

People's Democratic Republic of Algeria  
Ministry of Higher Education and Scientific Research  
Mohamed Boudiaf University of M'sila  
Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة المسيلة  
كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

### MASTER

En Génie Mécanique

Option : Génie des Matériaux

Présenté par :

SAHRAOUI Aboubakr

### Thème

---

## ETUDE DE LA CORROSION DES PIPELINES PETROLIERS

---

Devant le jury composé de :

FARSI Chouki

MCA

Président

SAIB Cherif

MCA

Encadreur

MOUSSAOUI Nafissa

MAA

Examinatrice

*Année Universitaire : 2020 / 2021*

N° d'ordre : GM/...../2021

# Remerciements

**« Je remercie en premier Dieu pour tout »**

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon Directeur de mémoire monsieur

SAIB Cherif. Je la remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé

Je remercie mes très chers parents et mes frères, qui ont toujours été là pour moi,

« Vous avez tout sacrifié pour vos enfants n'épargnant ni santé ni efforts ». Vous

m'avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Je suis redevable

d'une éducation dont je suis fier

**« À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon**

**respect et ma gratitude. »**

*Sahraoui aboubakar*

# SOMMAIRE

## Introduction Générale

### CHAPITRE I : Les Pipelines Oléoducs et Gazoducs

I.1. Les pipelines	01
I.2. Les principaux systèmes de transport par canalisation	03
I.3. Processus de fabrication	03
I.3.1. Les tubes soudés sous la forme en spirale	03
a) Zone fabrication	04
b) Basculeur de bobines	04
c) Machine de préparation bobine	04
d) Machine à souder	04
e) formage de la bande	05
f) Deux machines nettoyage tubes	06
g) Machine de reprise des soudures	06
h) Zone de réparation	06
i) Tronçonneuse des tubes	06
j) Banc d'essais hydrostatique	07
k) Deux chanfreineuses des tubes	07
l) Machines de contrôle radiographique et radioscopique	08
m) Zone de contrôle final	08
I.3.2 Les tubes soudés sous forme longitudinale	09
a) Croquage et formage	09
b) Le soudage du tube	09
c) Expansion et calibrage	09
I.3.3 Les tubes formés sans soudure	09
I.4. Revêtement des tubes	10
I.4.1. Revêtement extérieur	10
I.4.2. Revêtement intérieur	11
I.5. Contrôle de qualité	11
a) Contrôles Non Destructifs	11
b) Contrôles Destructifs (CD)	11
I.6. Prélèvement des échantillons	12
I.7. Essais de conformement des pipelines	12
a- Analyses chimiques	12
b- Essai de traction	12
c- Essai de dureté	12
d- Essai de résilience	12
I.8. Les aciers et les caractéristiques mécaniques	12
I.8.1. Classification des aciers	13
a- Aciers non alliés	13
b- Aciers alliés	13
c- Aciers à outils	13

d- Aciers inoxydables	14
I.8.2. Influence des éléments d'addition	14
I.8.3. Caractéristiques des aciers	15
I.9. Les éprouvettes	17
I.9.1 Diagramme de traction	18
a- Le module d'Young E (MPa)	18
b- La limite d'élasticité Re (MPa)	19
c- L'allongement à rupture A%	19
d- Striction à la rupture	19
e- Coefficient de Poisson	19
I.9.2 Essai de dureté	19
I.9.2.1.Principe de l'essai	20
a- Dureté BRINELL (HB)	20
b- Dureté ROCKWELL (HR)	20
c- Dureté VICKERS (symbole HV)	21

## **CHAPITRE II: La Corrosion et la Lutte Contre la Corrosion**

II.1. La corrosion	23
II.1.2. Corrosion dans les pipelines	23
II.1.3.Description géométrique de défauts de corrosion:	25
II.1.4. Types de corrosion	26
II.1.5. Mécanisme de la corrosion	28
II.1.6.Fissuration des pipelines	29
II.1.7.Traitements de réparation	29
II.1.8.Traitements mécaniques de surface	30
II.1.9.Traitement chimique de surface	31
II.2. La lutte cotre la corrosion	32
II.3. Les Inhibiteurs	33
II.3.1.Généralités sur l'utilisation des inhibiteurs de corrosion	34
II.3.2. Les classes d'inhibiteurs	34
II.3.3.Nature des molécules de l'inhibiteur	34
II.4. La préparation des métaux	40

## **CHAPITRE III: Partie Expérimentale**

III.1.But du travail	48
III.2. Composition chimique de l'acier XC52	49
III.3. Nuance et provenance de l'acier X52	50
III.4. Microstructure de l'acier X52	50
III.5. Préparation des milieux corrosifs	53
III.6. Préparation des éprouvettes	54
III.7. Essai de traction	56
III.8. Conditions expérimentales / Bancs d'essais :	57
III.9. Essai de dureté	58

## **CHAPITRE III: Résultats Expérimentaux des Essais**

III.1. Teste perde de masse	60
III.2. Résultats expérimentaux de l'essai de la dureté	61
III.3. Les étapes suivantes sont nécessaires pour la réalisation de l'essai	61
III.4. Les résultats des essais traction, traitement chimique et la dureté	69
<b>Conclusion Générale</b>	

## Liste des Figures

### CHAPITRE I : Les Pipelines Oléoducs et Gazoducs

<b>Figure I .01</b> : Les tubes soudés sous la forme en spirale.	03
<b>Figure I .02</b> : La Machine à souder	04
<b>Figure I. 03</b> : Préparation bobine.	05
<b>Figure I. 04</b> : Réparation des défauts manuellement	06
<b>Figure I. 05</b> : La machine d'essais hydrostatique.	07
<b>Figure I. 06</b> : Machine de contrôle ultrason automatique.	07
<b>Figure I. 07</b> : La carte du tube.	08
<b>Figure I. 08</b> : a) : Croquage b): Formage sous forme "U" c): Formage sous forme "O"	09
<b>Figure I. 09</b> : Fabrication de pipeline sans soudure	10
<b>Figure I. 10</b> : Revêtement extérieur	10
<b>Figure I. 11</b> : Tube revêtu	11
<b>Figure I. 12</b> : Dimension d'éprouvette de traction	17
<b>Figure I. 13</b> : diagramme de traction	18
<b>Figure I.14</b> : principe de la dureté brinell	20
<b>Figure. I. 15</b> : principe de la duretéRockwell.	21
<b>Figure I. 16</b> : principe de la dureté Vickers.	21

### CHAPITRE II: La Corrosion et la Lutte Contre la Corrosion

<b>Figure II.01</b> : Schéma simplifié du processus de corrosion (Destruction de l'équilibre par réaction du milieu).	23
<b>Figure II.02</b> : Représente le graphique montrant l'évolution des fuites en cour des années	24
<b>Figure II.03</b> : Pertes de métal dû à la corrosion interne	24
<b>Figure II.04</b> : Pertes de métal dû à la corrosion externe	25
<b>Figure II.05</b> : Les différents types de corrosion, d'après Melchers	25
<b>Figure II.06</b> : Corrosion par piqûration	26
<b>Figure II.07</b> : Corrosion bactérienne [23].	27
<b>Figure II. 08</b> : Fissuration par corrosion sous contrainte.	28
<b>Figure II. 09</b> : Opération de sablage du pipe en exploitation	29
<b>Figure II.10</b> : Traitement mécanique par abrasion,	30
<b>Figure II.11</b> : Structures moléculaires des substances chimiques extraites d'Eugenia caryophyllata	37
<b>Figure II.12</b> : Structure moléculaire de la davanone extraite de l'Artemisia	38
<b>Figure II.13</b> : (a) Installation de la moitié de la coquille du composite en carbone,(b) réparation finale	41
<b>Figure II.14</b> :Processus de réparation extérieur d'une pipe utilisant remplissage et enveloppe souple	44
<b>Figure II.15</b> : Méthode de meulage, (a) défaut de fissure, (b) réparation par meulage, (c) structure après réparation	44
<b>Figure II.16</b> : Perçage au fond de la fissure.	45
<b>Figure II.17</b> : Dimensions géométrique de la fissure et trou de réparation.	45

### CHAPITRE III: Partie Expérimentale

<b>Figure III.01</b> : localité Bouhmadou APC Souamaa W.de M'sila	48
<b>Figure III.02</b> : Analyse de sol par Lida instrument	49

<b>Figure III.03:</b> L'analyse par le dispositif thermoscientific Niton XL3t	49
<b>Figure III-04 :</b> Microstructure de l'acier X52 dans l'état brut de livraison (nommé <b>AR</b> )	51
<b>Figure III-05 :</b> Inclusions d'oxydes dans l'acier X52 (AR).	51
<b>Figure III-06 :</b> Inclusions de sulfure de manganèse dans l'acier X52 (AR).	52
<b>Figure III-07 :</b> Observation au MEB des particules de cémentite Fe <sub>3</sub> C	52
<b>Figure III-08 :</b> Grains de ferrite et perlite lamellaire (AR), MEB	52
<b>Figure III-09 :</b> Analyse micrographique (ZAT).	53
<b>Figure III-10 :</b> Analyse micrographique (Cordon).	53
<b>Figure III.11:</b> Dimensions éprouvette	54
<b>Figure III.12:</b> Sableuse de pression 06 bar	54
<b>Figure III.13:</b> Échelle de pesée des échantillons, précise 0.001 g	54
<b>Figure III.14:</b> Eprouvettes avant le traitement chimique	55
<b>Figure III.15 :</b> Après le traitement avec H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 20%	55
<b>Figure III.16:</b> Après le traitement avec l'eau de mer	55
<b>Figure III.17 :</b> Aucun traitement	55
<b>Figure III.18 :</b> Machine de traction MTS Criterion Model 45.	57
<b>Figure III.19:</b> Machine de traction MTS Criterion Model 45.	58
<b>Figure III.20:</b> Duromètre QNess – Qpix T2	58

### **CHAPITRE III: Résultats Expérimentaux des Essais**

<b>Figure III.01:</b> Graphique représentant la perte de masse	60
<b>Figure III.02:</b> Essai de dureté	61
<b>Figure III.03:</b> Emplacement de l'éprouvette.	61
<b>Figure III.04:</b> Rupture de l'éprouvette 01.	62
<b>Figure III.05:</b> Rupture de l'éprouvette 02.	62
<b>Figure III.06 :</b> l'éprouvette N° 01 après la traction	63
<b>Figure III.07 :</b> Graphe N° 01	63
<b>Figure III.08 :</b> l'éprouvette N° 02 après la traction	64
<b>Figure III.09 :</b> Graphe N° 02	64
<b>Figure III.10 :</b> Eprouvette N° 03 après la traction	65
<b>Figure III.11 :</b> Graphe N° 03	65
<b>Figure III.12:</b> Eprouvette N° 04 après la traction	66
<b>Figure III.13 :</b> Graphe N° 04	66
<b>Figure III.14 :</b> Eprouvette N° 05 après la traction	67
<b>Figure III.15 :</b> Graphe N° 05	67
<b>Figure III.16 :</b> Eprouvette N° 06 après la traction	68
<b>Figure III.17 :</b> Graphe N° 06	68

## Introduction Générale

Les demandes énergétiques mondiales ne cessent de s'accroître, avec le développement très rapide de l'économie mondiale. Le transport du pétrole et du gaz avec canalisation reste le moyen le plus économique et le plus sûr pour les sociétés de transport d'hydrocarbures. Pour augmenter la rentabilité d'un oléoduc, il est nécessaire d'élever le débit de ces structures tout en augmentant la pression de service et des diamètres des canalisations. Ainsi, l'augmentation de la résistance des conduites devient une nécessité et ces caractéristiques mécaniques et chimiques doivent être améliorées.

Les réseaux des hydrocarbures sont composés d'une dizaine de nuances différentes (Grade A, Grade B, X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70, X80, ..., X120), tout en sachant que le Grade B, X52 et le X60 représentent environ 70% de la diversité de ces réseaux.

Les hydrocarbures, produits chimiques, etc. sont des matières transportées souvent par canalisation. Ce dernier, utilise majoritairement des tubes en acier, soudés bout à bout et revêtus pour protéger contre les problèmes de corrosion. Le fluide transporté dans les canalisations se déplace généralement sous pression.

La corrosion est une destruction non souhaitée des métaux sous l'action de milieux corrosifs. La corrosion interne est rare du fait que le produit que transporte le pipeline s'écoule sans arrêt et que l'intérieur de la canalisation est fréquemment nettoyé à l'aide de racleurs. Par contre, la corrosion externe présente souvent des dégradations potentiellement dangereuses.

Dans cette optique, le pipeline présente des zones dites singulières au niveau desquelles le comportement mécanique est très perturbé. Nous nous sommes intéressés à l'étude du phénomène de corrosion dans l'oléoduc OB1 24" au niveau de la localité de Bouhmadou, APC Souamaa W. de M'sila.

Dans cette vision notre mémoire est subdivisée en quatre chapitres

- Les pipelines gazoducs et oléoducs : les aciers constitutifs et le processus de fabrication ...etc, sont bien détaillés au premier chapitre.
- Le deuxième chapitre est consacré à la corrosion et lutte contre la corrosion.
- La partie expérimentale est traitée au troisième chapitre.
- L'interprétation des résultats obtenus au différents tests sont données au dernier chapitre.

# Chapitre I

## Les Pipelines Oléoducs et Gazoducs

**I.1. Les pipelines :**

Une canalisation, ou un pipeline (de l'anglais) est une conduite destinée à l'acheminement de matières gazeuses, liquides, solides ou poly phasiques, d'un endroit à un autre. Le diamètre nominal d'une canalisation peut aller de trente millimètres environ (un pouce un quart) pour des fluides spéciaux jusqu'à plus de trois mètres vingt (soixante-huit pouces) pour les adductions d'eau. On désigne par « pipelines » (figure I.5), les oléoducs ou gazoducs qui sont des canalisations de diamètres pouvant aller de 1 à 42 pouce (1pouce = 2,54 centimètres), Celles-ci sont le plus souvent en acier, constituées d'éléments linéaires soudés bout en bout et revêtus, et dans lesquelles transitent, sous des pressions relativement élevées, des produits pétroliers, liquides ou gazeux. Ces produits pétroliers sont propulsés par des installations de pompages ou de compression. Elle sert à transporter un produit entre deux points donnés et elle est construite avec des matériaux et des techniques qui apportent la solution la plus économique au problème posé. Lorsqu'une canalisation a un très petit diamètre (moins de trente millimètres environ), on parle plutôt de tuyauterie [1]

Pour la fabrication des tubes, un grand nombre de matériaux peut être utilisé : acier, fonte, plastique, résines armées, etc., Le choix du matériau est fonction de la nature et de l'état des produits qu'elle doit acheminer. Dans ce cas, on considère l'application de l'acier dans la fabrication des tubes, pièces et matériaux qui satisfont aux exigences les plus sévères de l'industrie gazière explicites et implicites. Le type et le nom d'une canalisation dépendent des caractéristiques physiques et des conditions d'acheminement du produit à déplacer.

- Pour le gaz naturel, on parle de gazoduc (pipe-line).
- Pour le pétrole, on parle d'oléoduc (casing). [7]

➤ **Caractéristique des produits fabrique :**

Les produits fabriqués dans l'AMPTA sont caractérisé selon l'exigence de client et selon la norme API. Le tableau qui montre les caractéristiques des produite fabrique.

Norme de référence: American Petroleum Institute (API)			Utilisation
Nuance	Limite d'élasticité minimale $R_e$	Résistance à la traction minimale $R$	
		N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
X-42	290	415	Pipe-line
X-52	360	460	
X-60	415	520	
X-65	450	535	
N80Q	552	689	Casing
P110	758	862	
K55	379	655	

**Tableau I.1 :** Caractéristique des produits fabrique.

**I.2. Les principaux systèmes de transport par canalisation concernent:**

- Le gaz naturel, transporté par gazoduc ;
- Les hydrocarbures liquides, dont surtout le pétrole, transportés par oléoduc.
- Il existe bien d'autres produits acheminés sur des distances parfois importantes, justifiant le terme de « transport », par différenciation avec des distributions locales:
- L'eau douce, principalement pour l'irrigation, dans des conduites ou émissaires ou aqueducs ;
- L'eau salée ou saumâtre, appelée « saumure », dans des saumoducs ;
- L'oxygène dans des oxygénoducs ;
- L'hydrogène dans des hydrogénoducs ;
- L'éthylène dans des éthylénoducs ;
- etc...

**I.3. Processus de fabrication :**

On retrouve des réseaux de transport des hydrocarbures en Algérie sous les formes suivant :

**I.3.1. Les tubes soudés sous la forme en spirale :**

**Figure I .01** : Les tubes soudés sous la forme en spirale.

Les machines peuvent traiter des aciers laminés à chaud à très hautes limites d'élasticité. Les bobines utilisées pour la fabrication des tubes spirale sont livrées brutes, ces approvisionnement proviennent principalement de l'Allemagne ou la France.

Les bobines utilisées peuvent avoir une épaisseur de 5 à 15 mm, une largeur de 600 à 1800, un poids compris entre 29 et 36 tonnes. Cette unité est conçue pour la transformation à froid des bobines de tôle en tubes soudés en spirales et elle est équipée de : [3]

### **a) Zone fabrication**

A ce niveau la fabrication des tubes spirals

### **b) Basculeur de bobines :**

Les bobines de tôle arrivant à axe vertical sont mises à axe horizontal sur cette installation pour pouvoir être préparées.

### **c- Machine de préparation bobine :**

Cette machine est alimentée en bobines à axe horizontal par le pont roulant. La bobine ainsi placée et déroulée sur une certaine longueur pour subir plusieurs opérations.

La première partie de la bobine est coupée d'équerre suivant l'axe de la bande et elle est soumise à :

- Un contrôle dimensionnel (épaisseur, criques,...etc.)
- Un contrôle visuel (empreintes, criques,...etc.)
- Un contrôle ultrasonique pour détecter les éventuels défauts interne (des doublures).

Si le début de la bande ne présente pas des défauts, on considère que la bobine est apte à être consommée. Dans le cas où le début de la bobine contient des défauts, la bobine sera refusée.

### **d) Machine à souder :**

La TUBERIE spirale dispose de quatre (04) machines à souder identiques, qui permettent la réalisation de plusieurs opérations pour la fabrication du tube



**Figure I .02:** La Machine à souder

➤ **Le rabotage :**

C'est une opération d'oxycoupage qui consiste à débiter la fin de la bande sur la machine et de raccorder le bout de la précédente bobine à la nouvelle par un soudage automatique sous flux. La durée de l'opération dure environ 30 min et nécessite l'arrêt de la production.

➤ **Le guidage :**

Quatre (04) galets de guidage a commande hydraulique permettent un réglage rapide de la bande en cas de dérives dues aux variations de largeur bande.

➤ **Dressage bande :**

Un train de rouleaux dresseurs assurent une parfaite planéité et contribue au guidage de la bande.

➤ **Cisaillage :**

Des cisailles de rive permettant la mise en largeur définitive de la bande. Les chutes ainsi obtenues par cisaillage sont coupées par simple rotation de deux (02) tourteaux hacheurs équipés de plusieurs couteaux en acier.

**e) formage de la bande :**

La bande est entraînée par deux (02) rouleaux cylindriques, elle subit un préformage par des galets cambreurs, des bras de guidage avec plaque d'usure en TEFLON maintiennent la bande. Celle-ci est introduite dans la cage de formage constituée de plusieurs trains de galets, ajustés suivant le diamètre à réaliser. La bande ainsi formée, est soudée intérieurement, puis une demi-spire après extérieurement. Le procédé utilise est le soudage automatique .à arc immergé sous flux ; une centrale permet de récupération de flux en excès pour le recycler. Le tube formé est coupé à la longueur voulue par un chariot d'oxycoupage prévu à cet effet.



(A) Stockage bobine



(B) Préparation bobine



(C) Entrés bobine



(D) Préparation arêtes

**Figure I. 03 : Préparation bobine.**

**f) Deux machines nettoyage tubes :**

Le tube ainsi mis en longueur est nettoyé sur une machine qui le débarrasse de tous les déchets (flux, laitier....etc.).

Zone visuelle :

A ce niveau, les opérations suivantes sont réalisées :

- Contrôle de l'aspect visuel de la tôle et du cordon.
- Contrôle dimensionnel (longueur, diamètre, épaisseur).
- Elimination par meulage de certains types de défauts.
- Transcription de ces informations sur la carte suiveuse du tube.
- (Signalisation des opérations qui sont réalisé sur le tube)

**g) Machine de reprise des soudures :**

Cette machine effectue l'opération de soudage extérieure des rabotages ainsi que les longues interruptions du cordon extérieur de la soudure.

Le système de soudage est identique à celui des machine à a soudes en spirale.

**h) Zone de réparation :**

Equipée de deux postes à soudage manuel pour réaliser toutes les réparations de défauts préjudiciables de la soudure, signalés en amont par le contrôle visuel.



**Figure I. 04:** Réparation des défauts manuellement. [3]

**i) Tronçonneuse des tubes :**

Cette machine est utilisée pour l'oxycoupage des tubes suivant les instructions du contrôle visuel et figurant sur la carte suiveuse de tube.

**j) Banc d'essais hydrostatique :**

Cette installation sert éprouver les tubes à pression équivalentes à 90 % du taux de travail de l'acier utilisé, cette opération à pour but de vérifier d'une part l'étanchéité du tube, et d'autre part le comportement du tube lors de la montée en pression (résistance de la tôle et du cordon de soudure).



**Figure I. 05:** La machine d'essais hydrostatique.

**k) Deux chanfreineuses des tubes :**

Pour permettre l'opération de soudage manuel, le tube est chanfreiné sur cette installation suivant les normes de travail. L'angle obtenu est en général de 30° à 35° avec un talon de 1.5mm.

Machine de contrôle ultrason automatique :



**Figure I. 06 :** Machine de contrôle ultrason automatique.

Le cordon de soudure est contrôlé par une machine électrique à émission ultrason à l'aide de deux (02) palpeurs à angle situés de part et d'autre de cordon de soudure.

La tôle est également contrôlée par un palpeur plan en mouvement de translation entre les deux (02) spires.

**l) Machines de contrôle radiographique et radioscopique :**

Chaque défaut de soudage repéré à l'ultrason automatique, fait l'objet d'une première radiographie au rayon X .un second appareillage radiographique, identique au précédent et spécialisé au prise de la radiographie des soudures d'extrémités, la radioscopie utilise un écran fluorescent visualisant les défauts, mais la radiographie ; elle utilise des films de radiographie.

Ces installations sont isolées par un écran de plomb, permettant la protection des personnels contre les rayons X.

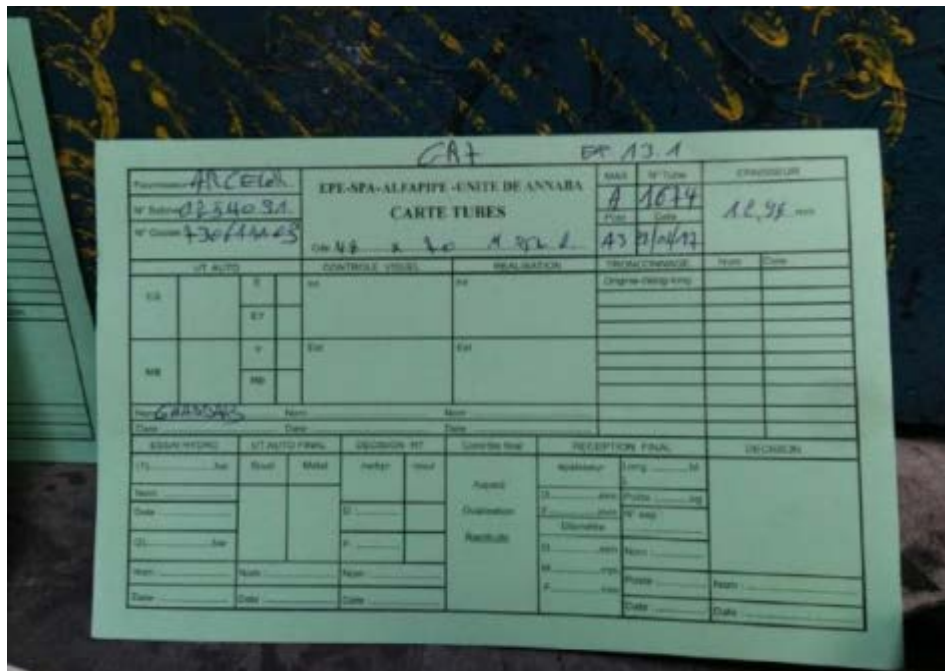
**m) Zone de contrôle final :**

Au niveau de ce stand, les opérations suivantes sont réalisées :

- Contrôle visuel et dimensionnel.
- Vérification de la carte suiveuse du tube, 02 cas peuvent se présenter :

Le tube ne comporte pas des défauts et les opérations mentionnées sur la carte Suiveuse sont réalisées, dans ce cas la tube reçoit un numéro d'expédition et suit son chemin au parc de stockage.

Le tube comporte un défaut ou bien l'opération mentionnée sur la carte n'a pas été réalisée, dans ce cas le tube retourne en atelier pour subir les prestations manquantes.



**Figure I. 07:** La carte du tube.

### I.3.2 Les tubes soudés sous forme longitudinale :

La technique de fabrication des tubes soudés sous forme longitudinale est généralement basée sur le formage à froid de la plaque à travers le processus "UOE"(...), elle est spécifique aux tubes avec des diamètres plus que 406.4 mm (16"). Cette technique passe par trois étapes de formage : [4]



**Figure I. 08:** a) : Croquage b): Formage sous forme "U" c): Formage sous forme "O"

#### a) Croquage et formage:

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

#### b) Le soudage du tube :

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

#### c) Expansion et calibrage :

L'objectif essentiel à atteindre par cette opération est d'avoir des tubes de section parfaitement circulaire, qui subit une augmentation de diamètre de 1 à 1.5%

### I.3.3 Les tubes formés sans soudure :

Les tubes sans soudure sont des produits tubulaires en acier forgés sans ligne de soudure, seront obtenus à partir d'une ébauche cylindrique par un travail du métal à chaud (laminage) en vue de produire la forme, les dimensions et les propriétés requises.

Ils sont généralement de petits diamètres (moins de 450 mm). Le principe de fabrication de ce type de tube se base sur la présentation du métal d'une manière qu'il soit contenu entre la filière et l'aiguille. On obtient ainsi un tube monobloc sans soudure. Il existe une variante dite filage sur nez d'aiguille où l'aiguille est fixe. [4]

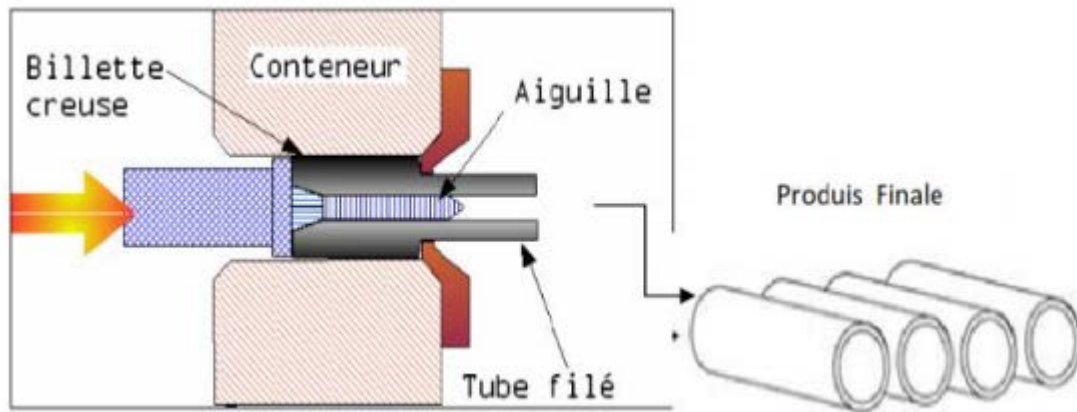


Figure I.09 : Fabrication de pipeline sans soudure

## I.4. Revêtement des tubes :

### I.4.1. Revêtement extérieur :

Les domaines d'application sont principalement : les canalisations enterrées ou posée en surface, et les canalisations émergées en eau douce ou salée. Le revêtement est constitué de :

- Une couche de résine époxydique appliquée par pulvérisation électrostatique de 50 à 80 microns d'épaisseur.

Une deuxième couche en copolymère destiné à assurer l'adhérence polyéthylène.

- Une couche de polyéthylène extrudé.
- Les avantages de revêtement extérieur en polyéthylène se caractérisent par une grande inertie chimique, une excellente adhérence de revêtement sur l'acier, un apport au réseau d'une résistance fiable vis-à-vis des sols agressifs et des courants vagabonds.

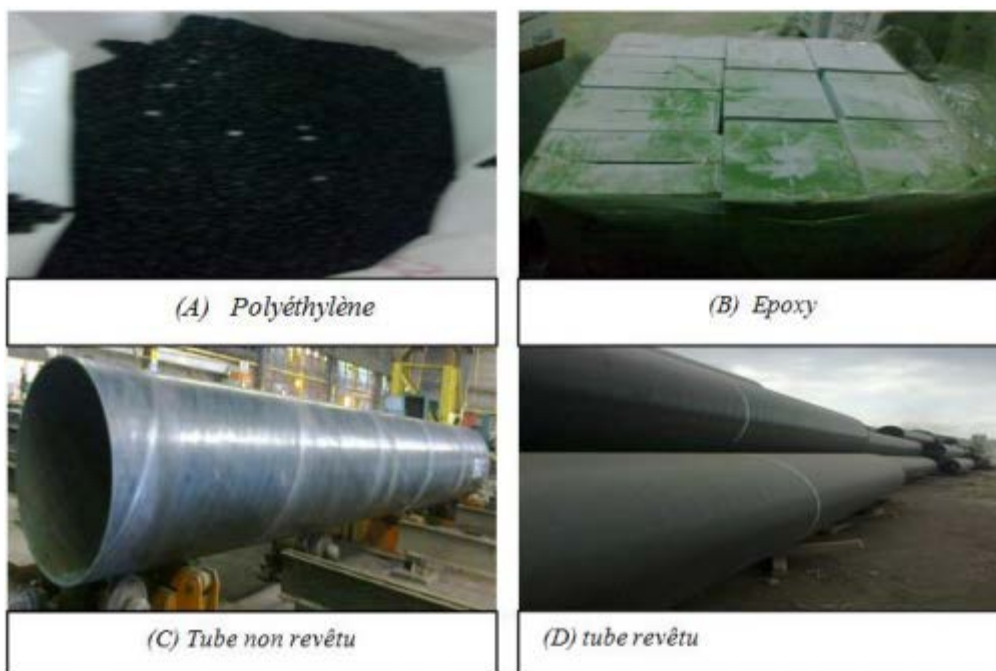


Figure I.10 : Revêtement extérieur. [5]

### I.4.2. Revêtement intérieur :

Il se fait en résine époxy pour les tubes destinés au transport et à la distribution du gaz sec et transport du gaz humide, d'eau potable brute et industrielle. L'aspect du revêtement est brillant, lisse et répond aux exigences de la norme API RP 5L.

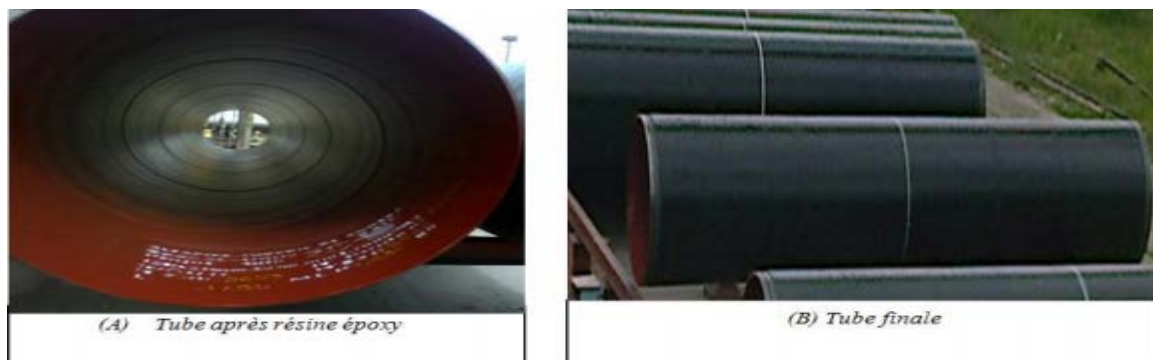


Figure I. 11: Tube revêtu

### I.5. Contrôle de qualité :

Tout assemblage soudé doit offrir des garanties optimales de sécurité et d'endurance aux conditions de service. La qualité de l'assemblage prend ses racines à divers stades de la construction, c.-à-d., Avant, pendant, et après fabrication. En soudage, où les facteurs régissant la qualité des assemblages sont nombreux et complexes, il y a lieu de prévoir trois types de contrôles distincts, en fonction du stade d'intervention :

- Contrôle Avant soudage ;
- Contrôle pendant soudage ;
- Contrôle après soudage :
- Contrôles destructifs.
- Contrôle semi destructifs
- Contrôles non destructifs.

#### a) Contrôles Non Destructifs :

Ces contrôles pour but de mettre en évidence des défauts soit directement (visuel) soit indirectement par leurs effets (Tuboscope, Magna poudre).

Epreuve hydraulique : Chaque tube subit l'épreuve hydraulique (banc d'épreuve hydraulique).

Chaque tube doit être maintenu à la pression d'essai en fonction des dimensions et nuances et un temps exigé par le client.

#### b) Contrôles Destructifs (CD) :

Les contrôles destructifs des tubes sans soudure viennent consolider la qualité du produit fabriqué par TSS.

Son laboratoire d'essais mécaniques dispose d'équipements fiables étalonnés périodiquement. Les différents essais destructifs réalisés sur une virole de tube sont des essais mécaniques (traction, dureté, résilience), des analyses chimiques.

### **I.6. Prélèvement des échantillons :**

Les échantillons pour les essais sont prélevés d'une virole du tube, désigné pour le test. La paire de plaques sont prélevés transversalement à l'axe du tube.

### **I.7. Essais de conformément des pipelines:**

Tous les essais sont effectués en conformité avec les normes API5L et avec les spécifications du client.

#### **a- Analyses chimiques :**

Le contrôle de la composition chimique se fait sur le métal de tube. Les résultats d'analyses sont comparés avec celle du fournisseur et les exigences du client, ce qui permet de définir les premiers critères d'acceptation du produit en composition chimique (spectromètre).

#### **b- Essai de traction :**

L'essai de traction consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction jusqu'à rupture en vue de déterminer une ou plusieurs caractéristiques mécaniques (la résistance ultime à la traction, la limite apparente d'élasticité à 0.5% et l'allongement).

#### **c- Essai de dureté :**

L'essai de dureté consiste à mesurer la résistance d'un matériau à la pénétration.

#### **d- Essai de résilience :**

L'essai de résilience consiste à mesurer l'énergie de rupture de les éprouvettes dans les différentes températures, cette dernière est exigée par le client et la norme API.

### **I.8. Les aciers et les caractéristiques mécaniques :**

L'acier est un alliage métallique constitué essentiellement de fer (typiquement très majoritaire et représentant plus de 98% du métal) et de carbone (typiquement moins de 2% du métal), auxquels sont ajoutés en faibles quantités d'autres composants minoritaires en fonction des propriétés recherchées. [2]

**I.8.1. Classification des aciers :**

On peut classer les aciers selon leur composition chimique ou selon leur domaine d'utilisation. C'est cette dernière classification qui nous permet de considérer les quatre familles suivantes.[3]

**➤ Les aciers au carbone d'usage général :**

Les aciers au carbone d'usage général, utilisés tels quels, sans traitement ultérieur, constituent environ 85 % de la production des aciers. Ce sont des matériaux produits en très grande quantité et dont le prix est relativement bas. Outre le carbone, ces aciers contiennent des éléments d'addition (manganèse, silicium...) et des impuretés (soufre et phosphore) dont la présence découle de leur mode d'élaboration.

**➤ Les aciers de traitements thermiques :**

Les aciers alliés ou non alliés de traitements thermiques sont définis en fonction de leur composition.

La composition chimique de ces aciers permet de déterminer les traitements qu'on peut leur appliquer en fonction des propriétés recherchées.

**a- Aciers non alliés :**

Ces aciers sont, en fait, intermédiaires entre les aciers d'usage général de type A et les aciers fins de type XC; on peut leur faire subir un traitement thermique mais les caractéristiques mécaniques obtenues peuvent être assez variables d'un lot à l'autre et même à l'intérieur d'un même lot.

**b- Aciers alliés :**

On distingue deux grandes catégories d'aciers alliés :

**➤ Aciers faiblement alliés :**

Ce sont des aciers dans lesquels aucun élément d'addition n'atteint la teneur de 5%.

**➤ Aciers fortement alliés :**

Dans ces aciers, au moins un élément d'addition atteint la teneur supérieure ou égale à 5%.

**c- Aciers à outils :**

Sont des aciers utilisés pour la fabrication d'outils mécaniques tels que les mèches, outils de coupe, cisailles, marteaux, burins...etc. Les caractéristiques d'utilisation des aciers à outils sont semblables à celles des aciers alliés, mais elles exigent l'amélioration d'un certain nombre de

propriétés : la dureté, la trempabilité ; la tenue à chaud, la ténacité, la résistance et la résistance aux chocs thermiques.

#### **d- Aciers inoxydables :**

Les aciers inoxydables comprennent un ensemble de familles d'alliages à base de fer dont la principale propriété est la résistance à la corrosion généralisée. Toutefois, bien qu'on les qualifie d'inoxidables, ces aciers ne sont pas dans tous les cas totalement exempts d'une possibilité de corrosion. Le chrome est l'élément essentiel qui, à des teneurs supérieures à environ 12 %, rend l'acier inoxydable en favorisant, en milieu oxydant, la formation d'un film passif à sa surface.

#### **I.8.2. Influence des éléments d'addition :**

Les éléments d'addition (éléments d'alliage) sont en général des "métaux" surtout dans les aciers mais ce peut être des "non métaux" ou des "gaz". En général, les éléments d'alliage améliorent les propriétés de ces métaux. Les éléments d'addition dans les aciers sont nombreux (une trentaine). Ces éléments ont une action spécifique dans les aciers

- **Manganèse :**

On l'utilise surtout pour améliorer les propriétés des aciers d'usage général et la trempabilité des aciers de traitements thermiques, et ce a un faible cout. Le manganèse se retrouve rarement seul comme élément d'alliage, car il entraîne plusieurs inconvénients : sensibilité à la surchauffe au cours de l'austénitisation, sensibilité qui provoque une croissance des grains ; augmentation de la fragilité au revenu ; diminution de la ductilité et de la résistance mécanique mesurées selon une direction perpendiculaire au laminage (sens travers)

- **Nickel :**

Le nickel, qui ne forme pas de carbures, agit principalement sur les propriétés de la ferrite augmentation de la résistance mécanique et de la ténacité. Les aciers qui contiennent plus de 0.5% de nickel conservent une bonne résilience, même à des températures très basses (aciers à 9 % de nickel utilisés pour les réservoirs cryogéniques). Le nickel freine en outre la croissance des grains austénitiques (aciers de cémentation) et il exerce une action moyenne sur la trempabilité (facteur d'augmentation de la trempabilité de 1,4/1 % Ni).

- **Silicium :**

Le Silicium augmente par ailleurs la stabilité du revenu, mais il accroît la fragilité de l'acier. Cet élément améliore la résistance à l'oxydation à chaud et la résistance au fluage ; c'est pourquoi on

peut le retrouver dans des aciers au chrome. On la retrouve également en présence de manganèse (1,5 à 2 % de Si et 0,6 à 0,9 % de Mn) dans les aciers manganés-siliceux utilisés pour la fabrication des ressorts (limite d'élasticité élevée)

- **Chrome :**

Le chrome augmente considérablement la trempabilité (facteur d'augmentation de la trempabilité de 3,2/1 % Cr). Il améliore également la résistance au revenu et la tenue à chaud, grâce à la formation de carbures de chrome qui exercent un effet de durcissement par précipitation, durcissement qui pallie l'adoucissement de la martensite. Enfin, le chrome, qui joue un rôle de premier plan dans la résistance à la corrosion, est l'élément d'addition le plus important des aciers inoxydables. On emploie le chrome dans les aciers de cémentation lorsqu'on veut améliorer la résistance à l'usure des surfaces carburées.

Les aciers hypereutectoïdes (0,8% de C) au chrome (0,50 à 1,70 % de Cr) sont largement utilisés pour la fabrication des roulements (billes, rouleaux, etc.). v). Molybdène : Le molybdène améliore la résistance au revenu en favorisant l'apparition d'un durcissement secondaire dû à la formation de carbures,  $Mo_2C$ , et en diminuant la sensibilité à la fragilisation au revenu.

### **I.8.3. Caractéristiques des aciers:**

Un acier courant se caractérise essentiellement par sa composition et les caractéristiques mécaniques qui en découlent, bien que non rattachées à un type d'essai normalisé, les caractéristiques les plus souvent citées sont :

- **Élasticité :**

C'est l'aptitude d'un matériau à se déformer sous une charge (un effort) et de retourner à son état initial après décharge.

- **Plasticité :**

C'est la déformation d'un matériau sous une charge sans revenir à son état initial après décharge.

- **La rigidité :**

C'est l'aptitude d'un matériau à se déformer de façon élastique (et donc réversible).

La rigidité est définie par le Module d'élasticité E. Plus le matériau est rigide, plus la force qu'on peut lui appliquer est importante.

- **Résistance maximale :**

C'est la charge maximale que peut supporter un matériau. La charge peut être effort en traction ou couple en torsion.

- **Limite élastique :**

C'est la charge maximale que peut supporter un matériau pour se déformer d'une façon élastique.

- **Ductilité :**

C'est l'aptitude d'un matériau à se déformer plastiquement avant rupture. Un matériau qui se déforme plus avant rupture est plus ductile qu'un matériau qui se déforme moins.

- **Fragilité :**

C'est la facilité avec laquelle on peut fracturer un matériau. Un matériau fragile se fracture sans se déformer plastiquement.

- **Ténacité :**

C'est l'aptitude d'un matériau à absorber l'énergie lors d'une déformation plastique. C'est une combinaison entre la bonne résistance à la rupture et la bonne ductilité. Une des façons de définir la ténacité est l'aire de la surface engendrée par la courbe de traction. La ténacité peut être mesurée par l'essai de Résilience Charpy. (Les termes résilience et ténacité ont des significations équivalentes).

- **La dureté :**

L'aptitude du métal à résister à la pénétration et à l'abrasion. [8]

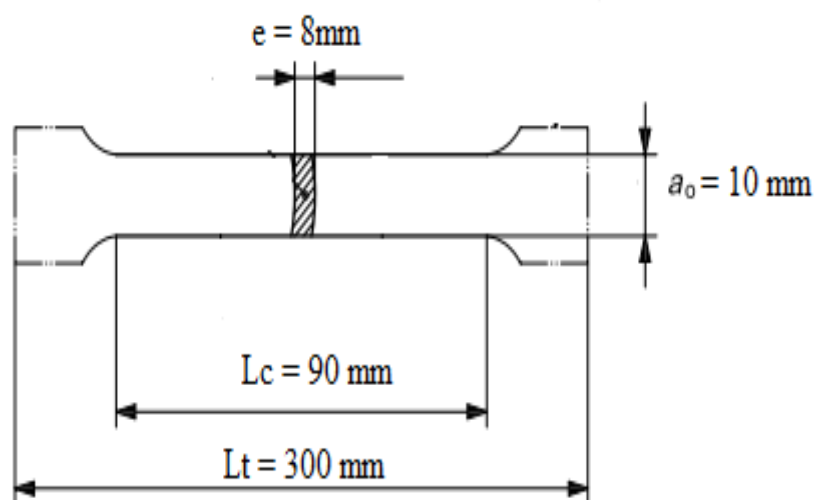
- **Essai de traction :**

Parmi tous les essais mécaniques, l'essai de traction est certainement l'essai le plus fondamental. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que le module de d'élasticité, le coefficient de poisson, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient de striction. Son exécution est facile et les résultats obtenus servent à dimensionner toutes sortes des pièces allant d'un pignon microscopique jusqu'à la structure métallique d'un grand hall. Dans la recherche on l'applique pour la caractérisation de nouveaux matériaux et dans l'industrie pour les contrôles périodiques servant à surveiller la qualité des alliages. [4]

### I.9. Les éprouvettes :

L'essai de traction est exécuté sur des éprouvettes cylindriques ou prismatiques prolongées de part et d'autre par des têtes d'attache de forme appropriée pour la fixation. Afin de garantir des résultats obtenus sous contrainte, toutes les déterminations faites au cours de l'essai ne portent que sur une partie de la longueur de l'éprouvette. Afin d'éviter toute influence de la force pinçant des mors, elles doivent être suffisamment loin des points d'amarrage.

Les têtes ont une section supérieure à celle de la partie cylindrique de façon qu'elles ne subissent aucune déformation plastique et qu'elles ne cassent pas en premier. Comme la limite d'écoulement plastique dépend aussi des contraintes latérales, on doit essayer d'éviter toute influence de la force pinçant des mors. Ceci n'est pas un détail que l'on doit respecter seulement lorsqu'on effectue l'essai de traction. Dans la pratique aussi, on doit garder à l'esprit que la limite d'écoulement plastique déterminée dans un essai de traction ne tient compte que d'un état de contrainte uni axiale. L'éprouvette fixée par ses têtes, entre deux mordaches, est soumise à un effort de traction suivant son axe. Une longueur de base  $L$  est définie par la distance séparant les deux repères que constituent les points d'attache de l'extensomètre. Les repères sont à tracer très finement, afin qu'ils ne puissent pas constituer des amorces de rupture. En augmentant l'effort de façon continue, il y a d'abord l'allongement élastique uniforme et puis, au-delà de la limite d'écoulement plastique (= limite d'élasticité), l'allongement plastique qui s'y ajoute. Au début, la déformation plastique est encore uniforme mais vers la fin lorsque la rupture s'approche, il y a apparition d'une striction (déformation non uniforme) et rupture. Les dimensions géométriques de l'éprouvette de traction sont montrées dans la figure.



**Figure I. 12:** Dimension d'éprouvette de traction

**I.9.1 Diagramme de traction :**

Les valeurs mesurées directement lors d'un essai de traction sont la force F et l'allongement ΔL, plutôt que les contraintes et la déformation. La contrainte σ, rapportée dans un diagramme de traction présenté dans La figure

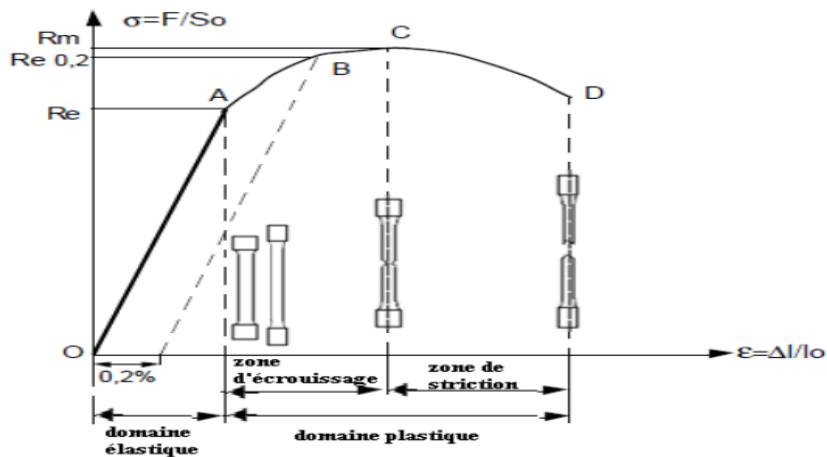


Figure I. 13: diagramme de traction.

On peut dire que se graphe divise à 3 domaine:

OA : domaine élastique à déformation réversible, le point A marqué la limite du domaine élastique;

AC : domaine de déformation permanent homogène ou de déformation plastique répartie ; le point C se situe à charge maximale et au début de la striction ;

CD : domaine de striction ou de déformation plastique localisée ; D point de rupture de l'éprouvette ;

Phénomène d'écroutissage : la densité de dislocation et leur enchevêtrement devenant de plus en plus élevée quand la déformation plastique croit, il faut appliquer une contrainte sans cesse croissante pour suivre la déformation plastique.

Caractéristiques obtenues lors d'un essai de traction :

**a- Le module d'Young E (MPa) :**

Il est défini comme la pente de la courbe de traction dans le domaine élastique (entre l'origine et Re).

Il est considéré comme invariable pour toutes les nuances d'acier et vaut en général : E=210000 Mpa souvent arrondi à 200000 Mpa.  $\sigma = E \times \epsilon \Rightarrow E = \sigma / \epsilon$ .

**b- La limite d'élasticité  $R_e$  (MPa) :**

Elle marque la fin du domaine élastique.

Pour les valeurs supérieures le matériau ne se déforme plus élastiquement mais plastiquement (l'éprouvette ne retrouve plus ses dimensions initiales après "déchargement", il subsiste un allongement permanent soit un phénomène de rémanence).  $R_e = F_e / S_0$

**c- La résistance ultime, ou contrainte maximum de traction  $R_m$  (MPa) :**

C'est la contrainte maximale que peut supporter le matériau avant d'atteindre la zone de striction. Utilisé dans le calcul des organes de sécurité. Souvent appelée résistance à la rupture.  $R_m = F_m / S_0$

**d- L'allongement à rupture  $A\%$  (%) :**

L'allongement représente la déformation relative maximale admissible d'un acier avant rupture.

$$A(\%) = ((L - L_0) / L_0) * 100$$

Dans cette expression,  $L_0$  et  $L$  sont respectivement les longueurs initiales et finales après rupture.

**e- Striction à la rupture :**

La déformation par striction ne reste pas toujours homogène à partir d'un certain allongement, elle se localise dans une zone de l'éprouvette. C'est le phénomène de l'instabilité plastique la striction

$$Z(\%) = ((S_0 - S) / S_0) * 100$$

Dans cette expression,  $S_0$  et  $S$  sont respectivement les sections initiales et finales après rupture.

**f- Coefficient de Poisson :**

Tout matériau qui va s'allonger dans un sens va forcément rétrécir dans l'autre sens.

Cela est dû à la conservation de la matière. Une éprouvette qui s'allonge va donc voir son diamètre diminuer. En notant  $\epsilon$  l'allongement longitudinal et  $\epsilon_r$  l'allongement transversale,

On peut exprimer le coefficient de Poisson:  $\nu = \epsilon_r / \epsilon$

**I.9.2. Essai de dureté :**

Les essais dits de dureté mesurent la pression moyenne de contact des matériaux, lors de l'enfoncement d'un indenteur (conique, pyramidal ou sphérique) sur une surface plans.

La dureté est évaluée après retrait de l'indenteur, à partir de la mesure de la dimension de l'empreinte de l'indenteur, ou pendant l'essai à partir de la courbe d'indentation qui lie la profondeur d'indentation à la charge appliquée. [5]

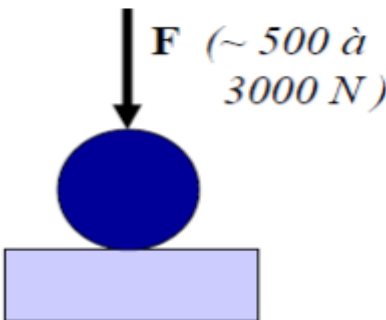
### **I.9.2.1.Principe de l'essai :**

Il consiste à enfoncer un pénétrateur dans le métal à essayer. La charge est constante et on mesure la dimension de l'empreinte. Elle est d'autant plus grande que le métal est plus dur.

La dureté H s'exprime par le rapport de la force sur la surface de l'empreinte.

#### **a- Dureté BRINELL (HB) :**

Il consiste à imprimer dans la pièce à essayer une bille en acier ou en carbure de tungstène de diamètre D sous une charge F, et à mesurer le diamètre d de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge. [6]

$$HB = \frac{F}{10\pi \cdot (5 - \sqrt{25 - \frac{d^2}{4}})}$$


**Figure I.14:** principe de la dureté brinell.

#### **b- Dureté ROCKWELL (HR) :**

Il consiste à imprimer, en deux temps, dans la couche superficielle de la pièce à essayer, un pénétrateur normalisé (cône en diamant ou d'une bille en acier trempé) et à mesurer l'accroissement rémanent « e » de la profondeur de pénétration.

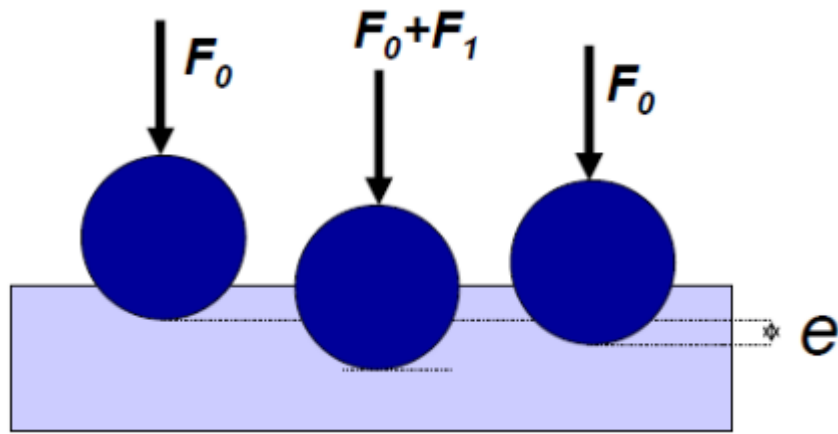


Figure. I. 15: principe de la dureté Rockwell.

**c- Dureté VICKERS (symbole HV) :**

Il consiste à imprimer dans la pièce à essayer un pénétrateur en forme de pyramide droite, à base carrée, d'angle au sommet 136°, sous une charge  $F$ , et à mesurer la diagonale «  $d$  » de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge.  $HV = (0.189 \times F) / d^2$  Tel que  $d = d_1 + d_2$ .

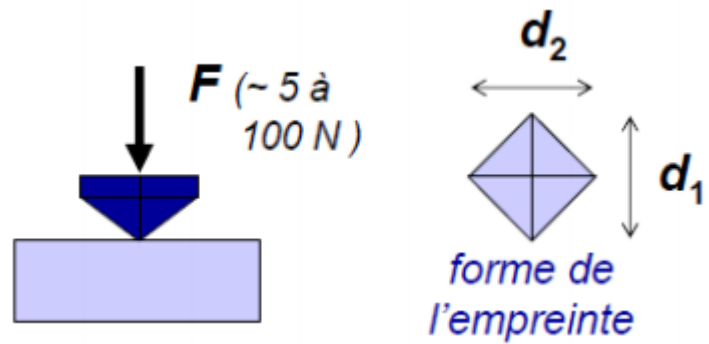


Figure I. 16: principe de la dureté Vickers.

# **CHAPITRE II**

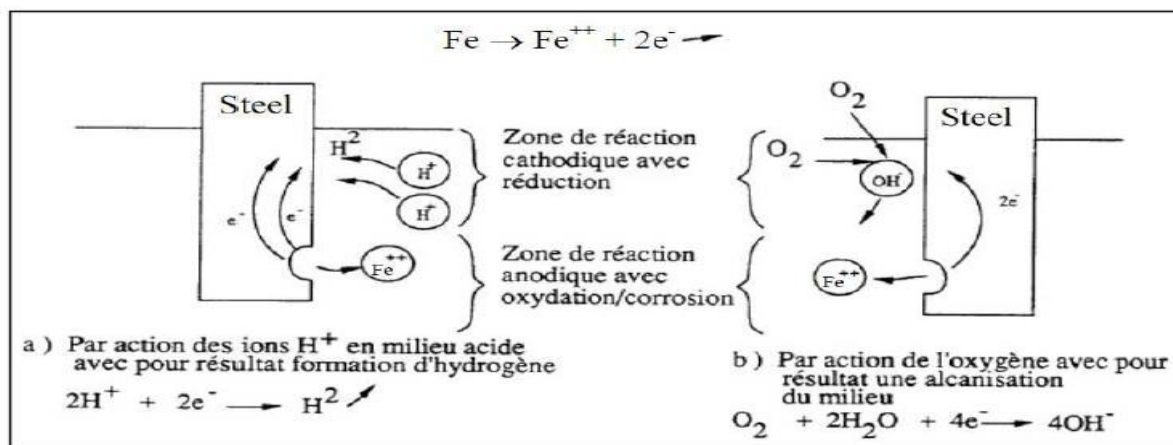
## **La Corrosion et la Lutte Contre la Corrosion**

## II.1. LA CORROSION

Le terme « corrosion » désigne la destruction d'un métal sous l'action du milieu environnant (air, eau, solution aqueuse, sols ...) par un processus de type physicochimique.

La norme ISO 8044 définit la corrosion comme suit : "La corrosion est une interaction physico-chimique entre un métal et son environnement entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou du système technique constitué par les deux facteurs...".

En ce qui concerne la corrosion des pipelines, le métal est de l'acier. La corrosion de ce dernier est un phénomène naturel et courant, où les molécules de fer sont transformées en des formes d'hydroxydes ferreux. Le processus de la corrosion peut être décomposé en deux réactions: anodique et cathodique



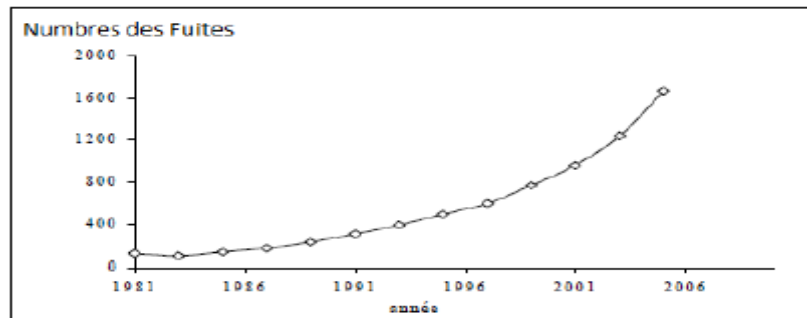
**Figure II. 01:** Schéma simplifié du processus de corrosion (Destruction de l'équilibre par réaction du milieu).

### II. 1.2. Corrosion dans les pipelines:

Dans l'industrie pétrolière, les pipelines sont des outils essentiels de transport massif des hydrocarbures, sur de grandes distances, ils allient des débits importants et confirment année après année qu'ils sont le mode le plus sûr et le plus économique de transport des hydrocarbures. Cependant, leur enfouissement conduit à une série de pertes systématiques et les autres sont accidentelles.

Les pertes par corrosion, représentent une composante importante du pourcentage des pertes technologiques au cours du processus de transport par pipelines, ainsi qu'une considérable source de pollution [9].

En Algérie, Une étude a été effectuée, sur la base des données réelles propres au Champ de Hassi Messaoud. Cette étude a donné les résultats représentés sur la figure II.2 et qui montrent que le nombre de fuites, qui pourrait être enregistré en l'année 2005, avoisinerait 1800.



**Figure II.2:** Représente le graphique montrant l'évolution des fuites en cour des années

Par ailleurs, selon les chercheurs, la majorité des fuites enregistrées sur les pipelines sont essentiellement la conséquence de corrosion interne, accentuée par la corrosion externe. Ces fuites peuvent provoquer des accidents graves, comme l'incendie survenu le 21 septembre 2004, au niveau du gazoduc GZ 2, reliant Hassi-R'mel à Arzew au niveau de la localité d'El-Ghomri.

➤ **Pertes de métal dues à la corrosion interne:**

Les pertes de métal sont provoquées le plus souvent par des attaques chimiques de la surface interne de la conduite (figure II.03). Ce type de corrosion est favorisé par la présence de sulfure d'hydrogène et de dioxyde de carbone dans le gaz et la présence des bactéries sulfate - réductrices (BSR) dans le cas des oléoducs.



**Figure II.03 :** Pertes de métal dû à la corrosion interne [13].

La protection des pipelines contre la corrosion interne se fait principalement par envoi d'inhibiteurs de corrosion et biocides mélangés au fluide.

➤ **Pertes de métal dues à la corrosion externe:**

Pertes de métal provoquées le plus souvent par des phénomènes de type électrochimique et chimique de la surface externe de la conduite (figure II.14). Les principaux facteurs favorisant ce type de corrosion sont :

- Les défauts de revêtement de la conduite ;
- Les insuffisances du système de protection cathodique;
- L'agressivité du sol (sol de faible résistivité électrique).



Figure II .04: Pertes de métal dû à la corrosion externe

La protection des pipelines contre la corrosion externe se fait par les revêtements des canalisations et la protection cathodique.

**II. 1.3.Description géométrique de défauts de corrosion:**

Les phénomènes de corrosion peuvent être différenciés par leurs caractéristiques géométriques sans tenir compte des mécanismes d'entraînement. Dans cet esprit, la figure montre les différentes formes possibles de corrosion.

Les caractéristiques géométriques de la corrosion en un point donné dans le temps peuvent être décrites par des variables stochastiques d'un champ aléatoire spatial. Si, en simplifiant la géométrie, la corrosion est décrite dans ce qui suit, soit par la corrosion uniforme (général) ou par la corrosion localisée.

	Surface exposée (exposed surface)	Section transversale (crosse section)
Même corrosion généralisée sur toute la surface (even general corrosion)		
Corrosion généralisée inégale (uneven general corrosion)		
Même corrosion localisée (even local corrosion)		
Corrosion localisée inégale (uneven local corrosion)		
Piqûres de corrosion larges (wide pits)		
Piqûres de corrosion moyennes (medium pits)		
Piqûres de corrosion étroites (narrow pits)		
Crevasse de corrosion (crevices)		

Figure II. 05: Les différents types de corrosion, d'après Melchers [14]

**II.1.4. TYPES DE CORROSION****➤ 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  $Fe_2O_3$ . Par exemple dans la figure II.12, les sites anodiques et cathodiques se forment au hasard sur l'électrode, ce processus conduit à une corrosion de type généralisé. Avec le temps, le métal voit sa masse et son épaisseur diminuer régulièrement.

**➤ La corrosion localisée:**

La corrosion localisée est basée sur le même principe comme la corrosion uniforme, bien que le potentiel d'entraînement caractérisée par la distinction claire des endroits anodiques et cathodiques. En outre, la cathode peut être plus grande de plusieurs ordres de grandeur que l'anode, ce qui augmente considérablement la vitesse de corrosion de l'anode. Donc, ce type de corrosion se manifeste par une attaque localisée pouvant entraîner des dommages très importants (perforation de conduite), sans que le métal présente dans son ensemble une perte de poids significative. peut être assurée par des mécanismes différents.

**➤ Corrosion par piqûres et corrosion caverneuse:**

La figure I.16 représente la corrosion par piqûres. Celle-ci et l'autre qui est 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.

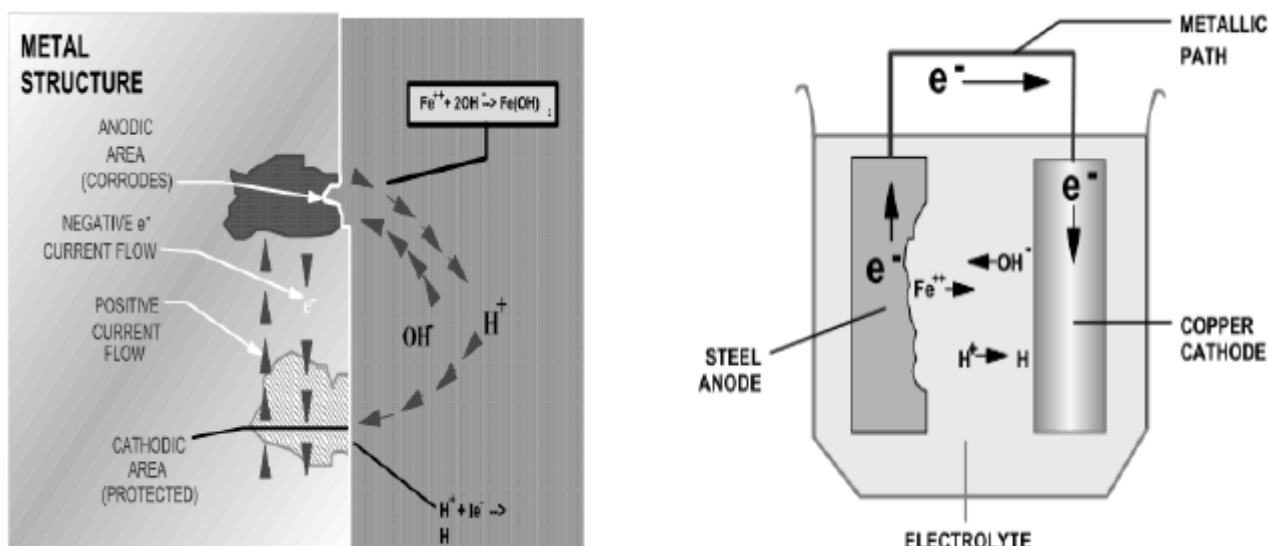


Figure II. 06 : Corrosion par piqûration.

➤ **Corrosion galvanique:**

Appelée aussi corrosion bimétallique, elle est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux en contact et entraîne une corrosion du métal le moins noble (anode) avec une résistance à la corrosion du métal le plus noble (cathode).

➤ **Corrosion intergranulaire (intercristalline):**

C'est une attaque sélective aux joints de grains des cristaux de l'acier, causé par des différences physico-chimiques entre le centre et les bords du grain.

➤ **Corrosion par crevasse:**

Appelée aussi corrosion caverneuse, elle est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux zones d'une structure métallique. C'est un phénomène qui se développe dans des zones confinées, telles que les interstices et les recoins. Il y a alors une attaque des parties métalliques les moins accessibles à l'oxygène.

➤ **Corrosion sous contrainte (stress corrosion):**

Il s'agit d'un type de corrosion qui se produit sous l'action commune d'une contrainte mécanique de traction et d'un milieu corrosif. En l'absence de la contrainte, le phénomène ne se produit pas. Le réarrangement cristallin provoque dans ces conditions la circulation d'électrons entraînant une polarisation de l'acier.

La C.S.C se manifeste sous la forme de fissures qui peuvent être inter-granulaires, soit transgranulaires. Les contraintes peuvent être d'origine résiduelle, provenant des opérations de mise en forme et des traitements thermiques, ou d'origine externe, qui résultent des conditions d'utilisation.

➤ **Fatigue-corrosion :**

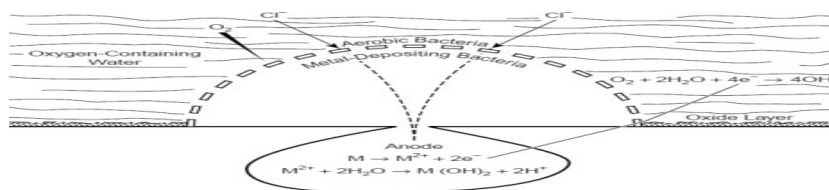
Très comparable à la corrosion sous contrainte, le phénomène de fatigue-corrosion apparaît sous l'action conjuguée de l'environnement et d'une sollicitation cyclique. Il se manifeste par un abaissement de la résistance du matériau (acier) à la fatigue.

➤ **Corrosion électriques ou corrosion par les courants vagabonds (courants parasites)**

Si un courant électrique continu peut avoir pour effet de protéger cathodiquement une structure lorsqu'il circule dans un sens convenable, il peut provoquer sa corrosion lorsqu'il circule dans le sens opposé. Mais en général, les courants vagabonds se propagent dans le sol où les liquides selon un chemin autre que celui prévu. Donc, ils peuvent entrer dans une structure conductrice enterrée ou immergée puis en ressortir plus loin, provoquant une corrosion par dissolution anodique. Ces courants circulant de façon non maîtrisée, sont variables en direction et en intensité et pour cette raison, ils ont reçu la nomination de courants vagabonds.

➤ **Corrosion induite microbiologiquement (CIM) :**

La figure II.06 présente la corrosion bactérienne. 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.



**Figure II.07 :** Corrosion bactérienne [23].

➤ **Corrosion par érosion:**

On rencontre le phénomène de l'érosion principalement dans les conduites de gaz. Ce phénomène est dû au déplacement des particules solides, sable et produits de corrosion à la vitesse du gaz, qui « rabotent » la surface interne de la conduite provoquant une réduction de l'épaisseur. Le phénomène de l'érosion est particulièrement intense au niveau des coudes à faible rayon de courbure.

**II.1.5. 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 [23].

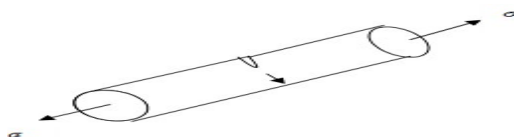
Si la concentration en H<sub>2</sub>S dans le gaz est supérieure à 0.5 mol/l et supérieure à 5 ppm dans l'eau la corrosion par H<sub>2</sub>S est provoquée selon le mécanisme [24]

<i>La réaction à l'anode :</i>	$Fe \rightarrow Fe^{++} + 2 e^{-}$
<i>Dissociation de :</i>	$H_2S \rightleftharpoons H^{+} + HS^{-}$ $HS^{-} \rightleftharpoons S^{2-} + H^{+}$
<i>La réaction à la cathode :</i>	$2H^{++} + 2 e^{-} \rightleftharpoons H_2$ $Fe^{++} + S^{2-} \rightleftharpoons FeS$
<i>Réaction globale :</i>	$Fe + H_2S \rightleftharpoons FeS + H_2$

**Tableau II.1 :** la corrosion par H<sub>2</sub>S [24].

**II.1.6.Fissuration des pipelines :**

La figure II.07 représente fissuration par corrosion sous contrainte. 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.



**Figure II. 08 :** Fissuration par corrosion sous contrainte.

**II.1.7.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 ...

**II.1.8.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.

➤ **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.



**Figure II. 09 :** Opération de sablage du pipe en exploitation

➤ **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.



(a) : grenailage,

(b) : sablage

**Figure II. 10** : Traitement mécanique par abrasion,**II.1.9.TRAITEMENT CHIMIQUE DE SURFACE:****➤ 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 [10].

**➤ 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 [10]. Il existe une grande variété de solutions acides utilisées pour le décapage. Citons par exemple les acides sulfuriques, chlorhydriques, sulfochromiques, phosphoriques, etc....

**➤ 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  $Al_2O_3$  [10].

**II.2. LA LUTTE CONTRE LA CORROSION:**

La corrosion est un phénomène qui dépend du matériau utilisé, de la conception de la pièce (forme, traitement, assemblage) et de l'environnement.

Le processus de corrosion peut également être ralenti en agissant sur la réaction chimique en elle-même.

**➤ La protection des métaux:**

Il existe plusieurs formes de protection contre la corrosion ; comme il est possible d'agir sur l'environnement avec lequel le matériau est en contact, sur le matériau lui-même (choix judicieux, formes adaptées, contraintes en fonction des applications,...), ou sur la surface du matériau (revêtement, peinture,

**➤ La prévention par une forme adaptée de la pièce:**

Le fait de prévoir une forme particulière pour un objet, permet de réduire, voir éliminer les risques de corrosion éventuels.

**➤ Remède au couplage galvanique:**

On sait qu'une corrosion peut naître suite à un assemblage de métaux différents, à cause de leur différence de potentiels.

Pourtant, parfois dans l'industrie, pour des raisons de conception, on est dans l'obligation d'assembler des pièces de matériaux différents, par exemple c'est le cas des branchements des abonnements (conduite en cuivre) sur les réseaux de distribution de gaz (conduite en acier). Cela conduit les concepteurs à prévoir des solutions pour éviter la dégradation du métal le moins noble en utilisant soit un joint isolant ou une pièce de rechange.

**➤ Protection par revêtements**

Parmi les différentes méthodes utilisées pour lutter contre la corrosion, la protection par revêtements métalliques. Selon leur comportement à la corrosion par rapport au substrat, on distingue deux types de revêtements métalliques :

Ceux plus nobles que le substrat, Ceux moins nobles que le substrat.

Le chrome, le nickel ou le cuivre forment des revêtements plus nobles qu'un substrat en acier, contrairement au zinc, au cadmium ou l'aluminium. Dans les deux cas, la couche forme une barrière entre le métal de base et le milieu corrosif. Par contre, la différence se remarque à partir des pores ou des défauts dans la couche de corrosion.

**➤ Protection cathodique**

La protection cathodique doit fonctionner pendant la durée de vie de l'ouvrage et maintenir la totalité de la surface exposée à l'électrolyte au delà d'un seuil d'immunité dépendant de la nature du métal. Par ailleurs le niveau de potentiel doit demeurer en deçà d'une limite pour éviter une dégradation des propriétés mécaniques (fragilisation par l'hydrogène d'un acier à haute résistance) ou du revêtement (décollement/alcalinisation).

L'analyse préalable des paramètres de l'électrolyte et de l'ouvrage est essentielle pour sa conception.

**➤ Protection anodique**

Certains métaux tels que le fer et les aciers inoxydables peuvent aussi être protégé efficacement en les plaçant en anodes et en augmentant leur potentiel dans le domaine passif de la courbe de polarisation anodique.

Le potentiel est maintenu automatiquement, à l'aide d'un appareil électronique appelé potentiostat. L'application industrielle de la protection anodique et l'emploi de potentiostat à cette fin ont été suggérés pour la première fois par Edeleanu [11]

La protection anodique a trouvé une application dans la protection des réservoirs contenant en particulier de l'acide sulfurique, mais la méthode est applicable à d'autres acides, par exemple l'acide phosphorique et aux alcalises et certaines solutions salines.

**II.3. Les Inhibiteurs:**

Un inhibiteur est « une substance qui retarde la corrosion lorsqu'elle est ajoutée à un environnement en faible concentration » est la définition retenue par la National Association of Corrosion Engineers (NACE). [12]

Un inhibiteur de corrosion doit :

- Abaisser la vitesse de corrosion du métal tout en conservant les caractéristiques physico-chimiques de ce dernier.
- Il doit être non seulement stable en présence des autres constituants du milieu, mais également ne pas influencer sur la stabilité des espèces contenues dans ce milieu.

Un inhibiteur est définitivement reconnu comme tel s'il est stable à la température d'utilisation et efficace à faible concentration. Il peut être utilisé en vue d'une protection permanente (surveillance primordiale du dispositif) ou plus couramment en vue d'une protection temporaire : durant une

période où la pièce est particulièrement sensible à la corrosion (stockage, décapage, nettoyage,...) ou encore lorsque la pièce est soumise à des usinages très sévères comme le perçage, taraudage, forage, filetage,...

### **II.3.1. Généralités sur l'utilisation des inhibiteurs de corrosion:**

D'une manière générale un inhibiteur de corrosion doit :

Abaisser la vitesse de corrosion d'un métal, sans en affecter les caractéristiques physicochimiques, en particulier la résistance mécanique, par exemple, risque de fragilisation par l'hydrogène en milieu acide

- être stable en présence des autres constituants du milieu, en particulier les oxydants,
- être stable aux températures d'utilisations,
- être efficace à faible concentration,
- être compatible avec les normes de non-toxicité,
- être peu onéreux.

Les inhibiteurs de corrosion sont utilisés dans plusieurs domaines d'applications tels que :

- le traitement des eaux (sanitaires, industrielles, de chaudières, etc.),
- l'industrie du pétrole (forage, extraction, raffinage et transport),
- la protection temporaire des métaux (décapage acide et traitement des huiles decoupe),
- l'industrie des peintures.

### **II.3.2. Les classes d'inhibiteurs:**

Il existe plusieurs possibilités de classer les inhibiteurs, celles-ci se distinguant les unes des autres de diverses manières :

- La formulation des produits (inhibiteurs organiques ou minéraux),
- Les mécanismes d'action électrochimique (inhibiteurs cathodiques, anodiques ou mixtes),
- Les mécanismes d'interface et principes d'action (adsorption et/ou formation d'un film).

### **II.3.3. NATURE DES MOLÉCULES DE L'INHIBITEUR:**

#### **➤ Les inhibiteurs organiques:**

Les molécules organiques sont promises à un développement plus que certain en termes d'inhibiteur de corrosion : leur utilisation est actuellement préférée à celle d'inhibiteurs inorganiques pour des raisons d'écotoxicité essentiellement. Les inhibiteurs organiques sont généralement constitués de sous-produits de l'industrie pétrolière [30]. Ils possèdent au moins un centre actif susceptible d'échanger des électrons avec le métal, tel l'azote, l'oxygène, le phosphore ou le soufre. Les groupes fonctionnels usuels, permettant leur fixation sur le métal, sont :

- la radicale amine (-NH<sub>2</sub>),
- le radical mercapto (-SH),
- le radical hydroxyle (-OH),

➤ **Le radical carboxyle (-COOH) l'inhibition de la corrosion par les substances naturelles:**

De nombreux inhibiteurs utilisés aujourd'hui sont soit synthétisés à partir de matières premières peu coûteuses ou proviennent de composés organiques ayant des hétéroatomes tels que l'azote, le soufre, le phosphore ou l'oxygène dans leur système aromatique ou dans leur chaîne carbonée. Cependant, la plupart de ces substances anticorrosives sont toxiques vis-à-vis des êtres humains et de l'environnement [15]. Ces inhibiteurs peuvent notamment causer des dommages temporaires ou permanents du système nerveux, mais également des perturbations du processus biochimique et du système enzymatique de notre organisme. La toxicité de ces composés se manifeste durant la synthèse ou durant leurs applications. Ces inhibiteurs n'étant pas biodégradables, ils causent également des problèmes de pollution. En conséquence, ces inconvénients ont orienté la recherche dans la direction des substances naturelles qui peuvent également offrir des propriétés inhibitrices vis-à-vis des métaux et des alliages.

Les plantes ont été reconnues comme sources de composés d'origine naturelle, avec pour certaines des structures moléculaires complexes et ayant des propriétés physiques, biologiques et chimiques variables. La plupart des composés extraits de plantes sont principalement utilisés dans les produits pharmaceutiques et les biocarburants. L'utilisation de substances naturelles est intéressante puisque celles-ci sont biodégradables, écologiques, peu onéreuses et présentent une disponibilité abondante. Ainsi, de nombreux groupes de recherche ont étudié des produits végétaux pour des applications en qualité d'inhibiteurs de corrosion pour métaux et autres alliages dans différents milieux corrosifs. Aujourd'hui, environ 4468 articles traitent des extraits naturels de plantes comme inhibiteur de corrosion.

Les inhibiteurs naturels de corrosion à travers l'histoire contemporaine

L'utilisation de substances naturelles comme inhibiteurs de corrosion remonte à 1930 lorsque des extraits de plantes (tiges séchées, feuilles et graines) de Chélidoine (*Chelidonium majus*) et d'autres plantes ont été utilisés dans un bain de décapage H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. En 1964, les tanins et leurs dérivés sont utilisés pour la protection de l'acier, du fer et d'autres outils métalliques [15].

En 1972, Marangoni et Stephanelli [16] rapportent l'utilisation des extraits de colle, de la gélatine et du son de blé pour inhiber la corrosion du fer dans les acides. Par la suite, la plupart des recherches sur l'étude de l'inhibition de la corrosion des métaux et des alliages en milieu aqueux ont favorisé l'émergence d'un grand nombre de composés organiques. Mais face à la toxicité de la

plupart d'entre eux, seule l'utilisation d'extraits de plantes communes est étudiée. En effet, les extraits de Lawsonia, de miel, d'Opuntia, de Ficus et d'huile de Jojoba ont été étudiés comme inhibiteurs de corrosion sur l'aluminium, le zinc et l'acier en milieu acide et alcalin.

En 1981, Srivastava et al. [17] ont démontré le pouvoir inhibiteur du poivre noir, des graines de ricin, de la gomme d'*Acacia* et de la lignine sur la corrosion de l'acier en milieu acide. La lignine et le poivre noir (piperine) se sont révélés être des inhibiteurs efficaces pour l'aluminium en milieu acide. Des recherches plus poussées concernant les graines de ricin, poivre noir et la lignine sur la corrosion de l'acier en solution HCl à 5% ont mis en évidence une efficacité inhibitrice à hauteur de 60-70 %.

En 1982, Saleh et al. [18] ont réalisé une étude intensive sur l'effet d'inhibition de l'extrait aqueux d'*Opuntia ficus indica*, des feuilles *Aloe eru* et d'écorces d'orange, de mangues et de grenade sur la corrosion de l'acier, l'aluminium, du zinc et du cuivre dans les milieux HCl et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en utilisant les techniques de mesure gravimétriques et de polarisation. De ces études, il a été montré que les extraits d'écorces de mangue sont les plus efficaces contre la corrosion pour l'aluminium et pour le zinc, alors que les extraits d'écorces de grenade sont beaucoup plus appropriés à la protection du cuivre. Il a également été rapporté que les extraits testés sont plus efficaces lorsqu'ils sont utilisés en milieu acide HCl qu'en milieu acide H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

En 1993, Pravinar et al. [19] ont étudié les effets d'inhibition de l'extrait aqueux des feuilles d'eucalyptus sur la corrosion de l'acier et du cuivre dans une solution d'HCl 1M. Il a été montré que l'extrait d'eucalyptus est un inhibiteur mixte de corrosion avec une efficacité d'inhibition qui croît avec l'augmentation de la concentration de l'extrait et diminue avec l'augmentation de la température.

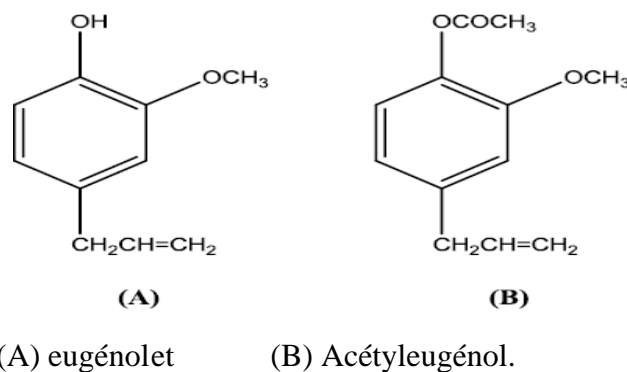
L'extrait des feuilles de Henné a également été étudié comme inhibiteur de métaux par Al-Sehaibani (2000) [19]. Les extraits aqueux de la poudre de feuilles d'Henné (*Lawsonia inermis*) ont été évalués comme inhibiteur de corrosion pour l'acier et l'aluminium en solutions neutre, acide et alcaline. Le maximum d'efficacité a été atteint seulement par 20 g/L d'extrait. L'efficacité d'inhibition dans HCl était de 96% et celle de l'aluminium dans NaOH atteignait 99,8%. Aucune inhibition n'a été observée pour l'acier et l'aluminium dans une solution de NaCl.

El-Etre (2003) a étudié l'inhibition de la corrosion de l'aluminium en utilisant l'extrait d'*Opuntia*. Il a été constaté que l'extrait agit comme un bon inhibiteur de corrosion de l'aluminium en solution HCl 2M. L'efficacité d'inhibition croît avec l'augmentation de concentration de l'extrait. L'étude montre que l'action inhibitrice de l'extrait suit l'isotherme d'adsorption de Langmuir.

Les graines de légumineuses, riches sources d'acides aminés, ont aussi été étudiées pour leur

potentielle inhibition en corrosion. Subhashini (2004) mit en évidence l'effet d'inhibition des extraits de graines d'*Alfa alfa* (Aa), d'*Adenantha pavonina* (Ap), de *Phaseolus lunatus* (Pl), de *Psophocarpus tetragonolobus* (Pt) et de *Sesbania grandiflora* (Sg) sur l'acier en milieu HCl 1M et en milieu H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,5M avec différents temps d'immersion et de concentrations. Les résultats indiquent clairement la baisse du taux de corrosion avec l'augmentation de la concentration et du temps d'immersion. Pour une même concentration, l'efficacité d'inhibition de la corrosion des extraits diminuent dans l'ordre suivant: Sg > Aa > Pt > Ap > Pl dans HCl et Pt > Aa > Pl > Sg > Aa dans H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Cependant, ces extraits ont montré, là aussi, une meilleure inhibition dans HCl que dans H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Chaieb et al. (2005), [20] ont étudié l'effet de l'eugénole et son dérivé (acétyl'eugénole) extraits du giroflier (*Eugenia caryophyllata*) sur l'inhibition de la corrosion de l'acier C21 dans une solution d'HCl 1M. L'eugénole et l'acétyl'eugénole appartiennent à une classe de composés appelés vanilloïdes et leurs structures chimiques sont présentées sur la figure II.20.



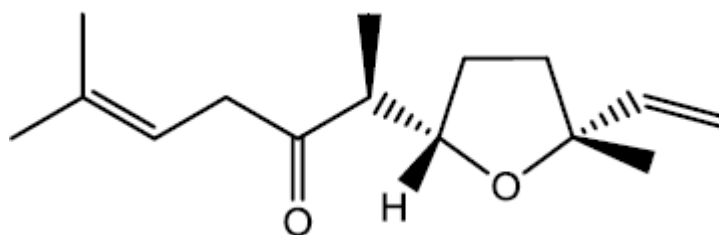
**Figure II.11 :** Structures moléculaires des substances chimiques extraites d'*Eugenia caryophyllata*

Ces composés sont connus pour avoir des propriétés anti-oxydantes et les régimes alimentaires contenant ces antioxydants peuvent réduire le risque de maladies comme le cancer. Il a été observé que ces extraits réduisent de manière significative le taux de corrosion de l'acier en milieu HCl 1M. Leurs efficacités d'inhibition augmentent avec la concentration en extrait d'eugénole et d'acétyl'eugénole avec un pourcentage d'inhibition de 80 et 91% respectivement pour une concentration de 0,173 g/L. Cette étude montre que l'acétyl'eugénole est plus actif à la surface comparativement à l'eugénole grâce à la présence du groupe carbonyle. De même, l'effet de la température a été étudié à la concentration maximale d'inhibition de 0,173 g/L d'eugénole et d'acétyl'eugénole. Les résultats ont montré que l'augmentation de la température augmente l'efficacité inhibitrice. Le taux d'inhibition passe de 64% à 298 K° à 87% à 328 K°. L'adsorption de ces extraits sur la surface métallique suit l'isotherme d'adsorption de Langmuir.

L'effet de l'extrait d'*Artemisia* (2006) sur la corrosion de l'acier en milieu H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,5M a été étudié dans la gamme de température allant de 298 à 353 K°. Les résultats obtenus révèlent que l'extrait

réduit le taux de corrosion de façon assez significative. L'efficacité d'inhibition augmente avec l'augmentation de la concentration, ainsi pour 10 g/L le taux d'inhibition observé est de 95% à

298 K° et de 99% à 353 K°. L'efficacité d'inhibition augmente également avec la température et il a été constaté que l'adsorption de l'extrait de l'Artemisia à la surface de l'acier suit également de l'isotherme de Langmuir. Des résultats similaires ont été constatés avec l'huile d'Artemisia en milieu HCl et H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> sur l'acier. L'Artemisia a reçu une attention considérable en tant que médicament prometteur et puissant antipaludéen. La davanone (figure II.12), son constituant majeur est un composédicétone, et l'action inhibitrice peut être interprétée par la formation d'un complexe.



**Figure II.12:** Structure moléculaire de la davanone extraite de l'Artemisia [21].

Oguzie (2006) [22] a étudié l'inhibition de la corrosion des extraits de feuilles de viridis Occimum de l'acier en milieu HCl 2M et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1M à 303 et 333 K°. Les résultats indiquent que les extraits inhibent le processus de corrosion aussi bien en milieu acide chlorhydrique que sulfurique et que l'efficacité d'inhibition augmente avec la concentration. Les effets synergiques obtenus par la présence des halogénures à savoir KCl, KBr, KI augmentent l'efficacité d'inhibition. Les études effectuées en fonction de la température ont révélé une diminution de l'efficacité avec l'augmentation de la température. Il a été montré que l'énergie d'activation augmente en présence de l'extrait par rapport au blanc (milieu corrosif), ce qui suppose que l'adsorption physique des espèces cationiques soit responsable du comportement d'inhibition observée.

En 2009, Satapathy et al. [23] ont étudié l'effet inhibiteur de l'extrait de *Justicia gendarussa* sur l'acier dans HCl 1M. Les résultats obtenus révèlent que l'extrait inhibe la corrosion avec un pourcentage d'inhibition de 93% pour une concentration de 150 ppm à 298 K°. Ces résultats montrent également que l'extrait de *Justicia gendarussa* agit comme inhibiteur mixte de corrosion et que son adsorption à la surface de l'acier suit l'isotherme de Langmuir

En 2011, l'effet inhibiteur de l'*Uncaria gambir* a été étudié par Hussin et Kassim en milieu HCl 1M [24]. Les résultats obtenus montrent que l'extrait d'*uncaria gambir* réduit considérablement la vitesse de corrosion de l'acier avec un pourcentage d'inhibition de 97% pour une concentration en extrait de 1000 ppm. L'effet de la température a également été étudié dans la gamme de

température allant de 303 à 333 K°, les résultats obtenus ont révélé une diminution de l'efficacité avec l'augmentation de la température.

Deng et Li [25], ont étudié en 2012 l'effet d'inhibition de l'extrait des feuilles de *Ginkgo* sur la corrosion de l'acier laminé à froid dans HCl 1 à 5M et dans H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> de 0,5 M à 2,5M. Les résultats obtenus ont montré que l'extrait de *Ginkgo* est un inhibiteur plus efficace dans HCl 1M (91%) que dans H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,5M (80%) pour une concentration en extrait de 100 mg/L. Les résultats obtenus de la polarisation linéaire montre que l'extrait agit en milieu HCl 1M comme un inhibiteur mixte de corrosion alors qu'en milieu H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,5M l'extrait agit comme un inhibiteur cathodique.

Le taux d'inhibition de corrosion rencontré dans presque tous les extraits de plantes semble être lié à la présence de constituants actifs qui améliorent la formation d'un film sur la surface métallique, réduisant ainsi la corrosion. L'analyse de la structure chimique de certains des constituants extraits de plantes révèle que toutes les molécules sont des hydrocarbures à longue chaîne portant un groupe polaire à l'une ou l'autre extrémité. Les groupes polaires contiennent des atomes d'oxygène, d'azote ou de soufre. En effet, les extraits naturels de plante sont de riches sources de composés organiques. Il a été montré qu'ils contiennent des composés chimiques tels que des terpènes, des tanins, des alcools, des polyphénols, des acides carboxyliques, des composés contenant de l'azote tels que les alcaloïdes qui peuvent présenter une activité anticorrosive des métaux. Ce qui est tout à fait en accord avec les travaux de Riggs [60], qui a montré que les paramètres structuraux pouvant influencer significativement l'efficacité des inhibiteurs organiques

- La structure géométrique ;
- La longueur de la chaîne carbonée ;
- Le type de liaison à travers la molécule ;
- Le type d'atomes et les caractéristiques des groupes moléculaires présents dans la molécule ;
- La capacité moléculaire à former une couche continue sur la surface métallique ou une liaison chimique ;
- La capacité de réagir et de former un complexe avec des atomes et des ions métalliques ou avec les produits de corrosion ;
- La force de liaison formée avec la surface métallique.

Depuis 2008, le groupe de recherche du Laboratoire des Matériaux et Molécules en Milieu Amazonien s'est particulièrement intéressé à la famille des alcaloïdes issus des extraits naturels de plantes et à leurs propriétés inhibitrices vis-à-vis des alliages métalliques.

**➤ Les inhibiteurs minéraux**

Les molécules minérales sont utilisées le plus souvent en milieu proche de la neutralité, voire en milieu alcalin, et plus rarement en milieu acide. Les produits se dissocient en solution et ce sont leurs produits de dissociation qui assurent les phénomènes d'inhibition

**II.4. LA RÉPARATION DES MÉTAUX****➤ Reparation des structures par patch en composite**

Des matériaux composites sont employés dans le but de la réparation et le renforcement des pipelines de transport de gaz ; dans ces dix dernières années. Des compagnies d'exploitation de pipelines, des organisations pour la recherche, et des concepteurs ; ce sont des facteurs qui ont accompagné ce type de réparation menés par un choix illimité d'analyse et de programmes d'essais.

Pour réparer le phénomène de corrosion, les matériaux composites sont utilisés avec succès pour réparer des entailles, des courbures, des coudes et des canalisations offshore. Actuellement, la majorité des compagnies d'exploitation de pipelines ; emploient les matériaux composites dans les programmes de réhabilitation et de réparation. Cependant, l'origine de l'utilisation des matériaux composites était de pouvoir réparer les canalisations corrodées, dont le but de rétablir la force à la section endommagée de la canalisation.

Au cours des quinze dernières années, les matériaux composites en fibres de verre sont utilisés dans le renforcement des pipelines, la réparation des corrosions et des endommagements mécaniques des pipelines on shore où la charge primaire est la pression interne [26]. La maîtrise des techniques de réparation dans les pipes offshore telles que des canalisations verticales nécessite, de pression, une compréhension complète des profils complexes de charge, de tension, de recourbement, interne et externe significative.

«Développement des matériaux de fibres de verre pour le service de pipeline du gaz naturel» était le rapport final préparé par l'institut de technologie du gaz pour l'évaluation du système de réparation. La réalisation de ce document était durant la période de janvier 1987 à mars 1994 ; puis il a été élargi vers la réparation des dommages mécaniques. Le démarrage du système Armor Plate Pipe Rap était en 1997. [27-28-29]. Ce système utilise un matériau de fibres de verre imprégné à matrice d'époxyde pour pouvoir résister à des conditions d'environnements particulières, y compris des applications sous-marines, des températures élevées et le temps froid.

L'augmentation de nombre de fabricants qui s'intéressent à cette technologie de réparation s'est marquée quand l'édition 2000 de l'Office of Pipeline Safety (OPS) a été publiée, par conséquent,

l'élargissement de l'utilisation matériaux composites était considérable.

En 2000, on assiste au début du programme d'évaluation des possibilités de Perma-Wrap, qui est un système semblable au ressort d'horloge puisqu'il utilise une coque dure avec un adhésif installé entre les couches [84-85]. Plus tard, Black-Diamond Composite Wrap est développé. Bien que semblable en nature à Armor plate's Pipe Wrap, l'avantage de ce système est d'utiliser les fibres de carbone, qui ont en moyenne un module élastique qui est de l'ordre de deux fois le module élastique de la fibre de verre. D'autres travaux ont continué à développer des produits de réparation par matériaux composites.

Des chercheurs ont travaillé sur des polymères renforcés par des fibres (PRF) pour réparer et la réhabiliter des pipelines. Ils ont développé un modèle théorique avec des expressions de contraintes et des courbes circulaires des contraintes. Cette étude s'est concentrée sur l'application du polymère renforcé par des fibres sur les pipes en acier.

L'établissement d'une position forte par les Composites de Polymère Renforcés par des Fibres (CPRF), comme efficace pour la réparation et la réhabilitation de l'infrastructure. L'utilisation de PRF dans la réparation et la réhabilitation des pipelines est un nouveau concept qui a le potentiel d'améliorer la manière que nous empruntons pour réparer des canalisations.

➤ **Conception de système de réparation en matériau composite:**

Les conditions des conceptions structurales fondamentales de la réparation en composite guidant effectivement l'architecture du matériau composite et les options géométriques sont énumérées comme :

Prévention du gonflement de la section corrodée du pipeline pendant la pressurisation.

Assurance un renforcement suffisant de sorte que les moments de flexion et d'autres charges demeurent inférieurs aux valeurs permises.

Maintenance d'une bonne adhérence entre les interfaces dans la zone de réparation.



**Figure II.13:** (a) Installation de la moitié de la coquille du composite en carbone, (b) réparation finale

D'autre part, il ya des conditions secondaires pour faciliter l'installation ; la viabilité économique, le contrôle de qualité aussi bien que l'intégrité structurale pendant l'installation, la résistance aux chocs et l'absence de la corrosion galvanique.

➤ **Performance des matériaux composites à long terme**

Concernant l'efficacité à long terme de la performance d'utilisation des matériaux composites, on trouve une question souvent posée sur ça. L'utilisation de ces matériaux dans l'industrie aéronautique était avec succès, Pendant des décennies. Or, la différence essentielle est le mode de chargement.

Quand un patch en composite est collé sur la surface extérieure d'un pipeline, la réparation est sous le même chargement en pression que le pipeline. Pour cette raison, les réparations sont typiquement conçues pour prédétermination de conception. Ceci est réalisé en optimisant les épaisseurs et les rigidités des patches composites.

L'effet des charges cycliques de pression sur la performance d'une réparation en composite est tout à fait important en travaillant sa rigidité. La réalisation de nombreuses études a été faite concernant l'amorçage et la propagation des dommages pendant la fatigue du matériau composite.

Quoique la performance à long terme des composites comportant des dégradations physiques et chimiques, soit de grande importance dans les applications de canalisation, les données reflétant les conditions environnementales appropriées sont encore modérées.

En présentant deux parties importantes de l'étude de la performance à long terme des matériaux composites:

L'emploi des matériaux composites pour la réparation des corrosions significatives. La plupart des constructeurs déclarent qu'ils peuvent réparer des profondeurs de corrosion jusqu'à 80%. Bien qu'il n'y ait aucun doute que la plupart des matériaux composites peuvent être utilisés dans les réparations de profondeurs de corrosion de cette grandeur sous chargement cyclique, les confirmations dans la littérature restent.

L'entreprise d'un programme de recherche pour pouvoir évaluer la performance des échantillons des pipelines enterrés ayant simulé la réparation de corrosion par les matériaux composites.

Les résultats des deux programmes permettant pas de comprendre quelles limitations existent concernant la performance à long terme des réparations en matériaux composites des pipelines usés. Pour estimer la durée de vie d'une réparation utilisant des données réelles durant toute la vie d'une canalisation sous pression cyclique ; une méthodologie est présentée pour atteindre ce but. Pour effectuer ce calcul, il faut des composants nécessaires qui sont : un nombre de cycles à la rupture

déterminé expérimentalement et une durée de vie de la canalisation sous pression cyclique.

Afin d'enrichir le domaine de l'expérience, l'état du département des transports de la californie (CALTRANS) a effectué des essais pour évaluer la performance à long terme des matériaux composites pour des applications d'infrastructure telles que les colonnes de pont en routes , Ce rapport fournit des données sur les effets de l'exposition environnementale, sur les propriétés mécaniques et physiques de réparation de carbone/époxyde et en verre/époxyde soumis à 10.000 h dans l'eau salée, la chaleur sèche au 60 °C et les conditions humidité-chaleur à 38°C.

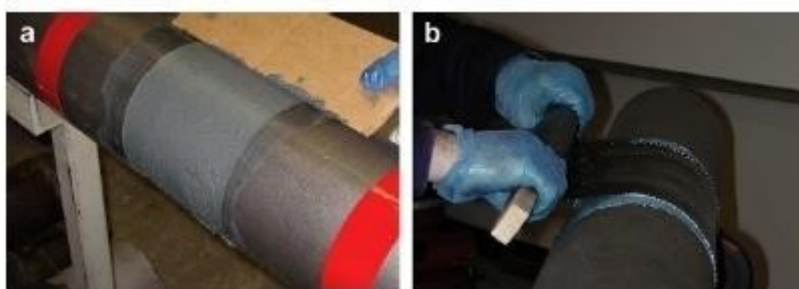
➤ **Système de réparation hors circuit de pipeline en matériau composite en carbone:**

L'analyse montre que les systèmes de réparation en matériaux composites sont, en moyenne, 24% moins coûteuses que les réparations soudées et 73% que le remplacement complet de la section endommagée du pipeline. Les systèmes de réparation en matériaux composites provoquent aussi le ralentissement de la croissance externe de corrosion en limitant les dommages de l'environnement mais la canalisation reste en service. De plus, ils sont devenus rentables dans la réparation des autres tuyauteries endommagées telles que les lignes d'égout corrodées, les réserves municipales en eau, la tuyauterie et la canalisation de traitement. Fréquemment, la base des matériaux composites utilisée est ; des fibres de verre, d'aramide ou de carbone.

Des recherches effectuées par [29] ont prouvé que les matériaux composites renforcés en fibres de carbone, sont plus performants que ceux renforcés avec des fibres en verre ou d'aramide car ils améliorent la capacité de la pression interne ultime des pipes, augmentant de manière significative la force, la durabilité, et les propriétés non-corrosives du système.

Pour l'évaluation de l'efficacité d'un système donné de réparation, il est courant de réaliser un défaut dans un spécimen de pipe, puis de procéder à la réparation de la région endommagée, puis d'appliquer une pression monotone jusqu'à ce que la défaillance se produise. Il est à noter que, la taille et la forme de la région du défaut peuvent avoir un effet significatif sur la qualité de réparation réalisée.

Trouvant d'autres recherches qui ont étudié la réparation d'un pipeline après avoir créé un défaut et le traitement de surface puis l'application du patch composite. Mélangeant d'abord, deux adhésifs selon des méthodes appropriées ; qui servent ensuite servis à remplir le défaut, Le tissu de carbone a été imprégné de pré-polymère mélangé d'époxyde/amine de basse viscosité utilisant un rouleau d'adhésif. Après que le tissu ait été correctement saturé, il a été enroulé autour du pipeline et un autre adhésif frais a été appliqué en utilisant la tension des mains pour tirer le tissu humide tout en gardant la ligne centrale de l'enveloppe au centre du défaut.



**Figure II.14:**Processus de réparation extérieure d'une pipe utilisant remplissage et enveloppe souple

Ce procédé d'application est montré sur la figure II.14 Pendant que l'enveloppe est appliquée, les bulles d'air sont évacuées de force à l'aide de la pression des mains. Un total de six couches d'enveloppe de carbone/époxyde ont été employées pour couvrir le pipeline, donnant à la réparation (à l'exclusion du mastic époxyde) une épaisseur de 3.1 millimètres.

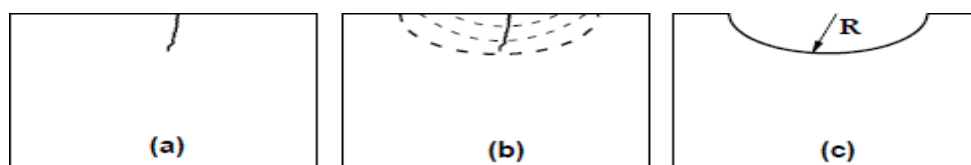
Enfin, le système est mis en traitement de 24 heures dans un environnement de température ambiante, avant le commencement de l'essai Le test de rupture consiste à appliquer une pression d'eau verticale sur la réparation pour s'assurer que le système est étanche. La réalisation de l'essai était avec une pression d'air par unité d'énergie hydraulique employée dans la pipe. La pompe hydraulique a été reliée au pipeline et un capteur a été utilisé pour l'enregistrement de la pression dans la ligne. La pompe projette l'eau dans le récipient à pression jusqu'à ce que la rupture se produise. La pression interne exigée pour endommager le pipeline est enregistrée.

➤ **Autres Méthodes de réparations des structures métalliques**

Il est bien connu que la singularité en pointe de défaut (fissure, entaille) contribue à accentuer sa progression. Ce qui tend à réduire la durée de vie des structures endommagées. Une des techniques les plus répandues permettant de réparer les effets néfastes d'un défaut, consiste à éliminer cette singularité par enlèvement de matière [30-31]. Trouvant dans ce cas le moulage et le perçage au voisinage du défaut.

➤ **Méthode de meulage**

Cette technique de réparation se base sur le principe d'élimination des défauts par enlèvement de matière figure II.24. Permettant ainsi d'éliminer la singularité créée par le front de la fissure.



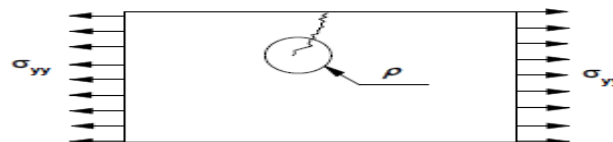
**Figure II.15:** Méthode de meulage, (a) défaut de fissure, (b) réparation par meulage, (c) structure après réparation

C'est une technique très simple nécessitant des moyennes moins couteuses. Le meulage peut donner de bons résultats en termes de durée de vie des structures réparées. Cependant, Cette technique peut fragiliser la structure du fait de la diminution localisée de la section. Cela exige une vérification par calculs de la tenue mécanique de telles structures après réparation.

Elle est souvent recommandée dans le cas des réparations des fissures dans des structures épaisses (appareils à pression, rails, ...) [31]. Elle est aussi utilisée comme technique de parachèvement dans le cas des joints soudés en vue de permettre l'extension de leur durée de vie.

➤ **Méthodes de perçages**

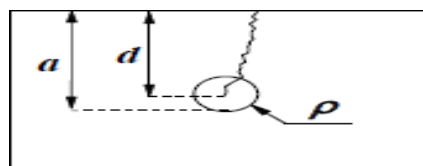
Le perçage d'un trou en fond d'une fissure permet un arrêt temporaire de la propagation de la fissure. Cette méthode est basée sur la modification géométrique en fond de la fissure. C'est une méthode largement répandue pour la réparation des structures métalliques endommagées [32]. Son but est d'augmenter la durée de vie ce qui entraîne une réduction de la contrainte maximale. Cette technique a plusieurs avantages ; elle est simple à réaliser, reproductible et utilisable pour des structures qui ne sont accessibles que dans d'un seul coté. Permettant de garder la structure en service en attendant un éventuel changement de la pièce endommagée. L'amorçage de la fissure est retardé par le perçage du trou et la durée de vie augmente avec l'accroissement du diamètre du trou. Le perçage d'un ou plusieurs trous autour du défaut est une autre méthode proposée par plusieurs chercheurs pour réparer la structure fissurée



**Figure II.16 :** Perçage au fond de la fissure.

Le retard de propagation de la fissure est causé par le processus de réparation. Car le facteur de concentration de contrainte a été réduit par un plus grand rayon de trou, mais il faut cependant faire attention à la diminution de la section du ligament restant.

Dans d'autres études, propose une approximation pour le facteur de concentration de contrainte. Pour un trou percé en fond d'une fissure



**Figure II.17:** Dimensions géométrique de la fissure et trou de réparation.

Avec  $d$  est longueur initiale de la fissure,  $\rho$  est rayon du trou percé,  $a=d+\rho$  est longueur de la fissure après perçage

Dans ce chapitre, nous avons évoqué les problèmes de pipelines installés pour accéder aux nouvelles sources, et transporter des volumes croissants de produit pétroliers. Les causes des défaillances des gazoducs sont de diverses natures et peuvent se manifester par une rupture ou par une fuite. Depuis les années 40, des milliers d'accidents mortels sont survenus.

Nous avons cité que les sources de contraintes, les plus importantes, sont dues à la pression de service, aux efforts secondaires induits par les mouvements des sols et aux intensificateurs locaux de contraintes à la surface de la conduite (toute irrégularité à la surface de la conduite). L'industrie et les chercheurs ont encore cette méconnaissance des effets d'autres paramètres qui influent brusquement sur les gazoducs : accidents de réparations, chutes brusques d'objets sans couvertures et plus généralement travaux extérieurs. Plus de 50% des ruptures sont causées par des "agressions extérieures", notamment la corrosion qui est omniprésente.

La réparation par collage d'un patch composite ou l'utilisation des inhibiteurs bios sont aujourd'hui employées pour la résolution des problèmes industriels liés aux pipelines. Cette technique de réparation nous semble la plus prometteuse pour résoudre rapidement et à moindre coût les dommages de canalisation.

# Chapitre III

## Partie

# Expérimentale

### III.1. But du travail :

Le but de notre travail consiste à déterminer le phénomène de la corrosion du pipe line OB1 24''/22'', Région transport centre – Bejaïa, dans la localité de Bohmadou, APC Souamaa. W. de M'sila

Lorsque les phénomènes de corrosion sont plus complexes, donc nécessite l'utilisation d'un très grand nombre de méthodes expérimentales pour estimer le taux de corrosion et estimer l'action des inhibiteurs utilisés dans l'étude d'autre part.

Nous avons commencer notre étude expérimentale par l'analyse physico-chimique d'un lot de sable prélevé de la zone de Bouhmadou – M'sila Figure III.01:



**Figure III.01** : localité Bouhmadou APC Souamaa W.de M'sila

Les testes physico-chimique effectuer sur le lot de sable au laboratoire de Biochimie – Faculté de science – M'sila - en utilisant Lida instrument, ce dispositif nous permis de faire les testes suivants :

- Teste de salinité
- Teste de TDS (Total Dissolved Solids)
- Teste de conductivité électrique
- Teste de PH

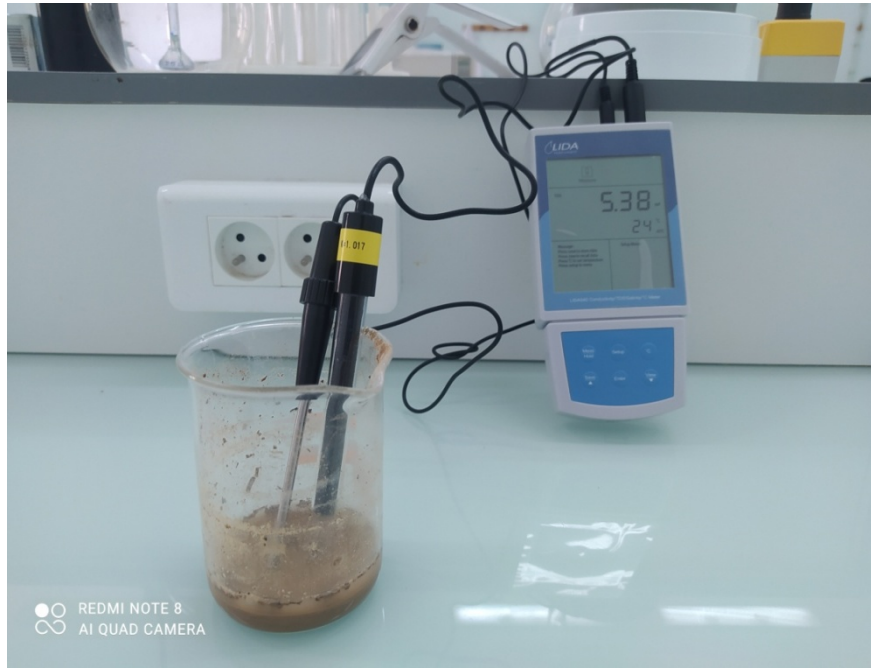


Figure III.02: Analyse de sol par Lida instrument

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

Salinité de Sol	TDS	Conductivité	PH
34 %	5.38 PPT	4.14 ms	8
<b>La température : entre -10 la nuit a + 45 le jour, soit un gradient de 55°C</b>			

Tableau III.01 : Fiche d'analyse de sol

### III.2. Composition chimique de l'acier XC52 :

L'analyse chimique fut effectuée au niveau de l'entreprise SONELGAZ MEI de M'sila sur un thermoscientific Niton XL3t, voir figure III.03.

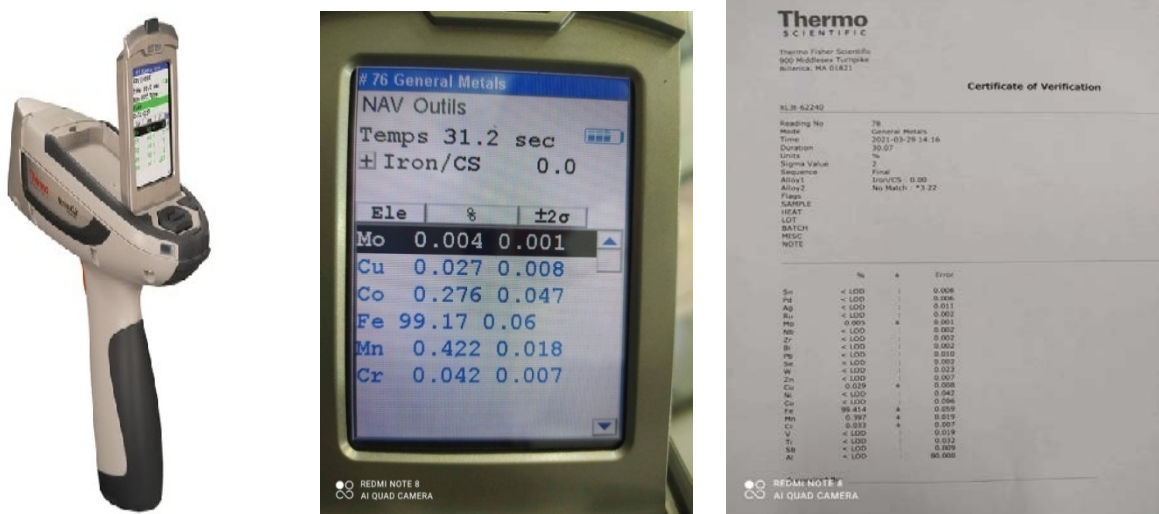


Figure III.03: L'analyse par le dispositif thermoscientific Niton XL3t

L'analyse de la composition chimique de la nuance d'acier dans laquelle est fabriquée le pipe de canalisation qui se trouve au niveau de la zone de Bouhmadou est donnée dans le tableau suivant :

<b>Elé.</b>	<b>Sn</b>	<b>Pd</b>	<b>Ag</b>	<b>Ru</b>	<b>Mo</b>	<b>Nb</b>	<b>Zr</b>	<b>Bi</b>	<b>Pb</b>	<b>Se</b>	<b>W</b>
%	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	0.004	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
<b>Elé.</b>	<b>Cu</b>	<b>Ni</b>	<b>Co</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>	<b>V</b>	<b>Ti</b>	<b>Sb</b>	<b>Al</b>	<b>/</b>
%	0.027	< LOD	0.276	99.017	0.422	0.042	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	/

**Tableau III.02 :** Fiche de comportement de l'acier XC 52

L'importance de la composition chimique apparaît par son influence sur la soudabilité, les caractéristiques mécaniques ainsi que la résistance à la corrosion. Il est donc indispensable de toujours vérifier ce paramètre afin de satisfaire toutes les exigences moyennant un compromis entre les différentes contraintes.

### III.3. Nuance et provenance de l'acier X52

La nuance d'acier étudié porte plusieurs désignations rattachées aux normes correspondantes, tableau III-2 [36]

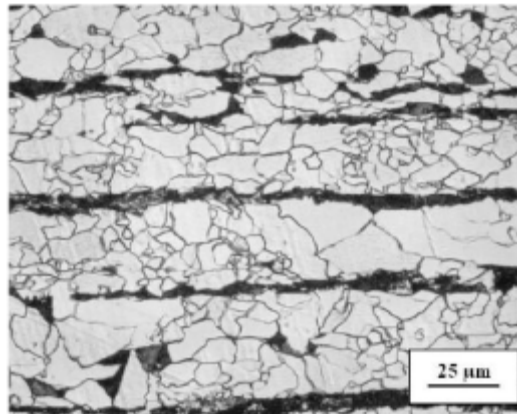
<b>Norme</b>	<b>Nuance</b>
American Petroleum Institute (API5L)	X52
DIN 1629	St 52.0 1.0421
EN 10208-2	L360 NB
NF A49-401	TS E360

**Tableau III-3 :** Nuances de l'acier X52 dans différentes normes.

C'est un acier pour Oléoduc, transporté le Pétrole Brut de Haoud el Hamra vers Béjaia, sous forme d'un pipe de diamètre extérieur 60.96 mm (24''), d'épaisseur 08 mm. Il a été mis en service dans les années 50 à ce jour, et représente correctement l'état des conduites en acier XC 52, du réseau existant.

### III.4. Microstructure de l'acier X52 :

La microstructure observée est typique de celles rencontrées dans les aciers pour oléoducs. Elle est constituée de ferrite et de perlite, figure III-4. Des observations effectuées dans divers plans et à différents niveaux de la tôle montrent que la microstructure est relativement homogène se présentant sous forme de bandes de perlite parallèles au plan de laminage. De plus, quelques ségrégations locales sont observées dispersées. Les grains de ferrite sont équiaxes (légèrement orientés dans la direction de laminage), leur taille est dans une plage de 7 à 15  $\mu$ m.



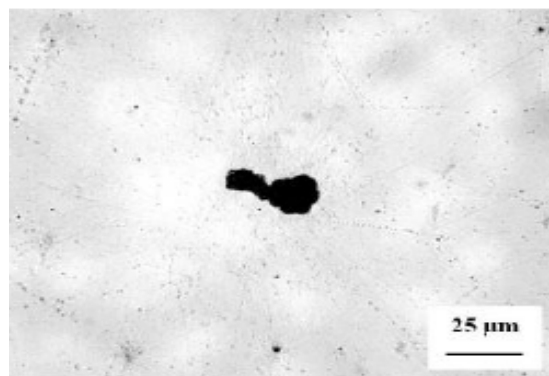
**Figure III-4** : Microstructure de l'acier X52 dans l'état brut de livraison (nommé **AR**) [36].

Dans la microstructure fine, baignent des inclusions de seconde phase :

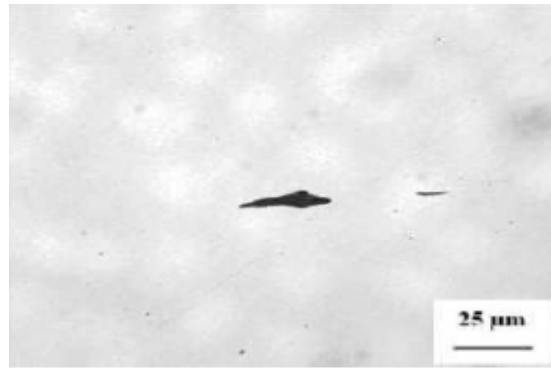
- Les plus grosses d'entre elles sont dites « particules primaires », essentiellement d'oxydes, figure III-5 et de sulfures, figure III-6. Ces inclusions constituent les sites privilégiés d'amorçage de cavités lors de la déchirure ductile (germination de cavités) d'où leur influence directe sur la ténacité du matériau [33].
- Les particules « secondaires », considérées comme partie de la microstructure fine, résultent de la combinaison d'éléments d'addition introduits dans le but d'obtenir des propriétés mécaniques ou physiques données [34]. Les seules particules secondaires observées sont celles des carbures  $Fe_3C$  (ou cémentite), figure III-7. Les carbures  $Fe_3C$  ainsi que la perlite (elle-même composée de lamelles de cémentite et de ferrite, figure III 8) se forment quasi simultanément à partir du mélange eutectoïde pendant le refroidissement.

#### **Les observations des zones du cordon de soudure :**

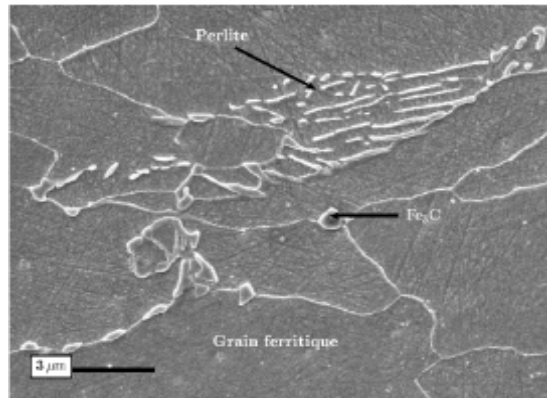
D'autres observations effectuées à l'aide de microscope à balayage électronique pour différents prélèvements sur le pipeline, notamment dans la zone du soudage longitudinal, montrent deux microstructures localement spécifiques :



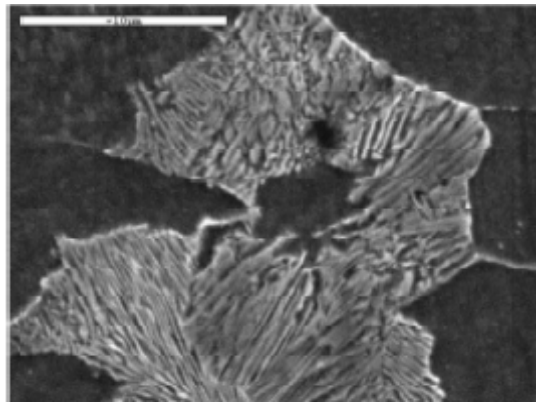
**Figure III-5** : Inclusions d'oxydes dans l'acier X52 (AR).



**Figure III-6** : Inclusions de sulfure de manganèse dans l'acier X52 (AR).

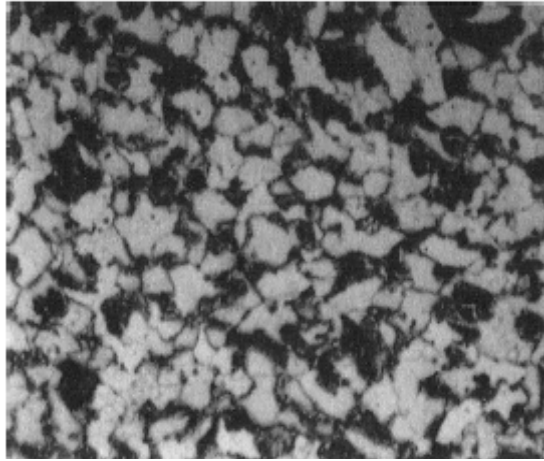


**Figure III-7** : Observation au MEB des particules de cémentite  $Fe_3C$  dans la perlite et aux joints de grains ferritiques [35].



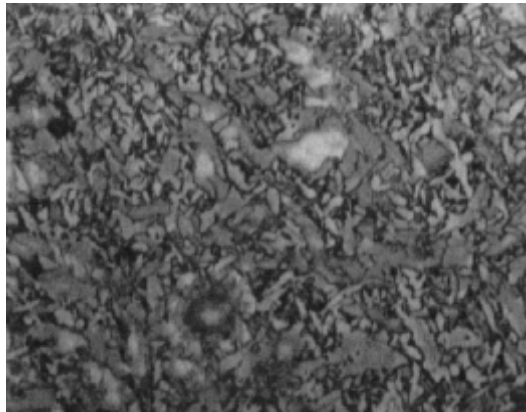
**Figure III-8** : Grains de ferrite et perlite lamellaire (AR), MEB [2].

- Pour la zone affectée par la température (ZAT), on retrouve la même microstructure du métal de base avec disparition progressive des orientations due à l'échauffement subit par cette zone, figure III.9



**Figure III-09** : Analyse micrographique (ZAT).

- Pour le Cordon de soudure, on retrouve une microstructure martensitique formée à l'état liquide lors du soudage entre les éléments chimiques des bords du métal de base et ceux du métal d'apport, figure III-10.



**Figure III-10** : Analyse micrographique (Cordon).

### **III.5. Préparation des milieux corrosifs :**

L'immersion des éprouvettes dans deux (02) solutions corrosives bien choisies qui sont similaires au milieu agressif de la localité de Bouhmadou- M'sila ainsi que l'étude de leurs effets sur la microstructure et les propriétés mécaniques pendant une durée de Dix (10) jours :

Les solutions choisies sont tirées d'une longue recherche bibliographique afin de reproduire le milieu corrosif similaire étaient :

- $H_2SO_4$  20% obtenue à partir de dilution d'acide sulfurique commercial par l'eau distillée.
- Eau de mer avec une salinité de 3.5%

### III.6. Préparation des éprouvettes :

Les essais de traction sont réalisés sur des éprouvettes, plates de sections rectangulaires, prélevées dans la direction longitudinale (L),

Les échantillons d'acier sous formes rectangle de dimensions 300mm X 10mm X 8mm sont préparés, avant immersion dans les solutions, par le sablage, il se fait par projection d'une poudre abrasive à grande vitesse (06 bar), 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 et ensuite par le polissage au papier abrasif au carbure de silicium de granulométrie décroissante allant jusqu'au grain 1200. Ces échantillons sont ensuite rincés à l'eau distillée et séchés à l'air ambiant avant utilisation. Afin que celles-ci soient leurs plans lissent et uniforme. Ce traitement doit être avant tout les essais électrochimiques.

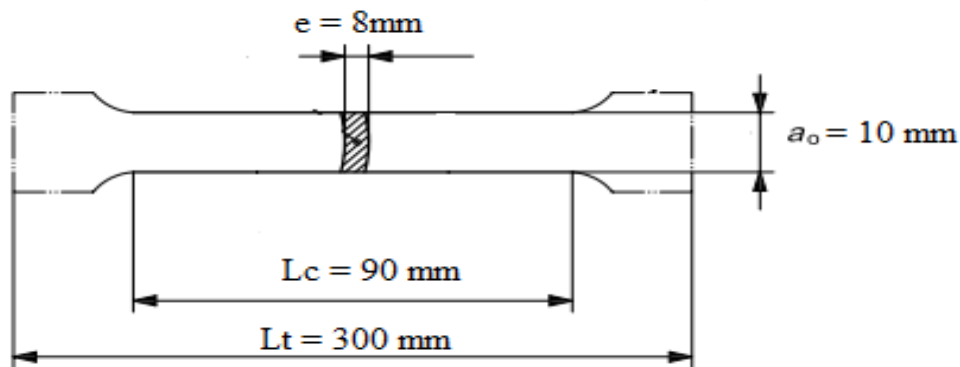


Figure III.11: Dimensions éprouvette



Figure III.12: Sableuse de pression 06 bar    Figure III.13: Échelle de pesée des échantillons, précise 0.001 g



**Figure III.14:** Eprouvettes avant le traitement chimique



**Figure III.15 :** Après le traitement avec H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 20%



**Figure III.16:** Après le traitement avec l'eau de mer



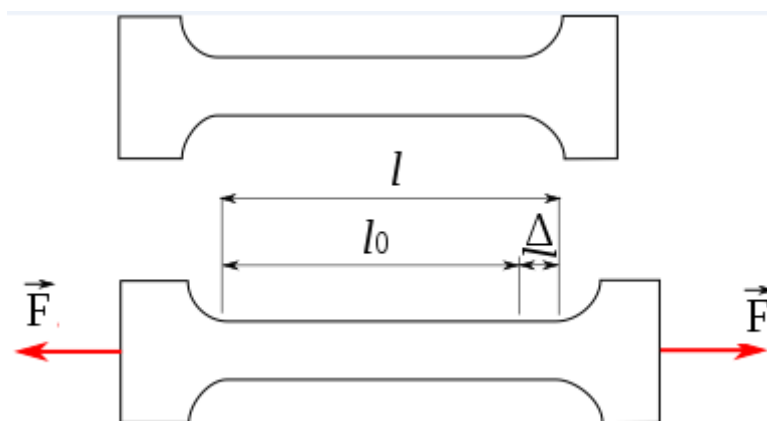
**Figure III.17 :** Aucun traitement

N°	01	02	03	04	05	06
Longueur en mm	90	8.9	90	90	90	90
Largeur (a) en mm	09	9.2	9.8	9.9	10	10
Epaisseur en mm	7.4	7.1	7.9	7.9	8	8
Poids en (g)	294.825	293.455	320.97	322.548	325.281	326.564

Tableau III.05: Dimensions et poids des éprouvettes après le traitement chimique

### III.7. Essai de traction :

L'essai de traction a une grande importance dans les essais mécaniques. Une barre travaille à la traction quand elle est soumise à l'action de deux forces égales et directement opposées qui tendent à l'allonger



L'essai de traction est destiné surtout pour l'examen de la tenue des matériaux soumis à l'action de contraintes de traction axiales réparties uniformément sur toute la section de l'éprouvette. L'essai se fait sur des éprouvettes standardisées sur une machine d'essai de traction. Les éprouvettes sont solidement maintenues entre les mâchoires (dispositif de fixation) de la machine et sont soumises à l'action d'une charge (éloignement des mâchoires l'une de l'autre) jusqu'à un allongement provoquant la rupture. La machine peut être munie d'un enregistreur pouvant donner instantanément les valeurs de l'effort de traction et l'allongement correspondant ou encore la dépendance entre la contrainte de traction et l'allongement correspondant ou encore la dépendance entre la contrainte de traction et l'allongement.

#### ➤ Machine de l'essai :

Une machine de traction moderne dispose d'un entraînement électrique réglable pour effectuer des essais simples ou cycliques à vitesse contrôlée. Elle doit être équipée de capteurs de force et d'allongement, ainsi que d'un système de démarrage. Grâce au micro-ordinateur, le contrôle de

l'essai et l'acquisition des données sont devenus très simples. Des capteurs combinés avec des cartes d'acquisition de données, gérés par des logiciels hautement polyvalents, permettent de contrôler des machines pouvant développer des forces de 50 KN, à l'aide de quelques touches. La machine de traction doit être illustrée dans la figure III.13.



**Figure III.18 :** Machine de traction MTS Criterion Model 45.

### **III.8. Conditions expérimentales / Bancs d'essais :**

Les éprouvettes sont sollicitées en traction monotone sur une machine d'essais universelle type MTS Criterion Model 45 figure (III.14) dotée d'un capteur de force et pilotée par ordinateur. La force appliquée sur l'éprouvette est 5000 N. Cinq essais au moins sont réalisés pour chaque type d'éprouvette, avec une vitesse d'essai de 5 mm/min.



**Figure III.19:** Machine de traction MTS Criterion Model 45.

### III.9. Essai de dureté :

L'essai de dureté est un outil essentiel de discrimination des matériaux et d'analyse, de développement et d'amélioration des matériaux et des technologies dans le cadre de la recherche fondamentale (science des matériaux, techniques des matériaux, diagnostic des matériaux).

Il permet de collecter des valeurs caractéristiques (valeurs de dureté) qui sont d'une importance décisive pour l'application des matériaux dans l'industrie (aptitude d'un matériau pour un composant technique), pour leur réception dans le cadre de contrôles d'assurance qualité (inspection en entrée et en sortie), pour la discrimination des matériaux (par exemple dans le cas de confusion entre matériaux) et pour la clarification en cas de sinistres (analyse des dommages).



**Figure III.20:** Duromètre QNess – Qpix T2

# **Chapitre III :**

# **Résultats**

# **Expérimentaux des**

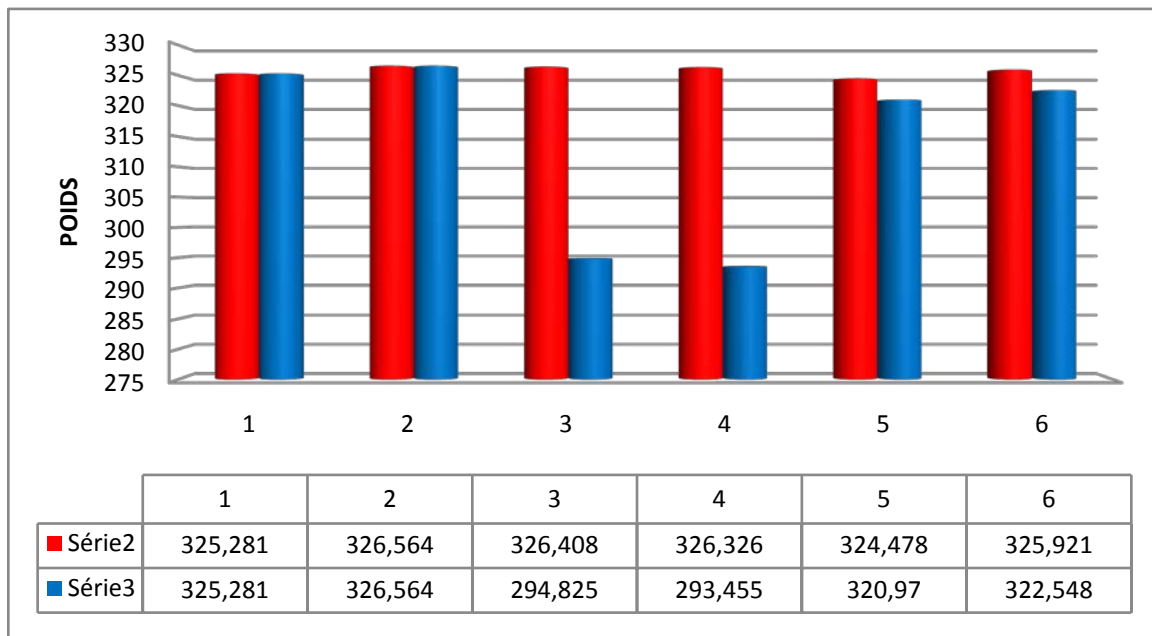
# **Essais**

**III.1. Teste perde de masse poids en (g):**

	Aucun traitement		H2SO4		Eau de Mer	
N°	1	2	3	4	5	6
<b>Poids Brut</b>	325,281	326,564	326,408	326,326	324,478	325,921
<b>Après traitement (10 jours)</b>	325,281	326,564	294,825	293,455	320,97	322,548

**Tableau III.01:** Poids des échantillons avant le traitement chimique

En remarque le poids de l'éprouvette traité au milieu acide H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> à perdue plus de matière que celui traité à l'eau de mer (32.871 g)



**Figure III.01:** Graphique représentant la perte de masse

**III.2. Résultats expérimentaux de l'essai de la dureté:**

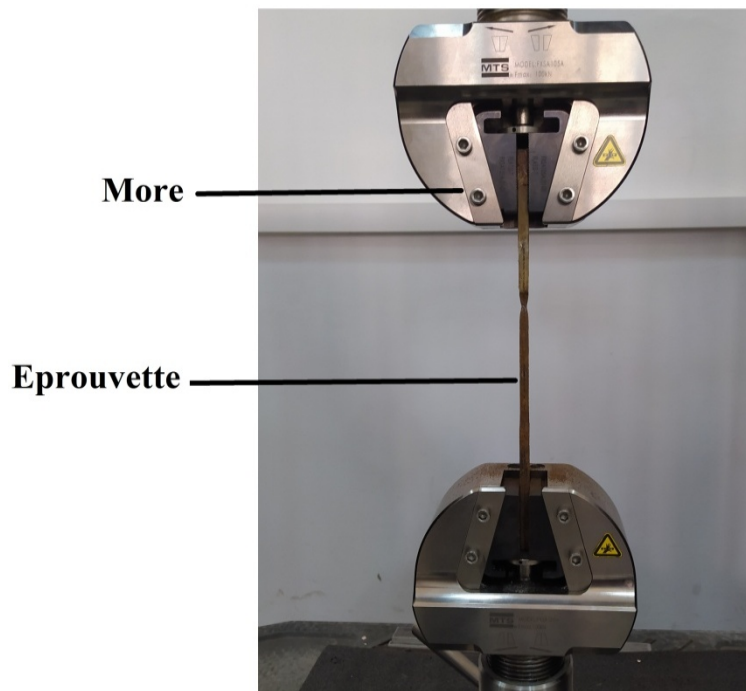
Nous avons réalisées des essais de dureté avec un duromètre de marque QNess – Qpix T2, universel étalonné et certifié, au laboratoire de la Mécanique optique (Sétif), la dureté dans l'état brut est de 251 HV; 198 Hv pour l'éprouvette traitée par H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, et 223 Hv pour l'éprouvette traitée par l'eau de mer, avec des charges de 10 N



**Figure III.02:** Essai de dureté

### **III.3. Les étapes suivantes sont nécessaires pour la réalisation de l'essai :**

Placer l'éprouvette entre les mores de la machine



**Figure III.03:** Emplacement de l'éprouvette.

- Serrer les mores.
- Introduire les données relatives de l'éprouvette à tester.
- Introduire les conditions de l'expérience (vitesse)
- Introduire les données relatives de l'éprouvette à tester (largeur, l'épaisseur de l'éprouvette et la distance entre les mores).

- Démarrer la machine et attendre jusqu'à la rupture :



**Figure III.04:** Rupture de l'éprouvette 01.

- Attendre l'affichage des résultats sur le micro ordinateur :



**Figure III.05:** Rupture de l'éprouvette 02.

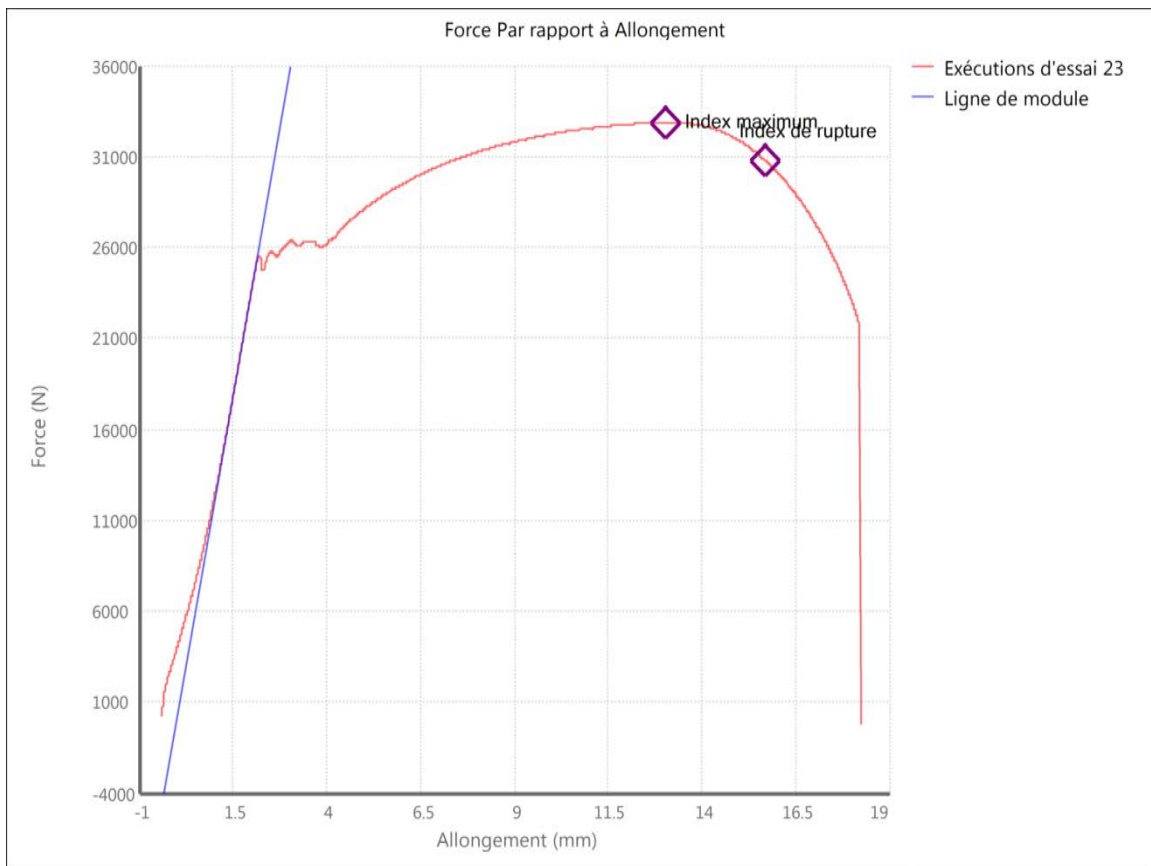
Les figures (III.04, III.05) donnent l'évolution de la charge appliquée en fonction de l'allongement des éprouvettes prise pour la même longueur de référence  $L_0$ , configurations, dans le cas des essais statiques, sollicités en traction. Dans le cas des trois types de traitement, le comportement en traction est similaire et peut se décomposer en 3 phases principales, à savoir:

● **La première phase aucune traitement (premier éprouvette):**

- Pic de contrainte : 400.3 MPa
- Force maximale : 33.860 KN
- Déformation à la rupture : 8.841 %



**Figure III.06 : Echantillon N° 01 après la traction**



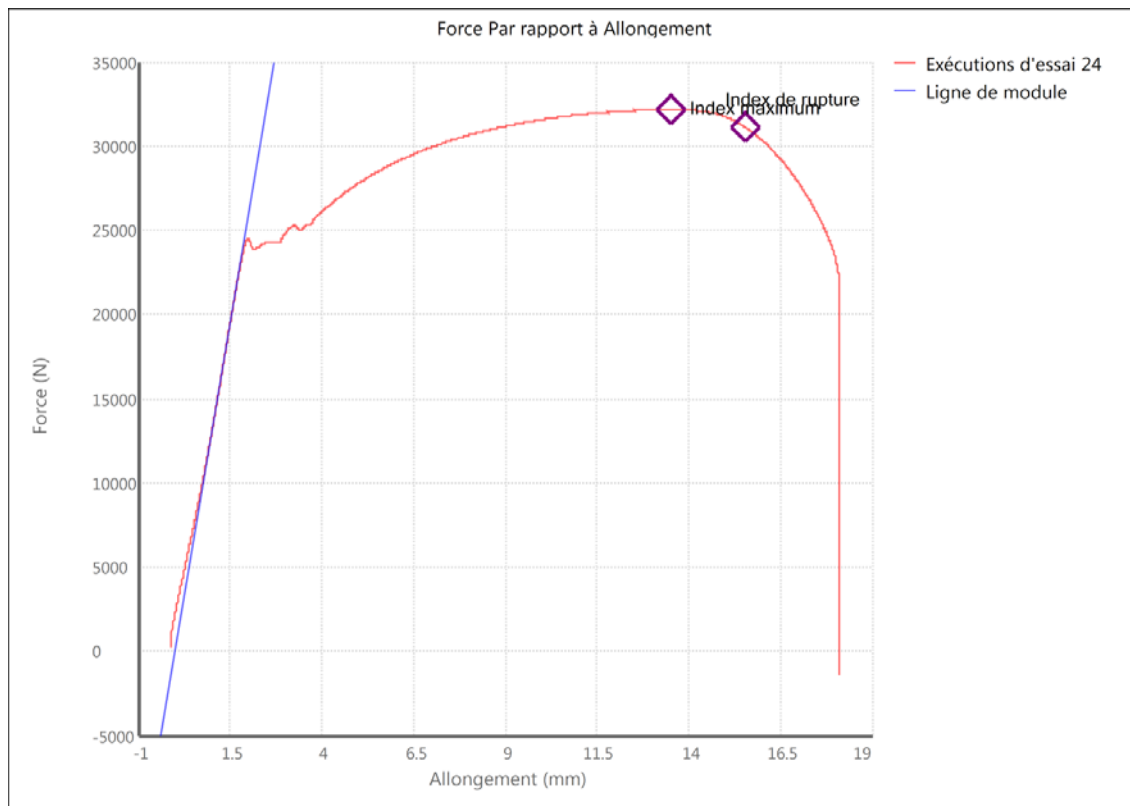
**Figure III.07 : Graphe N° 05**

● **La première phase aucune traitement (deuxième éprouvette):**

- Pic de contrainte : 395.9 MPa
- Force maximale : 33.162 KN
- Déformation à la rupture : 8.780 %



**Figure III.08 : Eprouvette N° 02 après la traction**



**Figure III.09 : Graphe N° 06**

- **La deuxième phase traitement avec H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 20% (premier éprouvette):**
  - Pic de contrainte : 370.3 MPa
  - Force maximale : 33.860 KN
  - Déformation à la rupture : 8.780 %



Figure III.10 : Eprouvette N° 03 après la traction

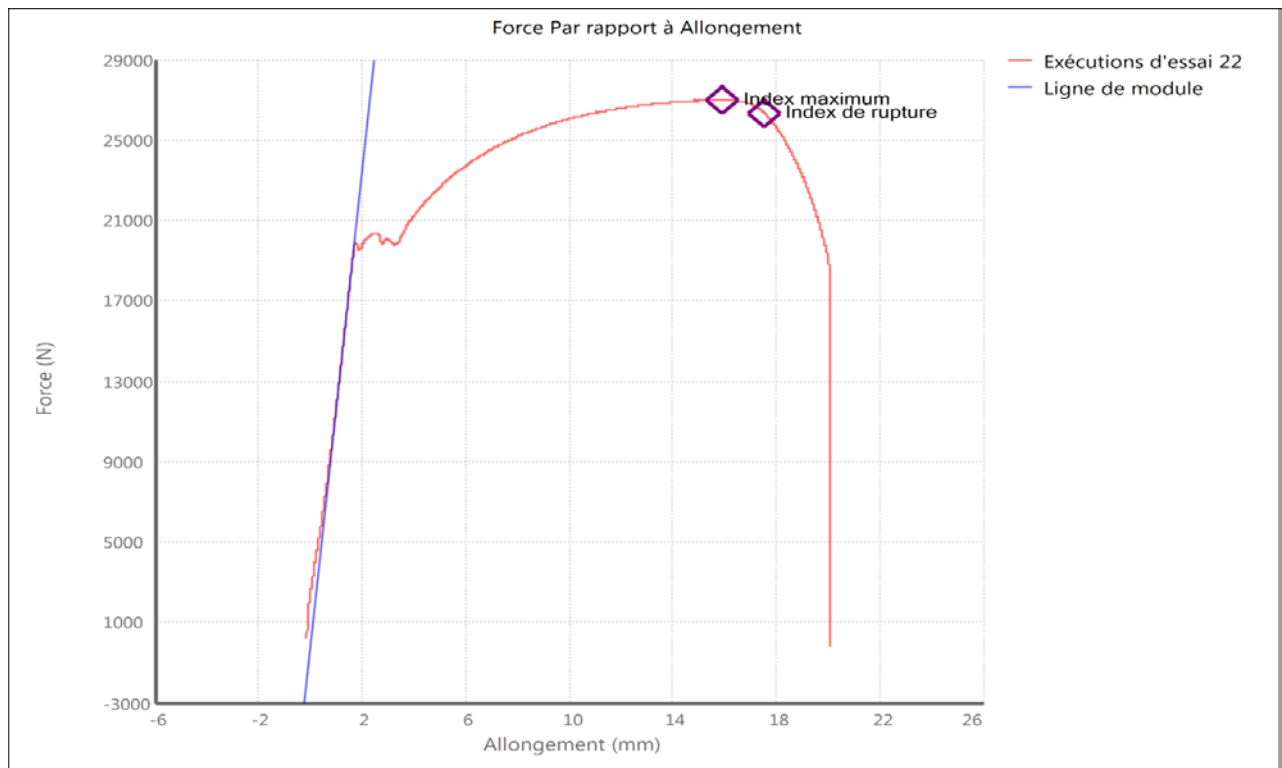


Figure III.11 : Graphe N° 01

- **La deuxième phase traitement avec H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 20% (deuxième éprouvette):**
  - Pic de contrainte : 378.3 MPa
  - Force maximale : 26.969 KN
  - Déformation à la rupture : 6.773 %



Figure III.12: Eprouvette N° 04 après la traction

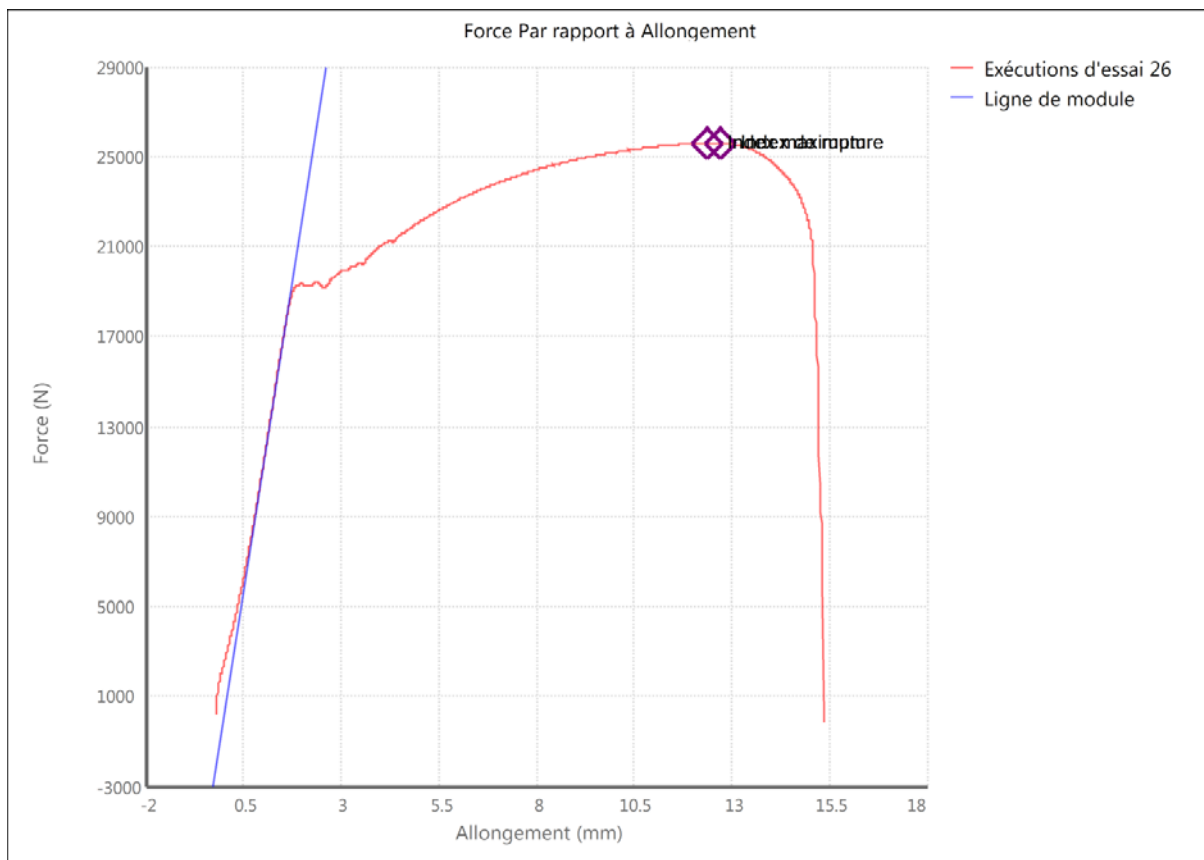


Figure III.13 : Graphe N° 02

- **La troisième phase traitement avec l'eau de mer (premier éprouvette):**
  - Pic de contrainte : 385.2 MPa
  - Force maximale : 31.867 KN
  - Déformation à la rupture : 7.127 %



Figure III.14 : Eprouvette N° 05 après la traction

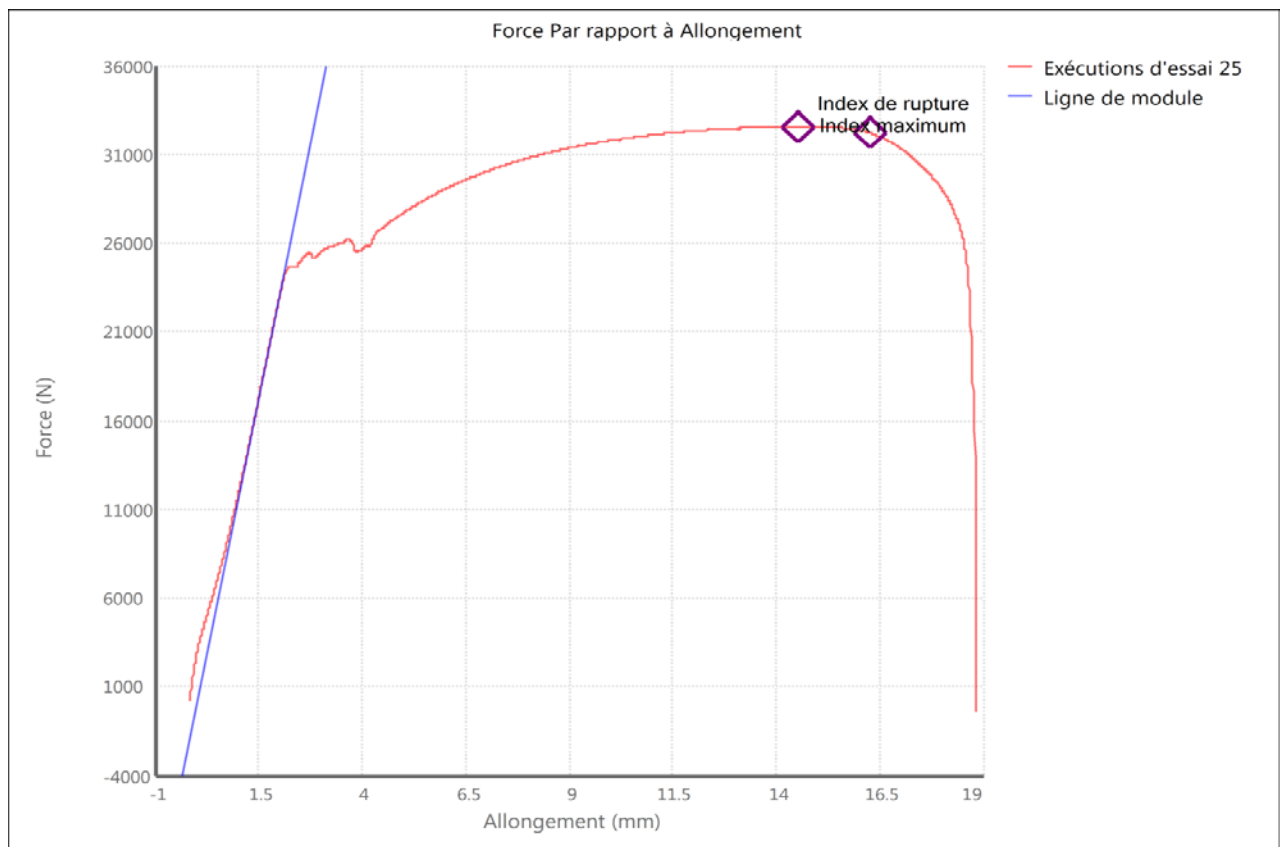


Figure III.15 : Graphe N° 03

- **La troisième phase traitement avec l'eau de mer (deuxième éprouvette):**
  - Pic de contrainte : 389.5 MPa
  - Force maximale : 31.397 KN
  - Déformation à la rupture : 7.366 %



Figure III.16 : l'éprouvette N° 06 après la traction

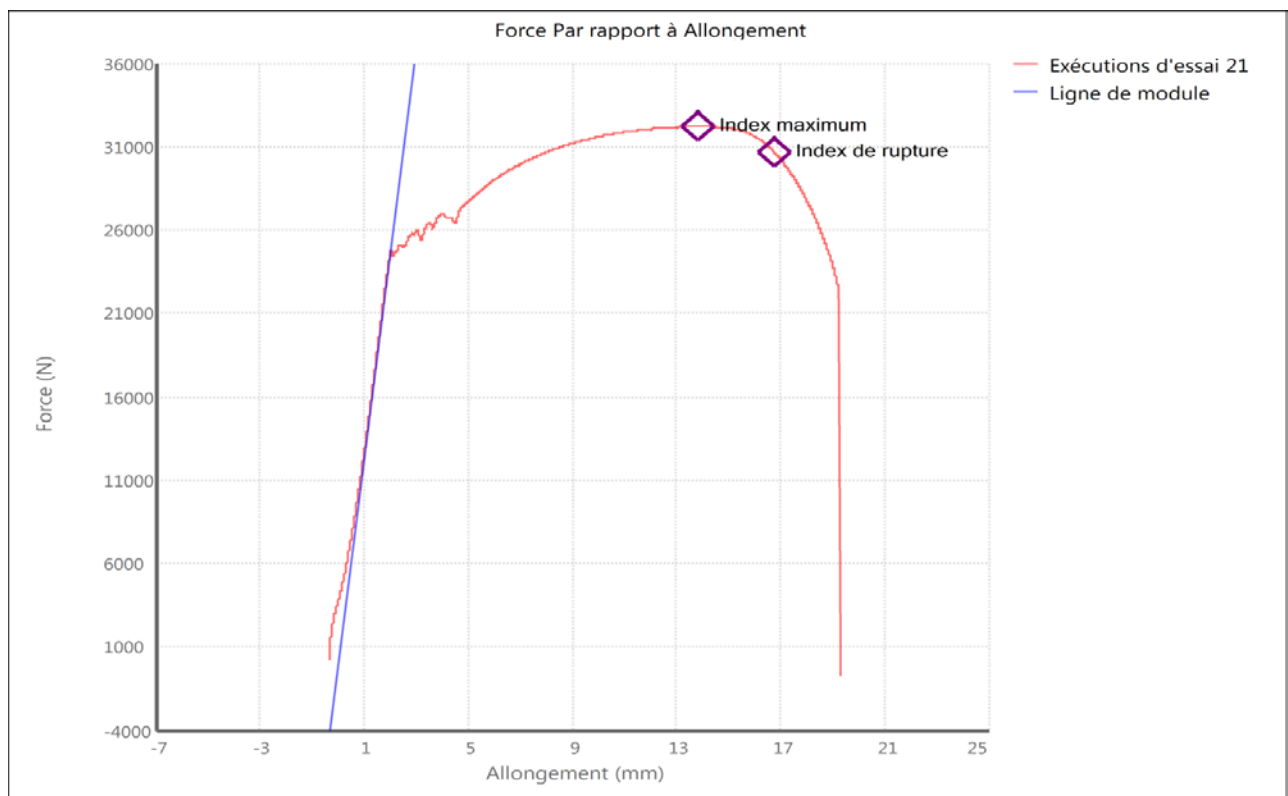


Figure III.17 : Graphe N° 04

### III.4. Les résultats des essais traction, traitement chimique et la dureté se résumant comme suite :

	Perte de masse (g)	Pic de contrainte (Mpa)	Force maximale (KN)	Déformation à la rupture (%)	Dureté (Hv10)
<b>Aucun Traitement</b>					
1 ère éprouvette	0	400.3	33.860	8.841	251
2ème éprouvette	0	395.9	33.162	8.780	
<b>Traitement Avec H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 20%</b>					
3ème éprouvette	31,583	370.3	25.579	6.351	198
4ème éprouvette	32,871	378.3	26.969	6.773	
<b>Traitement Avec L'eau de Mer</b>					
5ème éprouvette	3,508	385.2	31.867	7.127	223
6ème éprouvette	3,373	389.5	31.397	7.366	

**Tableau III.02 : Résultats des essais**

On constate à l'issue des expérimentations que plus le milieu est acide plus le taux de corrosion du métal est élevé, donc la durée de vie de l'efficacité du tube diminue, du fait des facteurs de corrosion internes et externes qui s'y trouvent.

## **Conclusion Générale**

L'étude de la corrosion des équipements de transport de brut à la ligne OB1 24'', dans la localité de Bouhmadou, APC Soumaa, Willaya de M'sila est l'objet de notre travail.

La corrosion se manifeste à l'intérieur des installations de surface par l'attaque chimique de brut lui-même et l'extérieur des ouvrages enterrés sous l'effet de l'agressivité du sol, ce qui provoque des percements des installations conduisant à des fuites donc la corrosion n'est pas seulement une source de gaspillage de matières premières, elle peut aussi entraîner des pertes économiques et humaines majeures et des tragédies écologiques irrémédiables.

La détection du problème de corrosion au niveau des pipelines se fait par l'application des techniques d'inspection spécifiques représentées essentiellement dans les analyses chimiques au laboratoire et le contrôle non destructif par la mesure des épaisseurs des pipelines au moyen d'un ultrason, ou par l'observation visuelle par conséquent ça nous permet de décider la méthode de protection la plus efficace, qui ce soit la protection cathodique des conduites enterrées, soit l'injection des inhibiteur de corrosion pour les installations de surface, ceci permet de réduire les catastrophes écologiques et économiques dues aux fuites et à une augmentation de la durée de vie des installations pétrolières et de leur protection.

## Référence :

- [1] Luc JOIN-LAMBERT, 'Généralistes sur le transport international du gaz'', (1995).
- [2] Michael F.Ashby et David R.H.Jones – Matériaux, propriétés et applications – EditionDUNOD, Paris(1998). Pages 115, 117.
- [3] Gérard BERANGER, Guy HENRY et Germain SANZ – Le livre de l'acier – EditionLAVOISIER Paris (1994). Pages 888,889 et 890.
- [4] Document usine N°2, Contrôle qualité – Matériaux métalliques, Essai de traction – NF10002-1 (1990)
- [5] Document usine N°3, Contrôle qualité – Matériaux métalliques, Essai de dureté – ISO 409/1(1982)
- [6] Document internet Wikipédia, dureté des matériaux, <http://wikipedia.org/wiki/fichier>
- [7] Sider.AMPTA, «ArcelorMittal pipes & tubes Alegria».
- [8] J.Paulbailon, J.Mariedorlot . « des matériaux »,3eme édition 2000 - 2001.
- [9] E. M. Ionescu, M, Patarlageanu, S.Suditu, Pertes des hydrocarbures liquides
- [10] Marie Pierre FOULC, José ALCORTA DURABILITE DES ASSEMBLAGES PAR COLLES : ETAT DE L'ART. (Module Ma5) ,2008
- [11] D. Landolt, « Corrosion et Chimie de Surface des Métaux », Presses polytechniques et universitaires Romandes, Lausanne, 1993
- [12] NACE Glossary of Corrosion Terms. Materials Protection, 1965, vol. 4, n°1, pp. 79-80.
- [13] Hammam.R. (2006) Simulation de la propagation des fissures par fatigue dans les toiles des roués de train sous chargement à amplitude variable. Thèse de Doctorat, Ecole normale Supérieure de Cachan, Octobre2006. France.
- [14] Melchers R.E., (1994), Pitting Corrosion in Marine Environments - A Review. Research
- [15] P.B Raja, M.G. Sethuraman, Mater. Lett. 62 (2008) 113.
- [16] C. Marangoni, P. Stephanelli, J. Chem.Soc. 25 (1972) 116.
- [17] K.Srivastava, Br.Corros. J. 16 (1981) 221.
- [18] R.M Saleh, A.A. Ismail, A.A El Hosary, Br. Corros. J. 17 (1982) 131.
- [19] H. Al-Seaibani, Meter. Wissen Werkst. Tech. 31 (2000) 1060.
- [20] E. Chaieb, A. Bouyanzer, B. Hammouti B, M Benkaddour, J. Appl. Surf. Sci. 246 (2005) 199.
- [21] B. Benjlili, J. Sarris, H. Richard, Sci. Aliment. 2 (1982) 515.
- [22] E.E. Oguzie, Mater. Chem. Phys. 99 (2006) 441.

- [23] A.K. Satapathy, G. Gunasekaran, S.C. Sahoo, K. Amit, P.V. Rodrigues, *Corros. Sci.* 51 (2009) 2848.
- [24] M.H. Hussin, M. J. Kassim, *Mater. Chem. Phys.* 125 (2011) 461.
- [25] S. Deng, X. Li, *Corros. Sci.* 55 (2012) 407.
- [26] Chris Alexander, Ozden O. Ochoa, Extending onshore pipeline repair to offshore steel risers with carbon–fiber reinforced composites, *Composite Structures* 92 (2010) 499–507.
- [27] Sylvain Popineau, Durabilité en milieu humide d'assemblages structuraux colles type ALUMINIUM/COMPOSITE. Thèse : Ecoles des mines de paris 2005. P10-11.
- [28] Sparks CP, Odru P. Composite riser tubes: defect tolerance assessment and nondestructive testing. Offshore technology conference paper no. OTC 6894. Houston, Texas, May; 1992.
- [28] A. K. Escoe; *Piping and Pipeline Assessment Guide*, Publisher: Gulf Professional Publishing of Elsevier; 1 edition, USA, (2006).
- [29] Houssam Toutanji, Sean Dempsey, Stress modeling of pipelines strengthened with advanced composites materials, *Thin-Walled Structures* 39 (2001) 153–165.
- [30] Song PS, Shieh YL. Stop drilling procedure for fatigue life improvement. *Int J Fatigue* 2004;26:1333-9.
- [31] J. L. DESIR, Examples of repair welding of heavy machinery subject to breakage due to low frequency alternating stresses. *Engineering Failure Analysis*, v.8 Issue 5, p. 423-437, 2001.
- [32] J. MATHAR. Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled holes, *Arch Eisenhüttenwesen*, 6 p.277-281 et *Trans. ASME*, V56(4), p.249, 1934.
- [33] Wikipedia, « Industrie pétrolière », obtenu à partir de <http://fr.wikipedia.org>.
- [34] European Gas Pipeline Incident Data Group, « Gas Pipeline Incidents: 1970-2007 », 7<sup>th</sup> Report, December 2008.
- [35] Leon Benoit, « État actuel et futur des oléoducs et des gazoducs et la capacité de raffinage au Canada », Rapport du Comité permanent des ressources naturelles, Mai 2012.
- [36] RYTIROVA L., « Etude de la dégradation par l'hydrogène des acier microalliés et duplex. Influence de la microstructure », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale Paris.
- [36] BENZERGA A. A., « Rupture ductile des tôles anisotropes. Simulation de la propagation longitudinale dans un tube pressurisé », Thèse de Doctorat, Ecole nationale supérieure des Mines de Paris, Mars 2000.