant plusieurs réparations relativement de grandes longueurs peuvent être renforcés.	

## I.6 Synthèse bibliographique :

Un composite à matrice Polymère Renforcé en Fibres (PRF) est généralement fait de polymère / matrice plastique renforcé par des fibres. L'utilisation de matériaux composites renforcés par des fibres a fait l'objet de plusieurs applications pour la construction et la rénovation d'éléments cylindriques remplis et creux dans l'air, marin et souterrain [8-50] vu leur efficacité, leurs performances et leurs disponibilités.

De nombreux développements, pratiques et produits sont disponibles dans ce domaine, par exemple: Clock Spring utilisé commercialement [10]. En outre, l'application réussie de matériaux composites renforcés par des fibres a été illustré dans la réhabilitation des pipelines corrodés en utilisant la réparation hybride [11], la réhabilitation des structures tubulaires en acier avec CFRP visant à évaluer la possibilité de réhabiliter les membres de flexion en acier tubulaire avec un accent sur les applications sous-marines [12], la production et l'installation de la conduite en plastique renforcé à grande échelle [13-15], et haute performance thermoplastiques tubes composites pour la profondeur de l'eau jusqu'à 3000 m [16]. Le tableau I.5 résume les recherches et les développements récents sur les composites en fibres utilisés pour la réparation de conduites à travers le monde. La recherche et les pratiques dans le monde entier montrent la poursuite de comprendre l'efficacité et le comportement en profondeur de la réparation composite. Généralement, ces littératures et produits commerciaux indiquent un aperçu des matériaux utilisés et la diversité des scénarios de perte de métal externes et internes pour les pipelines ou des structures cylindriques. Les Composites renforcés en fibres ont été le choix de matériau idéal pour la réhabilitation de ces structures tubulaires en raison de leur légèreté, haute résistance et rigidité, bonne résistance à la corrosion et d'excellentes propriétés de fatigue.

Une autre application récente de matériaux composites renforcés en fibres pour le renforcement des canalisations endommagées a été rapportée par Lukacs et al. [17]. Sur la base des études expérimentales et numériques, Lukács et al. ont suggéré que les matériaux composites renforcés par des fibres et de la technologie de renfort externe peut être utilisé pour une grande variété de diamètres de conduites et de longueur pour les deux sections pipelines ou des canalisations quasi-statiques et cycliques chargés.

Tableau I. 5 présente la recherche, développement et pratiques sur la réparation des pipelines par renforcement des fibres composites.

**Tableau I. 5 : Recherche, développement et pratiques sur la réparation des pipelines par renforcement des fibres composites.**

Year	Country	Description	Type of application	Level of development
2000	UK	Glass fibre reinforced repair with vinylester resin on steel pipe	Through wall defect and repair mechanism	R&D
2004	USA	Glass fibre reinforced joint with vinylester resin on composite pipe under UV curing	Pipe joint and curing effects	R&D
2005	USA	Water-activated glass and carbon wrap on metal pipe	External corrosion and mechanical gauge/dent	Application R&D
2007	Brazil	Glass fibre reinforced precured and flexible repairs	External and internal repair with localised flaws with 70% wall thickness	R&D
2007	Canada	Carbon fibre reinforced flexible system with epoxy resin on steel pipe	Improvement of flexural capacity	R&D
2007	USA	Glass and carbon fibre hybrid repair on steel pipe	External localised metal loss	R&D
2008	USA	Carbon fibre/epoxy composite wrap with epoxy putty on steel pipe	External axisymmetric and localised flaws with 50% wall thickness	R&D
2009	Brazil	Glass reinforced flexible wrap with epoxy adhesive on steel pipe	Through-wall localised corrosion	R&D
2009	Libya	Glass fibre reinforced wrap and bolted steel clamp repair on steel pipe	Through-wall repair	R&D
2009, 2010	USA	Carbon and glass fibre wet layup and cured spiral sleeves on metal and concrete pipes	External and internal repair	Application
2010	Hungary	Carbon fibre reinforced repair on metal loss and weld defects on steel pipes	External and internal repair	R&D
2011	Canada	Glass epoxy composite repair wrap with epoxy putty on steel pipe	External localised flaws with 80% metal loss	R&D
2011	Malaysia	Glass fibre reinforced overwrap with epoxy resin on steel pipe	External flaws with 80% wall thinning	R&D
-	Australia	Epoxy cured glass fabric, which is then cured to form a fibre reinforced composite	External repair of onshore and offshore steel pipe	Application
-	USA	Fibreglass composite sleeve, an adhesive and a filler material on metal pipe	Corrosion or mechanical damage of low-pressure pipe	application
-	USA	Carbon fibre reinforced flexible system with epoxy resin on metal pipe	Corrosion or mechanical damage	Application
-	USA	Glass fibre reinforced precured spiral sleeve	External blunt and localised metal loss	Application

## **I.7 Conclusion :**

Le système de transport des hydrocarbures par pipeline est un système en évolution à travers le monde en recherchant les solutions appropriées pour un transport fiable. Cependant les aciers de pipelines sont exposés à des sollicitations mécaniques chimiques aboutissant à des défaillances de différents types comme la corrosion, la fissuration, déformations, rupture... L'environnement défavorable et les dommages dans les conduites a conduit à explorer différentes options de réparation pour les garder fonctionnels tels que les renforcements en matériaux composites par des fibres.

Cependant, les systèmes de réparation par composites actuellement utilisés nécessitent une préparation complexe, l'application et le durcissement de la résine est difficile à installer dans un espace limité ou pour un scénario sous-marin. Tandis que la réparation par manchons des demi-coquilles métallique a été utilisée avec succès dans de nombreux projets de réparation, le poids lourd de l'installation est l'un inconvénient majeur de ce système.

Le système combiné de réparation flexible et réparation pré-durcie utilisant des composites est prévu de fournir une installation beaucoup plus simple et approprié pour la réparation de révolution <sup>[11]</sup>. Ce système présente également les avantages d'une réparation flexible en termes d'un fort potentiel et le contrôle de la qualité est amélioré pour les demi-coquilles en carbone par rapport aux systèmes composites stratifiés existants.

D'autres études sur la jonction du manchon, le collage et la performance subséquente mécanisme de transfert de charge entre les composants d'un système de réparation doivent être menées pour comprendre leur action combinée. Recherche détaillée à court terme et à long terme la performance de ces systèmes doit être effectué pour gagner la confiance et de développer le marché dans cette industrie prometteuse.

Après avoir présenté l'étude sur les défaillances et les méthodes de traitement de réparation des pipelines, nous présenterons dans le chapitre suivant le contexte industriel de l'étude et la description de la ligne GZ1 de transport du gaz naturel.

# C

## hapitre II :

### Contexte industriel.

## II Introduction :

Le secteur économique de l'énergie en Algérie comprend la production locale et l'importation d'énergies primaires, leur transformation éventuelle en agents énergétiques secondaires, le transport de ces agents et leur consommation finale, ainsi que les flux d'importations et d'exportations d'énergies. L'Activité transport par canalisation assure l'acheminement des hydrocarbures (pétrole brut, gaz naturel, GPL et condensat) et dispose d'un réseau de canalisations. Le groupe pétrolier et gazier SONATRACH possède et exploite un réseau de canalisations évalués à plus de 18 000 Km, a des diamètres allant de 8 à 48 pouces destinés au transport du gaz naturel et produits pétroliers des installations des gisements de Hassi R'mel (HR) et Hassi Messaoud (HM) au sud de l'Algérie vers les ports pétroliers et zones industrielles d'Arzew (AR) et Skikda (SK) au nord.

Les problèmes majeurs rencontrés dans les canalisations de transport (pipelines, gazoducs) est la corrosion. Pour cela le développement de nouveaux aciers pour les canalisations s'avère nécessaire tout en améliorant les propriétés mécaniques de l'acier et d'éviter une augmentation trop importante de l'épaisseur des tubes. Les aciers sont passés du grade X52 au grade X70 employés de nos jours avec des microstructures *ferrito-perlitique*. Le passage à des grades supérieurs X80, XI00 passe par le développement d'aciers de structures *ferrito-bainitiques*.

Au cours de leur exploitation, les canalisations sont confrontées à divers endommagements. Ces endommagements peuvent apparaître sous forme de fissures par fatigue, délaminages où formation de corrosion...etc.

Dans ce chapitre, une description des aciers de canalisations (gazoducs) selon la norme API 5L est présenté tout en mettant en exergue les différentes défaillances rencontrées lors de l'exploitation de ces gazoducs et une présentation sur les méthodes de réparation fréquemment utilisées dans la station (STT) comme : le Clock Spring et demi-coquilles soudées.

Figure II. 1 présente le réseau de transport des Hydrocarbures en Algérie (d'après sonatrach).

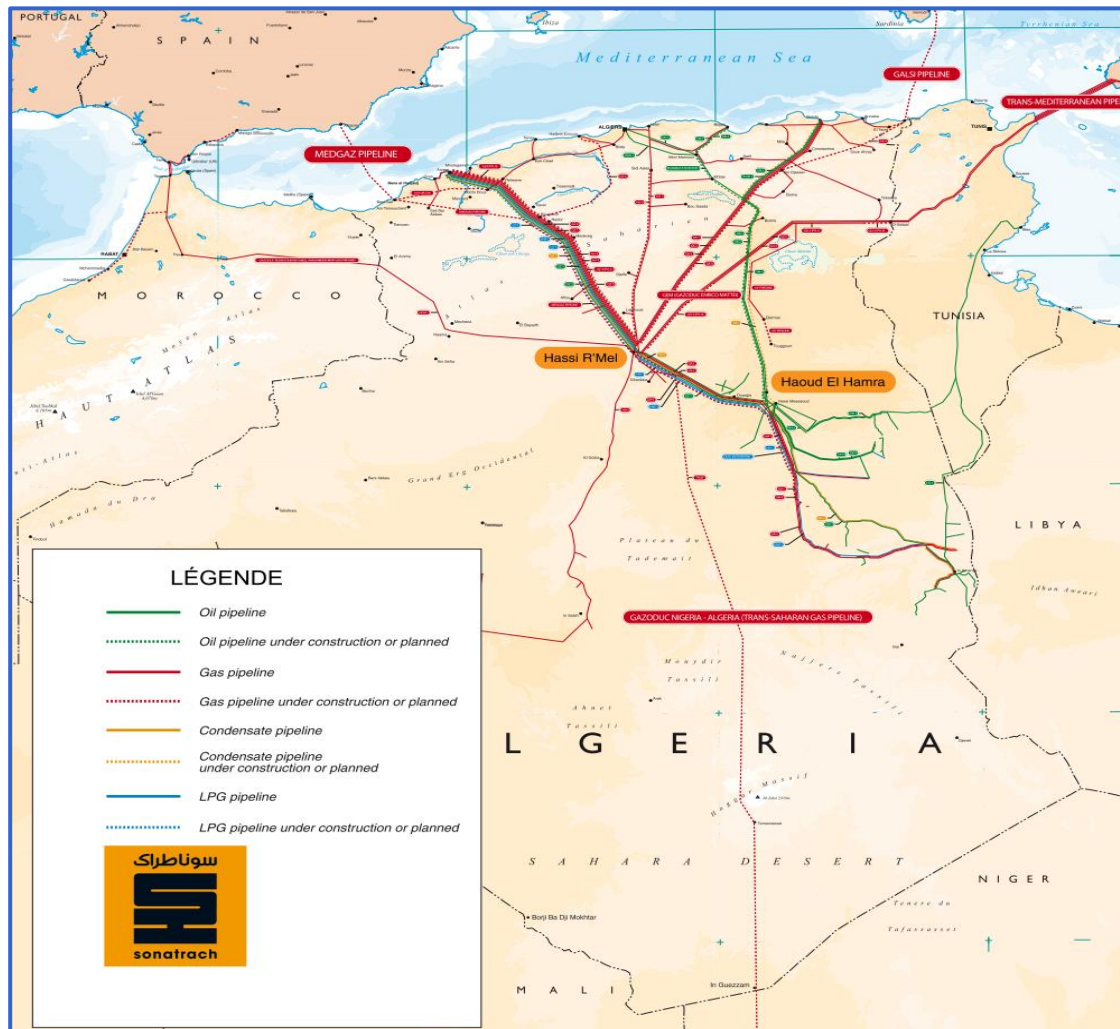


Figure II. 1 : Réseau de transport des Hydrocarbures en Algérie (d'après sonatrach).

## II.1 Description de la STT :

La Station de Traitement des Tubes (STT) a été créée le 18 juillet 1999 en vue de prendre en charge la récupération des tubes entreposés sur les propriétés terriennes, l'inspection et le traitement complet des tubes récupérés en vue de les réutiliser sur les ouvrages à réhabiliter et pour les interventions. Cette station est localisée au lieu-dit "sept marabouts" commune el Hassiane W. Mostaganem, elle s'étend sur une superficie de 10 hectares répartis, 07 ha pour le stockage et traitement des tubes, et 03 ha pour la base de vie. La capacité de stockage 100 000 ml de tubes à stocker.

## II.2 Réalisations de la STT :

- Récupération de 120000 ml de tubes en acier carbone
- Inspection de 91250 ml de tubes en acier carbone
- Déclassés et/ou rebutés 28250 ml

- Caractérisation 76000 ml de tubes en acier carbone (soit un taux de récupération de 83%)
- Réutilisation de 71000 ml de tubes en acier carbone (une étude comparative : cout ml réhabilité  $\approx$  33% du cout ml neuf).

### II.3 Activités de la STT :

- Réception des tubes provenant des zones réhabilitées,
- Décapage et pré sablage,
- Inspection des tubes et caractérisations,
- Traitement et revêtement de tubes,
- Contrôle de qualité.

Figure II. 2 présente le stockage des tubes (STT).



Figure II. 2 : stockage des tubes (STT).

Mettre en œuvre, d'autant plus que son application est souvent automatisée. Elle s'adapte lorsqu'il faut assembler des matériaux différents, fragiles ou minces. L'assemblage entre les matériaux est continu ce qui permet de répartir uniformément les efforts et d'éviter les concentrations de contraintes. Il en résulte une résistance mécanique supérieure à celle produite par le rivetage par exemple. Elle ne nécessite pas d'échauffement local important, comme pour le soudage, et ainsi ne modifie pas les propriétés des matériaux à assembler. Le gain de poids est aussi importants, les adhésifs absorbent une partie des vibrations et apportent une isolation aussi bien thermique, phonique qu'électrique.

## II.4 Caractéristiques des aciers (norme API 5L) :

### a- caractéristique mécanique :

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

- 5L pour les qualités normales.
- 5LX pour les qualités à haute résistance.

Les qualités d'acier les plus employées ont les propriétés mécaniques présentes dans le [tableau II.1](#).

**Tableau II. 1 : Propriétés mécanique des aciers pour tubes selon la norme API <sup>[53]</sup>.**

Spécification API	grade	Limite d'élasticité (kg/mm <sup>2</sup> )	Résistance à la rupture (kg/mm <sup>2</sup> )
5L	A	21	34
5L	B	25	42
5LX	X42	29	42
5LX	X46	32	45
5LX	X52	37	47
5LX	X56	39	52
5LX	X60	41	55
5LX	X65	46	56
5LX	X70	48	56

### b- composition chimique :

La composition chimique des aciers de l'API se présente dans le tableau suivant :

**Tableau II. 2 : Composition chimiques en % de l'acier X60 et X100 <sup>[54]</sup>.**

grade	fe	C	Mn	Si	P	S	AL	Cr	Mo	Ti	V
<b>X60</b>	97.14	0.19	1.15	0.20	≤	≤	0.02	≤	≤	0.03	0.11
	à 97.66	à0.24	à 1.35	à 0.40	0.025	0.025	à 0.04	0.02	0.05	à 0.04	à 0.15

<b>X100</b>	98.12	0.29	0.15	0.15	≤	≤	≤	0.5	≤	≤	0.03
	à	à 0.34	à	à 0.30	0.025	0.025	0.04	à	0.05	0.04	à
	98.55		0.34					0.65			0.070

#### II.4.1 Description de la ligne GZ1 40'' :

##### ► Présentation de la ligne :

Les terminaux sud sont tous les points du réseau qui se trouvent à la racine de chaque canalisation sud. Leur nombre a augmenté au fur et à mesure que les gisements ont été découverts. Actuellement, ils sont au nombre de neuf, répartis entre terminaux de champs de pétrole et terminaux de champs de gaz naturel, et ce nombre est appelé à augmenter dans les années avenir. La situation géographique des gisements amène à investir dans la construction de ce réseau de canalisation. Elle entraîne aussi la mise en œuvre d'un arsenal d'installation, de matériels et la mobilisation de plus de 10 000 employés pour maintenir une production permanente en assurant le bon fonctionnement de ces régions devenues ainsi des terminaux. La structure d'exploitation de TRC (Région Transport par Canalisation) gère un réseau qui totalise 11 gazoducs et 15 oléoducs ([Tableau II.3](#)).

**Tableau II. 3 : caractéristiques des canalisations du sud algérien (TRC-DRC. Sonatrach).**

<b>nature</b>	<b>ouvrages</b>	<b>Symbole</b>	<b>Diamètre en pouce</b>	<b>Longueur en Km</b>	<b>Nombre de Station</b>	<b>Puissance installée en CV</b>	<b>Année de mise en service</b>	<b>Produit</b>
<b>Existants</b>	HR-AR	GZ0	24''/20''	509	4	50372	1961	
	HR-AR	GZ1	40''	507	5	304000	76/79	
	HR-AR	GZ2	40''	507	5	225000	1982	
	HR-AR	GZ3	42''	507	5	304000	1989	
	HR-Skikda	GK1	40''	573	5	318250	71/78	
	HR-O. Safsaf (Tunisie-Italie)	GO1	48''	549	01	138980	1982	
	HR-O. Safsaf (Tunisie-Italie)	GO2	48''	549			1986	
	HR-Laricha (Maroc-							

	Espagne)	GME	48''	521	-	-	1996	GAZ
	HR-Isser	GG1	42''	436	-	-	1981	
	Alrar-HR	GR1	42''/48''	965	1	20100	1987	
	Gassi.Touil-HMD	GM1	40''	150	-	-	1976	
<b>En Construction</b>	HR-Skikda	GK2	42''	573	-	-	-	
	Alrar-HR	GR2	42''/48''	962	4	338776	-	
<b>En projet</b>	Apres extension G01/G02	-	-	-	+02 (3)	+277960	-	
	Extension GME	GME	-	-	01	75780	Fin 2002	
	Tiguentour-HR	GIS	42''ou 48''	526	En cours	En cours	-	
	Interconnexion gazoducs de l'est à l'ouest	-	40''	1000	-	-	-	

<b>Existant</b>	HEH-AR	OZ1	28''	801	6	134500	1965	Pétrole Brut
	HEH-Skikda	OK1	34''	637	4	124680	1972	
	HEH-Bejaia	OB1	24''/22''	660	7	73420	1959	
	b.Manssour- Alger	OG1	16''	131	1	900	1971	
	In Aménas- Tunisie	OT1	24''	265	2	15608	1960	
	El Borma- Mesdar	OD1	20''	272	1	2160	1977	
	Ohanet-HEH	OH1	30''	630	3	45589	1983	
	Mesdar-HEH	OH2	26''	108	1	4500	1972	
	H.Berkine-HEH	OH3	30''	292	-	-	Juil 1999	
	HEH-AR	OZ2	34''	821	6	115600	Fin 2002	
Extension station Mesder	OH2	-	-	1	10869	2002		

<b>En projet</b>	Extension station	OK1	-	-	1unité SP1	50000	2002	
	HEH-Skikda				2unit SP3			
<b>Existants</b>	HR-AR	NZ1	28''	506	3	63760	1978	Condensat
	Ohanel-HEH	NH2	30''	518	-	-	1961	
	HR-HEH	NH1	8''	306	-	-	1960	
<b>Existants</b>	HEH-AR	LNZ1	12''/16''	801	5	16493	1973	GPL
	HR-AR	LZ1	24''	504	1	10500	1983	
	Alrar-HR	LR1	10''-24''	988	4	28900	1997	
<b>En projet</b>	Looping[R] Ohanel-G.touil	LR1	16''	404	-	-	2001	
	HR-AR	LZ1	-	-	1	10500	2001	

La ligne de transport du gaz naturel GZ1 est constituée de tubes en aciers (type roulés soudés) de nuance API 5L X60, sur une distance de 507 Km pour relier le gisement de gaz naturel de Hassi R'mel (HR) et le terminal de raffinerie a Arzew (AR). La ligne dispose cinq stations de compression (SC), réparties sur la ligne assurent la mise sous pression du fluide gazeux nécessaire à son écoulement (Figure II.3), l'implantation des stations de compressions de la ligne GZ1 (tableau II.4).

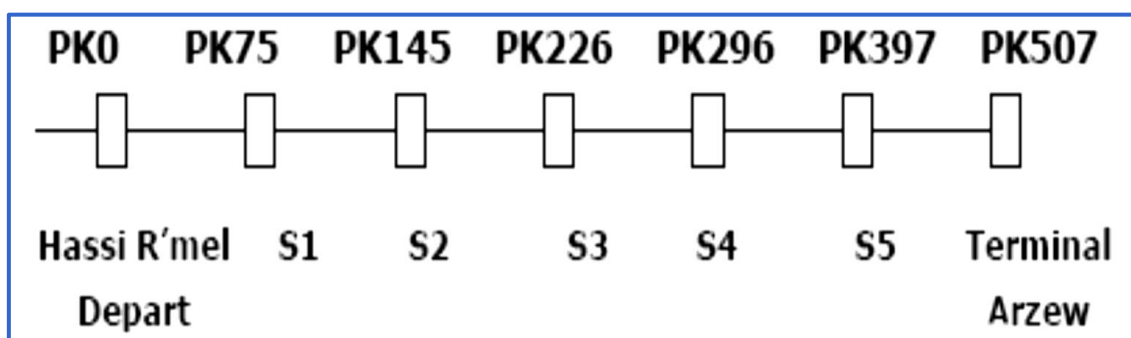


Figure II. 3 : Station de compression de la ligne GZ1.

Tableau II. 4 présentel'implantation des stations de compressions GZ1.

Tableau II. 4 : Implantation des stations de compressions GZ1.

Désignation	PK (Km)	Altitude (m)	T(c°) ambiante	Lieu
HR	0	747	40	Hassi R'mel
SC <sub>1</sub>	75	840	40	Timzet
SC <sub>2</sub>	146	4025	40	M'seka
SC <sub>3</sub>	226	970	40	Medareg
SC <sub>4</sub>	295	1255	35	Nador
SC <sub>5</sub>	397	525	35	Kenenda
AR	507	20	35	Arzew

La spécification technique de la ligne du gaz GZ1, qui relie Hassi R'mel à Arzew, est donnée dans le tableau suivant :

**Tableau II. 5 : Spécification technique de la ligne GZ1 40'' (DRC).**

Ligne	Longueur (Km)	Diamètre (pousse)	Catégorie	Nuance	Epaisseur (mm)	Masse nominale (kg/m)	PK
<b>GZ1</b>	507	40''	III	X60	12.7	275.65	0-288
		40''	II	X52A	12.7	314.18	288-507
		40''	I	X52a	19.05	465.2	Entrée et sortie

**Tableau II. 6 : paramètre énergétiques maximums d'écoulement du gaz a la sortie des stations de compression SC de GZ1.**

	Température max	Température min	Pression max	Pression min	débit
<b>GZ1</b>	81 c°	40 c°	69.8 bars	42 bars	15.33 m <sup>3</sup> /an

#### **II.4.2 Caractéristiques du matériau de l'étude X60 :**

##### *a- composition chimique du matériau :*

La composition chimique du matériau a été faite par analyse spectrophotométrie sur machine type "SPECTRO Rp 212" disponible au niveau de l'usine ALPHAPIPE à Annaba de production des tubes en spirale <sup>[55]</sup>.

**Tableau II. 7 : Composition chimique (en %).**

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
<b>0.213</b>	0.380	1.35	0.015	0.016	0.025	0.024	0.013
Al	Co	Cu	Nb	Ti	(S+P)	Ceq	Fe
<b>0.067</b>	0.007	0.029	0.078	0.003	0.031	0.45	97.8

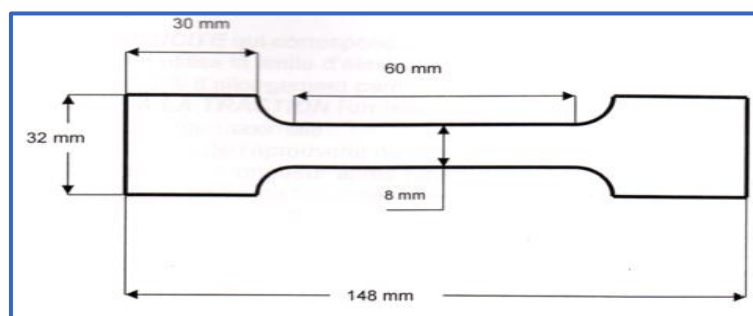
On notera que la teneur en soufre est très basse par rapport aux teneurs rencontrées dans les nuances des tubes de transport actuels. Il en résulte une basse teneur inclusionnaire et donc

une bonne ductilité. Par ailleurs on révèle la présence de très petite quantité d'aluminium (pour la désoxydation).

*b- Essai de traction (caractéristique mécanique) :*

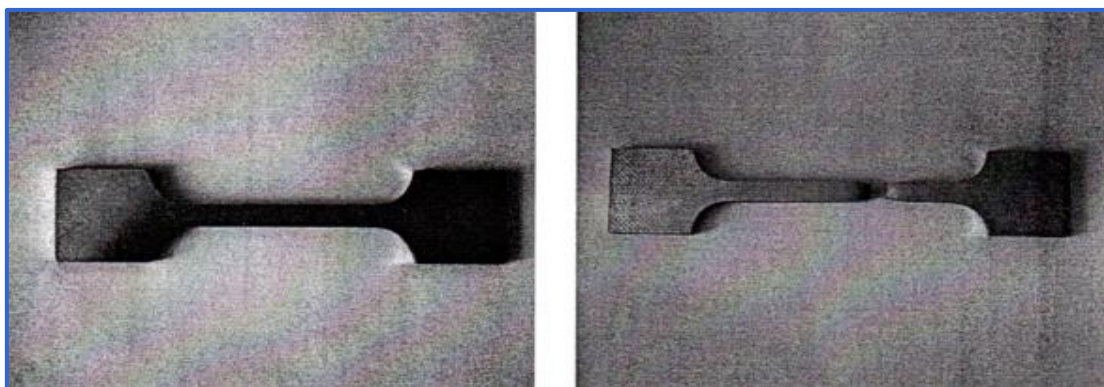
L'essai de traction consiste à exercer sur un barreau prismatique ou cylindrique, des efforts croissants qui vont la déformation puis le rompre. L'essai se fait sur une machine universelle type Machine "Spécial métal SP" avec entraînement hydraulique centrale, capacité entre 400 et 2000 KN.

Figure II. 4 présente l'éprouvette de l'essai.



**Figure II. 4 : éprouvette de l'essai.**

Les figures suivantes montrent l'éprouvette avant et après essai.



**Figure II. 5 : éprouvette de traction avant et après essai <sup>[55]</sup>.**

L'examen du diagramme effort-allongement (figure II.6) fait apparaître plusieurs domaines :

- Un domaine élastique OA dans lequel les déformations sont réversibles.
- Un domaine plastique AC dans lequel les déformations sont permanentes de A à B

La figure suivante courbe effort allongement.

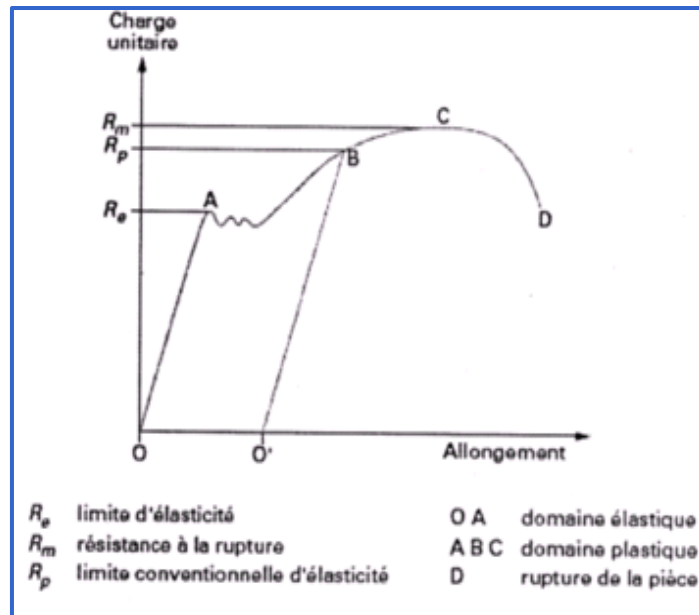


Figure II. 6 : Courbe effort allongement <sup>[55]</sup>.

On définit :

- La limite d'élasticité ( $R_e$ ) qui correspond à la fin du domaine élastique.
- La résistance à la traction  $R_m$  (charge de rupture) qui correspond à la charge maximale.
- L'allongement total (A) de l'éprouvette ou allongement de rupture ( $L_o$  : longueur initiale,  $L_u$  : longueur après rupture).
- La striction (Z) qui est la réduction de section maximale de l'éprouvette rompue ( $S_o$  : section initiale,  $S_u$  section minimale après rupture).

Les résultats de l'essai de traction pour l'acier X60 et donnée sur le tableau suivant :

Tableau II. 8 : Résultat d'essai de traction <sup>[55]</sup>.

Essais	$R_e$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	A %	Z %
1	410	557	32	49
2	413	569	30	53
3	417	578	33.3	55
<b>Moyen</b>	413.33	568	31.76	52.33

Ces résultats montrent que les valeurs de l'acier API 5L X60 sont proches.

## **II.5 Inspection des canalisations :**

Les décisions de réhabilitation de canalisations reposent essentiellement sur les résultats des inspections suivantes:

- Mesures du potentiel de la protection cathodique ;
- Mesures de résistance du revêtement ;
- Inspections par outil instrumenté.

### **II.5.1 Principales causes des dégradations de canalisations:**

Mauvaise application des revêtements durant la construction ;

- Dégradation rapide des revêtements appliqués ;
- Agressivité des sols traversés ;
- Défaillance des systèmes de protection cathodique ;
- Interférences entre les systèmes de PC de différentes pipes.

### **II.5.2 Méthodes d'inspection des tubes :**

#### **II.5.2.1 Contrôle visuel :**

Une équipe de contrôleurs expérimentés inspecte ici toutes les surfaces extérieure du tube. Ils signalent toutes les anomalies d'aspect ou de forme qui pourront être corrigées, soit meulage, soit par recoupe doivent être décrivant :

- l'état général des surfaces (produits de corrosion, organismes, pollution) ;
- les désordres (nature, localisation et ampleur) ;
- le relevé précis des réparations réalisées antérieurement ;
- les déformations constatées.

#### **II.5.2.2 Contrôle ultrasonore :**

Bien que les défaillances dues à la corrosion d'une canalisation soient très rares, nos exploitants de pipelines surveillent leurs conduites de très près par le biais de diverses technologies et d'outils. Ces derniers peuvent inclure des racleurs (outil intelligents). Les outils intelligents, ou jauges d'inspection de canalisation, sont de gros pistons métalliques instrumentés. Ils sont insérés dans la canalisation et la parcourent, poussés par le débit du

produit transporté. Ils effectuent diverses mesures à l'intérieur de la conduite : ils indiquent entre autres les obstructions et les déformations de la conduite, ainsi que la perte de métal.

S'ils décèlent une perte de métal, l'exploitant du pipeline prend les mesures qui s'imposent, ce qui dans certains cas, peut comprendre le remplacement d'un segment de la canalisation.

Nous présentent l'outil intelligent dans la figure suivante :

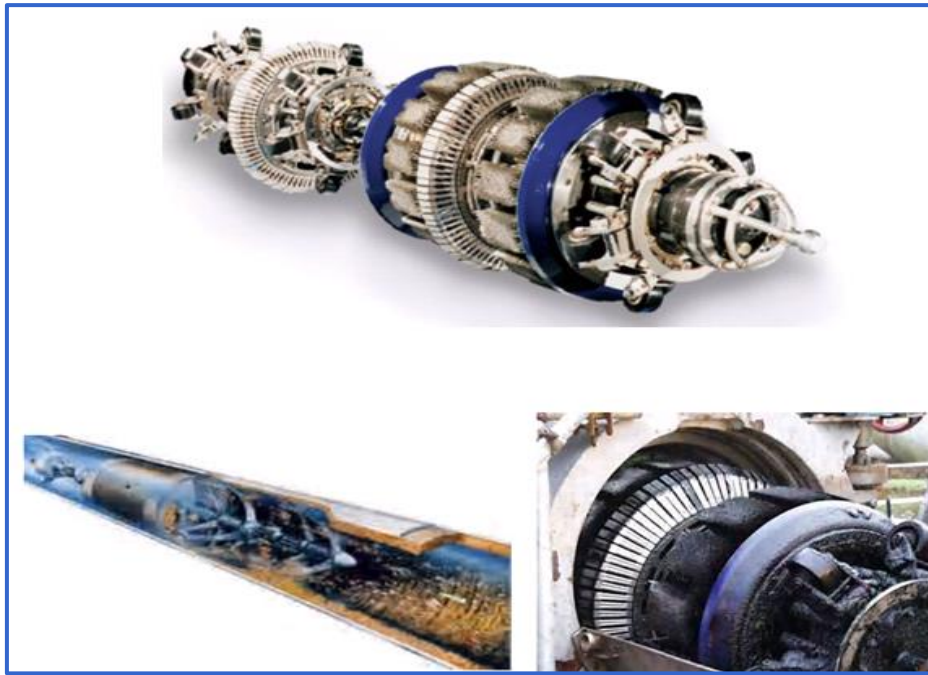


Figure II. 7 : Outil intelligent d'inspection <sup>[56]</sup>.

## II.6 Méthodes de traitement des surfaces :

### II.6.1 Décapage :

Cette opération consiste à enlever l'ancien revêtement et la mie à nu de l'acier .Elle s'effectue manuellement par les ouvriers au le détachement et plus facile après que le revêtement soit dégradé.

La figure suivante présente décapage manuelle (STT).



**Figure II. 8 : Décapage manuelle (STT).**

### **II.6.2 Sablage :**

L'opération de sablage consiste à projeter les grains d'abrasif (fibre de verre) sur la surface de l'acier des tubes à une vitesse choisie pour bien nettoyer les tubes et sans les détériorations. Cette opération s'effectue par deux types de machines :

- Machine automatique modèle AOB 32636 (figure II.9).
- Machine manuelle (figure II.10).



**Figure II. 9 : Sableuse automatique (STT).**



Figure II. 10 : Sableuse manuelle (STT).

## II.7 Méthodes de réparation des tubes :

### II.7.1 Réparation par demi-coquilles soudées :

La procédure de réparation en charge des canalisations de transport d'hydrocarbures par l'installation de demi-coquilles soudées à encerclement total. Les demi-coquilles soudées à encerclement total, également connues sous le nom de demi-coquilles de type B, renforcent la zone défectueuse et contiennent toute éventuelle fuite, et sont par conséquent utilisées pour réparer des défauts débouchant ou non-débouchant d'orientation axiale ou circonférentielle.

La figure suivante présente la géométrie de demi-coquilles.

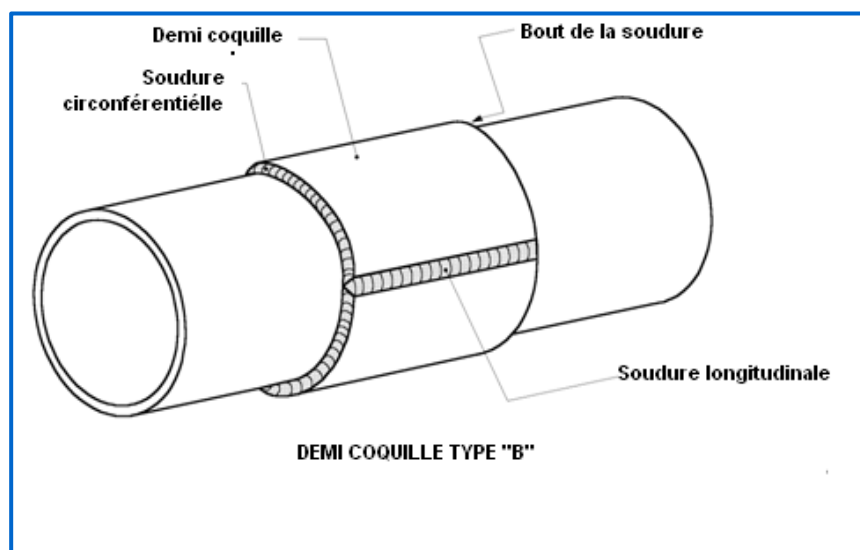


Figure II. 11 : Géométrie de demi-coquilles <sup>[59]</sup>.

Les demi-coquilles soudées permettent de réparer les défauts suivants :

- Corrosions internes et externes ;
- Enfoncements simples ou combinés à d'autres défauts ;
- Entaille et rayures ;
- Fissures au niveau du corps du tube ou du cordon de soudure circonférentiel.

La figure suivante présente l'opération de soudages de demi coquilles (STT).



**Figure II. 12 : Opération de soudages de demi coquilles (STT).**

### **II.7.2 Réparation par Clock spring :**

Les compagnies d'exploitation de pipelines peuvent périodiquement trouver des défauts dans leurs canalisations pendant les inspections et l'opération normale et l'entretien. Le défaut a pu avoir été provoqué par des dommages d'excavation, la corrosion, des erreurs de construction, ou le processus de fabrication. Des manchons ou les brides en acier de réparation ont été typiquement utilisées pour réparer des dommages de canalisation ou des défauts ou la section endommagée ont été arrêtés et remplacés. Une fois correctement appliquée le manchon composé de clock spring reconstitue la canalisation à la condition de fonctionnement sûre sans devoir arrêter et remplacer la canalisation. Les manchons composées de clock spring sont utilisées pour dépanner provisoires et permanents sur le gaz naturel et les canalisations liquides. La phase d'installation de clock spring selon [les figures II.13 et II.14](#) <sup>[57]</sup>.

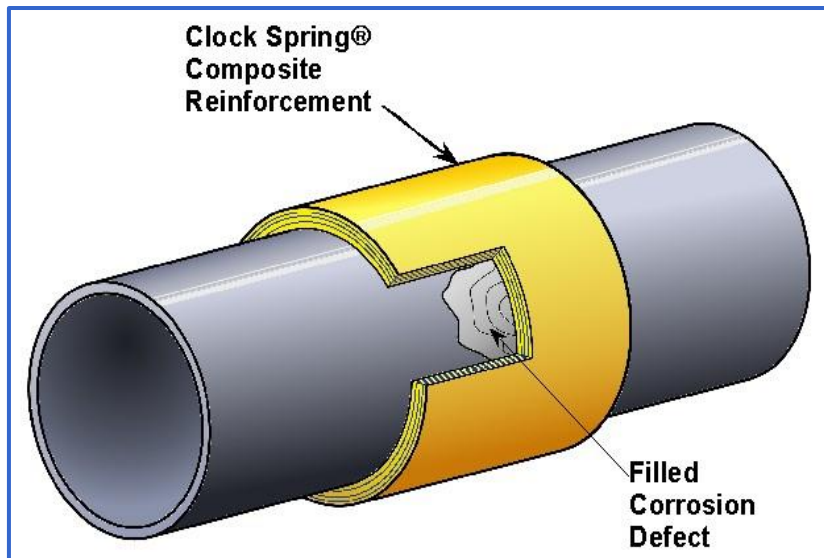


Figure II. 13: Réparation par clock spring.

► *Installation de Clock Spring dans la STT :*

1. Localisation du point de corrosion par GPS



2. Découpage de la conduite



3. Mesurage de la perte de métal



4. Phase de sablage



5. Phase installation du kit Clock spring



**Figure II. 14 : installation de Clock Spring (STT).**

La qualité de l'activateur pour l'adhésif de clock spring se définit sur le tableau suivante :

**Tableau II. 9: Qualité d'activateur pour l'adhésif <sup>[58]</sup>.**

température d'installation c°	quantité d'activateur (g)					approximatif	
	quantité adhésive (g)					temps de travail (minutes)	temps de traitement (heures)
	650	1200	1700	2400	3000		
<b>0</b>	80	150	215	300	380	45	2.5 - 3
<b>10</b>	65	120	175	245	310	45	2.5 - 3
<b>21</b>	50	95	135	190	240	45	2.5 - 3
<b>27</b>	40	75	105	145	180	45	2.5 - 3
<b>32</b>	35	70	95	135	170	35	2 - 2.5
<b>38</b>	35	60	90	120	150	23	1.5 - 2
<b>43</b>	35	60	85	120	150	22	1.5 - 2
<b>49</b>	35	60	85	120	150	21	1.5 - 2

## **II.8 Conclusion :**

L'acheminement des hydrocarbures se fait par pipelines. Les tubes en acier API avec double protection par revêtements et par protection cathodique, mais des défaillances sont apparus dans des conditions d'interaction du matériau avec l'environnement de sol.

La ligne GZ1 de ce réseau achemine le gaz naturel depuis le gisement jusqu'à la raffinerie. Les opérations d'inspection visuelle et par contrôle ultrasons (outil intelligent) ont révélés que les tubes de la ligne après exploitation d'une quarantaine d'année présentent des défaillances par corrosion localisée (pitting corrosion et généralisée et des décollements de revêtements mettant l'acier du pipe à nu et en interaction avec le milieu environnant.

La réhabilitation progressive des pipes a permis son exploitation et une continuité d'exploitation grâce à la maîtrise du système de protection et de détection des défaillances, la connaissance de l'état de corrosion au niveau des différents points du pipe a permis de définir le risque à un seuil de sécurité permettant d'assurer une meilleure exploitation.

Après avoir défini le contexte de l'étude relatif à la description de la ligne GZ1, nous présenterons dans le chapitre suivant une étude de simulation numérique de la structure métallique en utilisant le code de calcul ANSYS. La structure métallique du pipe a été considéré dans un premier temps exempt de défauts ensuite renfermant un défaut localisé suite à des sollicitations de corrosion simulé en forme parabolique à des profondeurs de pics variant jusqu'à 80% et finalement nous avons considéré la structure du pipe réparée par renforcement de composite de type clock spring sur deux aspects : le défaut rempli et le défaut non rempli.

# C

## hapitre III :

### Modélisation & simulation numérique.

### III Introduction :

Dans cette partie du mémoire nous avons considéré la structure métallique du pipe dans un premier temps exempt de défauts ensuite renfermant un défaut localisé suite à des sollicitations de corrosion simulé en forme parabolique à des profondeurs de pics variant jusqu'à 80% et finalement nous avons considéré la structure du pipe réparée par renforcement de composite de type clock spring sur deux aspects : le défaut rempli et le défaut non rempli.

La première partie de l'étude analytique, nous avons considéré l'état des contraintes d'un tube sans défaut en fonction de l'épaisseur et de la pression interne, puis en déterminant l'ensemble des lois expérimentales qui ont mis un seuil de pression critique pour un tube comportent un défaut de corrosion. Ces lois nous donnent deux types de défauts cylindriques et rectangulaires d'une manière comparative et en conformité avec les règles de calculs.

La deuxième partie comporte une modélisation numérique par le code de calcul ANSYS version 11.0. L'étude de simulation comporte trois parties. Nous avons considéré dans un premier temps la structure de pipe GZ1 sans défaut en faisant varier l'épaisseur et le diamètre et dans un deuxième temps la structure comportant un défaut parabolique comme une perte de métal par corrosion jusqu'à 80% et nous terminerons cette simulation en considérant la structure de pipe réparée par manchon composite en s'approchant du contexte industriel.

### III.1 Différentes étapes du comportement mécanique du matériau :

L'allure générale du comportement d'un acier de construction est celle présentée sur la figure III.1. Les caractéristiques de base (élasticité, ductilité, résistance maximale) sont initialement garanties. La présence d'un palier d'écoulement plastique à contrainte constante est fondamentale en vue d'une application en analyse plastique. La réserve de résistance due à l'écroutissement assure la sécurité de la structure en cas de déformations importantes. Cette réserve peut être définie par le rapport de la limite d'élasticité à la résistance maximale qui est une valeur normalisée dans certains cas.

La figure suivante montre le comportement d'un acier au carbone.

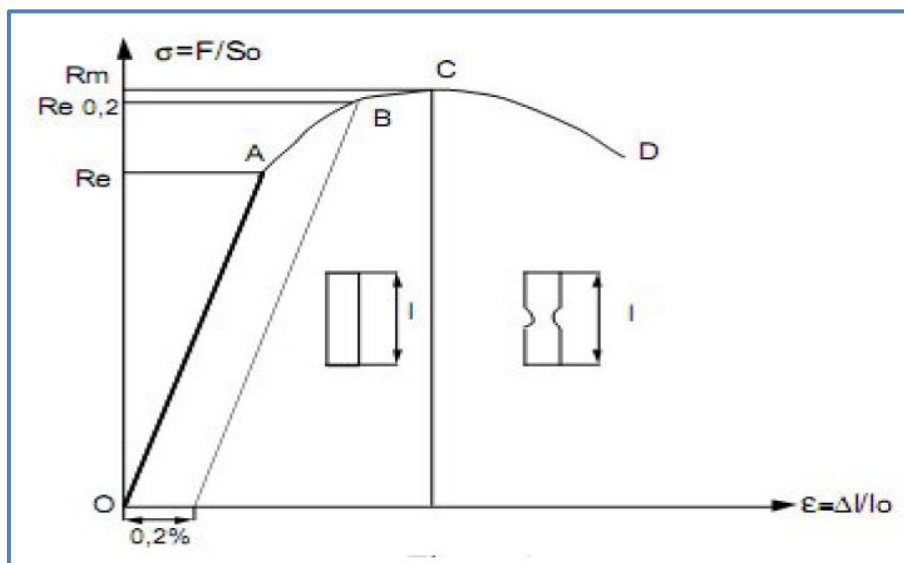


Figure III. 1 : Comportement d'un acier au carbone.

La courbe de comportement d'un acier écroui ne présente pas de palier de plasticité et l'évolution post-élastique est progressive et non linéaire. L'acier écroui est caractérisé par une nouvelle limite d'élasticité plus grande que sa valeur initiale.

La plasticité est caractérisée par des déformations irréversibles qui se développent dans la structure lorsqu'un niveau de contrainte, connu sous le nom de limite d'élasticité, a été atteint.

La réponse en élastoplasticité à une sollicitation est gouvernée par trois concepts fondamentaux liés

- Le critère de plasticité, qui généralise la notion de limite d'élasticité ou de seuil de plasticité en traction uni axiale.
- La loi d'écoulement, qui définit dans le cas de sollicitation multiaxiale, la façon dont évolue la déformation plastique.

- La règle d'écroûissage qui décrit l'évolution du critère en fonction de l'histoire.

### III.2 Étude analytique de la variation des rapports contrainte, pression interne et celle des diamètres moyens et épaisseur pour les tubes spéciaux mince à l'état idéal :

Les tubes de Pipeline sont des tubes minces, cela est dû au fait que l'épaisseur de la conduite est inférieure au diamètre extérieur  $\frac{t}{D_{ext}} \leq 0.05$ .

On va présenter un échantillon comme exemple de ce qu'on vient d'expliquer :

( $D_{ext} = 1016$ ,  $t = 12.7$ ) dans le cas de pipe de GZ1.

Les contraintes dans le tube sont : La contrainte radiale  $\sigma_r$ , la contrainte circonférentielle  $\sigma_\theta$  et la contrainte de traction  $\sigma_z$ . Celles-ci s'expriment par les relations suivantes en fonction de la variable  $r$  voir la figure III.2.

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

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

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

Les contraintes développées dans les tubes : la contrainte circonférentielle  $\sigma_{\theta\theta}$ , la contrainte radiale  $\sigma_{rr}$ , et la contrainte de traction  $\sigma_{zz}$ . Celles-ci s'expriment par les relation suivants en fonction de la variation  $r$ , notons que le problème est considéré axisymétrique du moment que la pression est répartie uniformément dans le tube.

La figure suivante montre la Variation des contraintes en fonction du rayon  $r$ .

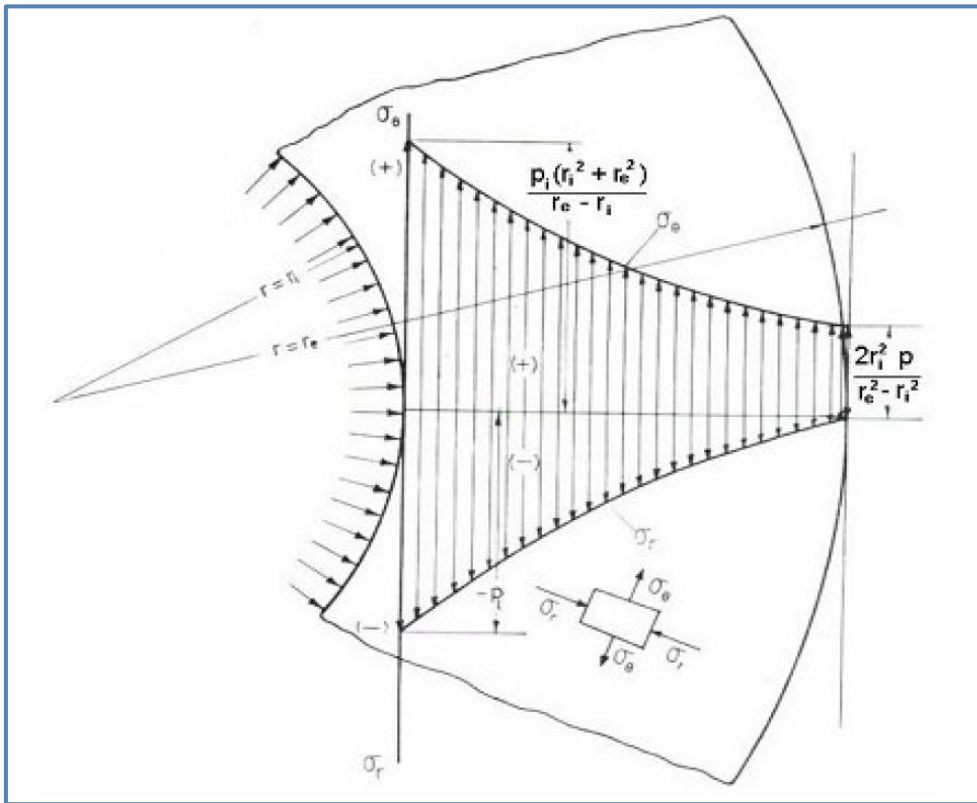


Figure III. 2 : Variation des contraintes en fonction du rayon r.

### III.2.1.1 La contrainte de Von Mises $\sigma_{zz}$

Pour le calcul des tubes de pipelines, il est plus commode d'employer cette théorie en utilisant des coordonnées cylindriques, dont les composantes des d'effort sont combinées en un seul effort efficace selon l'équation de Von Mises [63].

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

Considérons trois tubes de dimensions différentes, soumis à diverses pressions de 1 et 3 et 5 et 7 MPa et après l'application numérique, les résultats obtenus sont reportés dans le tableau IV.1. Dans ce cas, nous prenons l'acier API 5L X 60, qui a les propriétés mécaniques suivantes  $E = 210000 \text{ MPa}$ ,  $\nu = 0.3$ .

Le tableau suivant illustre la variation des dimensions et de pression.

**Tableau III. 1 : variation des dimensions et de pression.**

<b>t</b>	<b>DEXT</b>	<b>DINT</b>	<b>DMOY</b>	<b>t/DMOY</b>	<b>Pi</b>	$\sigma_{\theta}$	$\sigma_r$	$\sigma_z$	$\sigma_e$
<b>12,7</b>	1016	990,6	1003,3	0,01265823	1	39,5	-1	19,2531646	35,0740029
<b>12,7</b>	1016	990,6	1003,3	0,01265823	3	118,5	-3	57,7594937	105,222087
<b>12,7</b>	1016		1003,3	0,01265823	5	197,5	-5	96,2658228	175,370145
<b>12,7</b>	1016	990,6	1003,3	0,01265823	7	276,5	-7	134,772152	245,518203
<b>8</b>	459,4	443,4	451,4	0,01772264	1	28,2125	-1	13,6106807	25,2987675
<b>8</b>	459,4	443,4	451,4	0,01772264	3	84,6375	-3	40,832042	75,8963026
<b>8</b>	459,4	443,4	451,4	0,01772264	5	141,0625	-5	68,0534033	126,493837
<b>8</b>	459,4	443,4	451,4	0,01772264	7	197,4875	-7	95,2747646	177,091373
<b>6</b>	219	207	213	0,02816901	1	17,75	-1	8,38204225	16,2379779
<b>6</b>	219	207	213	0,02816901	3	53,25	-3	25,1461268	48,7139335
<b>6</b>	219	207	213	0,02816901	5	88,75	-5	41,9102113	81,1898892
<b>6</b>	219	207	213	0,02816901	7	124,25	-7	58,6742958	113,665845

### III.3 Analyse élastique des éléments de conduites avec corrosion:

Nous avons analysé la résistance des tuyaux dans une situation idéale ou il n'existe pas des défauts dans les tubes.

Du fait que les tubes peuvent être corrodés, et que le phénomène de corrosion est un problème à prendre en compte puisqu'il est considéré comme l'une des causes d'endommagement des tubes les plus répandues.

L'ensemble des lois expérimentales qui ont mis un seuil de pression critique et qui nous permettent de prendre en considération ces défauts de corrosion. Ces lois nous donnent deux types de défauts cylindriques et rectangulaires d'une manière comparative et en conformité avec les règles de calculs. La forme suivante nous donne les dimensions d'une manière générale.

La figure suivante représente la représentation de la fissure sur un tube.

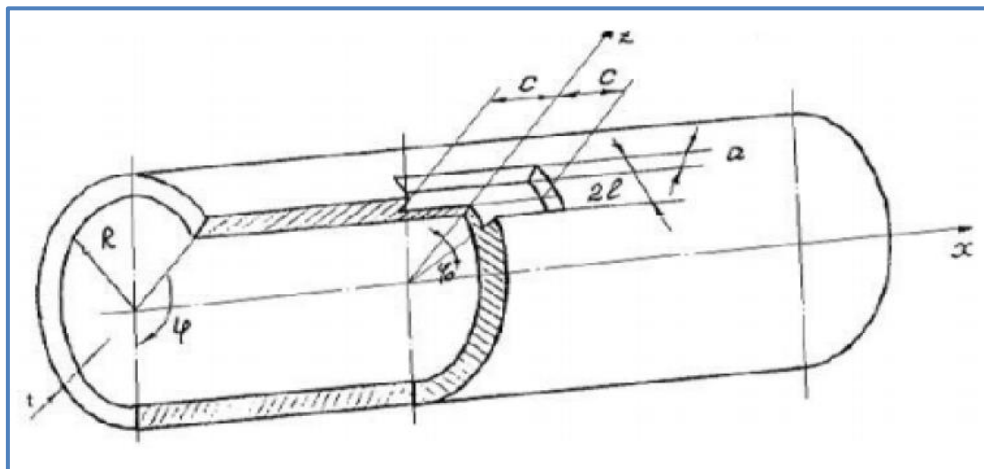


Figure III. 3 : Représentation de la fissure sur un tube.

#### III.3.1 Codes d'évaluation :

##### III.3.1.1 ASME B31G :

Le code ASME B31G est un code destiné à évaluer la résistance à la rupture résiduelle d'un tuyau corrodé. Il constitue un additif au code ASME B31 utilisé pour les tubes sous pression.

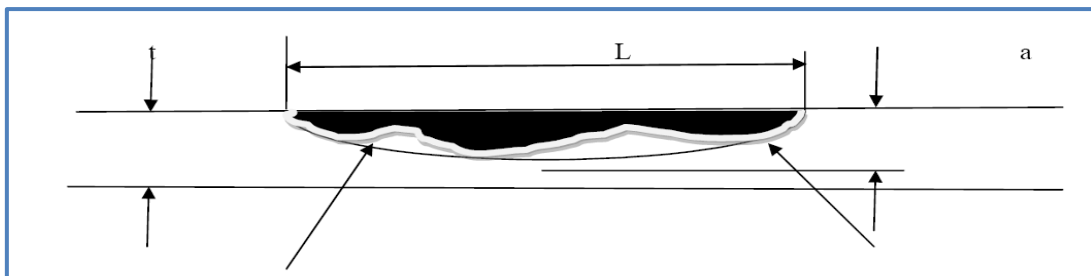
Ce code a été développé dans les années 60 au Battelle Memorial Institute(USA) et donne des méthodes semi empiriques pour vérifier la tenue en service de tuyaux corrodés. Basé sur

un nombre relativement important d'essais en vraie grandeur sur des sections de tuyaux corrodés, il a été constaté que les aciers utilisés pour les tuyaux ont en générale une ténacité suffisante pour permettre la rupture ductile et donc que la ténacité n'est pas le paramètre essentiel mais la profondeur de corrosion. La rupture amorcée sur des défauts de corrosion émoussés est contrôlée par leur taille et la contrainte d'écoulement du matériau  $R_c$ . Les paramètres d'entrée comportent le diamètre extérieur du tuyau ( $D_{ext}$ ), l'épaisseur ( $t$ ), la limite d'élasticité minimale requise, la pression de service maximale [60], l'extension maximale longitudinale de la corrosion ( $2c$ ) et la profondeur du défaut ( $a$ ).

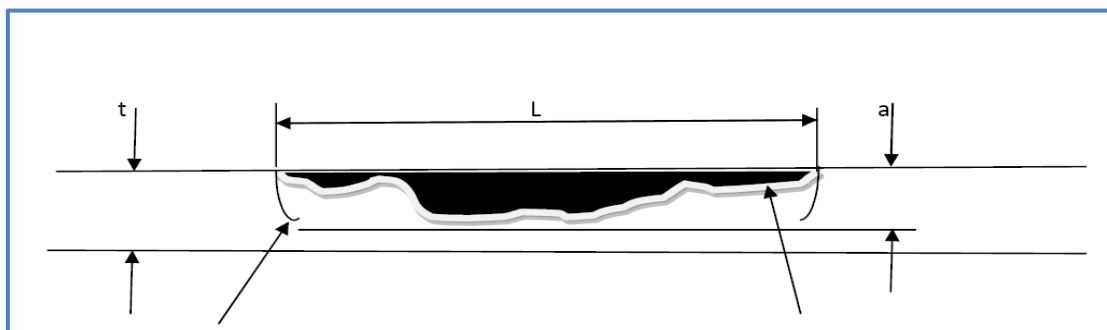
Selon le Code ASME B31G, l'équation de la rupture de tubes corrodés est établie à partir des données expérimentales et exprimée à partir des deux conditions suivantes :

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

Les figures III.4 et III.5 représentent les types de défaut selon la norme B31G.



**Figure III. 4 : Défaut de corrosion court projeté selon une forme parabolique.**



**Figure III. 5 : Défaut de corrosion long projeté selon une forme rectangulaire.**

La surface de corrosion est calculée par cette formule  $A_{co} = t * 2c$  représentée sur la figure III.6.

La figure suivante représente la face longitudinale imaginaire d'un défaut de corrosion.

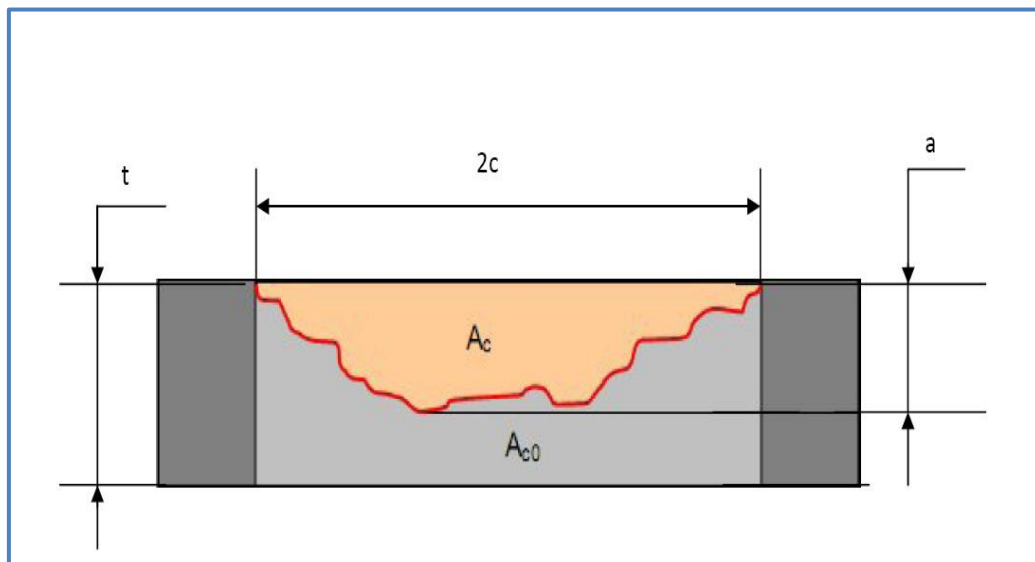
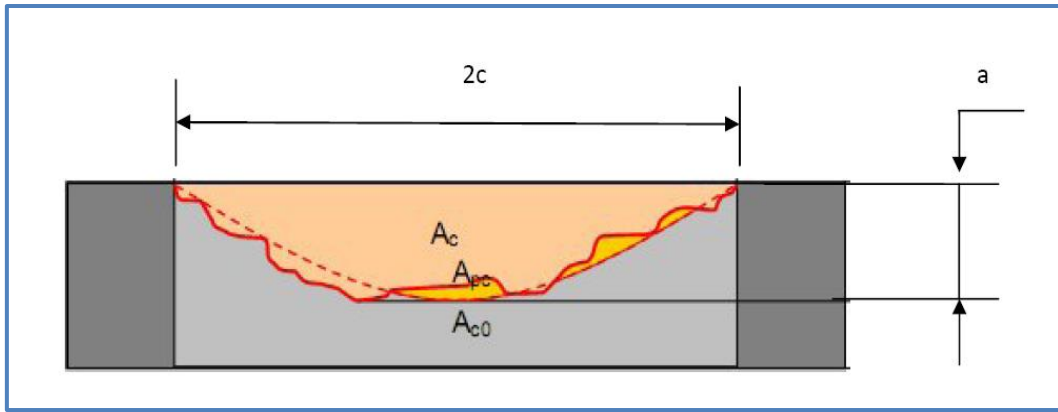


Figure III. 6 : Face longitudinale imaginaire d'un défaut de corrosion.

La surface corrodée est rapprochée. Selon la longueur ASME de défaut B31G assume une forme parabolique ou rectangulaire pour la corrosion. Pour des secteurs plus courts de corrosion, quand la longueur axiale de la surface affectée L est inférieure ou égale à  $\sqrt{20 * D * t}$ , la forme parabolique est employée (figure. III.7).

$$2c \leq \sqrt{20 * D * t}$$

La figure suivante présente la surface corrodée parabolique assumée pour le défaut relativement court de corrosion (selon ASME B31G).



**Figure III. 7 : Surface corrodée parabolique assumée pour le défaut relativement court de corrosion (selon ASME B31G).**

Par conséquent les montants projetés de la surface  $A_{pc}$  de défaut :

$$A_c = \frac{2}{3} a * 2c$$

La pression sûre maximum pour des défauts courts est définie comme :

$$P_{ult} = \frac{2 \cdot (1.1R_e) * f * T * t}{D_{ext}} \cdot \left[ \frac{\left(1 - \frac{2}{3} \left(\frac{a}{t}\right)\right)}{\left(1 - \frac{2}{3} \left(\frac{a}{t \sqrt{1+A^2}}\right)\right)} \right] \quad (\text{III.16})$$

- $\mathcal{F}$ -facteur de conception approprié d'ASME B31.4, d'ASME B31.8, ou d'ASME B31.11, (normalement égale à 0.72)
- T- la température sous-sollicitant le facteur du code B31 approprié (si aucun n'énumérait, T=1).

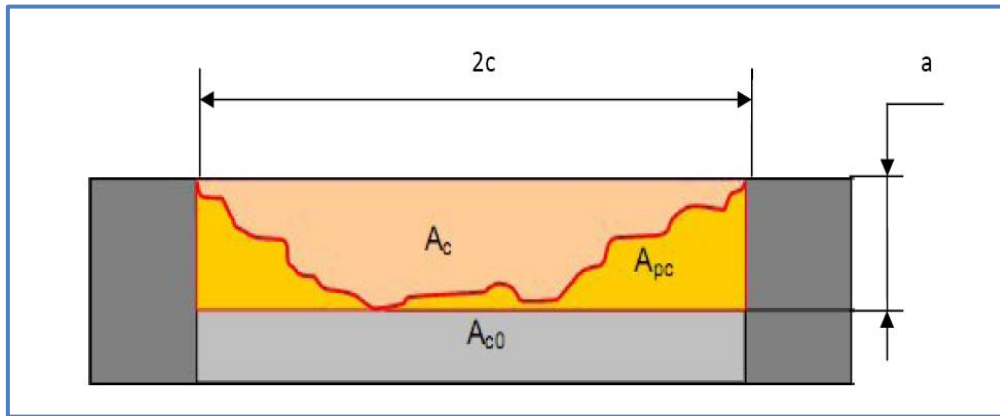
Dans les équations suivantes des facteurs  $\mathcal{F}$  de et de T ne sont pas pris en compte. La plupart des auteurs supposent que les compagnies emploient leurs propres facteurs de sûreté de toute façon.

Le facteur de *Folias* est défini comme :

$$M = \sqrt{1 + 0.8 * \frac{(2a)^2}{D_{ext} * t}} \quad (\text{III.17})$$

Pour de plus longs secteurs de corrosion l'approximation d'une forme parabolique n'est pas appropriée [61], quand l'équation III.18 est rencontrée, la forme est rectangulaire (Figure.III.8).

$$2c > \sqrt{20 * D * t}$$



**Figure III. 8 : Secteur rectangulaire supposé corrodé pour un plus long défaut de corrosion (selon ASME B31G /34/).**

Pour ces longs défauts le secteur projeté  $A_{pc}$  s'élève :

$$A_c = a * 2c$$

La pression d'échec est décrite par l'équation suivante, qui est concurremment égale au calcul d'épaisseur de paroi de repos.

$$P_{ult} = \frac{2 \cdot (1.1R_e) \cdot f \cdot T \cdot t}{D_{ext}} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{a}{t} \right) \right] \quad (\text{III.18})$$

Le facteur de *Folias* est infiniment haut :  $\mathbf{M} = \infty$

Récapitulatif, ASME B31G est une méthode conservatrice. Il contient des limitations, qui le rendent impossible de couvrir tous les défauts de corrosion, matériaux de pipe et charges :

L'équation de la rupture pour un tuyau corrodé varie selon la forme du défaut (parabolique et rectangulaire).

### III.3.1.2 Défauts paraboliques :

$$A = \sqrt{0.8 \left(\frac{2a}{D_{ext}}\right)^2 \left(\frac{D_{ext}}{t}\right)} = 0.893 \left(\frac{2a}{\sqrt{D_{ext} \cdot t}}\right) \quad (\text{III.19})$$

si  $A \leq 4$

$$P_{ult} = \frac{2 \cdot (1.1R_e)t}{D_{ext}} \cdot \left[ \frac{\left(1 - 0.667\left(\frac{a}{t}\right)\right)}{\left(1 - 0.667\left(\frac{a}{t}\right)/M\right)} \right] \quad (\text{III.20})$$

$$M = \sqrt{1 + 0.8 \left(\frac{2a}{D_{ext}}\right)^2 \left(\frac{D_{ext}}{t}\right)} = \sqrt{1 + A^2} \quad (\text{III.21})$$

$$P_{ult} = \frac{2 \cdot (1.1R_e)t}{D_{ext}} \cdot \left[ \frac{\left(1 - \frac{2}{3}\left(\frac{a}{t}\right)\right)}{\left(1 - \frac{2}{3}\left(\frac{a}{t\sqrt{1+A^2}}\right)\right)} \right] \quad (\text{III.22})$$

Avec

M est le coefficient de la flambage. la limite d'écoulement  $R_c$  est prise égal à  $R_c = 1.1R_e$

### III.3.1.3 Défauts rectangulaires :

si  $A > 4$

$$P_{ult} = \frac{2 \cdot (1.1R_e)t}{D_{ext}} \cdot \left[ 1 - \left(\frac{a}{t}\right) \right] \quad (\text{III.23})$$

### III.3.2 ASME B31G modifié ou 085DL :

Dans le code ASME B31G modifié la limite d'écoulement est considérée comme égale à :

$$R_m = 1.1R_e + 69 \text{ (MPa)} \quad (\text{III.24})$$

Limite d'élasticité. Deux cas sont à considérer :

- **cas 1 :**

$$\left(\frac{2a}{R_{ext}}\right)^2 \cdot \left(\frac{R_{ext}}{t}\right) \leq 50 \text{ où } A \leq 6.3 \quad (\text{III.25})$$

$$P_{ult} = \frac{2 \cdot (R_e + 69)t}{D_{ext}} \cdot \left[ \frac{\left(1 - 0.85\left(\frac{a}{t}\right)\right)}{\left(1 - 0.85\left(\frac{a}{t}\right)/M\right)} \right] \quad (\text{III.26})$$

Le facteur de flambement M est égal à :

$$M = \sqrt{1 + 0.6275 \left(\frac{2c}{D_{ext}}\right)^2 \cdot \left(\frac{D_{ext}}{t}\right) - 0.003375 \left(\frac{2c}{D_{ext}}\right)^4 \cdot \left(\frac{D_{ext}}{t}\right)^2} \quad (\text{III.27})$$

- **cas 2 :**

$$\left(\frac{2c}{R_{ext}}\right)^2 \cdot \left(\frac{R_{ext}}{t}\right) > 50 \text{ où } A > 6.3 \quad (\text{III.28})$$

$$P_{ult} = \frac{2 \cdot (R_c)t}{D_{ext} - t} \cdot \left[ \frac{\left(1 - \left(\frac{a}{t}\right)\right)}{\left(1 - \left(\frac{a}{t}\right)/Q\right)} \right] \quad (\text{III.29})$$

Application du code ASME B31G modifié :

Le facteur de flambement M est égale à :

$$M = 3.3 + 0.032 \left(\frac{2c}{D_{ext}}\right)^2 \cdot \left(\frac{D_{ext}}{t}\right) \quad (\text{III.30})$$

Dans ce cas, la pression ultime décroît toujours avec la profondeur du défaut. la pression ultime calculée est peu sensible à la forme du défaut utilisé et les résultats sont beaucoup plus

conservatifs dans le cas du code ASME B31G modifié. Il faut mentionner que l'utilisation du code ASME B31G est limitée à des défauts de corrosion avec un facteur de concentration de contrainte faible. Le cas des fissures sera examiné plus loin.

Le chargement est aussi limité à une pression interne. L'extension latérale du défaut n'est pas prise en compte mais une attention particulière sur les défauts réels tri dimensionnel montre que son influence est mineure. Dans le cas où le défaut est non admissible selon le code ASME B31G, il est permis de reprendre l'analyse ou de faire un essai de pressurisation.

### **III.4 Modélisation et simulation numérique :**

L'étude de simulation comporte trois parties. Nous avons considéré dans un premier temps la structure de pipe GZ1 sans défaut en faisant varier l'épaisseur et le diamètre et dans un deuxième temps la structure comportant un défaut parabolique comme la perte de métal par corrosion et nous terminerons cette simulation en considérant la structure réparée par manchon composite en s'approchant du contexte industriel.

La modélisation numérique a été faite par le code commercial ANSYS version 11.0. La simulation associe une représentation géométrique, un modèle mécanique, un modèle de comportement matériel et une représentation des actions extérieures (conditions aux limites) [63]. On résumera ci-après les hypothèses retenues pour chacune de ces représentations.

#### **III.4.1 Modélisation numérique d'un tube sans défaut :**

##### **III.4.1.1 Représentation géométrique :**

Dans l'exemple suivant, nous prenons un quart de coque cylindrique avec les mêmes dimensions du tableau III.1, et les mêmes pressions.

##### **III.4.1.2 Choix des éléments :**

Solid 186 est un élément 3-D qui présente un comportement de déplacement quadratique. L'élément est défini par 20 nœuds ayant trois degrés de liberté par nœud. L'élément prend en charge la plasticité, hyperélasticité, fluage, le stress de raidissement, grande déviation, et de grandes capacités de contrainte. Il a également la capacité de formulation mixte pour la simulation des déformations des matériaux élastoplastiques presque incompressibles, et matériaux hyper pleinement incompressibles.

La figure suivante présente une description de l'élément solid186.

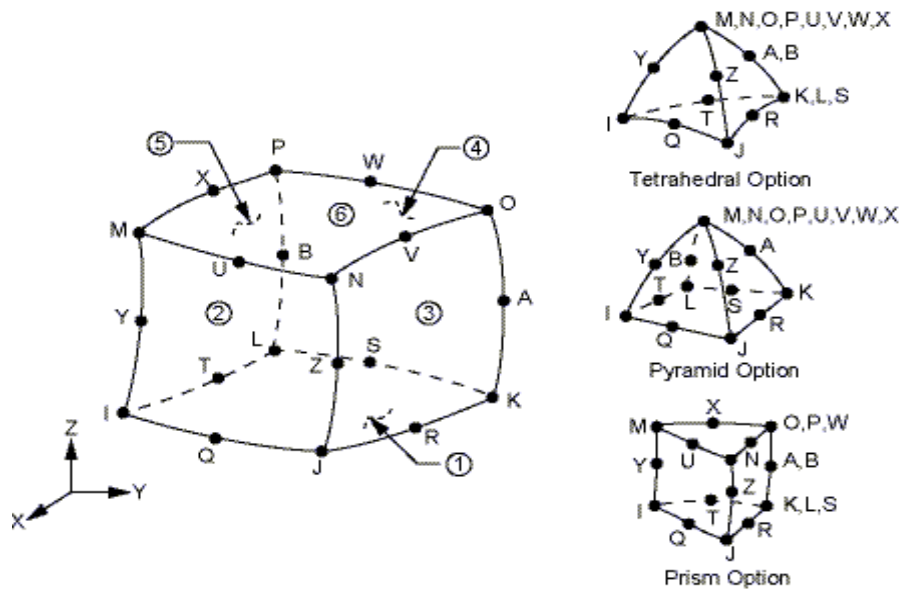


Figure III. 9 solid 186.

### III.4.1.3 Discrétisation du domaine d'étude en éléments finis :

Les figures III.9 et III.10 représentent le maillage de la structure et les conditions aux limites d'un tube sans défaut

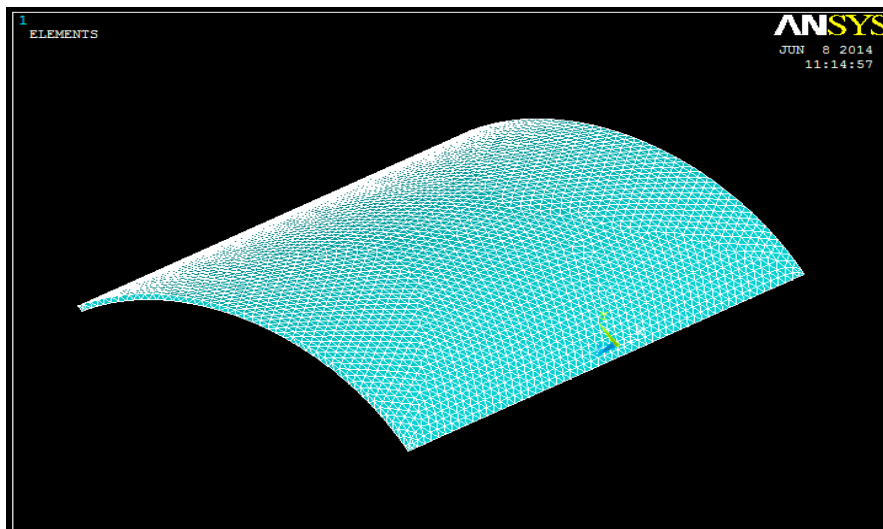


Figure III. 10 : le modèle coque cylindrique-maillage retenu pour le ¼ de coque-

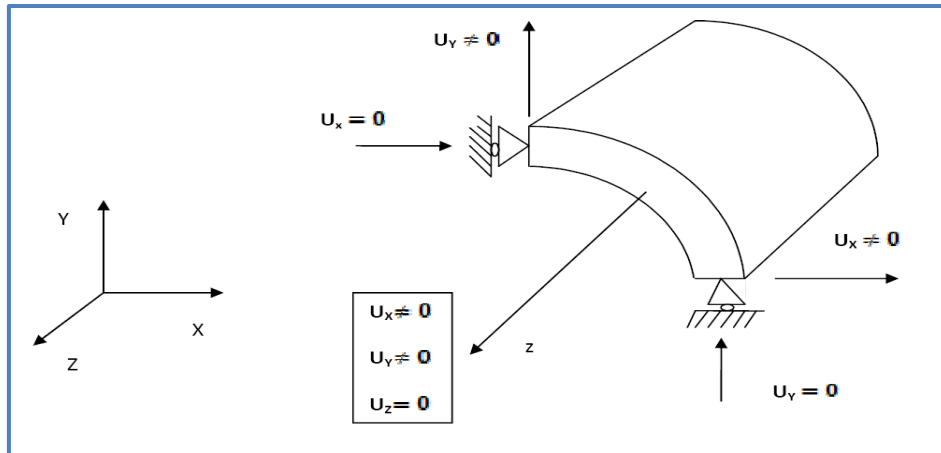


Figure III. 11 : conditions aux limites pour la pression intérieure.

### III.4.2 Modélisation numérique d'un tube comportant un défaut :

#### III.4.2.1 Représentation géométrique :

Le modèle structure est un pipeline GZ1. Les données géométriques normalisées du pipe sont : le rayon extérieur ( $R_{ext}= 508$  mm), le rayon intérieur ( $R_{int}=495.3$  mm), l'épaisseur ( $t=12.7$  mm), longueur de tube ( $L=1000$ mm).

Le pic de corrosion a une forme parabolique caractérisée par son demi-axe suivant l'axe ox ( $a=44.45$  mm) et son deuxième demi-axe suivant l'axe oz ( $C=44.45$  mm).avec un taux d'endommagement jusqu'à 80%.

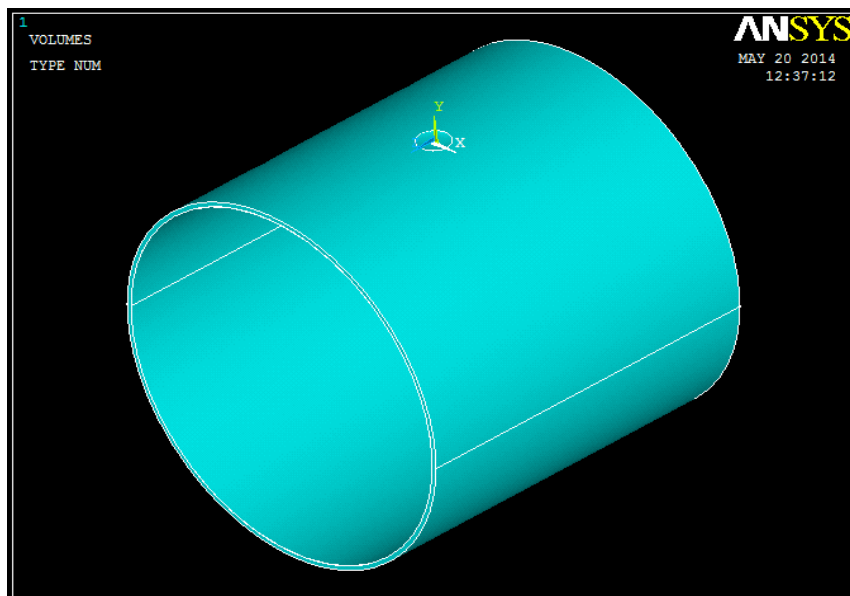


Figure III. 12 : Coque cylindrique avec défaut parabolique.

### III.4.2.2 Discrétisation du domaine d'étude en éléments finis :

L'analyse est réalisée par la méthode des éléments finis tridimensionnels. Un maillage automatique sera effectué sur la structure et le type d'élément employé pour la modélisation est tétraédrique. La figure III.12 représente le maillage de la structure.

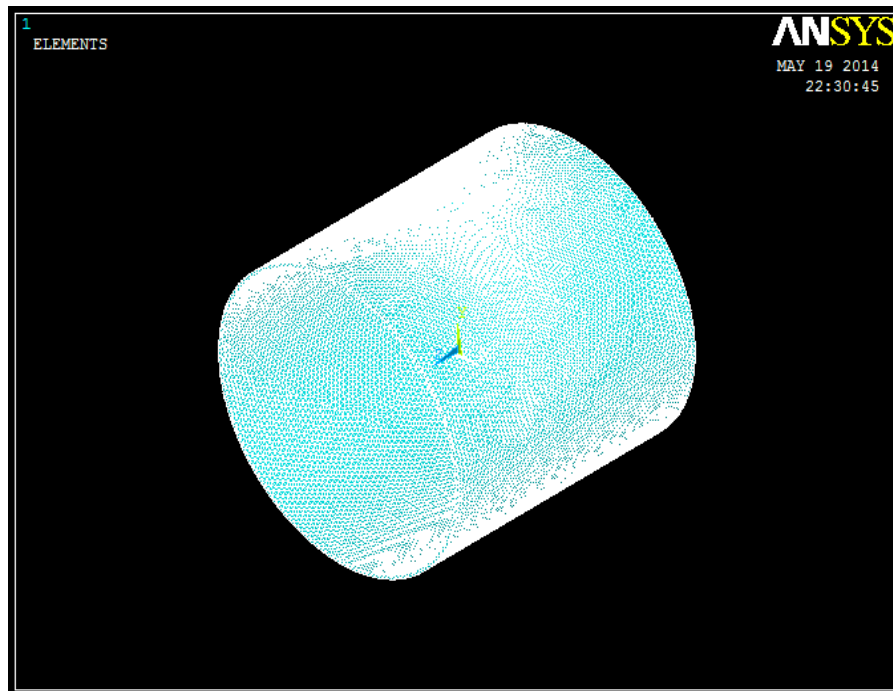


Figure III. 13 : Maillage d'un domaine cylindrique en éléments finis tétraédriques <sup>[64]</sup>.

### III.4.3 Modélisation numérique d'un tube comportant un défaut parabolique réparée par collage de composite :

#### III.4.3.1 Représentation géométrique :

On a considéré un modèle formellement identique au modèle précédent. La réparation est réalisée par un manchon composite (C.S) de largeur ( $L_c = 500$  mm), et de l'épaisseur ( $t_c = 8$  mm).

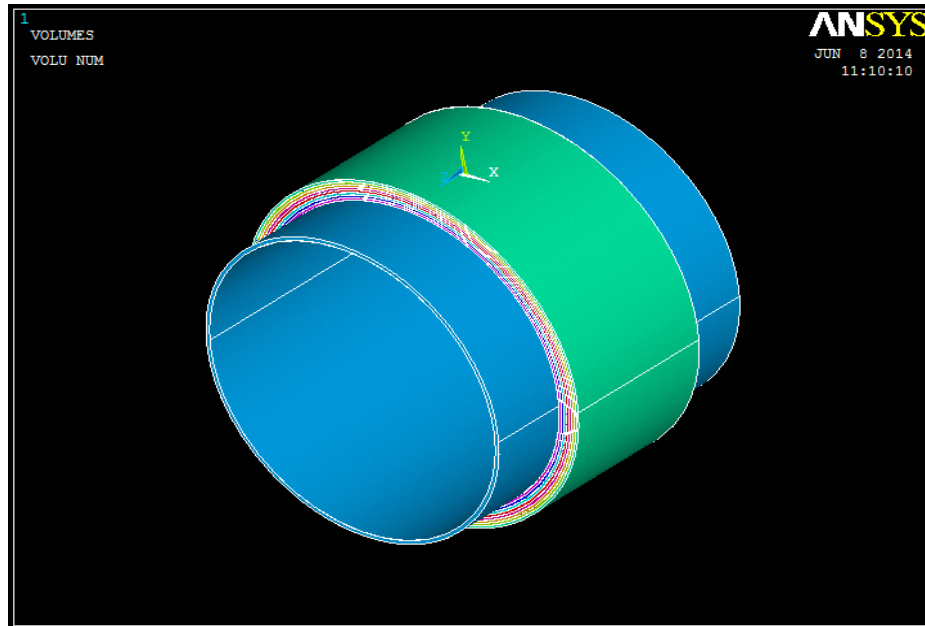


Figure III. 14 Tube réparé par un manchon composite

### III.4.3.2 Caractéristique des matériaux de réparation :

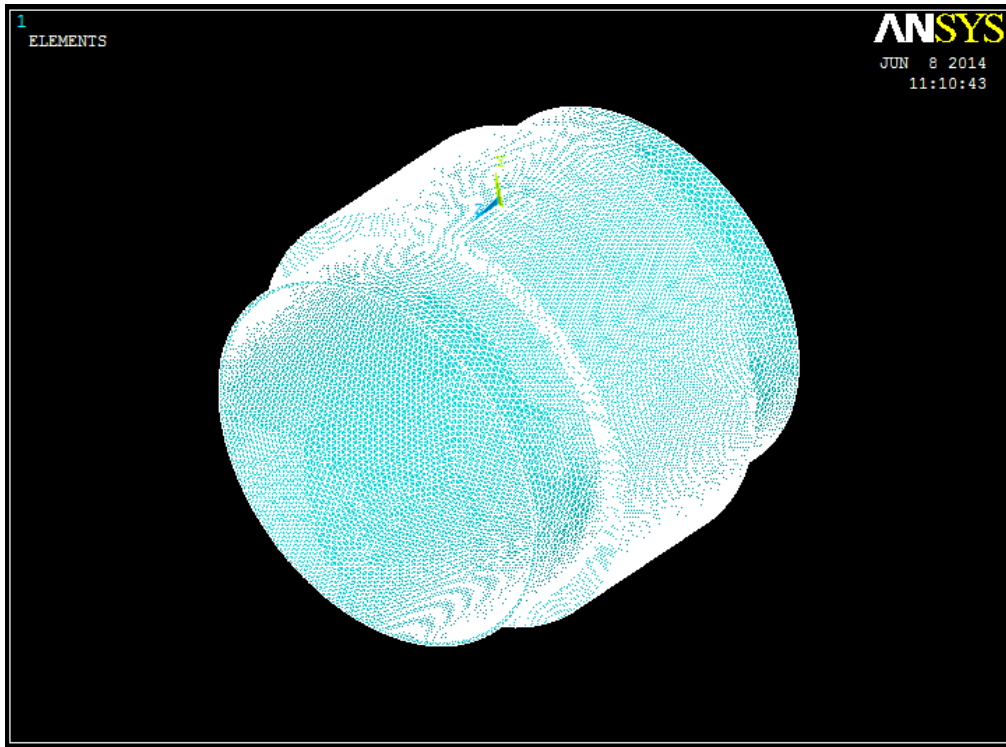
Les propriétés physiques sont dans le tableau suivant <sup>[65]</sup> :

Tableau III. 2 : caractéristique des matériaux.

	Type	$E_1$ [GPa]	$E_2$ [GPa]	$E_3$ [GPa]	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	$\nu_{23}$	$G_1$ [GPa]	$G_2$ [GPa]	$G_3$ [GPa]
Clock spring	Verre/époxyde	160	25	25	0.21	0.21	0.21	7.5	5.5	5.5
Adhésif	FM73	2.55			0.32					
Pipe	X60	210			0.3					

### III.4.3.3 Discrétisation du domaine d'étude en éléments finis :

L'analyse est réalisée par la méthode des éléments finis tridimensionnels. Un maillage automatique sera effectué sur la structure et le type d'élément employé pour la modélisation est tétraédrique. La figure III.14 représente le maillage de la structure.



**Figure III. 15** Maillage d'un tube cylindrique réparé par collage de composite en éléments finis tétraédriques.

Les résultats obtenus de la simulation ont montrés que l'état de contrainte de la structure est modifié en considérant le pipe sans défaut, avec défaut et réparée par manchon composite de type clock spring. Ces résultats seront discutés dans le chapitre suivant.

### **III.5 Conclusion :**

L'étude de simulation numérique de la structure métallique de pipelines a comportée trois parties :

- Une comparaison entre l'étude analytique et l'étude numérique.
- Une étude numérique pour une pipe GZ1 comporte un pic de corrosion.
- Une étude numérique pour une pipe GZ1 comporte un pic de corrosion renforcé par un manchon de composite.

Nous avons considéré dans un premier temps la structure de pipe GZ1 sans défaut en faisant varier l'épaisseur et le diamètre et dans un deuxième temps la structure comportant un défaut parabolique comme la perte de métal par corrosion et nous terminerons cette simulation en considérant la structure réparée par manchon composite en s'approchant du contexte industriel. Les résultats seront discutés dans le chapitre suivant

# C

## hapitre IV :

### Résultats & discussion.

#### IV Introduction :

L'étude dans le cadre de ce projet consiste à considérer le comportement mécanique de la structure métallique de pipelines GZ1 sous sollicitations par les sols aboutissant à des défaillances par pics de corrosion (pitting corrosion) et les réparations par collage de manchons à base de matériaux composites.

L'objectif de ce travail est de montrer l'efficacité de la réparation par collage par matériaux composites par une étude de modélisation numérique du comportement de la structure sans défaut, avec défaut, et avec défaut réparé par collage de composite.

La méthodologie qui a été employée est qu'à partir de l'acquisition des données sur la ligne GZ1 au cours du stage à la station de réparation des tubes exploitée par la société SONATRACH /DRC de développer les calculs numériques qui montrerons l'état de contrainte lorsque la structure ne renferme pas de défaut, lorsque elle renferme un défaut assimilé à une forme parabolique à des profondeurs différentes et la structure réparée.

La simulation numérique constitue trois étapes :

- La première étape ayant pour but de faire une comparaison entre les résultats numériques basés sur le logiciel ANSYS et les résultats obtenus analytiquement calculé dans le chapitre précédent.
- La deuxième étape ayant pour but d'étudier un tube de même dimension que le pipe GZ1 comportent un défaut parabolique avec un taux d'endommagement qui varie jusqu'à 80%.
- La troisième étape ayant pour but d'étudier le même tube avec renforcement par un manchon à base de matériau composite type clock spring.

#### IV.1 Analyse élastique des éléments de conduites sans corrosion :

A partir des équations précédentes (III.10 ; III.11 ; III.12 ; III.14) du chapitre III, nous avons tracé les courbes pour les tubes minces  $\frac{t}{D} < 10\%$ . Il est à noter que la contrainte circonférentielle prend la plus grande valeur suivie de la contrainte équivalente de Von Mises, où  $\frac{\sigma_e}{P_i}$  diminue en proportionnalité avec le rapport  $\frac{t}{D}$ .

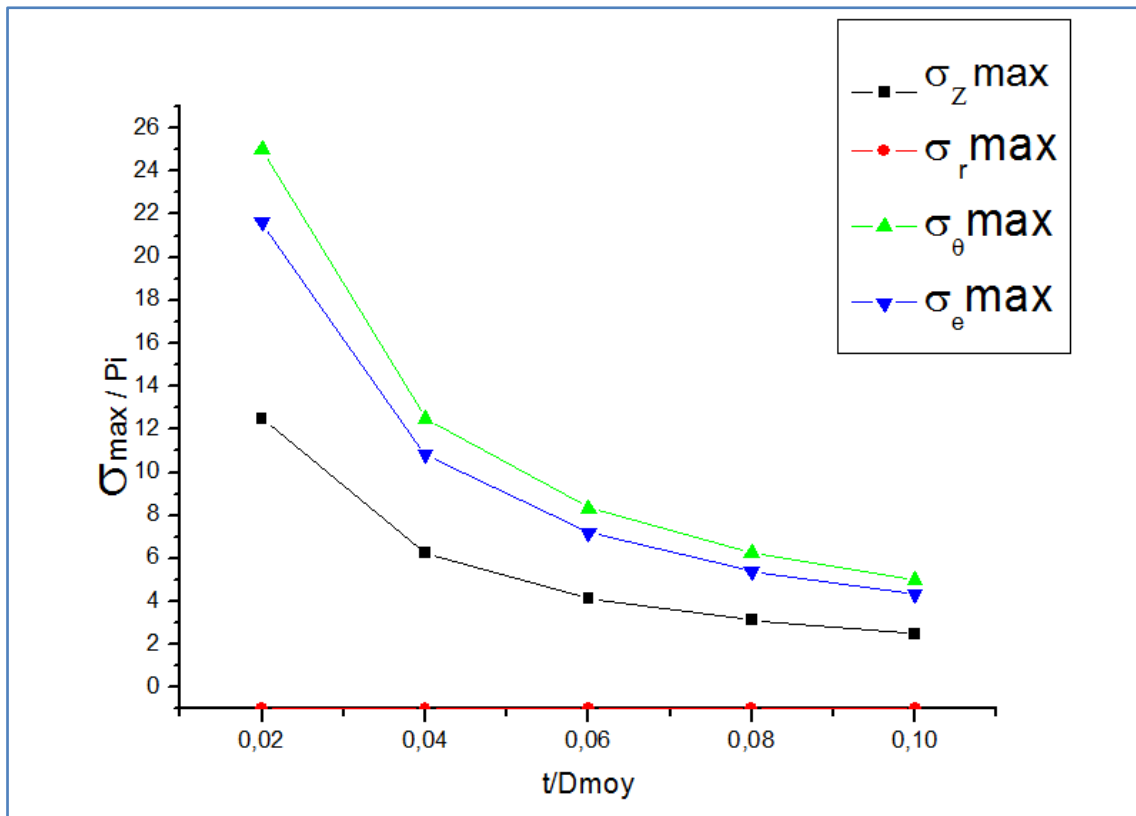


Figure IV. 1 : distribution des contraintes radiale, circonférentielle et axiale en fonction de l'épaisseur

Nous prenons un quart de coque cylindrique avec les mêmes dimensions du tableau III.1, et les mêmes pressions. Ensuite nous comparons les résultats numériques basés sur le logiciel ANSYS et les résultats d'analyses pour la contrainte équivalente de Von Mises.

##### IV.1.1 Répartition des contraintes équivalentes de VON MISES :

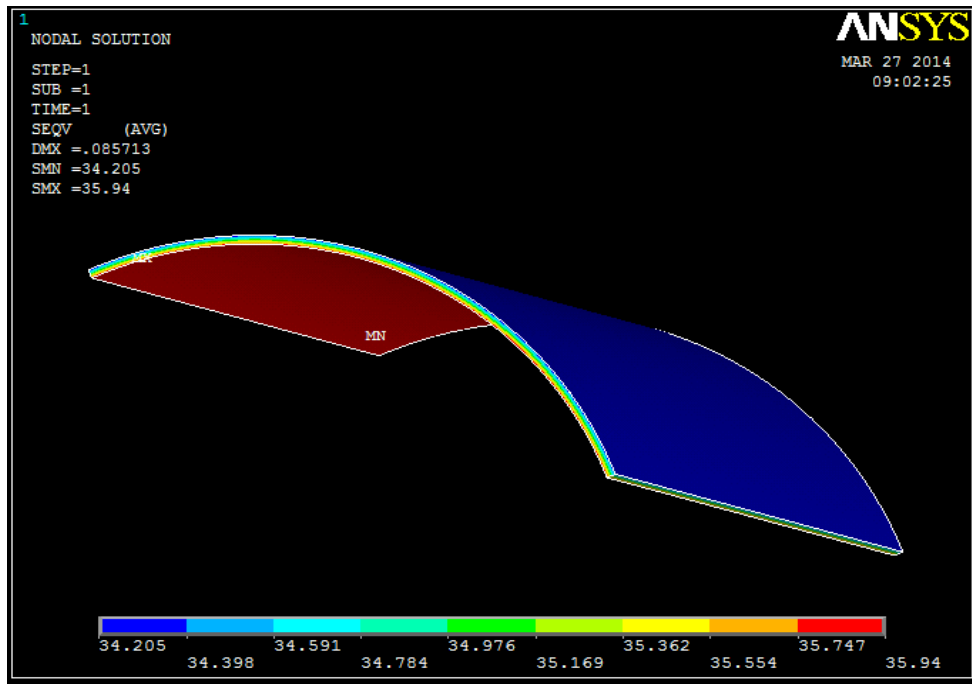


Figure IV. 2 : tube sous pression interne (acier grade API 5L X60,  $P_i=1$  MPa,  $D_{ext}=1016$ mm,  $t=12.7$ mm).

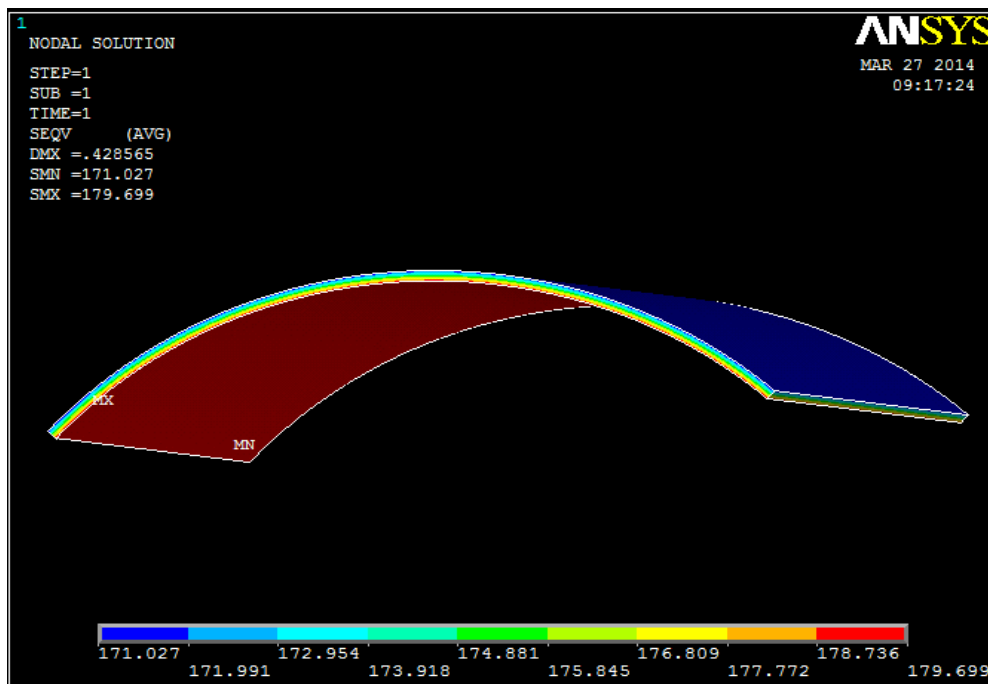


Figure IV. 3 : tube sous pression interne (acier grade API 5L X60,  $P_i=5$  MPa,  $D_{ext}=1016$ mm,  $t=12.7$ mm).

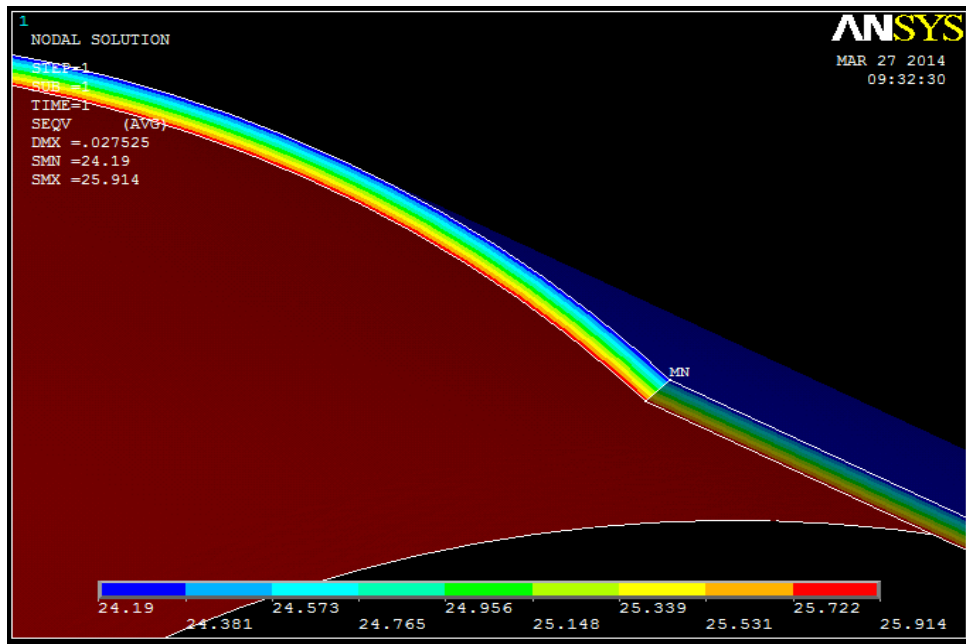


Figure IV. 4: tube sous pression interne (acier grade API 5L X60,  $P_i=1$  MPa,  $D_{ext}=459.4$ mm,  $t=8$ mm).

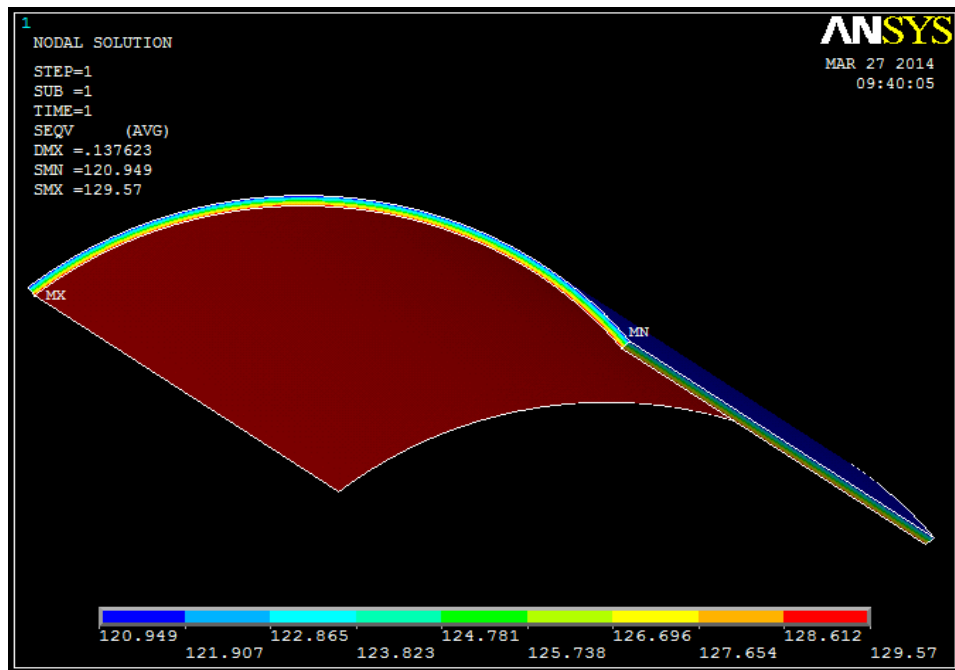


Figure IV. 5 : tube sous pression interne (acier grade API 5L X60,  $P_i=5$  MPa,  $D_{ext}=459.4$ mm,  $t=8$ mm).

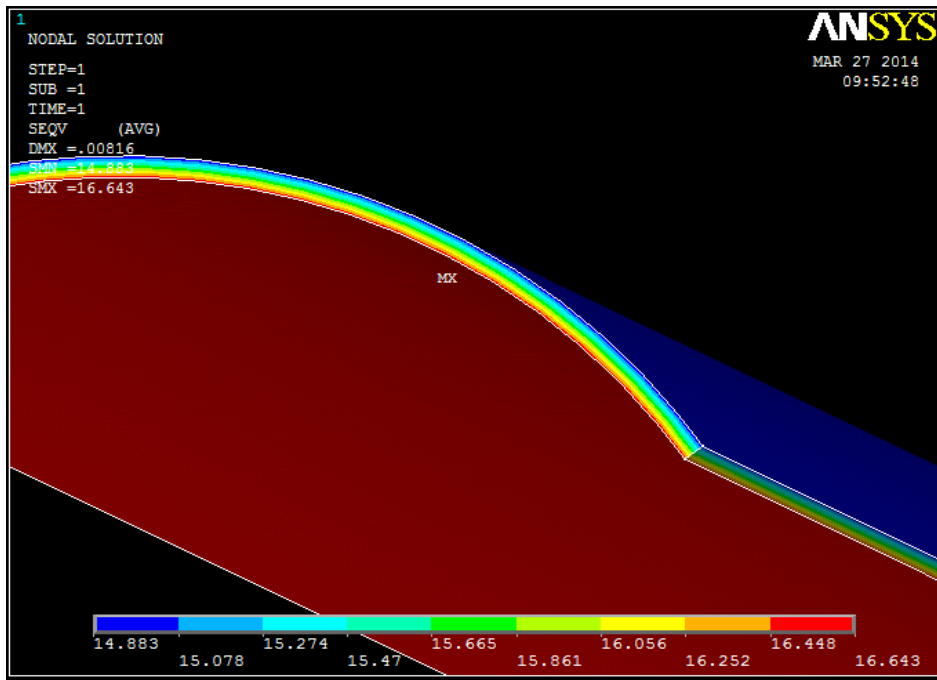


Figure IV. 6 : tube sous pression interne (acier grade API 5L X60,  $P_i=1$  MPa,  $D_{ext}=219$ mm,  $t=6$ mm).

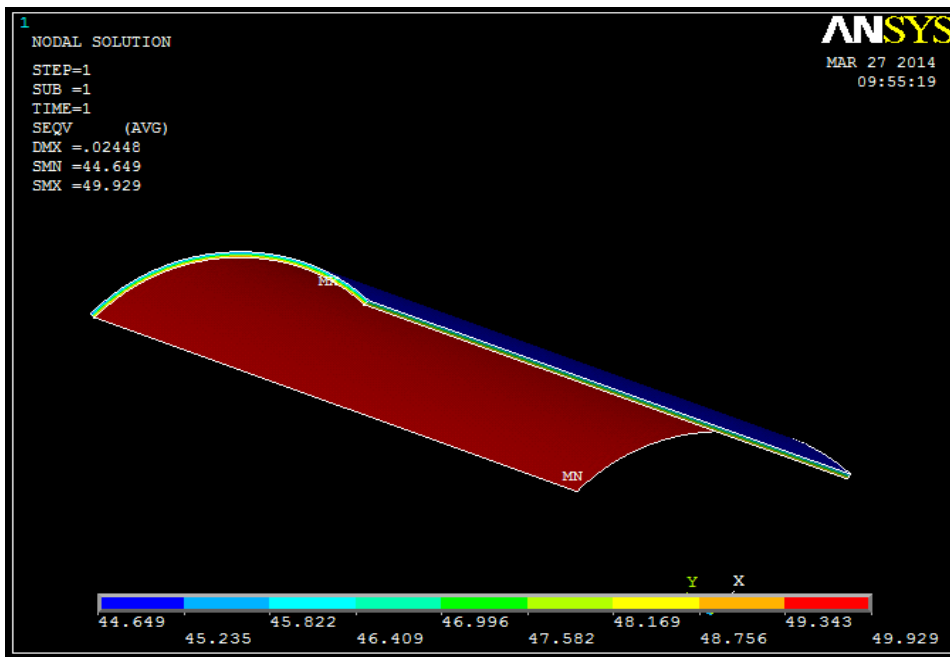


Figure IV. 7: tube sous pression interne (acier grade API 5L X60,  $P_i=3$  MPa,  $D_{ext}=219$ mm,  $t=6$ mm).

#### IV.1.2 Validation des résultats :

Dans le tableau suivant nous comparons les résultats numériques basés sur le logiciel ANSYS et les résultats d'analyses pour la contrainte de Von Mises. On remarque que les résultats obtenue par la simulation elle est aussi proche que les résultats d'analyses.

**Tableau IV. 1 : comparaison entre les résultats analytique et résultats numériques de la contrainte équivalente de Von Mises.**

<b>T</b>	<b>DEXT</b>	<b>DINT</b>	<b>Pi</b>	<b><math>\sigma_e</math> (analytique)</b>	<b><math>\sigma_e</math> (numérique)</b>	<b>Erreur(%)</b>
<b>12,7</b>	1016	990,6	1	35,0740029	35.94	2,46905693
<b>12,7</b>	1016	990,6	3	105,222087	107.82	2,46898068
<b>12,7</b>	1016	990,6	5	175,370145	179.699	2,46841046
<b>12,7</b>	1016	990,6	7	245,518203	251.579	2,46857338
<b>8</b>	459,4	443,4	1	25,2987675	25.914	2,43186764
<b>8</b>	459,4	443,4	3	75,8963026	77.742	2,43186733
<b>8</b>	459,4	443,4	5	126,493837	129.57	2,43186756
<b>8</b>	459,4	443,4	7	177,091373	181.397	2,4313028
<b>6</b>	219	207	1	16,2379779	16.643	2,49428934
<b>6</b>	219	207	3	48,7139335	49.643	1,90718836
<b>6</b>	219	207	5	81,1898892	83.216	2,49552114
<b>6</b>	219	207	7	113,665845	116.502	2,49516915

## IV.2 Répartition des contraintes équivalentes de Coque cylindrique avec défaut parabolique :

La figure IV.8 représente un tube cylindrique sous pression interne à un défaut parabolique qui nous permet de constater l'effet de la pression interne sur la contrainte équivalente.

Avec une pression interne  $P_i = 5$  MPa, et un taux d'endommagement de 50 %.

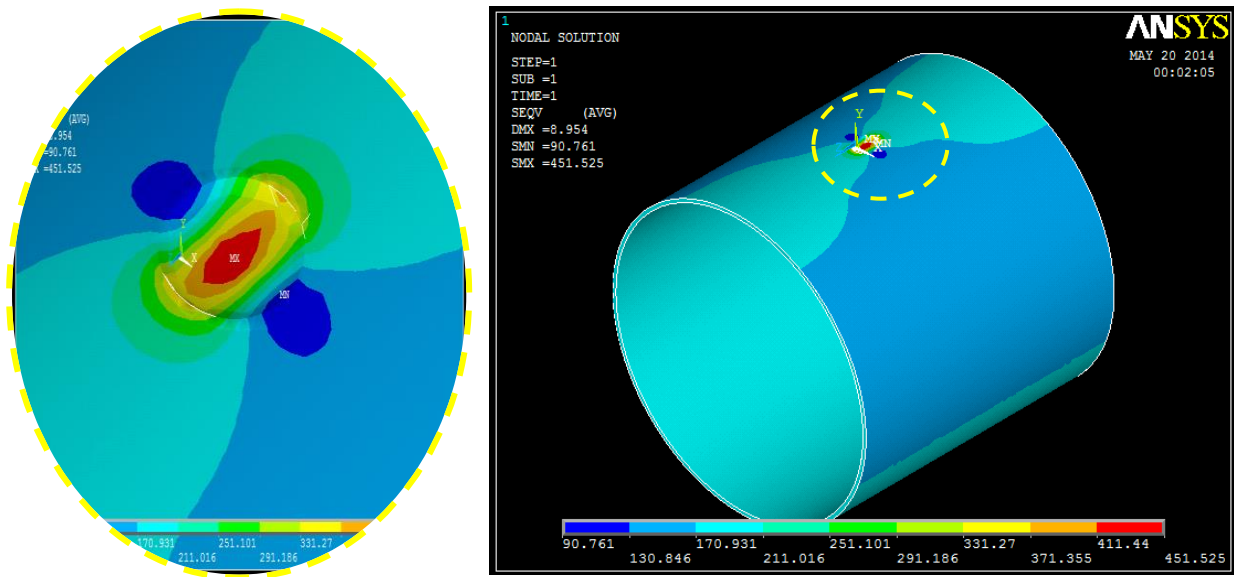


Figure IV. 8 : Tube sous pression interne comportent un défaut parabolique  $p_i = 5$  MPa

Les contraintes équivalentes au sens de Von Mises sont réparties non-uniformément sur la génératrice du tube corrodé paraboliquement, et le défaut comporte la contrainte maximale qui va provoquer une défaillance après un temps (figure IV.8). Ce qui nécessite une réparation.

La figure IV.9 représente la courbe des contraintes maximal de Von Mises en fonction de perde d'épaisseur avec une pression interne  $P_i = 5$  MPa on remarque que la contrainte augmente en proportionnalité avec perte de métal.

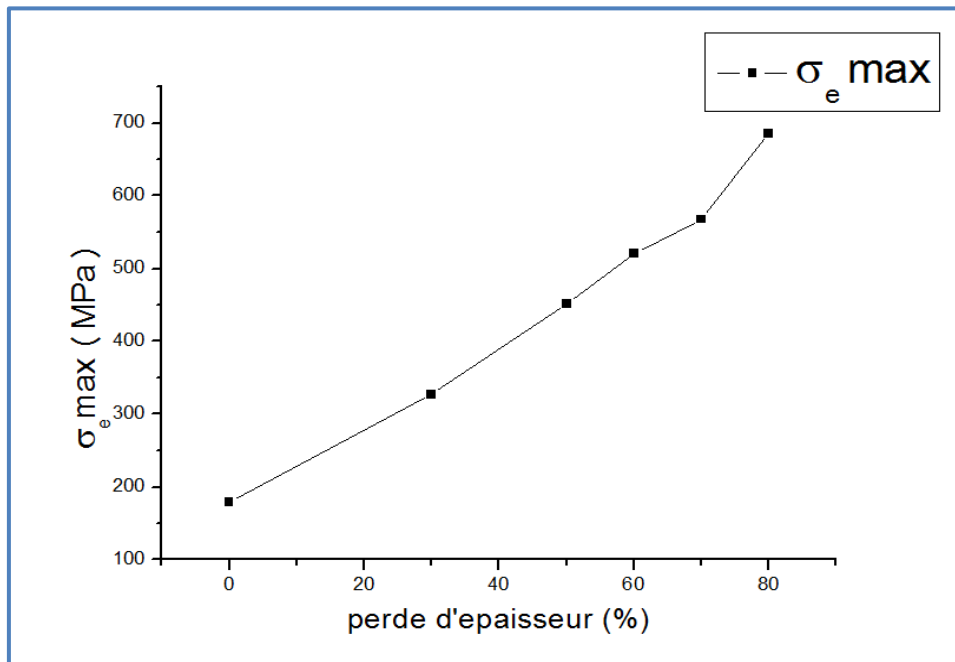


Figure IV. 9 : contrainte maximal de Von Mises en fonction de perte d'épaisseur avec une pression interne  $P_i=5$  MPa.

### IV.3 Répartition des contraintes équivalentes de Coque cylindrique avec défaut parabolique réparée par collage de composite :

La figure IV.10 représente un tube cylindrique sous pression interne à un défaut parabolique remplie et renforcée par 8 plis de composite qui nous permet de constater l'effet de la pression interne sur la contrainte équivalente.

Avec une pression interne  $P_i= 5$  MPa, et un taux d'endommagement de 50 %.

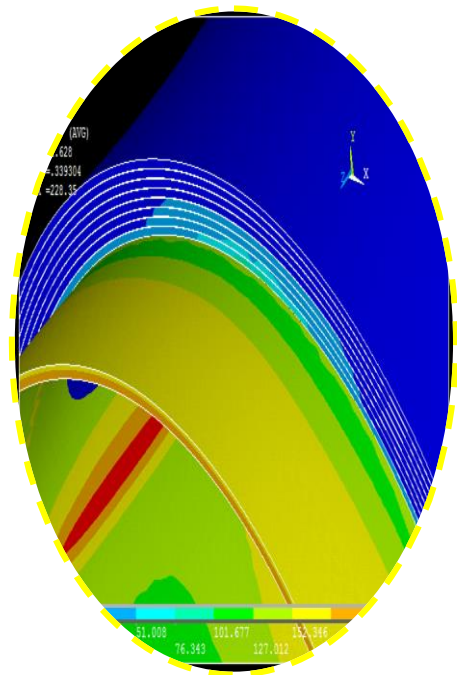
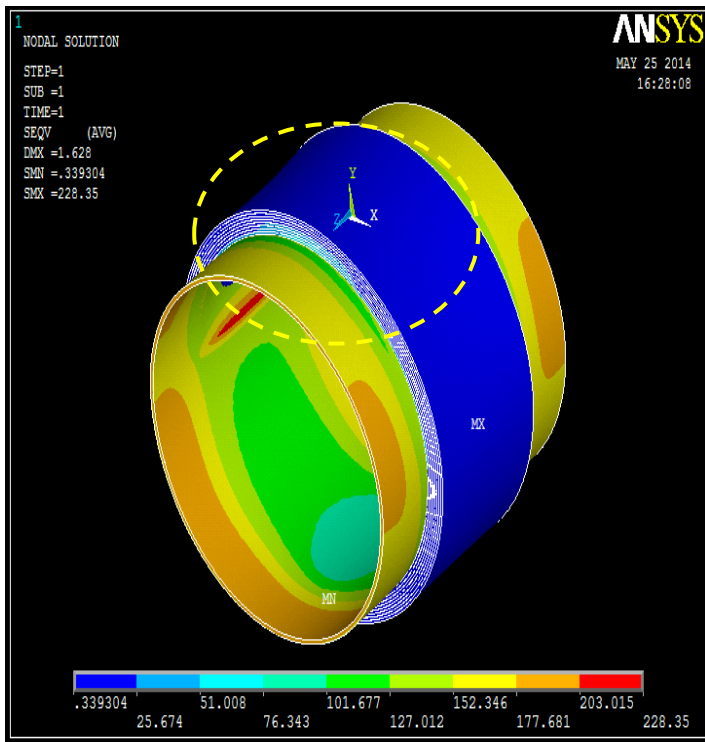


Figure IV. 10: Tube sous pression comportent un défaut parabolique réparé par collage de 8 couches de composite après le remplissage de défaut par le mastic.

La figure suivante représente un tube sous pression comportent un défaut parabolique réparé par collage de 8 couches de composite sans remplissage de défaut.

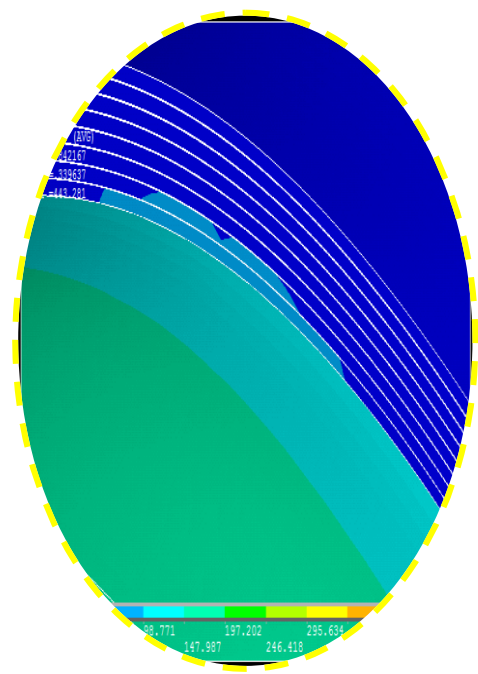
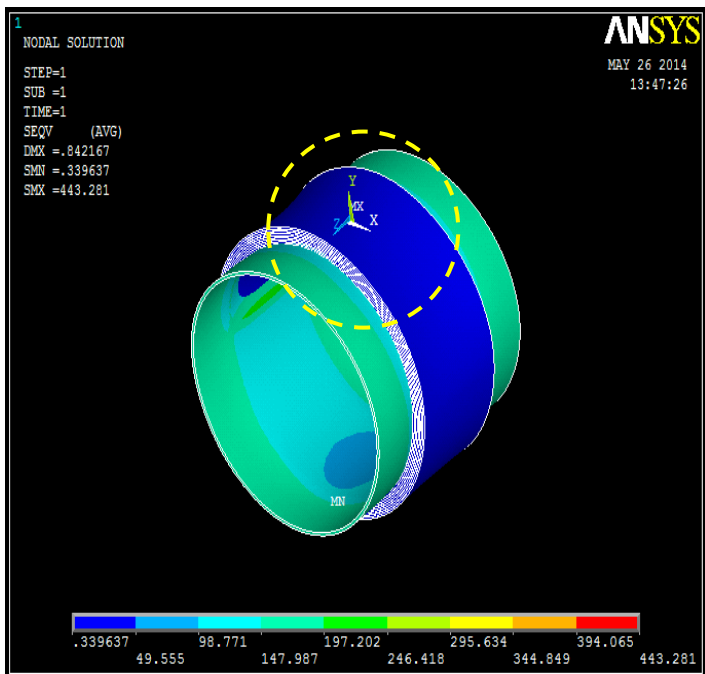


Figure IV. 11 Tube sous pression comportent un défaut parabolique réparé par collage de 8 couches de composite sans remplissage de défaut.

Les résultats ont montrés que la contrainte maximale de Von Mises est diminuée presque de trois fois dans un tube corrodé réparé et rempli (figures IV.9 et IV.10) et représente presque la contrainte maximale d'un tube sans défaut ce qui montre la nécessité et l'efficacité du remplissage de défaut dans le renforcement de la structure par manchon à base de matériau composite. Les figures ont montrés également que l'état de concentration des contraintes sont réparti d'une manière homogène sur la surface du défaut lorsque il est rempli.

Ce qui montre la nécessité du remplissage de défaut avant réparation par collage composite afin d'obtenir une meilleure réparation.

Ces résultats ont été obtenus en considérant la réparation par collage par manchon composite du type clock spring. Nous n'avons pas considéré les autres types de collage où les résultats peuvent être différents.

#### **IV.4 Conclusion :**

Les structures métalliques comme les pipelines de transport des hydrocarbures sont sollicités par des défaillances par corrosion localisée aboutissant à des pics de corrosion. L'étude de simulation a montré que la structure renfermant des défauts est caractérisée par une concentration de contraintes à l'endroit du défaut qui peuvent engendrer une propagation de cette anomalie et la ruine de la structure. Ce qui nécessite des réparations sur la structure.

Les résultats du renforcement par manchon à base de matériau composite ont montrés que la contrainte atteint presque la contrainte d'un tube sans défaut et les résultats de la réparation sont meilleures lorsque le défaut est rempli avant collage.

# C onclusion & perspectives :

---

L'étude dans le cadre de ce projet a été de considérer le comportement mécanique de la structure métallique de pipelines (cas de la ligne GZ1) sous sollicitations d'interaction par les sols aboutissant à des défaillances par pics de corrosion (pitting corrosion) et les réparations par collage de manchons à base de matériaux composites.

La méthodologie qui a été employée est qu'à partir de l'acquisition des données sur la ligne GZ1 au cours du stage à la station de réparation des tubes exploitée par la société SONATRACH /DRC de développer les calculs numériques qui montrent l'état de contrainte lorsque la structure ne renferme pas de défaut, lorsque elle renferme un défaut assimilé à une forme parabolique à des profondeurs différentes et la structure réparée par collage de composite.

Les résultats ont montrés que la structure renfermant des défauts est une structure qui est exposée à des risques de détériorations. Ce qui montre la nécessité de la réparation. Selon ces résultats, la contrainte maximale de Von Mises est diminuée presque de trois fois dans un tube corrodé réparé et rempli et représente presque la contrainte maximale d'un tube sans défaut ce qui montre la nécessité et l'efficacité du remplissage de défaut dans le renforcement de la structure par manchon à base de matériau composite. L'état de concentration des contraintes est répartie d'une manière homogène sur la surface du défaut lorsqu'il est rempli. Ce qui montre la nécessité du remplissage de défaut avant réparation par collage composite afin d'obtenir une meilleure réparation.

Ces résultats ont été obtenus en considérant la réparation par collage par manchon composite du type clock spring. Nous n'avons pas considéré les autres types de collage où les résultats peuvent être différents.

La réparation par collage de composite a été choisie par la STT pour la réparation des structures métalliques (pipelines, gazoducs..). Bien que cette technique suscite actuellement un vif intérêt en raison de l'allègement des structures qui lui sont associés, une attention particulière doit être portée à la durabilité des assemblages collés en conditions de service. La présence d'interfaces à diverses échelles, met en jeu des phénomènes spécifiques, particulièrement sensibles à l'environnement et aux effets de synergie. Il a été mis en évidence l'intérêt de procédés de préparation et de mise en œuvre spécifiques pour cette application, ainsi que des caractérisations physiques permettant d'évaluer les

propriétés de la colle. Ces études ont permis de garantir les performances et la durabilité des assemblages.

L'effet de divers types de sollicitations (notamment les contraintes mécaniques et les sollicitations environnementales) modifie non seulement le comportement de l'adhésif mais agit également sur les interactions interfaciales et les forces d'adhésion. Ces sollicitations sont des facteurs de la diminution de la résistance mécanique des assemblages, la perte de la fonction d'adhérence et la diminution de la durée de vie des assemblages collés.

Enfin, d'après nos résultats de simulation, nous pouvons conclure que la réparation par collage de composite est très efficace et prometteuse pour la réparation des structures métalliques.

En perspectives, il serait souhaitable d'appliquer cette méthode de réparation en recherchant les matériaux composites adéquats en minimisant le nombre de spires de réparation où l'assemblage collé serait plus résistant, les sollicitations environnementales seraient faibles et le temps de réparation serait réduit.

## V Bibliographie :

- [1] BENDJEBBOUR.A, *corrosion localisée des aciers API 5L\_X52 de la ligne ASR /MP sollicité n sol algérien, 2011., mémoire de magister, université de Tlemcen*
- [2] CHEMANI.Y, *Étude Sur les Procédés de Traitement des Tubes de Pipelines Corrodés Acier API 5L X60, 2013. Mémoire master, université de Tlemcen.*
- [3] DJEDID.I, *Étude sur les défaillances des aciers API- 5LX60 pour pipeline Cas de la ligne GZ1, 2013. Mémoire master, université de Tlemcen.*
- [4] Marie-Pierre FOULC, José ALCORTA *DURABILITE DES ASSEMBLAGES PAR COLLES : ETAT DE L'ART. (Module Ma5),2008*
- [5] PRASSE. T. , MICHEL. F , MOOK. G. , Schulte. K., BAUHOFER. W. : *A comparative investigation of electrical resistance acoustic emission during cyclic loading of CFRP laminates. Composites Science and Technology, 2000.*
- [6] SOUTIS. C. SMITH. F. C, MATTHEWEUS. K. L.: *Predicting the compressive engineering performance of carbon fiber reinforced plastics composites. Composites Part A: Applied science and manufacturing (Incorporating composites and composites Manufacturing), 1999, Vol 31, pp 531-536.*
- [8] Cercone L, Lockwood JD. *Review of FRP composite materials for pipeline repair. Pipelines; 2005. p. 1001–13.*
- [11] Alexander C. *Development of a composite repair system for reinforcing offshore risers. PhD thesis. Texas: Texas A&M University; 2007.*
- [12] Seica VM, Packer AJ. *FRP materials for the rehabilitation of tubular steel structures, for underwater applications. Comp Struct 2007.*
- [13] Newberry AL, Bakhshaliyev R, Garnish M. *World's largest high pressure,large diameter GRP pipe project. Reinforced plastics; 2008 [September 2008].*
- [14] Hille GM, Romer AE. *Fiberglass Pipe Design for Water Mains. In: Proceedings of Pipeline Engineering and Construction, What's on the Horizon?. August1-4, San Diego, California. United States: ASCE;2004. p. 1–11.*
- [15] Gibson AG, Linden JM, Elder D, Leong KH. *Non-metallic pipe systems for use in oil and gas. Plast Rubber Compos 2011.*
- [16] Picard D, Hudson W, Bouquier L, Dupupet G, Zivanovic I. *Composite carbon thermoplastic tubes for deepwater applications. In: Offshore technology conference, Houston, Texas; 30 April–3 May 2007.*
- [17] Lukács J, Nagy G, Török I, Égert J, Pere B. *Experimental and numerical*

- investigations of external reinforced damaged pipelines. Proc Eng2010.*
- [18] Alexander C, Francini B. *State of the art assessment of composite systems used to repair transmission pipelines. In: Proceedings of 6th international pipeline conference. Calgary, Alberta: ASME; 25–29 September 2006.*
- [19] Palmer-Jones R, Paisley D. *Repairing internal corrosion defects in pipelines – a case study. In: 4th International pipeline rehabilitation and maintenance conference, Prague; September 2000.*
- [20] Ehsani M. *Latest advances in pipeline renovation with fiber reinforced polymer (FRP). Tucson, AZ, USA: ASCE; 12–15 September 2010. p. 200–208.*
- [21] Ehsani M. *Superlaminates: the next generation of carbon FRP products for repair of pipelines. In: Climbing new peaks to infrastructure reliability-renew, rehab, and reinvest, keystone, Colorado, USA; 28 August–1 September 2010.*
- [22] Ehsani M. *FRP super laminates present unparalleled solutions to old problems. Reinforced Plastics. Kidlington, Oxford: Elsevier Ltd., 2009.*
- [23] Worth F. *Analysis of Aquawrap for use in repairing damaged pipeline: environmental exposure conditions, property testing procedures, and field testing evaluations; 2005 [September 28]. <<http://pipingrepairtechnologies.com/wp-content/uploads/2009/04/analysis-of-aquawrap-for-use-in-repairing-damaged-pipelines.pdf>> [accessed 14.09.12].*
- [24] Alexander CR, Wilson FD. *Recent test results and field experience with Armor Plate pipe wrap repairing corroded and mechanically-damaged pipes. In: Pigging conference, Houston; February 2000.*
- [29] Peck JA, Li G, Pang S-S, Stubblefield MA. *Light intensity effect on UV cured FRP coupled composite pipe joints. Compos Struct 2004.*
- [30] Peck JA, Jones RA, Pang S-S, Li G, Smith BH. *UV-cured FRP joint thickness effect on coupled composite pipes. Compos Struct 2007.*
- [32] [45] Ochola RO, Marcus K, Nurick GN, Franz T. *Mechanical behaviour of glass and carbon fibre reinforced composites at varying strain rates. Compos Struct 2004.*
- [33] Wonderly C, Grenestedt J, Fernlund G, Cêpus E. *Comparison of mechanical properties of glass fibre/vinyl ester and carbon fibre/vinyl ester composites. Composites: Part B 2005.*
- [34] Giancaspro JW, Papakonstantinou CG, Balaguru PN. *Flexural response of inorganic hybrid composites with E-glass and carbon fibres. J Eng Mater Technol 2010.*
- [35] Lassila LVJ, Nohrström T, Vallittu PK. *The influence of short-term water storage on the flexural properties of unidirectional glass fibre-reinforced composites. Biomaterials 2002.*

- [36] Ray BC. Temperature effect during humid ageing on interfaces of glass and carbon fibres reinforced epoxy composites. *J Colloid Interface Sci*2006.
- [37] Tanaka K, Minoshima K, Grela W, Komai K. Characterization of the aramid/ epoxy interfacial properties by means of pull-out test and influence of water absorption. *Compos Sci Technol* 2002.
- [38] Sala G. Composite degradation due to fluid absorption. *Compos B Eng*2000.
- [39] Hausrath RL, Longobardo AV. High-strength glass fibers and markets. In:Wallenberger FT, Bingham PA, editors. *Fiberglass and glass technology:energy-friendly compositions and applications*. New York: Springer; 2011.
- [40] Joshi SV, Drzal LT, Mohanty AK, Arora S. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? *Compos A Appl Sci Manuf*2004.
- [41] Yu HN, Kim SS, Hwang IU, Lee DG. Application of natural fiber reinforced composites to trenchless rehabilitation of underground pipes. *Compos Struct*2008.
- [42] Tavakkolizadeh M, Saadatmanesh H. Galvanic corrosion of carbon and steel in aggressive environments. *J Comp Constr* 2001.
- [43] Béland S. *High performance thermoplastic resins and their composites*. New Jersey: Noyes Publications; 1990.
- [44] Strong AB. *Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications Michigan*. Society of Manufacturing Engineers; 2008.
- [45] Fitzer E, Weiss R. Effect of surface treatment and sizing of C-fibres on the mechanical properties of CFR thermosetting and thermoplastic polymers.*Carbon* 1987.
- [46] McCullouch BG. *Repair/rehabilitation of deteriorated drainage pipe*. West Lafayette: Indiana Department of Transportation and Purdue University;1991.
- [47] Lopez-Anido R, Michael AP, Sandford TC, Goodell B. Repair of wood piles using prefabricated fiber-reinforced polymer composite shells. *J Perform Construct Facilit* 2005.
- [48] Hamerton I. *Recent developments in epoxy resins*. Shawbury: Rapra Technology Limited; 1996.
- [49] Duell JM, Wilson JM, Kessler MR. Analysis of a carbon composite overwrap pipeline repair system. *Int J Press Vessels Pip* 2008.
- [50] Gibson AG. *The cost effective use of fibre reinforced composites offshore*. Norwich: University of Newcastle Upon Tyne for the Health and Safety Executive; 2003.

- [51] *Toutanji H, Dempsey S. Stress modelling of pipelines strengthened with advanced composites materials. Thin-Walled Struct 2001.*
- [52] *Jones Andrew P, Repairing Internal Corrosion Defects in Pipelines, UK 4 the International Pipeline Rehabilitation and Maintenance Conference, Prague, September 2000.*
- [53] *J. Vincent-Genod. (1989). Le transport des hydrocarbures liquides et gazeux par canalisation. Institut Français du pétrole. Société des éditions technique Paris.*
- [54] *Forty-First edition API 5L, Specification for line pipe, April 1995.*
- [55] *Belaid Salim, analyse de la fiabilité de l'acier API 5L X60 pour pipelines corrodés modèle basé sur le critère B31G, mémoire du magister (science des matériaux), Université Abou Beker Belkaid Tlemcen, 03 mars 2008.*
- [56] *S. Ben soltane, Etude électrochimique de la corrosion des aciers API 5L X60 pour gazoduc en milieu environnant de sol et protection par inhibiteurs à base de Polyphosphates, mémoire de magister, université USTO MB Oran, Avril 2009.*
- [57] *Scott Rukke, Pipeline Repair Using Clock Spring, Composite Sleeve Reinforcement, Washington Utilities, Transportation Commission.*
- [58] *Clock spring, installation guide and checklist; clock Spring Company, L.P. 14107 Inter drive west Houston, Texas 77032.*
- [59] *A. Benlekhal, Rapporte sur les procédures de réparation en charge de canalisation de transport d'hydrocarbures par demi-coquilles soudées, SONATRACH-DRC, Oran-Arzew, 15 Août 2010.*
- [60] *J. PERCHAT. « Béton Armé, Règles BAEL, Pièces soumises à des sollicitations normales », Techniques de l'Ingénieur, C2306-C2320, 1991.*
- [61] *Perfectionnement sur les techniques de réhabilitation et de renforcement des structure, rencontres scientifique, SOCOTEC-CTC année 2002.*
- [62] *Règlement eurocode2. Calcul des structures en béton AFNOR1992.*
- [63] *Technical recomendation construction, guide for the design and construction of externally-bonded, FRP système for strenghtening existing structure, CNR année 2004.*

[64] *Article Ozkul Turk.*

[65] *Alexder C. Francini R, state of the art assessmnt of composite systems used to repair transmission pipelines, The 16 th international pipeline conference, Calgary, Canada, September 25-29,2006.*

## **Webgraphie :**

[7] [http://plidco.com/public/products/split\\_sleeve.php](http://plidco.com/public/products/split_sleeve.php)

[9] <http://www.ppsa-online.com/papers/2004-London-8-Patrick.pd>

[10] <http://www.clockspring.com/wp-content/uploads/2011/12/brochure1.pdf>

[25] <http://www.integpipelineservices.com/skins/integ/homepage.aspx?elid=298&SkipFlip=298>

[26] <http://www.tdwilliamson.com/en/Products/RehabilitationProducts/CompositeWrap/Documents/RESQ.pdf>

[27] <http://www.csiro.au/Organisation-Structure/Divisions/Earth-Science-Resource-Engineering/PIPEASSURE.aspx>

[28] <http://www.offshore-mag.com/articles/print/volume-70/issue-10/flowlines-pipelines/composites-offer-effective-offshore-pipe-repair-alternative.html>

[31] <http://www.wrapmaster.us/weldwrap%20brochure%2004.12.pdf>