



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Med Khider Biskra

Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie

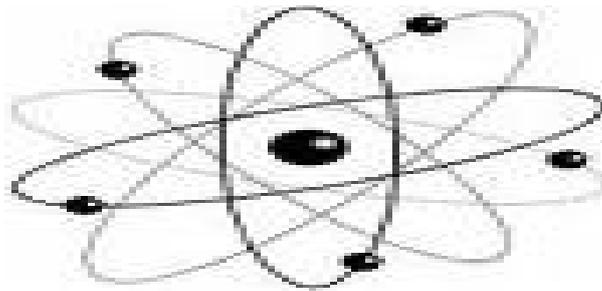


Département des Sciences de la Matière

Domaine des Sciences de la Matière

Filière de Physique

Spécialité Physique des Matériaux



Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Master  
Intitulé :

*Etude des propriétés tribologiques, mécaniques et électrochimiques de l'acier API 5L X70*

Présenté par : Boumzrag Maria Nor el Yakin

Devant le jury:

<i>N. Ouhbab</i>	M .A.« A»	Université Med khieder de Biskra	Président
<i>N. Belhamra</i>	M .C.« B»	Université Med khieder de Biskra	Rapporteur
<i>O. Belahsen</i>	M .C.« A»	Université Med khieder de Biskra	Examineur

Année Universitaire  
2017-2018

# Remerciements

*Je remercie Dieu, le tout Puissant, pour tout.*

*Ces études ont été effectuées sous la direction de Melle à **BELHAMRA NADJETTE** qui j'adresse mes sincères remerciements, Doctorante au département des sciences de la matière de la faculté des sciences exactes et sciences de la nature et de la vie de l'université de Biskra, qui m'a soutenu dans cette épreuve, il m'a surtout encouragé à travers ses orientations, ses conseils et son assistance et l'appréciation des résultats.*

*Je suis très sensible à l'honneur que m'a fait **Monsieur Nour elddine Ouhbab**, enseignant à l'université de Biskra, en s'intéressant à ce travail et en acceptant de présider le jury.*

*Mes vifs remerciements sont destinés aussi vers **Monsieur Belehssen Okba**, enseignant à l'université de Biskra qui a bien voulu accepter de faire partie du jury et d'examiner mon travail*

*J'adresse mes profonds remerciements à **Madame amina Loucif**, chef de service laboratoires Entreprise des Industries du Câble de Biskra (ENICAB), qui m'a permis de faire les tests mécaniques dans leur laboratoire.*

*J'exprime ma gratitude à l'équipe du laboratoire de génie mécanique de l'université de Setif dirigée par le Professeur **LOUCIF Kamel***

*J'adresse mes plus sincères remerciements À tous mes professeurs à l'université de Biskra qui m'ont accompagné durant mon parcours académique*

*Mes remerciements vont également à tous ceux qui m'ont aidé soit de près soit de loin.*

## *Sommaire*

<i>Remerciements</i> .....	<i>i</i>
<i>Dédicace</i> .....	<i>ii</i>
<i>Sommaire</i> .....	<i>iii</i>
<i>Introduction générale</i> .....	<i>iiii</i>

## *Chapitre I Etat de l'art*

I.GENERALITE SUR LES PIPELINES.....	2
I.1. les aciers des pipelines.....	2
I.2. CARACTERISTIQUES DES ACIERS DES PIPELINES.....	3
I.2.1. Caractéristiques des aciers API.....	3
I.2.2. Composition chimique.....	4
I. 3. DEGRADATION DES PIPELINES.....	4
I.4. ETUDE DES PROPRIETES TRIBOLOGIQUE.....	5
I.4.1. Frottement.....	7
I.4.1.1. Lois de frottement.....	8
I.4.1.2. Mécanismes de frottement.....	8
I.4.2. L'usure.....	9
I.4.2.1. Modes d'usure.....	10
I.4.2.1.1. Usure abrasive.....	10
I.4.2.1.2. Usure adhésive.....	11
I.4.2.1.3. Usure corrosive (ou tribochimique ou tribocorrosive).....	11
I.4.2.1.4. Usure par fatigue.....	12
I.5. LES PROPRIETES MECANIQUES.....	13
I.5. 1.Evaluation des propriétés mécaniques.....	14
I.6. LES PROPRIETES ELECTROCHIMIQUES.....	15
I.6.1. La corrosion des pipelines.....	15
I.6.2. Les type de corrosion.....	16
I.6.2.1. Corrosion interne.....	16

I.6.2.2. Corrosion externe.....	17
I.6.3. Etude thermodynamique et cinétique électrochimique .....	19
I.6.3.1. Aspect thermodynamique de la corrosion.....	19
I.6.3.2. Aspect cinétique de la corrosion.....	21

## *Chapitre II Matériaux et méthodes expérimentales*

II.1. INTRODUCTION .....	26
II.2. PREPARATION DE L'ECHANTILLON .....	26
II.2. 1.Prélèvement d'échantillons des plaques.....	26
26	
II.2. 3.Microstructure du métal.....	26
II.2.4. Préparation des solutions .....	26
II.3.MESURES TRIBOLOGIQUES.....	29
II.3.1. L'usure.....	29
II.3. 2. L'essai de frottement .....	30
II.4. MESURES MECANIQUES.....	31
II.4.1.teste de Traction.....	31
II.4.1.1. Préparation des éprouvettes .....	33
II.4.2. Microdureté Vickers .....	35
II.5. METHODE ELECTROCHIMIQUE.....	37
II.5.1 : Dispositif .....	37
II.5.2.Protocole des mesures électrochimiques .....	38
II.5.2.1. Les courbes de polarisation .....	38
II.5.2.2. Mesure de la vitesse de corrosion.....	39
II.6. TECHNIQUES DE CARACTERISATION.....	40
II.6. 1.Méthodes de caractérisations morphologiques.....	40
II.6. 1.1.Microscopie Electronique à Balayage (MEB).....	40
II.6. 1.2.Microscopie optique .....	41

## *Chapitre III Résultats et discussions*

III.1.INTRODUCTION.....	43
III.2. ETUDE TRIBOLOGIQUE.....	43
III .2.1. essai de frottement.....	43
III .2.2. Usure .....	45
III.3.ETUDE DES PROPRIETES MECANIQUE.....	48
III.3.1. Essai de Traction .....	48
III.3.2.1. Mesure de la micro-dureté.....	51
III .4. ETUDE ELECTROCHIMIQUE.....	52
III .4.1.Corrosion.....	52
III .4.2.Les courbes de polarisation .....	53
III .4.3.La résistance de polarisation .....	54
III .4.4.Caractérisation métallographique.....	55
Conclusion Générale .....	56
Références Bibliographiques .....	57

Dans l'industrie pétrolière, les pipelines sont des outils essentiels pour le transport d'importants débits d'hydrocarbures sur de grandes distances.

La qualité de débits d'hydrocarbures de grand débit dépend du choix de la meilleure combinaison entre les propriétés des tubes, à savoir la résistance et la ténacité. La qualité d'un hydrocarbure est une question primordiale pour les projets de transport du gaz et pétrole par canalisation.

Parmi les problèmes que les pipelines subissent de manière complexe, les conditions de sollicitation, de l'environnement et des propriétés physico-chimiques des surfaces en contact :

- ❖ Sollicitations externes : contraintes mécaniques ;
- ❖ Sollicitations internes : frottement, abrasion, érosion,...
- ❖ Sollicitations environnementales : corrosion, oxydation, attaque chimique [1].

Vu les problèmes rencontrés par les pipelines qui rendent l'état de suivi très difficile en particulier le problème de l'usure qui est l'endommagement résultant du frottement entre les surfaces.

Le problème de corrosion est un facteur important qui entraîne une dégradation des pipelines dans l'industrie qui peuvent aussi être attaqués par ce phénomène interne et externe, de fissuration ou bien de faille de fabrication. La corrosion interne et externe peut générer d'énormes fuites et de ruptures des canalisations, se traduisant parfois par des dégâts catastrophiques (dégâts humains, pollution du milieu naturel, frais supplémentaires de réparation, arrêt prolongé du pompage, etc.).

Le but de nos travaux est de faire passer de telles études du stade académique au stade industriel. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire d'étudier les propriétés tribologiques, mécanique et électrochimique de l'acier des pipelines API 5L X70.

Ce travail s'articule sur trois chapitres. Le premier chapitre sera consacré à une présentation bibliographique qui est divisée en trois parties. La première partie est réservée pour la présentation des généralités sur les aciers des pipelines (X70). La deuxième partie est axée sur l'état d'art du comportement mécanique et tribologique sur l'acier de pipeline. Cette dernière sera suivie par une étude théorique sur la corrosion dans l'industrie pétrolière permettant de justifier le choix du matériau et du milieu corrosif utilisés dans ce travail.

# *INTRODUCTION GENERALE*

---

Dans le deuxième chapitre, nous présentons l'acier étudié, les techniques expérimentales et les méthodes de caractérisation utilisées, ainsi que les essais tribologiques, mécaniques et électrochimique mis en œuvre dans ce travail.

Le dernier chapitre traite regroupe les résultats obtenus et leur interprétation et nous clôturons ce travail par les principaux résultats dans une conclusion générale et nous discutons également les perspectives.





# *Chapitre I* *Etat de l'art*

---



## I.GENERALITE SUR LES PIPELINES

### I.1. Les aciers des pipelines

Le pipeline est une canalisation particulière qui contribue aux enjeux économiques d'un pays. Les pipelines sont largement utilisés pour le transport du gaz naturel et le pétrole brut, et leurs dérivés. [2]

Les pipelines sont des canalisations pompables, presque toujours enterrées, le premier pipeline a été construit en 1869 par Benson pour éviter le monopole du transport de pétrole par chemin de fer. Ces derniers permettent l'échange de produits entre raffineries, dépôts pétroliers et installations portuaires. Sa longueur peut varier de quelques kilomètres à des centaines, voire des milliers de kilomètres. Bien souvent les pipelines sont interconnectés entre eux pour former un réseau. [3]



*Figure I.1 : Les pipelines.*

Un pipeline se caractérise tout d'abord par sa ligne qui est constituée de tubes d'acier. Les pipelines en acier sont utilisés en raison de sa grande capacité de transport et faible coût de fabrication par rapport à d'autres matériaux. Le pipeline est généralement construit en carbone l'acier, en raison de sa haute résistance mécanique, et Aussi parce qu'il est moins cher que d'autres matériaux [4].

Les tubes d'acier pouvant résister à une pression de 100 bars environ, son diamètre courant est compris entre 15 cm à 1 mètre, son épaisseur varie de 4 à 13 mm. La profondeur d'enfouissement dans le sol varie de 0,6 à 1 mètre selon son ancienneté et ses lieux de passages. La réalisation d'un pipeline met en jeu des investissements considérables, et elle est soumise à une réglementation de construction et d'exploitation précise

Un pipeline présente de nombreux avantages, dont certains sont décisifs, par rapport aux autres moyens de transport. Il s'agit de :

- ❖ Un mode de transport massif, environ 60.106 L/Jours, il permet un fonctionnement sans interruption, 24/24 heures sur 365 jours par an.
- ❖ Un mode de transport à haut degré de sécurité avec moins de deux incidents pour dix milles kilomètres de pipelines par an, il offre de plus l'intérêt majeur de ne pas encombrer les infrastructures de surface, contrairement à tous les autres modes de transport ce qui est un gage d'efficacité énergétique.
- ❖ Le mode de transport massif le moins coûteux sur longue distance et pour des volumes élevés [5].

## **I.2. CARACTERISTIQUES DES ACIERS DES PIPELINES**

### **I.2.1. Caractéristiques des aciers API**

Ces aciers sont produits dans le plus grand respect des normes de qualité afin de satisfaire aux cahiers des charges les plus sévères. La norme de référence est le standard API 5L. Les significations de ces dernières désignations sont comme suivies :

**API** : Institut Américain du Pétrole.

**5 L** : Spécification pour le pipeline.

**X** : Désignation de catégorie pour le pipeline de haute résistance.

Le chiffre après le « X » correspond à la valeur de la limite d'élasticité minimale, Par exemple, X70 a une limite d'élasticité minimale de 70 ksi (485 MPa) [6].

ALFA PIPE ex ALFATUS est une entreprise spécialisée dans la fabrication des tubes pour canalisation d'hydrocarbures et hydrauliques. Elle dispose d'un système de contrôle qualité assurant la conformité du produit selon les normes internationales API et ISO 9001-2008. ALFA PIPE a pour rôle de produire des tubes soudés en spirale à partir des bobines de tôles. La gamme de tubes fabriqués varie en diamètre entre 16 pouces (406.4 mm), et 52 pouces (1320.8 mm). Actuellement, la plupart des commandes concerne des tubes 48 pouces (1219.2 mm) et de longueur entre 9 à 12 m. Le tube soudé en spirale est obtenu à partir d'un formage à froid d'une bobine d'acier, conformément aux normes API 5L et NFA 49150. La production des canalisations soudées est soumise à plusieurs exigences.

Conformément aux spécifications, les tubes sont fabriqués par soudage automatique à l'arc immergé à partir de feuillards. Le métal devra être de bonne qualité notamment en ce qui concerne sa résistance au vieillissement. [7]

## **I.2.2. Composition chimique**

Les aciers de carbone sont les plus utilisés dans la construction des pipelines.

L'acier au carbone est un alliage, composé essentiellement de fer contenant jusqu'à 2% en masse de carbone (au-delà, on parle de fonte). L'acier n'est pas un alliage fer-carbone pur, la faible teneur en carbone et un élément d'alliage qui permet de garantir la bonne soudabilité de l'acier.

Un certain nombre d'éléments sont toujours présents dans les aciers de construction. Chaque élément d'addition a un effet spécifique que l'on résume ci-dessous :

\* le silicium dont les teneurs peuvent atteindre 0,5%. Le silicium agit principalement par effet de solution solide, il a également un rôle de désoxydant.

\*L'aluminium est employé comme désoxydant lors des traitements en poche de l'acier liquide, l'aluminium et le silicium sont des éléments alpha gènes, mais ils sont présents de faibles teneurs.

\*Les éléments d'alliage gamma gènes (Mn, Ni, Cu) abaissent la température de transition  $\gamma \rightarrow \alpha$  de l'acier, favorisant ainsi la germination des grains fins de ferrite. Ces éléments ont également un effet de durcissant par solution solide.

\* La très faible teneur en impuretés (S et P) est caractéristique d'une faible teneur inclusionnaire et d'une bonne résistance à la corrosion.

\* L'addition de calcium est effectuée lors du traitement de l'acier liquide en poche pour contrôler la morphologie des inclusions.

\*Le vanadium et le titane précipitent à plus basse température, participent au durcissement final de la ferrite [8].

## **I. 3. DEGRADATION DES PIPELINES**

Les pipelines sont considérés comme des structures exposées à des risques majeurs pouvant leur occasionner des dommages plus ou moins importants et très souvent irréversibles. Ces ouvrages sont caractérisés par :

- une très grande longueur (parfois plusieurs centaines de Kilomètres).
- la traversée de zones et d'environnements hostiles, (terrains géologiquement instables, zone de marnage...).
- des conditions d'exploitation difficiles.
- des interventions humaines fréquentes volontaires.

L'effet néfaste de ces aléas sur l'état de ces structures, oblige généralement les exploitants à veiller à la surveillance continue, et faire des réparations en cas d'anomalies.

En règle générale, l'origine des accidents graves dépend de trois facteurs principaux : les qualités intrinsèques des tubes (métallurgiques notamment), les contraintes d'exploitation et de production (fluides, pressions, températures) et enfin l'environnement externe (agressivité des terrains, sismicité, accident dus à la présence humaine). [9]

Plusieurs travaux et statistiques ont montré une prédominance des accidents lors des diverses opérations pendant l'exploitation de ces structures (les pipelines), exemple : ceux dus à la corrosion et à des dommages mécaniques. [10]

Pour la première catégorie d'incidents provoqués par des tiers, la solution ne peut être apportée que par l'application de législations strictes définissant un périmètre de protection des ouvrages suivie par une surveillance externe et l'application de procédures opérationnelles strictes.

Pour les autres causes, des réponses ont été apportées. Les progrès importants faits ces dernières années, dans le domaine du contrôle et de la surveillance automatique, ont amené les opérateurs et les exploitants à proposer des systèmes de management permettant une gestion plus appropriée des risques et surtout plus exhaustive comme principal objectif la prévention classée ainsi dans des groupes de dégradations impliquant :

- ↳ les dommages mécaniques (50%)
- ↳ la corrosion externe (25%) ;
- ↳ la corrosion interne (15%) ;
- ↳ les dégradations diverses.

Ceux-ci ont pour conséquences d'affecter directement la paroi de la canalisation dans sa forme (déformation) ou dans son épaisseur (corrosion) voire les deux.

Les dommages mécaniques, la corrosion externe et interne ont essentiellement pour origines l'agressivité du milieu et de l'environnement immédiat (contraintes, physicochimies des terrains encaissants et des fluides transportés). [9]

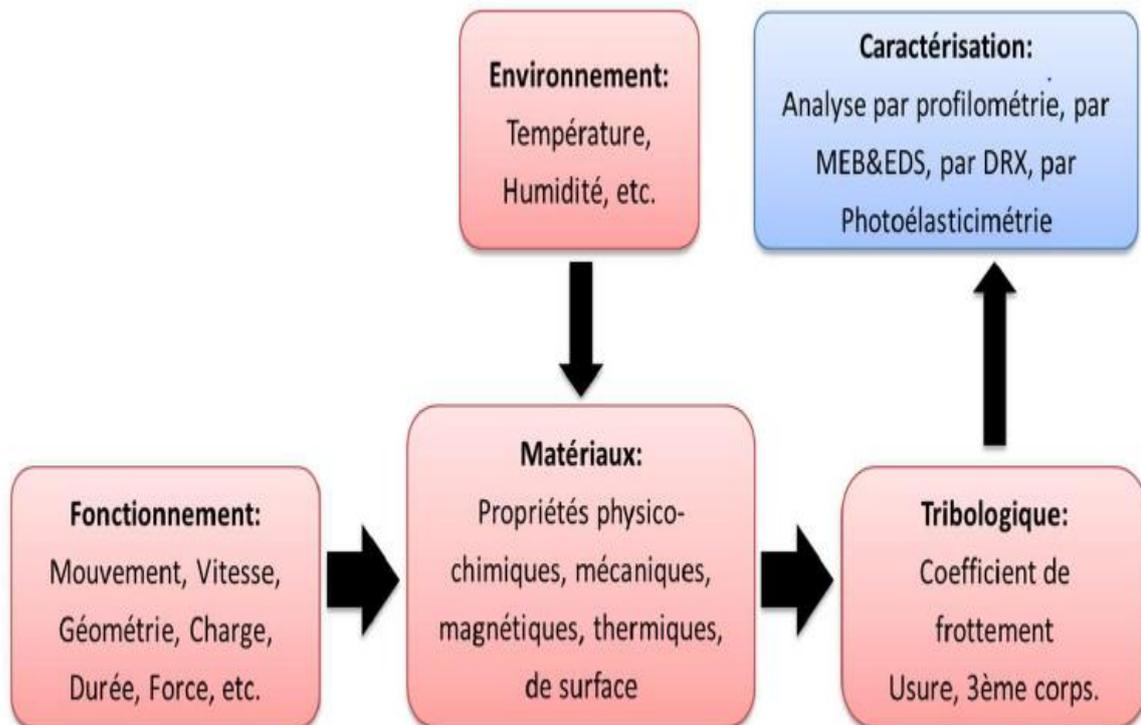
### **I.4. ETUDE DES PROPRIETES TRIBOLOGIQUE**

La tribologie est la science et la technologie des interactions entre des surfaces solides en mouvement relatif. Elle concerne l'étude du frottement, de l'usure, et de la lubrification des pièces mécaniques. [11]

C'est une vieille connaissance de grande importance quand il s'agit de tout en mouvement mais en tant que discipline scientifique, la tribologie est plutôt nouvelle. C'est une science complexe avec de petites possibilités de calculs théoriques de frottement et porter. Par conséquent, la tribologie est fortement associée à des applications pratiques qui

rendent précieux le travail d'élaboration et l'expérience empirique. Les propriétés tribologiques sont de la plus haute importance pour les matériaux en contact et le système est sensible aux conditions de fonctionnement et à l'environnement. Comprendre le comportement tribologique, la connaissance en physique, chimie, métallurgie et la mécanique sont nécessaires, ce qui rend la science interdisciplinaire. En optimisant la friction et l'usure dans des applications technologiques, telles que composants de machines ou dans des systèmes de travail des métaux, à la fois les coûts peuvent être sauvés.

Un système tribologique se définit comme un système mécanique, formé de deux matériaux antagonistes en contact, animés de mouvements relatifs. Ces deux solides évoluent dans un milieu ambiant et peuvent être séparés par un film intercalaire appelé troisième corps (Figure I.2). L'interface d'un tel système devient alors le siège de phénomènes dissipatifs d'énergie, regroupés sous le terme générique de frottement.



*Figure I.2 : Synoptique général d'un système tribologique [12].*

La quantification de ces énergies est d'un intérêt capital car elles conditionnent les échauffements à l'interface, elles modifient la micro et la macro géométrie du contact (dégradations par usure conduisant à la détérioration du système).

Energie dissipée	Mode de dissipation
Energie de déformation	Déformations élastique et plastique
Energie de rupture	Fissuration, formation de débris, arrachement, écaillages
Energie thermique	Echauffements écoulement de chaleur, transferts par conduction
Energie chimique	Adhésion, oxydation
Energie acoustique	Vibration, bruits
Energie électrique	Electrisation, accumulation de charges, potentiels électrochimiques
Energie lumineuse	Etincelles, rayonnement, photoémission

*Tableau I.1 : Différents modes de dissipation d'énergie en frottement.*

## **I.4.1. Frottement**

Le frottement entre corps solides a toujours eu une importance considérable, du fait des avaries qu'il peut provoquer pendant le fonctionnement des machines industrielles. En effet, pendant le glissement, les pièces subissent une usure, génèrent des bruits et dissipent de la chaleur, toutes causes pouvant générer des dysfonctionnements et des avaries.

Quand un corps solide est en mouvement relatif sur un autre, la déformation des surfaces, leur adhésion et leur glissement provoquent une résistance au mouvement. Cette résistance se compose d'une composante réversible d'origine élastique, et d'une composante de frottement qui génère une dissipation d'énergie entre les deux surfaces. Selon le mouvement du frotteur, on distingue deux types de frottement comme le montre la figure I.3 :

- un frottement de glissement, où le frotteur glisse sur la surface antagoniste (plaque de frein/disque, rideau/glissière, outil de coupe/pièce, arbre/coussinet).
- un frottement de roulement et pivotement, où le frotteur roule sur la surface en contact (bille de roulement/bague, roue d'automobile/route, roue de train/rail),

Pour diminuer l'usure des pièces en frottement, la lubrification des surfaces est une solution efficace, mais plusieurs situations exigent un frottement sec et nécessitent des matériaux ayant un comportement approprié à ces conditions de frottement (charge, vitesse, température) et susceptibles d'apporter une fiabilité suffisante.

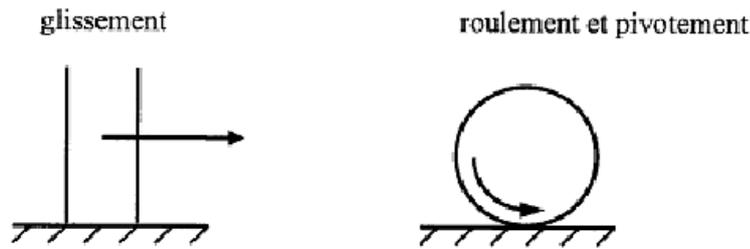


Figure 1.3 : Différents systèmes en frottement [13].

### I.4.1.1. Lois de frottement

Depuis quelques millénaires, on s'intéresse aux problèmes de frottement entre deux surfaces solides et à l'énergie dissipée par le frottement [9, 14-15]. Leonard de Vinci et Amontons ont été les premiers à étudier le frottement. Leurs résultats ont été confirmés par Coulomb. Ces résultats sont formalisés selon les lois classiques de frottement :

1. Le coefficient de frottement statique est le rapport entre la force tangentielle nécessaire pour provoquer le mouvement du frotteur et la force normale appliquée.
2. Le coefficient de frottement dynamique est le rapport entre la force tangentielle nécessaire pour maintenir le mouvement du frotteur et la force normale appliquée.
3. La force de frottement est proportionnelle à la charge normale appliquée. Le coefficient de frottement est constant pour un couple de matériaux en frottement.
4. Le coefficient de frottement est indépendant de la surface de contact apparente,
5. La force de frottement est indépendante de la vitesse de frottement.
6. Le coefficient de frottement statique est supérieur au coefficient de frottement dynamique.

### I.4.1.2. Mécanismes de frottement

Le frottement entre deux corps solides en mouvement relatif de glissement est produit principalement par le cisaillement des aspérités, le labourage et la déformation des aspérités, la force de frottement s'écrit donc sous la forme :

$$F = F_{cis} + F_{lab} + F_{pot} \quad 1.1$$

Où :

$F_{cis}$  : la force de cisaillement des aspérités après formation de jonctions ponctuelles

$F_{lab}$  : la force de déformation des surfaces

$F_{pot}$  : la force potentielle.

Des méthodes expérimentales permettent de séparer ces forces. L'utilisation de deux surfaces lisses permet d'éliminer la force de déformation, l'utilisation d'un lubrifiant permet d'éliminer la force d'adhésion.

Sous l'action de la charge normale, les surfaces métalliques adhérentes, le mouvement relatif provoque le cisaillement de l'interface. La force d'adhésion dépend donc de la contrainte de cisaillement et s'écrit sous la forme

$$F_{cis} = A \cdot \tau \quad 1.2$$

Où  $A$  est la surface réelle de contact.

Le contact peut produire une déformation plastique des aspérités, qui dépend des caractéristiques mécaniques et géométriques des corps en contact. Ce mécanisme est appelé labourage, il peut se produire lorsque les duretés des deux corps sont différentes. La force du labourage est donnée, par Moore [16] en fonction de la forme géométrique du frotteur :

$$F_{lab} = \frac{2\delta}{\pi R}, \quad \text{pour cylindre/plan}$$
$$F_{lab} = \frac{2R^2(2\theta - \sin 2\theta)}{\pi d^2}, \quad \text{pour bille/plan}$$

où  $\delta$  est l'enfoncement du frotteur dans la surface frottée,  $R$  le rayon du frotteur,  $d$  le diamètre de l'aire de la surface de contact et  $\theta$  l'angle au centre du frotteur entre la normale à la surface de contact et la droite passant par le centre du frotteur et la frontière de cette surface.

La formation du troisième corps à l'interface influence le frottement. Les particules d'usure résistent au mouvement et le coefficient de frottement total s'écrit sous la forme

$$\mu = \mu_{Cis} + \mu_{lab} + \mu_{par} \quad 1.3$$

Où,  $\mu_{cis}$  est le coefficient produit par le cisaillement des jonctions,  $\mu_{lab}$  celui produit par la déformation des aspérités et  $\mu_{par}$  celui produit par la présence du troisième corps [13].

### **I.4.2. L'usure**

Dans les contacts tribologiques, l'usure se produit en raison de l'interaction entre les deux surfaces en contact et implique l'enlèvement progressif des matériaux de surface, c-à-d. perte matérielle. L'usure des matériaux en contact est, tout comme le frottement, un système paramètre. Les mécanismes d'usure importantes pour les matrices de tréfilage les rouleaux de laminage à chaud sont abrasifs, adhésifs, de fatigue et d'usure chimique tribo. Typique, il y a une combinaison de mécanismes d'usure dans un contact. Une relation

d'interdépendance existe entre la friction et l'usure ; souvent une faible friction se traduit par un faible porté. Cependant, ce n'est pas une règle générale et il existe de nombreux exemples montrant un taux d'usure élevé malgré un faible frottement

Dans les premiers instants du frottement, ce sont les écrans superficiels qui subissent l'ensemble des mécanismes inhérents au frottement (effets thermiques, mécaniques ou chimiques). Ensuite, ces mécanismes s'interpénètrent en fonction des multiples conditions présentes. En général, une pièce subit tout au long de sa vie trois étapes d'usure :

\*Rodage : usure rapide avec une vitesse d'usure régulièrement décroissante

\*Marche normale : durée de vie (usure faible et constante).

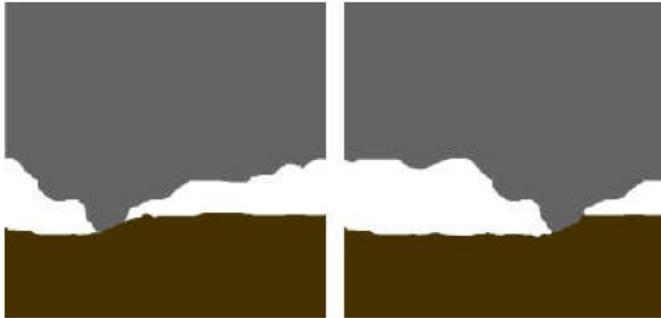
\*Vieillesse et mort : vitesse d'usure croissante [17].

### **I.4.2.1. Modes d'usure**

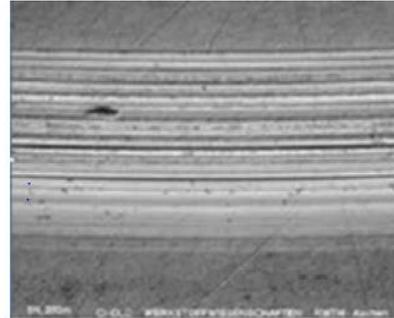
#### **I.4.2.1.1. Usure abrasive**

Elle se caractérise par la présence dans le contact d'un état de surface rugueux ou par pénétration dans le matériau le plus tendre de particules dures provenant des débris d'usure du contact ou de la pollution du milieu (figure I.4). Ce mécanisme de dégradation qui fait intervenir dans les premiers instants uniquement les corps antagonistes, devient rapidement une usure à trois corps. Cette forme d'usure se manifeste par des polissages, des griffures, des micro-labourages, des arrachements de particules. Le micro-labourage (ou micro-usinage) se manifeste par des rayures à la surface du matériau le plus tendre sans arrachement de matière mais provoquant sur les bords du sillon une déformation plastique, (figure I.5). Pour lutter contre l'usure abrasive, on cherche souvent à durcir les matériaux (au moins leur surface)]. On doit différencier *le labourage* (déplacement de matière et formation de bourrelets), prédominant pour les matériaux ductiles, de *la coupe* (enlèvement de matière), repérée surtout pour des matériaux fragiles.

On distingue l'usure abrasive de *l'usure érosive* par le fait que ce sont les interactions des aspérités des surfaces antagonistes, et non des corps étrangers aux surfaces en contact, qui provoquent l'enlèvement de matière à l'interface, on parle aussi d'abrasion à deux corps pour l'usure abrasive et à trois corps pour l'usure érosive.



*Figure I.4 : Mécanisme d'usure abrasive.*

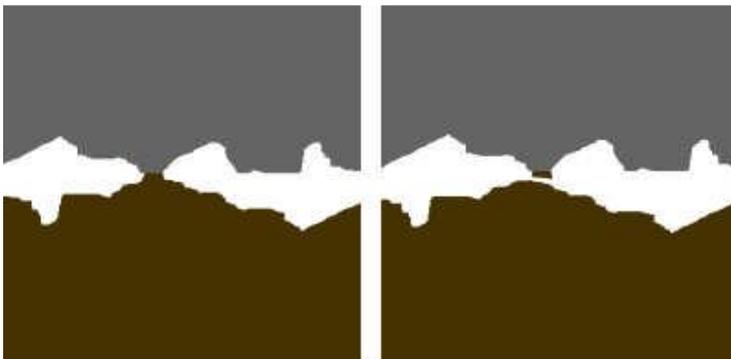


*Figure I.5 : Etat surface après une usure abrasive.*

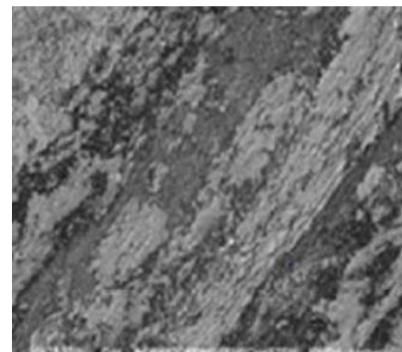
### **I.4.2.1.2. Usure adhésive**

Elle se caractérise par un transfert de débris d'un des deux antagonistes vers l'autre soit par un mécanisme d'origine purement mécanique, soit suite à une réaction physicochimique, (figure I. 6). Pour le transfert mécanique, plusieurs hypothèses ont été développées.

Les micro-aspérités présentes dans le contact peuvent conduire à la diminution des zones en contact et générer aux jonctions des énergies très élevées qui peuvent favoriser les réactions physico-chimiques (micro-soudage des aspérités en contact). Lors du frottement, il existe entre les matériaux antagonistes une multitude de microcontacts qui supportent l'ensemble de la charge normale. En effet, dans ces régions, une constriction des lignes de forces engendre des concentrations de contraintes et l'augmentation de la température (températures flashes).



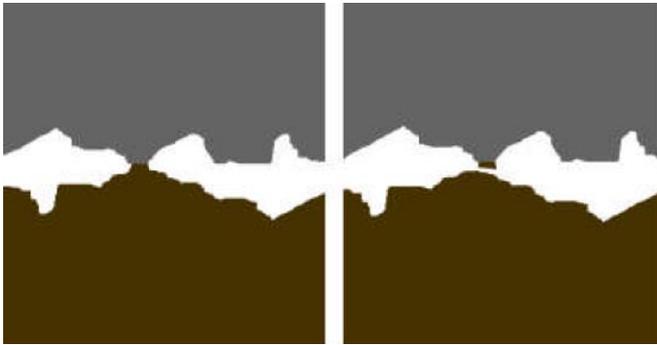
*Figure I.6 : Mécanisme d'usure adhésive.*



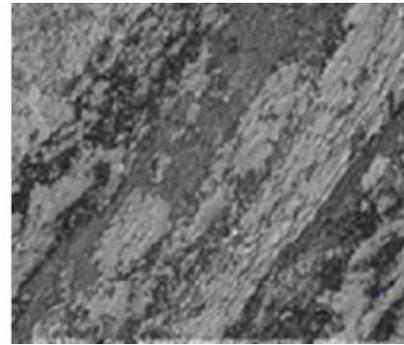
*Figure I.7: Etat de surface Une usure adhésive.*

### **I.4.2.1.3. Usure corrosive (ou tribochimique ou tribocorrosive)**

C'est un système à trois composantes, où interviennent la réactivité chimique entre les surfaces. On a une réactivité chimique avec le milieu environnant et une réactivité physico-chimique avec les débris. Ce type de dégradation résulte d'une seule ou de plusieurs réactions chimiques sous l'effet d'agent corrosif (environnement, lubrifiant) et des contraintes mécaniques pendant le frottement, (figure I.8).



*Figure I.8 : Mécanisme d'usure corrosive.*



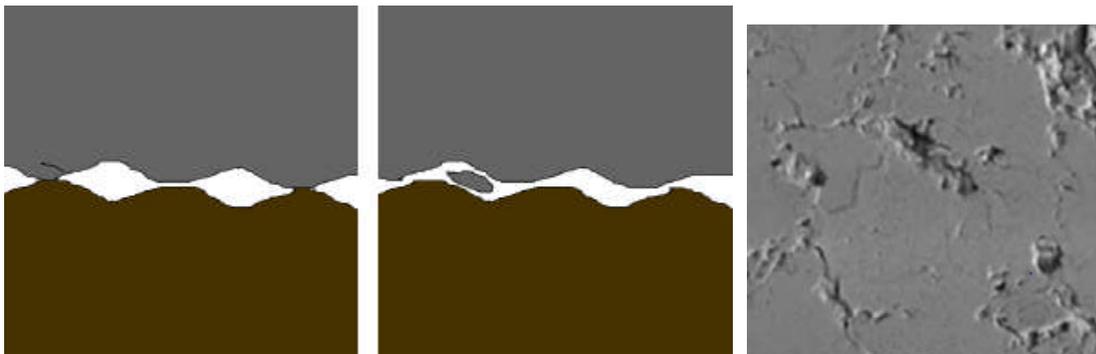
*Figure I.9: Etat de surface*

*Après une usure corrosive.*

Suivant l'état structural superficiel, il se crée des oxydes réactionnels dépendant de l'environnement. Suite au frottement entre les surfaces, la rupture des aspérités qui s'oxydent, forme des débris en général très stables et très durs. Ces derniers jouent alors un rôle abrasif et viennent dégrader les surfaces antagonistes et donc entretenir l'usure. Par contre, il est possible de rencontrer une configuration moins agressive par la formation de films d'oxydes adhérents à la surface d'un des antagonistes et suffisamment résistants au cisaillement pour jouer un rôle protecteur, (figure I.9).

### **I.4.2.1.4. Usure par fatigue**

Elle est liée à l'action d'un mouvement cyclique et à la capacité des matériaux à absorber les énergies de déformation et les contraintes thermiques générées par frottement. Elle se manifeste par des fissures, des écailles et des changements de structure métallurgique, (figures I.10 et I.11). Les comportements face à ce mécanisme d'usure dépendent de la nature du matériau. Dans le cas de matériaux ductiles (matériaux métalliques ou polymères), la rupture par fissuration (ou mécanisme de délaminage) a lieu en sous-couche, parallèle à la surface de frottement, dans les zones où les contraintes de cisaillement sont maximales. L'analyse des transferts thermiques sur la microstructure (déplacement des lacunes, des dislocations, des plans de glissement, l'effet des joints de grains...) explique la formation de fissure associée à un écrouissage ou à un adoucissement de la surface, (figure I.11). Ce phénomène peut se décomposer en plusieurs phases.



*Figure I.10 : Mécanisme d'usure par fatigue .*

*Figure I.11 : Etat de surface après une usure par fatigue.*

Dans un premier temps, il y a augmentation de la densité de dislocations en surface provoquant un écrouissage superficiel. Dans un deuxième temps, l'énergie de frottement transmise à la surface de ce matériau a pour effet de redistribuer cette densité de dislocations en un réseau plus stable par glissement ou montée de dislocations. Il existe alors un déséquilibre entre les contraintes internes. En surface, suite à une densité plus élevée de dislocations, des contraintes de compression sont générées alors qu'en sous-couches, la densité de dislocations étant moindre, des cavités se forment, favorisant la fissuration [18].

### **I.5. LES PROPRIETES MECANQUES**

Les dommages mécaniques sont considérés les plus importants des dommages que peut subir les pipelines. Ils sont fréquemment le résultat des actions liées à la construction de la ligne et à la maintenance ainsi qu'aux actions de la pesanteur sous toutes ses formes. Ils peuvent être définis comme toute modification de la structure ayant lieu après fabrication et/ou construction et qui peuvent mettre en cause l'intégrité de la structure [9]. Les dommages mécaniques peuvent être directement imputables à des causes mécaniques (chocs, chutes, déplacement, etc.) ou aux résultats d'agressions différentes et indirectes prenant en compte, par exemple, des phénomènes électrochimiques fragilisant ainsi la structure.

Ces endommagements sont à l'origine de conditions externes ou internes défavorables très diverses. Les causes externes correspondent à des défauts de manipulation lors des opérations de pose ou de maintenance et à l'environnement immédiat. Elles ont pour origines [19]:

- les chocs par des outils de levage et de manutention (chutes) ;

- la présence de matériaux mettant la conduite sous contrainte ou tension (rocher, pierre) ;
- les glissements de terrain, tremblement de terre ;
- les mauvais encrages de la conduite ;
- le gel des terrains environnant (permafrost) ;
- les alternances de périodes chaudes/froides ;
- l'absence de moyens de compensation thermique (lires) ;
- la corrosion externe ;
- les erreurs opérationnelles pendant des opérations de réparation ou de modification de la ligne entraînant une fragilisation de la structure ou des équipements ;
- la malveillance.

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

- la corrosion interne ;
- l'abrasion interne ;

aux surpressions incontrôlées de la montée en pression des effluents, ou à des actions incontrôlées de manutention (fermeture brutale de vanne) [20]

### **Evaluation des propriétés mécaniques**

Les propriétés mécaniques des métaux et alliages sont d'un grand intérêt puisqu'elles conditionnent non seulement les problèmes de mise en forme des matériaux mais également leur comportement en service dans des applications industrielles extrêmement diversifiées. Le choix du matériau d'une pièce industrielle dépendra des propriétés mécaniques tel que : résistance, dureté, ductilité. Il est donc nécessaire de mesurer ces grandeurs physiques par des essais mécaniques. Pour définir les caractéristiques mécaniques des matériaux, on réalise des essais mécaniques sur des éprouvettes. Le but de ces essais est d'obtenir des valeurs des propriétés qui seront utilisables dans les calculs de résistance des matériaux ou qui permettront d'apprécier le comportement d'un matériau en service. Les corrélations sont entièrement empiriques et sont intéressantes du point de vue économique dans le cas où la mesure directe est difficile à effectuer. [21,22]

L'essai le plus fréquemment utilisé afin de déterminer le comportement mécanique d'un matériau sont les essais de traction et la dureté.

API 5L	Resistance à la rupture [N/mm <sup>2</sup> ] (min-max)	Limite élastique [N/mm <sup>2</sup> ] (min-max)	Allongement (%)
X65	531-758	448-600	24
X70	565-758	483-621	23
X80	621-827	552-690	22

Tableau I.2 : Propriétés mécanique des aciers pour tubes selon la norme API [23]

## I.6. LES PROPRIETES ELECTROCHIMIQUES

Dans les industries chimiques, pétrolières ou minières, de nombreuses installations métalliques subissent une série de pertes systématiques, accidentelles et des endommagements provoquer par la corrosion .soit de leur environnement (comme pour les tubes enterrés), soit de leur fonction (transport de fluides corrosifs) qui représentent une composante importante du pourcentage des pertes technologiques au cours du processus de transport par pipelines. Parmi les conséquences : la rupture sous pression, la fuite des fluides (pétrole, gaz) ainsi qu'une considérable source de pollution. Par ailleurs, selon les chercheurs, la majorité des fuites enregistrées sur les pipelines sont essentiellement la conséquence de corrosion interne,

La corrosion uniforme ou généralisée est la forme la plus connue et la plus fréquemment rencontrée de corrosion aqueuse et les mécanismes physico-chimiques mis en jeu sont désormais bien compris.

### I.6.1. La corrosion des pipelines

La corrosion est la détérioration d'un métal par une attaque ou une réaction chimique avec son environnement. C'est un problème constant et continu, souvent difficile à éliminer complètement. La corrosion affecte la plupart des secteurs industriels et peut coûter des milliards de dollars chaque année, par exemple dans le cas des procédés industriels les métaux sont exposés à l'action des acides, qui agissent comme agents corrosifs. Ces acides jouent un rôle important dans l'industrie, surtout dans le raffinage du pétrole brut, décapage à l'acide, le nettoyage industriel, détartrage acide, et aussi dans les procédés pétrochimiques, etc.... L'acide chlorhydrique est l'un des agents les plus largement utilisés dans le secteur industriel. Cet acide cause la dégradation des métaux, soit par des réactions chimiques ou électrochimiques [24].

Selon la thermodynamique, les métaux ne sont pas stables au contact de l'air et de l'eau, à quelques exceptions près. Mais, si la vitesse des réactions de corrosion est lente et si l'on emploie des techniques de protection adéquates (traitement de surface, protection électrochimique, etc.), ils peuvent remplir leur fonction pendant la durée de vie prévue d'une réalisation technique

### **I.6.2. Les type de corrosion**

Corrosion la cause de la corrosion est critique. Externe la corrosion peut avoir été causée avant que le tuyau ait été enduit, particulièrement pour pipelines qui ont été revêtus «sur le fossé». Une corrosion interne peut avoir eu lieu alors que le tuyau était en transit vers le site de construction, ou alors qu'il était en stockage sur le site

#### **I.6.2.1. Corrosion interne**

Cette corrosion est essentiellement due aux actions des effluents transportés par la canalisation (milieu anaérobie) ou plus rarement à l'abandon momentané de l'exploitation de cette dernière (milieu aérobie). Elle peut être définie comme le résultat d'actions physiques, chimiques ou bio-physicochimiques internes dues essentiellement à la présence et au transport des effluents (hydrocarbures) entraînant des pertes de métal aussi bien locales que générales [9].

D'autre part plusieurs causes sont à l'origine de cette réaction chimique :

❖ La présence de CO<sub>2</sub>, d'acides organiques, parfois d'H<sub>2</sub>S et des bactéries ce sont les agents corrosifs mais le plus souvent c'est le CO<sub>2</sub>. On admet que la formation de la rouille est alors la résultante de l'action de tous ces corps, mais il faut qu'un acide soit présent, même en protection faible pour que l'attaque puisse se produire [25].

La corrosion généralisée : Elle concerne de très larges superficies et peut être plus ou moins profonde. Elle est, en général, due à des effluents corrosifs ou infectés par des micro-organismes dont l'agressivité affecte l'ensemble des surfaces mises en contact avec le fluide. On la combat souvent par l'injection d'inhibiteurs.

La corrosion par piqûre : c'est une corrosion très localisée, très difficile à localiser sans des moyens d'auscultation interne appropriés car souvent elle est accompagnée de produits de corrosion masquant l'ampleur et l'étendue des dégâts.

La corrosion par érosion : c'est une corrosion localisée dans des zones précises où une attaque mécanique est possible comme par exemple dans les coudes et les changements

de direction brutaux. Les actions répétées au cours du temps amènent le métal à s'éroder. La présence de sable ou d'hydrates accélère en général le processus.

La corrosion bimétallique : c'est une corrosion localisée au niveau du contact entre au moins deux matériels ou équipements de nature électronique différenciée (métaux différents). Plongés dans un milieu électrolytique (conducteur de l'électricité), ils forment alors une pile de corrosion (migration des électrons du métal le plus électro-négatif vers celui qui est le moins).

La corrosion bactérienne : cette corrosion est due à l'action pathogène de bactéries sulfurogènes présentes dans l'effluent entraînant des corrosions plus ou moins localisées. Ce type de corrosion peut, par ailleurs, être de type foudroyant et entraîner rapidement des percements.

### **I.6.2.2. Corrosion externe**

La corrosion externe est en partie due à des actions de dégradation électrochimique du milieu environnant sur l'acier de la conduite. Les causes sont multiples et les mécanismes de détérioration sont décrits dans de nombreux ouvrages consacrés à la corrosion. Elle peut être définie comme le résultat d'actions physicochimiques voire biochimiques sur le pipeline entraînant des pertes de matières aussi bien locales que générales affectant l'extérieur de la canalisation.

Mis à part les causes exogènes (acidité des terrains, courants vagabonds, etc.), elles sont imputables à des défauts de revêtement (protection passive) et/ou à une protection cathodique (protection active) défailante ainsi qu'à des états de stress mécanique de la conduite (corrosion sous contraintes). Contrairement aux dommages mécaniques, les informations topologiques sont plus difficiles à identifier et à interpréter. Cela vient du fait, entre autres, de la multiplicité des facteurs intervenant dans les processus de dégradation et de leur évolution dans le temps

La notion de perte de métal regroupe un grand nombre de formes différentes imputables à des phénomènes également très variés. On peut citer à titre d'exemple :

#### **En zone aérienne :**

❖ la corrosion atmosphérique plus ou moins généralisée due à l'humidité relative à l'air, à des agents contaminants naturels (Cl<sup>-</sup>) ou industriels (SO<sub>2</sub>) ;

- ❖ la corrosion due aux zones de marnage ou de variations de conditions d'oxydoréduction au cours de temps ;

- ❖ à l'arrachement de partie métallique. [9]

### **En zone enterrée :**

- ❖ la corrosion électronique ou électrolytique par courants vagabonds, telluriques ou industriels (corrosion très rapide et très localisée pouvant entraîner des percements)

- ❖ Plus rare la corrosion galvanique : corrosion galvanique résulte du contact entre deux métaux différents sur le électriques entre deux métaux différents

- ❖ Localisée : Certains secteurs de la surface du métal se corrodent à des taux plus élevés que d'autres dus à l'hétérogénéité de surface dans le métal, l'environnement ou dans la géométrie de la structure dans l'ensemble.

- ❖ la corrosion bactérienne : appelé aussi bio-corrosion, Ce processus concerne essentiellement l'attaque bactérienne des canalisations ou réservoirs enterrés : ces bactéries utilisent quelques éléments chimiques se trouvant dans le matériau pour le transformer en ion métallique ou secrètent des produits chimique qui sont agressifs vis à vis du métal (ex : production de  $H_2SO_4$  par certains types de bactéries) [26].

### **En zone émergée :**

- ❖ la corrosion par la salinité de : contenue dans les gisements de pétrole est très élevée (plus de 3 à 4 fois celle de l'eau de mer). La concentration de chlorure de sodium (NaCl) constitue, à lui seul, 80 à 85% de la salinité globale et peut parfois atteindre et même dépasser les conditions de saturation. Les chlorures sont des ions agressifs, souvent à l'origine de corrosion localisée, leur présence en solution s'accompagne d'effets complémentaires, d'une part, leur concentration locale induit une acidification du milieu et d'autre part, la salinité a une influence sur la conductivité du milieu aqueux. Le paramètre important de la corrosion par les chlorures est la teneur en oxygène. En effet, en l'absence totale d'oxygène, la corrosion d'une eau chlorurée peut-être très faible si les conditions de non agressivité carbonique de l'eau sont réunies.

- ❖ la corrosion par un taux d'oxygène : La teneur en oxygène est un paramètre primordial dans les processus de corrosion des aciers. Or compte tenu de

la complexité du phénomène de corrosion, les processus sont fortement conditionnés par l'environnement dans lequel ils séjournent. La corrosion électrochimique des aciers en présence de l'oxygène s'effectue selon les réactions suivantes [27] :



### I.6.3. Etude thermodynamique et cinétique électrochimique

#### I.6.3.1. Aspect thermodynamique de la corrosion

##### I.6.3.1.1. Tension d'électrode à l'équilibre (Equation de Nernst)

Le potentiel d'équilibre est le potentiel d'un métal plongé dans une solution non corrosive contenant ses ions métalliques (solution de l'un de ses sels). Ce potentiel est une grandeur thermodynamique et il est indépendant du temps.

Toute interface électrochimique est siège de réactions d'oxydation et de réduction des espèces réductrices et oxydantes en présence. En général la réaction, considérée réversible, est caractérisée par l'équilibre suivant :

La mesure du potentiel de l'électrode ainsi que la concentration des espèces Ox et Red est régie par la loi de Nernst qui s'écrit :



Nernst a établi une relation thermodynamique entre le potentiel pris par une électrode par rapport à une électrode de référence (ENH) et le rapport des concentrations entre deux espèces réversiblement transformées l'une en l'autre par transfert d'un ou plusieurs électrons. Ainsi le potentiel de Nernst (redox) est donné par l'équation suivant :

$$E_{\text{eq}} = E^\circ + \frac{RT}{nF} \log \left[ \frac{(\text{ox})}{(\text{red})} \right] \quad \text{I.7}$$

Où :

$E^\circ$  : est le potentiel standard des couples redox sont mesurés par rapport à l'électrode normale à hydrogène (ENH)

R : constante des gaz parfaits (8,31 J.K<sup>-1</sup>.mol<sup>-1</sup>)

T : température absolue (en K)

n : nombre d'e- mis en jeu dans la réaction

F : constante de Faraday (96 500 C.mol<sup>-1</sup>)

(Ox) et (Red) sont les activités des espèces Ox et Red, respectivement.

### I.6.3.1.2. Diagrammes de Pourbaix

Les diagrammes de Pourbaix (potentiel-pH) sont définis pour les équilibres thermodynamiques des systèmes métal/solution aqueuse et permettent de connaître les domaines de prédominance relative des différentes espèces considérées. Il est à remarquer que les diagrammes potentiel-pH indiquent quelles sont les réactions qui sont thermodynamiquement possibles, mais ne donne aucune indication sur les vitesses de réactions.

Ces diagrammes peuvent être tracés soit expérimentalement, soit théoriquement en considérant, pour un métal donné, les différentes réactions chimiques et électrochimiques susceptibles de se produire.

- Pour chaque équilibre électrochimique, l'équation de Nernst donne le potentiel en fonction du pH.
- Pour les équilibres chimiques, les constantes d'équilibre permettent de déterminer la valeur du pH correspondant à l'équilibre entre un oxyde et des ions dissous, indépendamment du potentiel.

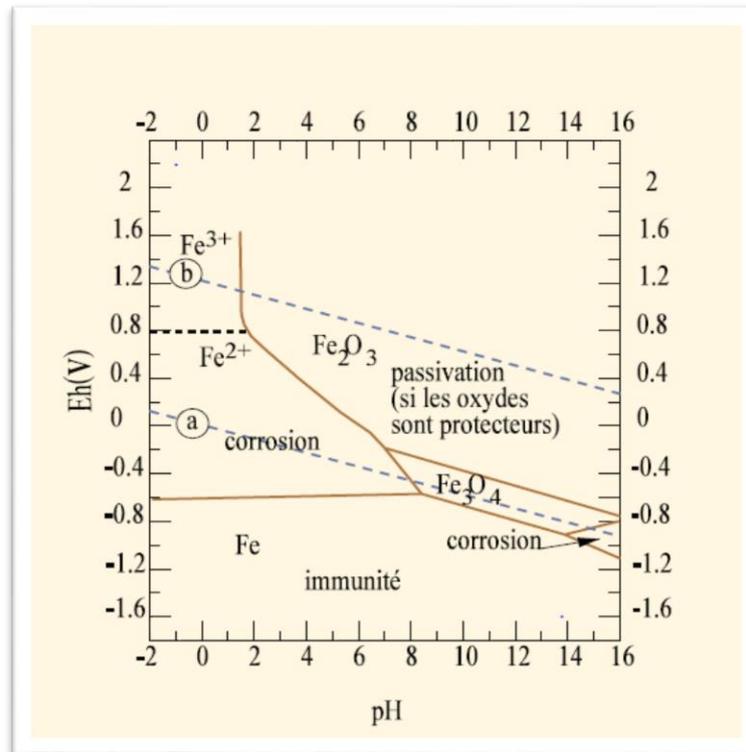
Sur ces diagrammes, on trace généralement le domaine de stabilité de l'eau, délimité par les lignes a et b (figure I.12) correspondantes à l'oxydation et la réduction de l'eau :



Il y a donc dégagement d'oxygène au-dessus de la ligne a et d'hydrogène en dessous de la ligne b.

Appliqués à la corrosion des métaux, ces diagrammes permettent de prévoir le comportement du métal selon le pH de la solution et le potentiel de dissolution du métal dans cette solution. Ils permettent donc d'identifier les domaines de stabilité des différentes espèces. Trois cas peuvent se produire :

- le métal est en état d'immunité, il reste intact (domaine du diagramme où l'élément considéré reste sous forme métallique).
- le métal subit la corrosion en passant à l'état d'ions ou de composés (domaine du diagramme où l'élément considéré est sous forme ionique).
- le métal se recouvre d'un oxyde, hydroxyde, hydrure ou sel pouvant avoir un rôle plus ou moins protecteur : si ce rôle protecteur existe, on parle alors de passivation.



**Figure I.12** : Diagramme potentiel-pH pour le système fer-eau. [28]

### I.6.3.2. Aspect cinétique de la corrosion

Les approches décrites ci-dessus et qui consistent à comparer deux tensions d'électrodes à l'équilibre ne donnent aucune indication sur la vitesse de la réaction de corrosion, problème pratique fondamental ; cette détermination est du domaine de la cinétique électrochimique dont nous donnons ci-dessous les notions principales.

#### I.6.3.2.1. vitesse de corrosion

Dans le cas des réactions électrochimiques, qui mettent en jeu un transfert de charges, on exprimera la vitesse de corrosion en terme :

$$V \text{ (mol/s.m}^2\text{)} = i / nF \quad \text{I.10}$$

V : la vitesse de réaction (mol / s. m<sup>2</sup>)

i : la densité de courant de transfert de charges (A / m<sup>2</sup>).

n : Valence du métal (son nombre d'oxydation).

F : Constante de Faraday (96500 C/ mol) [29].

### I.6.3.2.2. L'intensité du courant de corrosion I<sub>corr</sub>

La détermination de l'intensité du courant de corrosion peut se faire au laboratoire par le tracé des courbes intensités potentiel, également appelées Courbes de polarisation.

### I.6.3.2.3. Phénomène de polarisation

#### I.6.3.2.3.1. Courbes de polarisation

Le problème qui se pose est de savoir comment varie le potentiel de deux électrodes A et K constituées chacune par un métal pur différent, réunies entre elles et plongées dans un électrolyte, en fonction de l'intensité du courant qui circule dans la pile. Ce problème est très important car il correspond à un cas pratique très fréquent.

Le montage de la figure (I.13) montre comment cette étude peut être conduite.

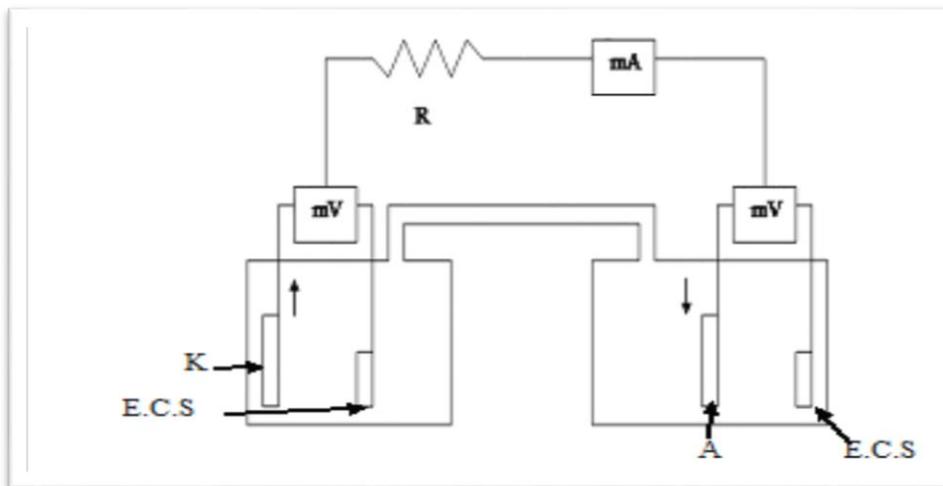
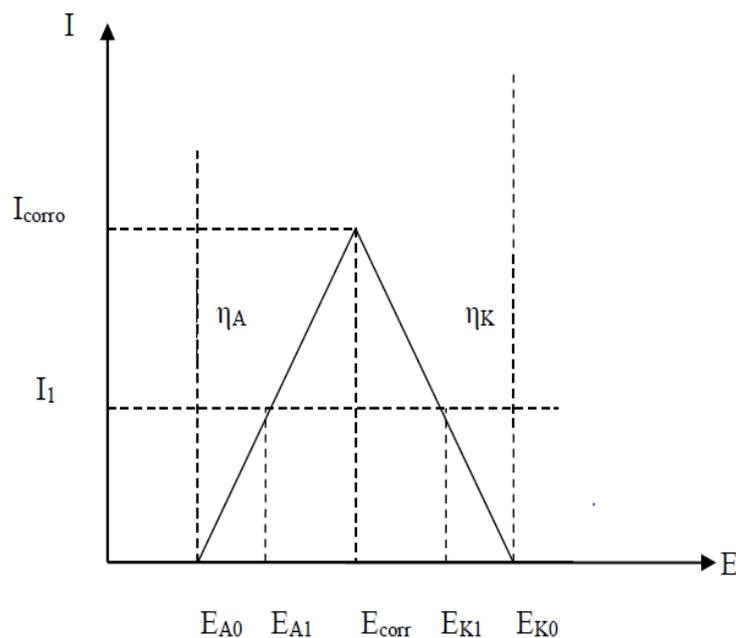


Figure I.13 : Schéma de montage du dispositif destiné à tracer les courbes de polarisation

A chaque instant, on peut mesurer le potentiel EA et EK des deux métaux. Le rhéostat R permet de faire varier l'intensité du courant débité par la pile. A l'instant initial, si le circuit est ouvert, le potentiel des deux électrodes est EA0 pour l'anode, EK0 pour la cathode. Si un courant d'intensité i1 circule dans la pile, on constate que le potentiel de la cathode devient plus négatif, EK1 et celui de l'anode plus positif, EA1. EK1-EK0, est appelé surtension cathodique  $\eta_K$  et EA0 - EA1, surtension anodique  $\eta_A$ . En faisant varier la valeur de

l'intensité du courant de corrosion, on pourra tracer les courbes de polarisation cathodique  $E_K = f(i)$  et anodique  $E_A = f(i)$ . On observe alors que pour une certaine valeur  $i_c$  de l'intensité, le potentiel de l'anode et celui de la cathode prennent la même valeur  $E_C$ .  $i_c$  est l'intensité maximale que pourra débiter la pile ; c'est l'intensité de corrosion du couple A-K dans le milieu donné.  $E_{corr}$  est le potentiel de corrosion du couple (potentiel mixte). Dans certains cas, étant donnée la résistance intérieure du circuit, il est impossible d'atteindre la valeur  $i_c$  de l'intensité du courant de corrosion même si

$R = 0$ . On la détermine alors par extrapolation des deux courbes de polarisation anodique et cathodique fig (I.14).



**Figure I.14: Courbes de polarisation (diagramme d'Evans)**

L'intensité du courant de corrosion  $i_c$  est une grandeur qu'il est très intéressant de connaître car elle permet de calculer la perte de poids  $m$  subie par le métal en fonction du temps. Différents types de Courbes de polarisation

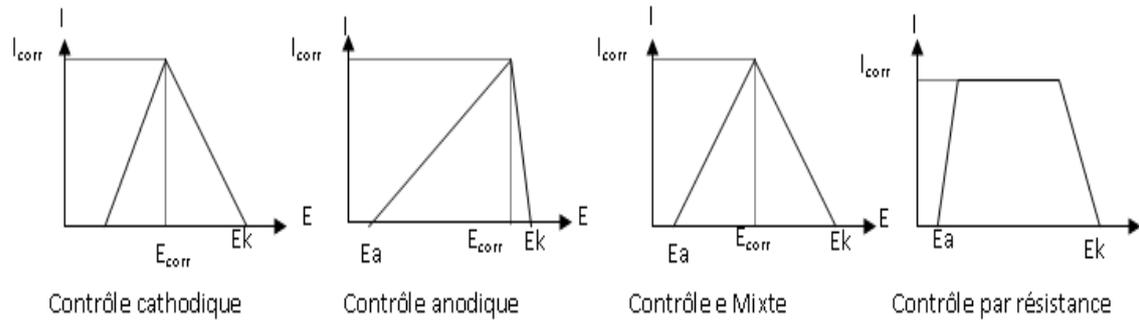
La fig. (I-15) indique les types principaux que peuvent présenter les diagrammes de polarisation.

a) les deux électrodes sont impolarisables l'intensité débitée par la pile dépend de la résistance totale du circuit c'est le cas de la pile Daniell.  $\text{Cu}-\text{CuSO}_4-\text{ZnSO}_4-\text{Zn}$ .

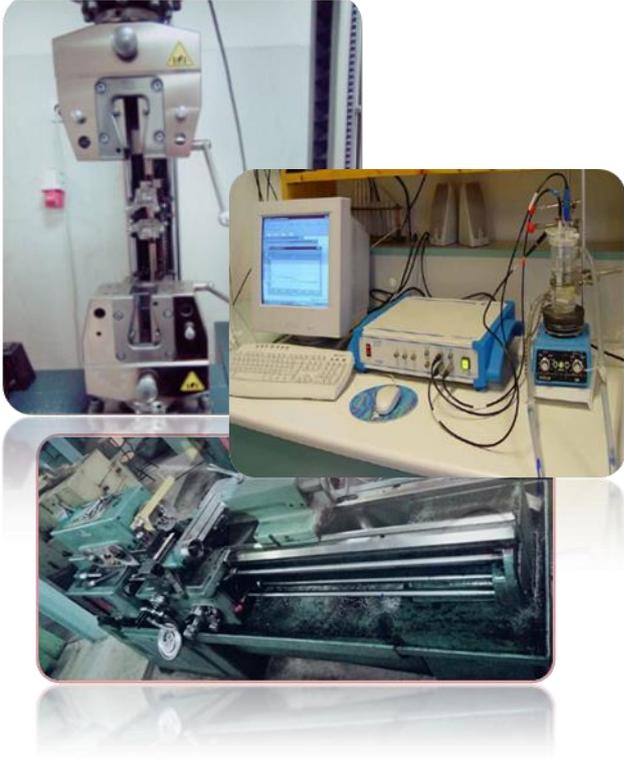
b) la cathode est impolarisable, on dit que la pile fonctionne sous contrôle anodique.

c) L'anode est impolarisable, on dit que la pile fonctionne sous contrôle cathodique.

d) Les deux électrodes sont polarisables, on dit que la pile fonctionne sous contrôle mixte.



*Figure I.15 : Principaux types de courbes de polarisation [30].*



*Chapitre II*  
*Matériaux et*  
*méthodes*  
*expérimentales*

---



## II.1. INTRODUCTION

Ce chapitre donne un exposé succinct de l'ensemble des techniques expérimentales employées dans le cadre de cette étude. Ainsi, un minimum de renseignements indispensables à la compréhension de la démarche expérimentale est présenté.

## II.2. PREPARATION DE L'ECHANTILLON

### II.2. 1.Prélèvement d'échantillons des plaques

A partir d'un tube nous avons découpé une virole comme illustre la (figure II .1.a) Ensuite nous avons prélevé une plaques à partir de cette virole transversale par rapport à la virole, qui contient seulement le métal de base (Figure II.1.b).



*Figure II.1.(a). Une virole découpée à partir d'un tube. (b)Prélèvement des plaques en métal de base transversale par rapport à la virole.*

### II.2.2.Polissage

L'échantillon de pipe du tube a été coupé à l'aide d'une scie mécanique avec refroidissement à l'eau pour éviter le changement microstructurale.

Polissage grossier : qui s'effectue avec du papier abrasif en forme de disque collé sur une polisseuse : les granulométries que l'on utilise sont croissantes : 100,400, 600, 800 et 1200. A chaque changement du papier, le sens d'orientation des éprouvettes change de 90°, ce qui a pour effet d'éliminer les stries et les raies laissées par le disque précédent.

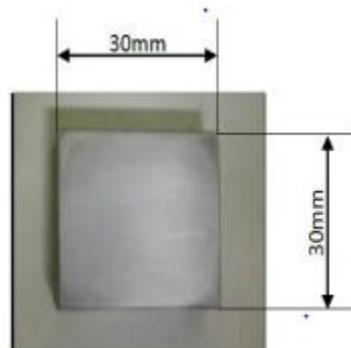


**Figure II.1 : Polisseur à disque (MECAPOLE 250)**

A partir de la plaque du métal de base (Figure II.2 (a)) nous avons découpé une éprouvette de dimensions  $L \times L = 30\text{mm} \times 30\text{mm}$  (Figure II.2 (b))



**a)**



**b)**

**Figure II.2 : Etats de surface avant (a) et après (b) polissage**

Le matériau que nous avons étudié est un tube en acier à haute limite élastique de grade « API 5LX70 » utilisé pour la canalisation du pétrole et gaz

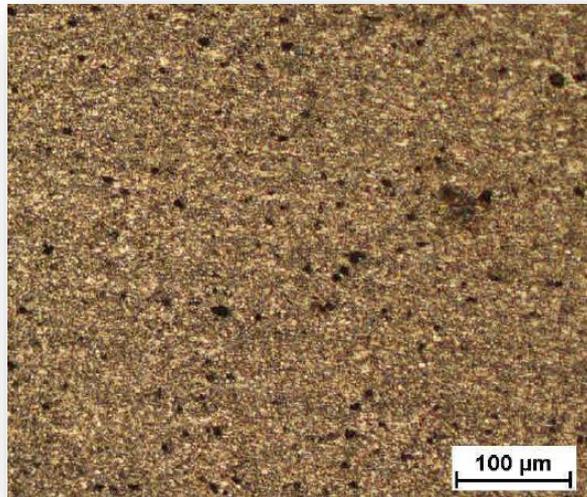
L'acier utilisé dans ce travail est un acier au carbone de type X70, sa composition chimique est tabulée comme il est illustré dans le tableau II.1.

Les compositions chimiques (mass %)											
	C	V	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Nb	Cu	Fe
<b>MIN</b>	0.050	-	0.150	1.00	-	-	-	-	-	-	reste
<b>MAX</b>	0.14	0.08	0.35	1.7	0.02	0.005	0.250	0.25	0.04	0.08	

*Tableau II.1. : Exigence de la Composition chimique d'acier au carbone X70 [31].*

### II.2. 3. Microstructure du métal

L'acier de type X70 présente une microstructure de type ferrito-perlitique. Les bandes de perlite marquées dans l'acier de type X70 explique la sensibilité de cet acier à la fissuration. Cette microstructure en bandes favorise la propagation des fissures [32].



*Figure II.3. Microstructure du métal de base G X200.*

### II.2.4. Préparation des solutions

A partir d'une solution concentrée d'acide hydrochlorique figure on a préparé plusieurs solutions de divers concentrations (0.1 ; 0.5 ; 1; 1.5) M.

<i>Forme brute</i>	<i>HCl</i>
<i>Densité</i>	<i>1.177 g/mol</i>
<i>Masse molaire</i>	<i>36.46%</i>
<i>pureté</i>	<i>35%-38%</i>



*Tableau II.2. Les propriétés physico-chimiques  
D'acide HCl*

*Figure II.4. Acide chlorhydrique  
HCl*

## **II.3.MESURES TRIBOLOGIQUES**

### **II.3.1. L'usure**

Pour étudier la résistance à l'usure des aciers nous avons utilisés le tour parallèle de marque MACO à tourelle revolver (figure II.5). Elle a pour but de tester dans les conditions de laboratoire la résistance à l'usure d'un ensemble tribologique formé de deux matériaux, généralement en présence d'un lubrifiant.

La force appliquée est constante elle est générée par un poids, mesurée à l'aide d'un dynamomètre et perpendiculaire sur le bras qui maintient le disque en acier 100C6 de 5 mm de diamètre, ce dernier provoque l'usure en contact avec l'acier (X70). L'usure générée se manifeste par l'apparition d'un sillon circulaire sur le disque avec une vitesse de glissement constante.



*Figure II.5. tour parallèle de marque MACO à tourelle revolver.*

### **II.3. 2. L'essai de frottement**

En tribométrie, une sphère, une épingle ou un plat est chargé sur l'échantillon d'essai avec une force connue avec précision. La broche est montée sur un levier rigide, conçu comme un capteur de force. Le coefficient de frottement est déterminé pendant l'essai en mesurant la déviation du bras élastique. Coefficients d'usure pour les matériaux de broche et de disque sont calculés à partir du volume de matériel perdu pendant l'essai. Cette simple méthode facilite l'étude de la friction et de l'usure comportement de presque toutes les combinaisons de matériaux à l'état solide avec ou sans lubrifiant.

En outre, le contrôle des paramètres de test tels que la vitesse, fréquence, pression de contact, temps et environnement paramètres (température, humidité et lubrifiant) permet la simulation des conditions réelles d'une situation d'usure pratique



Figure II.6. Tribomètre d'instruments de CSM (CSM Instruments, Suisse)

## II.4. MESURES MECANIQUES

L'essai le plus fréquemment utilisé afin de déterminer le comportement mécanique d'un matériau sont les essais de traction et la dureté.

### II.4.1. Test de Traction

D'une façon générale, on peut estimer les principales propriétés mécaniques à partir d'une courbe conventionnelle de traction  $\sigma = f(\epsilon)$  d'un matériau à comportement ductile en traction. ( Figure II.7).

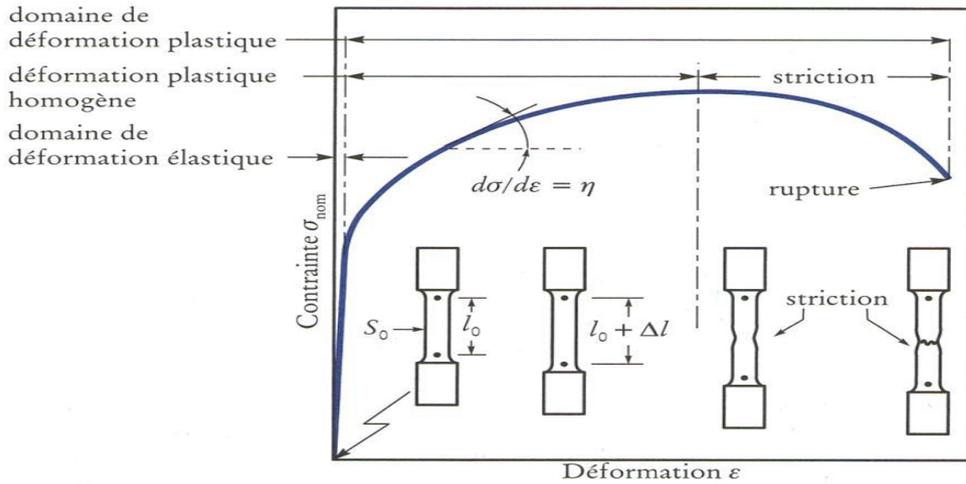


Figure II.7. Représentation d'une courbe de traction (matériau ductile).

L'exploitation de la courbe de traction permet de distinguer deux domaines fondamentaux : **Domaine élastique linéaire** Pendant la première partie de l'essai, l'éprouvette a un comportement élastique linéaire et obéit la loi de Hooke. Théoriquement la pente de la droite est égale au module d'Young  $E$  ; en pratique, le module d'élasticité est très rarement mesuré de cette façon, car, dans le domaine élastique, les déformations sont très faibles, et la précision des mesures laisse alors à désirer. La limite de ce domaine est marquée par une propriété importante. C'est la limite élastique  $R_e$  **Figure II.8.**

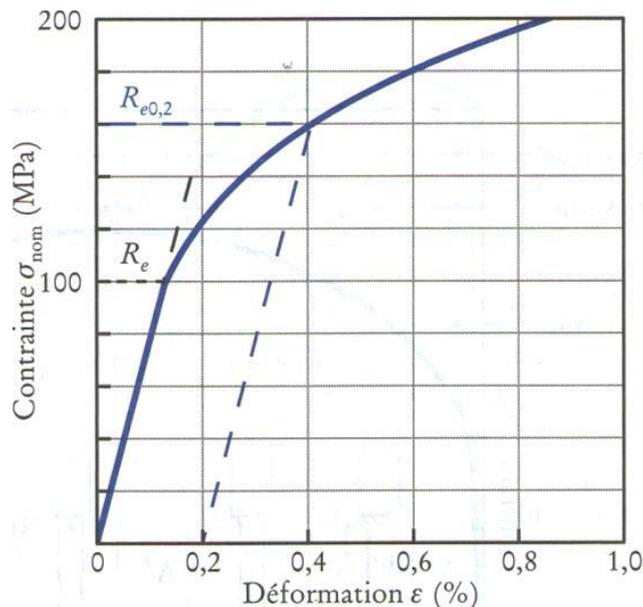


Figure II.8. Représentation de la limite conventionnelle  $R_{p,0,2}$ .

En toute rigueur, la limite d'élasticité  $R_e$  correspond à la contrainte à partir de laquelle le comportement du matériau s'écarte de la loi de Hooke, c'est-à-dire au moment où

apparaît la première déformation plastique irréversible. En d'autres termes, La limite d'élasticité devrait donc correspondre, à la contrainte à partir de laquelle il n'y a plus proportionnalité entre contrainte et déformation. En pratique, même si sa définition est simple, une telle limite de proportionnalité est très difficile à apprécier, car le passage du domaine élastique au domaine plastique se fait de façon progressive ; la limite de proportionnalité, ou limite d'élasticité vraie  $Re$ , dépend donc de la précision que l'on a sur la mesure de l'allongement. On lève toute ambiguïté en définissant une limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 %, notée  $Re_{0,2}$ : Elle définit la contrainte à laquelle correspond une déformation plastique permanente égale à 0,2 %. (Figure II.8).

**Domaine plastique** Dans la seconde phase de l'essai, le comportement du matériau n'est plus linéaire puisque la déformation élastique est suivie de la déformation plastique qui se manifeste de deux façons

**Déformation plastique homogène** : Dans ce sous-domaine qui est compris entre la limite élastique et se poursuit jusqu'à la valeur maximale de la contrainte, le matériau se consolide par phénomène d'écrouissage. Le taux de consolidation  $d\sigma$ , pente de la courbe  $\sigma=f(\varepsilon)$ , diminue quand la contrainte augmente et devient nul à la valeur maximale de la contrainte nominale appliquée. Cette dernière caractérise La résistance à la traction  $Rm$  qui se définit comme la contrainte maximale atteinte durant l'essai de traction. Les matériaux fragiles n'ont pas de domaine de déformation plastique, dans ce cas, la limite d'élasticité et la résistance à la traction sont confondues.

**Déformation plastique hétérogène (localisée)** : Une fois que la courbe de traction ait atteint un maximum  $Rm$ , la contrainte nominale diminue bien que l'allongement continue de croître. Quand l'allongement augmente au-delà de celui qui correspond à la charge maximale atteinte, un nouveau phénomène apparaît : localement, la consolidation du matériau ne peut plus compenser l'augmentation de la contrainte. La déformation n'est plus homogène, mais elle est localisée dans la zone de striction [22].

#### II.4.1.1. Préparation des éprouvettes

Des éprouvettes du matériau concerné, en forme de barreau prismatique comportant une partie centrale calibrée à section constante  $S_0$  et longueur  $L_0$  raccordée à chaque extrémité à deux têtes de section plus importante, sont fixées dans une machine de traction.



*Figure II.9. Les éprouvettes pour l'essai de traction normalisées*

Cet essai est réalisé sur une machine spéciale *Zwick/Roll* qui relie avec un ordinateur est utilisée pour la mise en marche et exploitation de la mesure, les conditions de travail sont tabulées.

Longueur section (mm)	Largeur de section (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )
120	30	3600

*Tableau II.3. Les dimensions des éprouvettes de traction.*



*Figure II.10. La machine de traction .Zwick/Roll*

**Définition des grandeurs données par l'essai de traction**

- **Limite apparente d'élasticité :**

Contrainte correspondant à l'ordonnée du premier palier de la courbe, à condition que ce palier ne soit pas le maximum absolu du diagramme.

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad [\text{N/mm}^2] \quad \text{II.1}$$

- **Résistance à la traction :**

Contrainte correspondant à l'ordonnée du maximum absolu du diagramme

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [\text{N/mm}^2] \quad \text{II.2}$$

- **Résistance à la rupture :**

Contrainte vraie correspondant au dernier point (rupture) du diagramme.  $S_u$  = aire minimale de la section après rupture

$$R_u = \frac{F_u}{S_u} \quad [\text{N/mm}^2] \quad \text{II.3}$$

- **Allongement après rupture :**

Allongement spécifique après rupture mesuré entre repères définissant la longueur initiale  $L_0$ . Dans le cas d'éprouvettes proportionnelles, on en distingue deux principaux dépendant de la longueur initiale choisie

$$A\% = 100 \frac{L - L_0}{L_0} \quad \text{II.4}$$

**II.4.2. Microdureté Vickers**

Il consiste à imprimer dans le métal testé une empreinte avec un pénétrateur en diamant de forme géométrique pyramidale à base carrée et d'angle au sommet entre deux faces opposées de  $136^\circ$ , sous l'action d'une force connue. On mesure la diagonale de l'empreinte carrée laissée par le pénétrateur (figure. II.3).

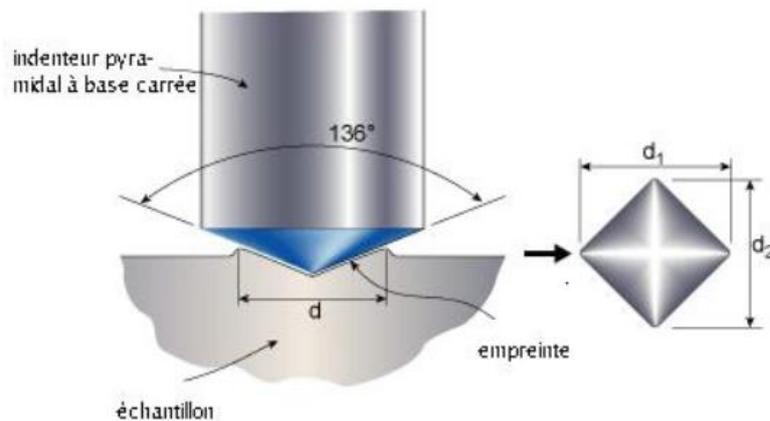


Figure .II.11. Principe de dureté Vickers.

Généralement la gamme des forces utilisables (5 à 100 kgf) permet d'appliquer cette méthode avec toutes les dimensions d'échantillons. Pour des raisons de fiabilité de l'essai, la force est choisie de telle manière à donner une empreinte ayant la diagonale moyenne inférieure aux deux tiers de l'épaisseur. D'autres sources préconisent que la profondeur de pénétration ne dépasse pas le huitième de l'épaisseur de la pièce à tester.

La force  $F$  étant exprimée en kgf, le diamètre de l'empreinte  $d$  en mm et la dureté Vickers est exprimée en kgf/mm<sup>2</sup> selon la relation suivante (I.7).

$$HV = \frac{1,8454P}{d^2}$$

$$\text{avec: } d = \frac{d_1 + d_2}{2}.$$

L'essai de Vickers celui qui fournit la plus grande diversité de renseignement. Il possède deux avantages principaux : être souvent non destructifs et pouvoir être répété un grand nombre de fois ; c'est-à-dire se prêter à une interprétation statistique (dislocation des diagonales d'empreinte suivant une loi gaussienne

Pour réaliser les mesures de la microdureté sur les surfaces de nos échantillons, nous avons utilisé un micro-duremètre Vickers de type Zwik-Roelléquipé d'un oculaire avec une charge de 100 g. l'appareil a été auparavant étalonné.



Figure II.12. Microduremètre Vickers type Zwik-Roell.

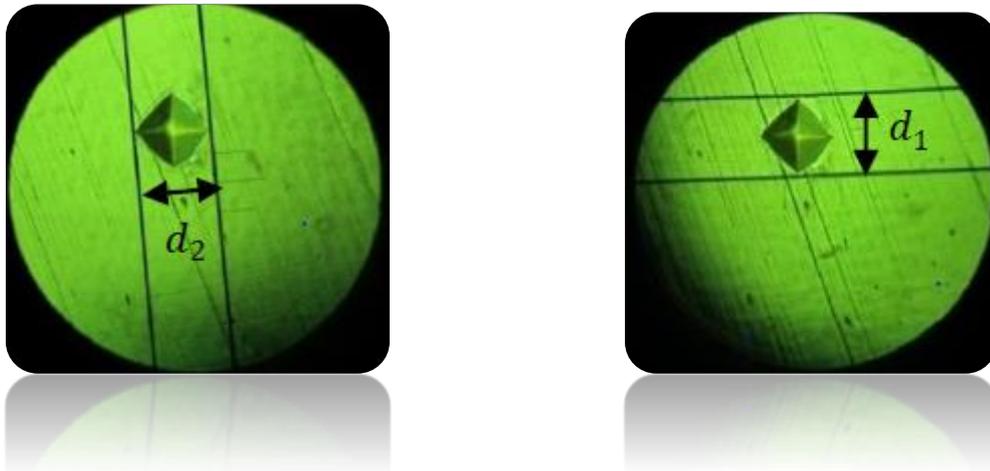


Figure II.13. Empreinte.

## II.5. METHODE ELECTROCHIMIQUE

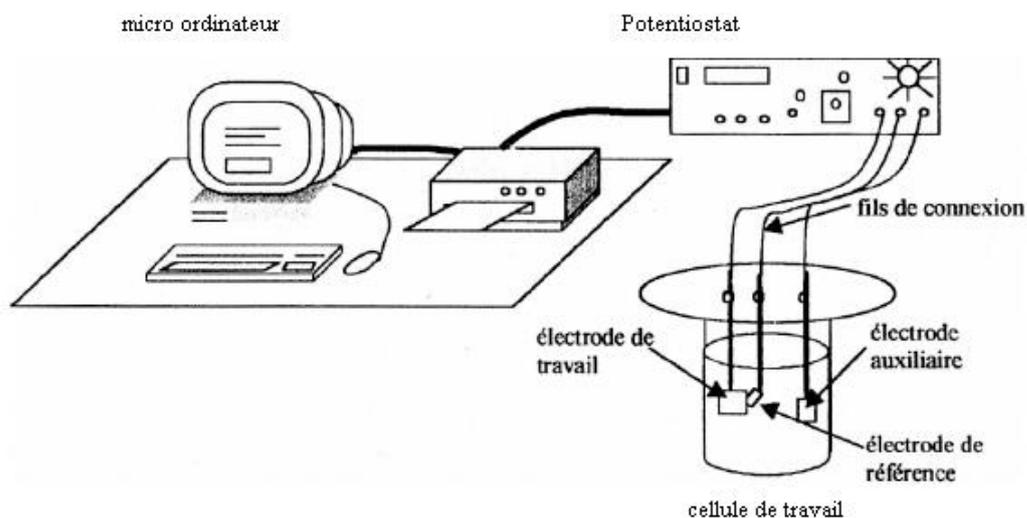
### II.5.1 : Dispositif

L'étude électrochimique a été réalisée à l'aide d'une chaîne électrochimique qui comprend un potentiostat /galvanostat PG201.

- ✓ Une unité de traitement informatique comprenant un micro-ordinateur PC doté d'un logiciel « Volta Master 1 » permettant de calculer les paramètres électrochimiques, et d'une imprimante.

- ✓ Une cellule d'électrolyse en verre pyrex à trois électrodes thermostatées et à double paroi de contenance 500 ml de forme cylindrique.
- une électrode de travail (ET) (acier), sous forme rectangulaire 1cm<sup>2</sup>.
- une contre électrode en Platine (CE), assure le passage du courant.
- une électrode de référence au calomel saturée (ECS) (tacussel XR100).

Le dispositif expérimental de cette technique est représenté par figure II.14.



*Figure II.14. Dispositif Expérimental de la technique Potentiostatique.*

## II.5.2. Protocole des mesures électrochimiques

### II.5.2.1. Les courbes de polarisation

Les courbes de polarisation sont tracées à l'aide d'un appareil Volta Master1, piloter par un ordinateur.

L'utilisation d'un potentiostat permet de faire varier le potentiel de l'électrode de travail par rapport à une électrode de référence au calomel saturé.

L'intensité du courant mesurée est celle qui circule entre l'électrode de travail et l'électrode auxiliaire.

Les mesures s'effectuent lorsque le potentiel libre est stable.

Les courbes de polarisation sont tracées dans un domaine de potentiel de (-700 mV/ECS à -300 mV/ ECS) à une vitesse de balayage de 20 mV/s.

Les courbes sont enregistrées au moyen d'un ordinateur couplé avec le potentiostat à l'aide d'un logiciel Voltmaster.

### II.5.2.2. Mesure de la vitesse de corrosion

#### La méthode de Tafel

Il s'agit en fait d'une méthode d'extrapolation basée sur l'équation  $I = f(E)$  de Butler- Volmer. Par conséquent, les hypothèses nécessaires à l'établissement de cette équation sont à l'origine des limites liées à l'exploitation de cette technique. Si on représente la courbe de polarisation obtenue en coordonnées log (densité de courant) =  $f(E)$  (figure 3), l'intersection des droites anodique et cathodique, extrapolées au potentiel de corrosion, donne la densité de courant de corrosion  $i_{corr}$  (A.cm<sup>-2</sup>).

A partir de la loi de Faraday, il est alors possible de définir une relation permettant de calculer la vitesse de corrosion :

$$V = \frac{i_{corr} \cdot t \cdot M}{n \cdot F \cdot \rho} \quad \text{II.5}$$

V : Vitesse de corrosion

$i_{corr}$  : Densité de courant de corrosion, en A.m<sup>-2</sup>

t : Temps d'immersion en sec

M : Masse molaire, en g.mol<sup>-1</sup>

n : Nombre d'électrons.

F : Constante de Faraday = 96485 C.mol<sup>-1</sup>

$\rho$  : Masse volumique, en g.cm<sup>-3</sup>

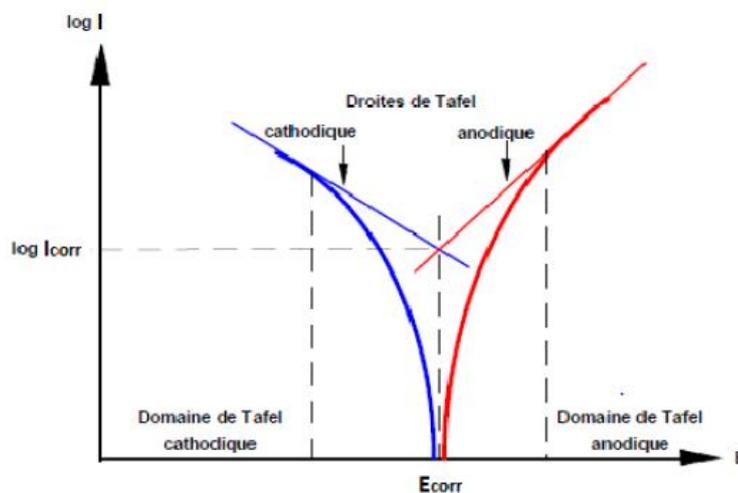


Figure II.15. Détermination du courant de corrosion par la méthode des droites de Tafel [33].

## II.6. TECHNIQUES DE CARACTERISATION

Pour suivre les évolutions structurales et caractériser nos pièces, nous avons utilisé plusieurs techniques à savoir :

### II.6. 1.Méthodes de caractérisations morphologiques

#### *Microscopie Electronique à Balayage (MEB) :*

La microscopie électronique à balayage (MEB) permet d'observer les zones d'études de l'évolution de la corrosion en surface du matériau. Une observation plus fine à la microscopie électronique à balayage permet de sélectionner finalement les surfaces à étudier d'après divers paramètres micro structuraux.

La microscopie électronique à balayage (MEB) est une technique de microscopie électronique capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon en utilisant le principe des interactions électrons-matière.

La MEB consiste en un faisceau d'électrons balayant la surface de l'échantillon à analyser qui, en réponse, réémet certaines particules. Ces particules sont analysées par différents détecteurs qui permettent de reconstruire une image en trois dimensions de la surface.

Pour caractériser la composition chimique, on utilise la technique EDX (Energie Dispersive X-ray) basé sur l'analyse des rayonnements X émis lors de l'interaction électron-matière Figure (II. 15) [28].

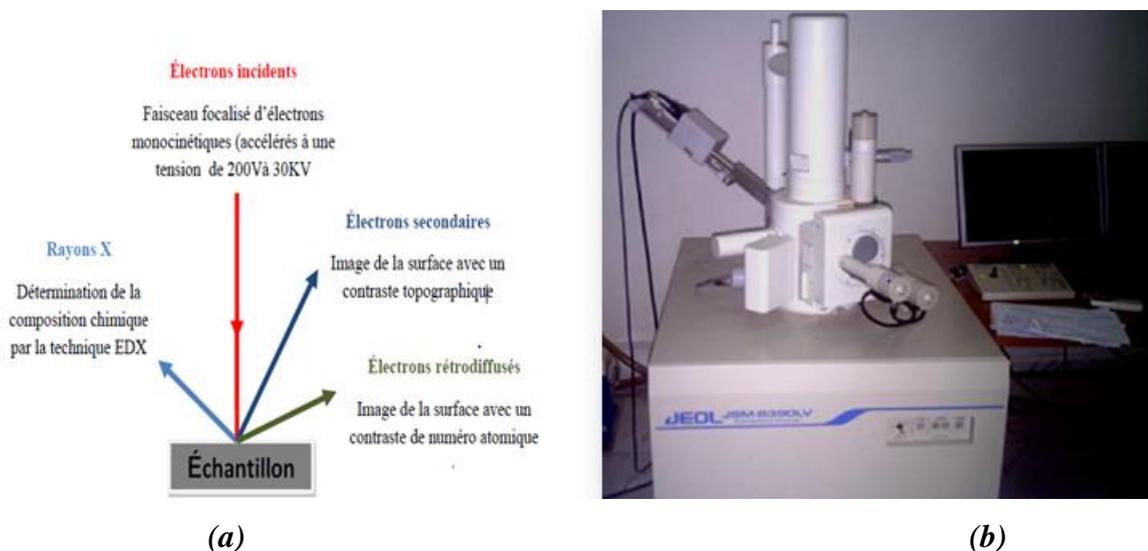


Figure (II. 16): (a) Schéma explicatif du principe physique de microscopie électronique à balayage, (b) Microscopie électronique à balayage (MEB) de type Jeol JSM- 6390LV.

### **Microscopie optique**

Le suivi l'évolution de l'usure a été effectué à l'aide d'un microscope optique type HUND équipé d'une caméra type PHILIPS (figure II.16).



*Figure II.17. Microscopie optique de type HUND.*



*Chapitre 03*  
*Résultats*  
*et*  
*discussions*

---

### III.1.Introduction

Après une brève introduction et un rappel sur les propriétés des aciers des pipelines et les mécanismes de dégradation des surfaces.

Cette partie est volontairement descriptive et présente les résultats des essais :

- ↻ frottement nécessaires à l'identification des réponses en frottement et des mécanismes de dégradation des surfaces.
- ↻ l'usure et les différents concepts et méthodes liés à l'étude de l'usure ainsi que les outils de quantification de ce phénomène.
- ↻ les essais mécaniques tels que la traction et la dureté.
- ↻ le comportement électrochimique de l'acier (API 5L X 70) dans le milieu acide.

### III.2. Etude Tribologique

La tribologie est une branche de mécanique qui étudie le frottement et l'usure qui se produisent à la surface entre deux solides en contact.

#### III .2.1. Le frottement

Dans cette partie, les essais tribologiques a été réalisées en utilisent un tribomètre pion-disque (d'instruments de CSM (CSM Instruments, Suisse)). Le pion est une bille en  $\text{Si}_3\text{N}_4$  de diamètre  $r= 5\text{mm}$ .

Les essais sont déroulés sous les conditions suivantes :

- La force normale appliquée  $F_n = 10 \text{ N}$ .
- La vitesse de rotation du disque  $V = 0.05 \text{ m/s}$
- Le rayon de la piste usée  $R = 1 \text{ mm}$ .
- Le temps de l'essai  $t = 15 \text{ min}$ .
- La température est  $25 \text{ °C} \pm 2\text{°C}$ .
- Le frottement est à sec (sans lubrification).

Figure III.1 présente :

La courbe de coefficient de frottement tribologique  $\mu$  entre le pion- disque et l'acier (X70) mesuré pendant  $(2.02.E4) \text{ s}$ .

La courbe  $\mu_m$  qui exprime la profondeur de la balle en contact avec l'échantillon surveillé en permanence pendant un test de tribomètre sur une distance et sous une charge spécifique.

Une perturbation du coefficient de frottement a été observée. Après analyse des courbes, on a remarqué que la perturbation débutait par une baisse du coefficient de

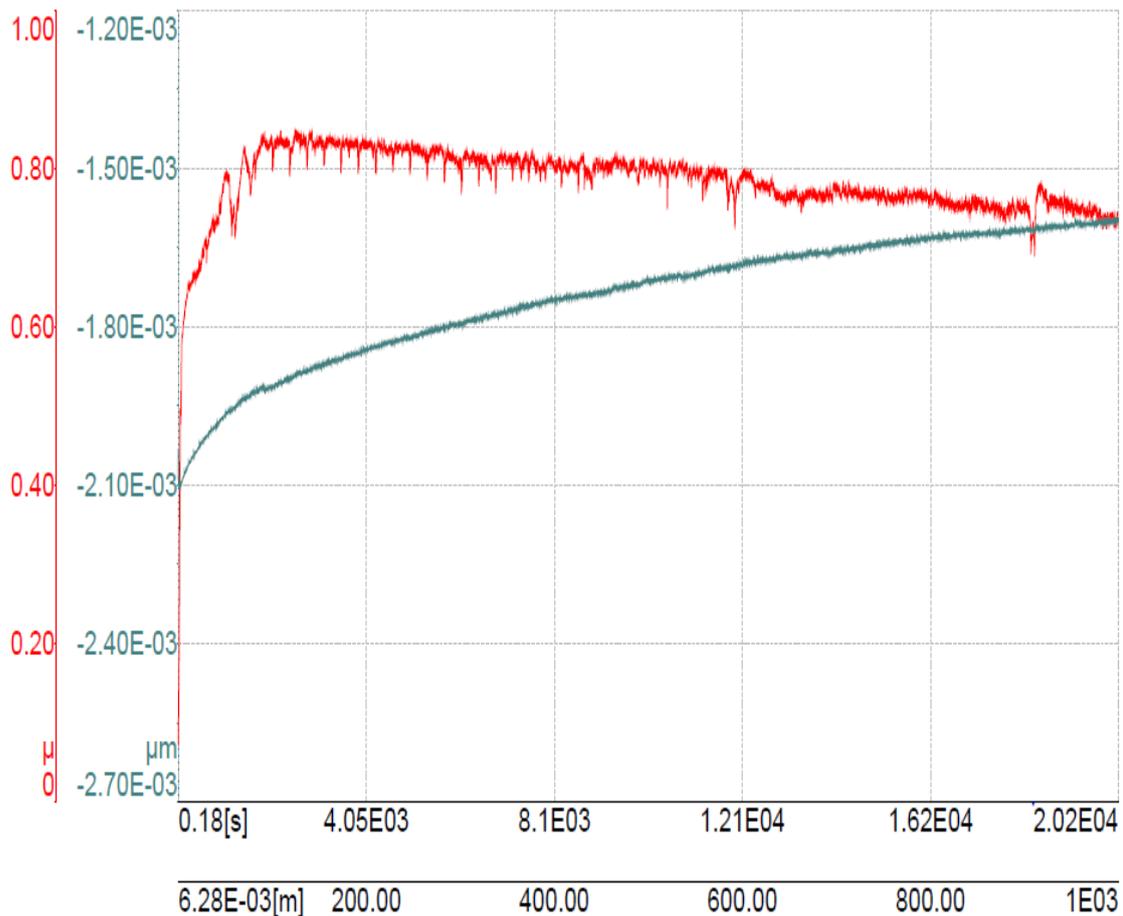
frottement suivie immédiatement d'une augmentation de la valeur moyenne. Un frottement de coefficient moyen 0.847. La perturbation du coefficient de frottement observée était liée à la formation de débris.

La diminution du coefficient de frottement a lieu lorsque l'acier retiré, les grains sont coincés sous la balle  $\text{Si}_3\text{N}_4$  et agissent comme un lubrifiant temporaire avant d'être éjectés par la force centrifuge. Cette élimination des grains d'acier de la trajectoire des billes  $\text{Si}_3\text{N}_4$  provoque une augmentation du coefficient de frottement.

La deuxième courbe  $\mu_m$  représente : la profondeur de pénétration du pion dans l'acier en fonction du temps et la distance. On a remarqué une augmentation de la profondeur de pénétration dû à l'augmentation du frottement du pion avec l'acier, après une stabilité du signal pour les grandes profondeurs à cause du pion érodé.

Après la mesure de tribologie jusqu'à 1000 m on constat la présence de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  provenant de la balle endommagée incorporée dans la surface de l'échantillon et former une couche tribologique.

L'examen de la balle endommagée a montré la présence de particules de l'acier X70 incorporées sur la surface de la balle érodée. Cet endommagement est dû à la dureté de l'acier (X70) plus élevée que celle de la balle du pion-disque. L'origine microscopique de ce phénomène est la faible teneur en carbone de l'acier (X70) a été connue pour donner une résistance. Même résultats a été observé par [34].



**Figure III.1.** Représente les courbes du coefficient de frottement après (2.02.E4) s de mesure

### III .2.2. Usure

Pour évaluer l'influence des conditions opératoires sur l'évolution de l'usure du pion, des mesures gravimétriques à l'aide d'une balance électronique avec une précision de  $(1.10^{-4})$  g avant et après l'essai ont été réalisés pour chaque échantillon. La différence entre les deux pesées détermine la perte de masse  $\Delta m$ . on peut déterminer le taux d'usure en utilisant l'équation d'Archard [35]:

$$K_u = \frac{V_u}{F_N \cdot D} \quad \text{III. 1}$$

Avec :

$K_u$  : le taux s'usure (en  $\text{m}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$ ) ;  $V_u$  : le volume d'usure (en  $\text{m}^3$ )

$F_N$  : la force normale (en N) ;  $D$  : la distance de glissement (en m)

Densité de l'acier X70 ( $\text{g}/\text{mm}^3$ ) : 7.85

La durée de l'essai : 10 min

Vitesse de rotation (trs/min)	56	80	112	160
La distance de parcourue (m)	70.4	100.5	140.7	201
La charge (N)	La perte de masse en (mg)			
1.5 N	1.7	7.4	10	13.9
3.5 N	5	10	13.2	20
6 N	13	16	20.9	31.2

Tableau III.1. Les résultats de l'essai de l'usure.

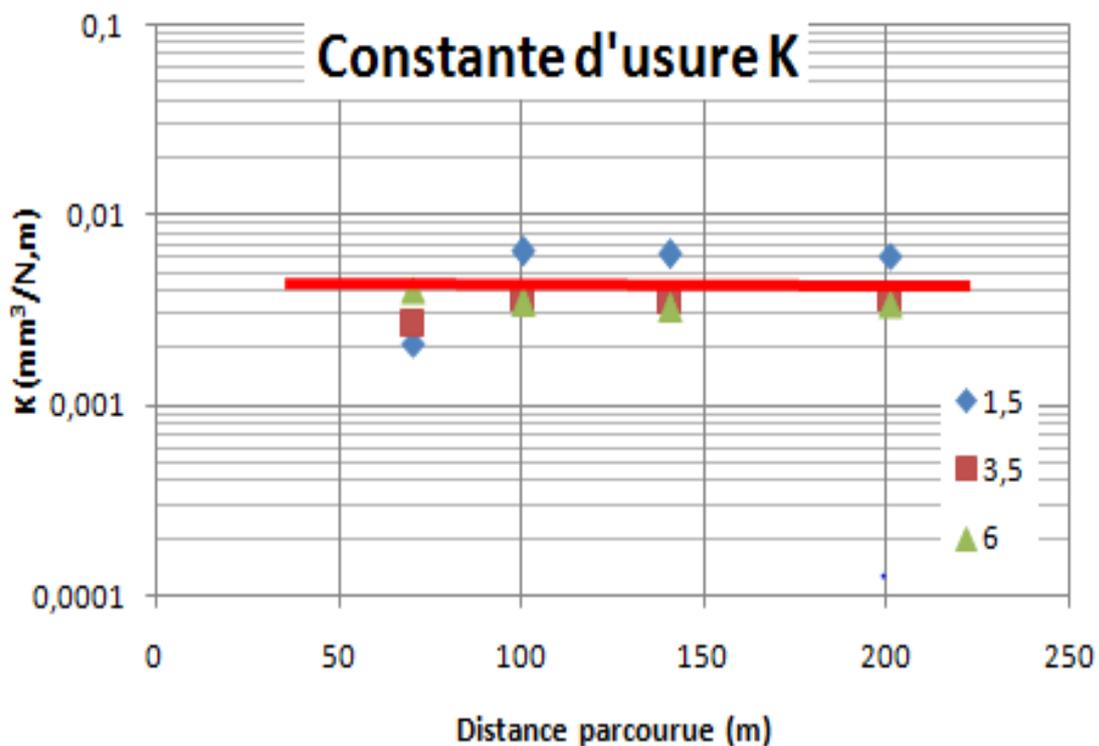


Figure III.2. Montre l'évolution du taux d'usure du pion frottant contre le disque de l'acier testé.

La courbe représente le taux de l'usure à l'échelle logarithmique en fonction de distance de parcours. On a remarqué que pour différentes vitesses de rotation et différentes charges il y a une seule valeur du taux de l'usure constant ( $K_u = 4.E10^{-3} m^3/N.m$ ), c'est la moyenne des séries des points, alors un seul phénomène de l'usure.



*La Figure III.3. Evolution de la surface de contact des disques après les tests de frottement*

Quel que soit la charge appliquée sur les échantillons, on observe des sillons parallèles à la direction de glissement qui ont tendance à s'agrandir avec l'augmentation de la force normale appliquée. Les sillons dans les zones de frottement donnent l'impression d'un micro-labourage de surfaces frottées, avec parfois la formation des bourrelets latéraux, un signe d'une déformation plastique dans le contact.

Les surfaces usées des matériaux de l'acier testés sont présentés dans (la figure III.3). L'influence de la charge normale sur l'état de surfaces usées est significative. À charge normale appliquée de 1.5N, les surfaces usées sont encore rugueuses et présentent des traces de glissement, avec seulement quelques rainures. De nombreuses rainures résultant du labourage ont été observées sur les surfaces de contacts de tous les échantillons à charge normale appliquée de 3.5N et 6N. Avec l'accroissement de la charge normale, la morphologie des surfaces usées passe de fines rayures à des rainures distinctes. Comme on a observé pour à une charge normale élevée, l'acier se distingue par une surface usée non-uniforme avec de faibles déformations, et présente des rainures parallèles dues à l'abrasion. L'effet de la charge appliquée sur l'usure de l'acier est nettement plus important que celui des autres paramètres d'essais tels que la vitesse de glissement.

### III.3. Etude des propriétés mécaniques

Les méthodes d'essais mécaniques sont principalement divisées en deux catégories, l'une est l'essai de traction, l'autre est le test de dureté.

Les essais de dureté et la traction sur les aciers des pipelines prennent en compte leurs propriétés mécaniques, qui sont liées aux performances et à la qualité de ces aciers en tant que déformation de la matière première, la rupture et autres traitements. Par conséquent, chaque acier a besoin d'un test mécanique.

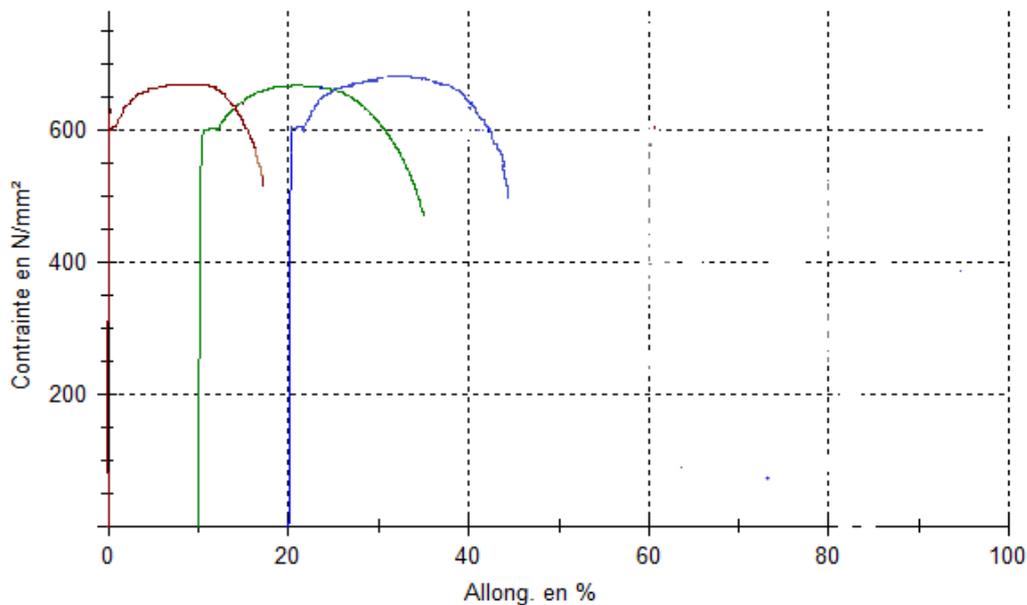
#### III.3.1. La Traction

Cet essai nous a permis de déterminer plusieurs caractéristiques mécaniques du matériau testé, notamment l'allongement (en %), la résistance à la rupture (en MPa), la résistance à la traction (en MPa)...



*Figure III.4. Traction de métal de base*

Les résultats contrainte-déformation obtenus sur le métal de base sont illustrés par la (figure III.5) et le tableau III.2.



*Figure III.5. Représente les courbes (contraintes- allongements) pendant l'essai de traction sur des éprouvettes de forme haltère de l'acier X70.*

La figure ci-dessus représente les courbes contraintes -allongements pendant l'essai de traction sur des éprouvettes de forme haltère.

On peut remarquer qu'il existe un bon accord entre les résultats obtenus par les tests 2 et 3 à l'exception du test 1 où une différence assez remarquable a été constatée.

Par conséquent, il est préférable de travailler avec la moyenne des deux courbes des test 2 et 3 ou bien utiliser directement les résultats obtenus par l'un des deux test (test 2 ou test 3). On observe quatre zones distinctes :

**1) Zone 1:** Une augmentation de la contrainte avec l'accroissement de l'allongement linéaire. Dans cette zone, la déformation au 1<sup>er</sup> stade est élastique c'est à-dire que l'éprouvette revient à sa géométrie initiale après suppression de la charge ou on enregistre uniquement un changement réversible du volume de l'éprouvette sans changement de la forme globale et toute les contraintes sont des contraintes normales (absence de cisaillement) et le comportement suit la loi de Hooke.

Au niveau moléculaire, l'élasticité instantanée peut s'expliquer par une légère déformation des liaisons de valence par étirement ou distorsion ou par des changements de distance entre chaînes voisines.

**2) Zone 2:** L'augmentation de la contrainte se poursuit avec l'augmentation de la déformation au-delà de la limite d'écoulement ou toute la déformation est localisée dans une

partie. Il correspond à une déformation localisée sous forme d'une ou plusieurs bandes de déformation intense se propageant le long de l'éprouvette de traction ce phénomène est courant dans les aciers doux et se traduit sur la courbe de traction par un crochet de traction suivi d'un palier dans la gamme de déformation correspondant au palier la déformation est entièrement localisée dans les bandes. Toute la déformation se produisant au niveau de font de band qui se propage, les vitesses de déformation plastique locale peuvent être très élevée.

L'origine microscopique de ce phénomène est l'ancrage très fort des dislocations par les atomes de carbone il faut augmenter beaucoup la contrainte pour les désancrer mais une fois qu'elles sont désancrées, la déformation totale étant imposée, il faut que la vitesse de déformation élastique diminue donc que la contrainte chute : c'est l'origine du crochet de traction

**3) Zone 3 :** La déformation plastique se poursuit sans augmentation notable de la contrainte. La striction commence à apparaître à ce stade de déformation

**4) Zone 4 :** Domaine de striction ou de déformation plastique localisée, jusqu'a le point de rupture de l'éprouvette.

Série	Resistance à la rupture [N/mm <sup>2</sup> ] (MPa)	Contrainte Maximale Rm ( MPa )	Allongement à rupture (A%)
01	483.02	671.89	19.55
02	468.94	667.79	24.88
03	490.15	687.31	24.77
MOY	487.55	678.97	23.07

*Tableau III.2. Propriétés mécaniques de l'acier grade API X70.*

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que :

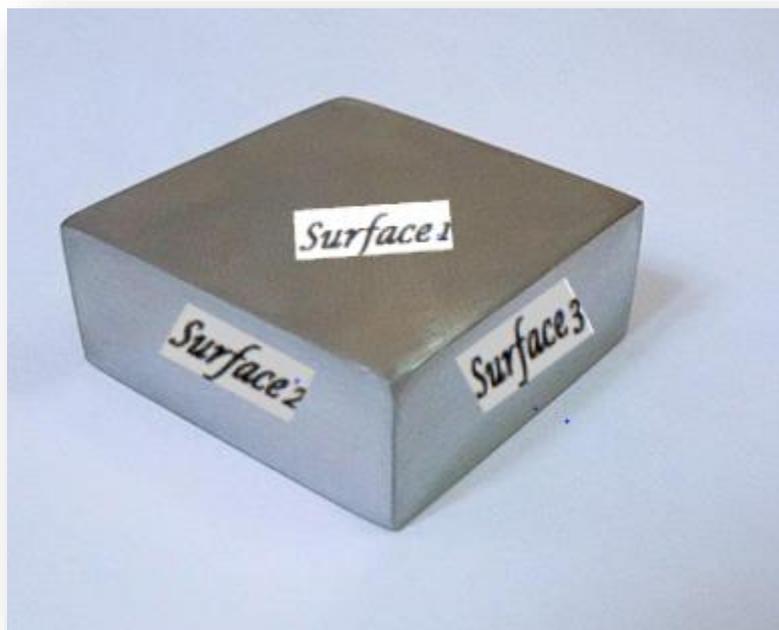
- ☞ Les valeurs de la limite d'élasticité et de la résistance maximale à la traction pour les trois éprouvettes de métal de base supérieures aux valeurs minimales (**Re0.2>483 MPa, Rm>566 MPa**) et inférieure aux valeurs maximale (**Re0.2<621 MPa, Rm<758 MPa**).
- ☞ la valeur d'Allongement à rupture supérieures aux valeurs minimales (A% >22%)

L'acier API 5L X70 possède des limites élastiques et à la rupture très élevées. Ce qui justifie son utilisation pour la fabrication des tubes des pipelines. Alors on dit que les essais de traction sont conformes à la norme API 5L [23].

### III.3.2.1. Mesure de la micro-dureté

La dureté est mesurée par un microduremètre de type zwick Rowel au niveau de laboratoire physique des couches minces et application à l'université de Biskra.

Les essais ont été réalisés sur trois surfaces perpendiculaires aux directions longitudinales (plan x-y), circonférentielle plan (x-y), et radiale plan (x-z), en appliquant une charge 100N.



*Figure III.6. Différentes plages pour la mesure de la microdureté.*

Les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau III.3 :

La charge (N)	Surface 1	Surface 2	Surface 3
Hv	214	210	215

*Tableau III.3. Résultats d'essai HV (les unités sont en Kg/mm<sup>2</sup>).*

Les résultats affirment que la nuance API 5L X70 se caractérise par une très bonne homogénéité des valeurs de micro dureté.

Il est intéressant de souligner que les valeurs de micro dureté retenue sont en parfait cohérence avec celles de la littérature et les exigences de la norme API ( $HV_{10} \leq 270$ ) [34].

### III .4. ETUDE ELECTROCHIMIQUE

#### III.4.1. Corrosion

Dans cette partie est consacrée à l'évaluation de corrosion de l'acier API 5L X70 en milieu HCl. Les tests ont été faits en divers concentration de (0.1 ; 0.2 ; 0.5 ;1 ;2)M

Les courbes de polarisation (Figure III.7) comportent trois domaines de potentiel.

**La zone I :** l'acier sous la polarisation cathodique. L'acier est protégé et la réaction qui se déroule est la réaction de réduction de l'eau.



**La zone II :** domaine actif, situé entre  $E_{\text{corr}}$  et  $E_{\text{pit}}$ , dans ce domaine il ya une dissolution active de l'acier selon l'équation :



Les électrons libérés par la dissolution active sont repris par l'oxygène dissous du milieu pour former les hydroxydes  $OH^-$  selon l'équation :

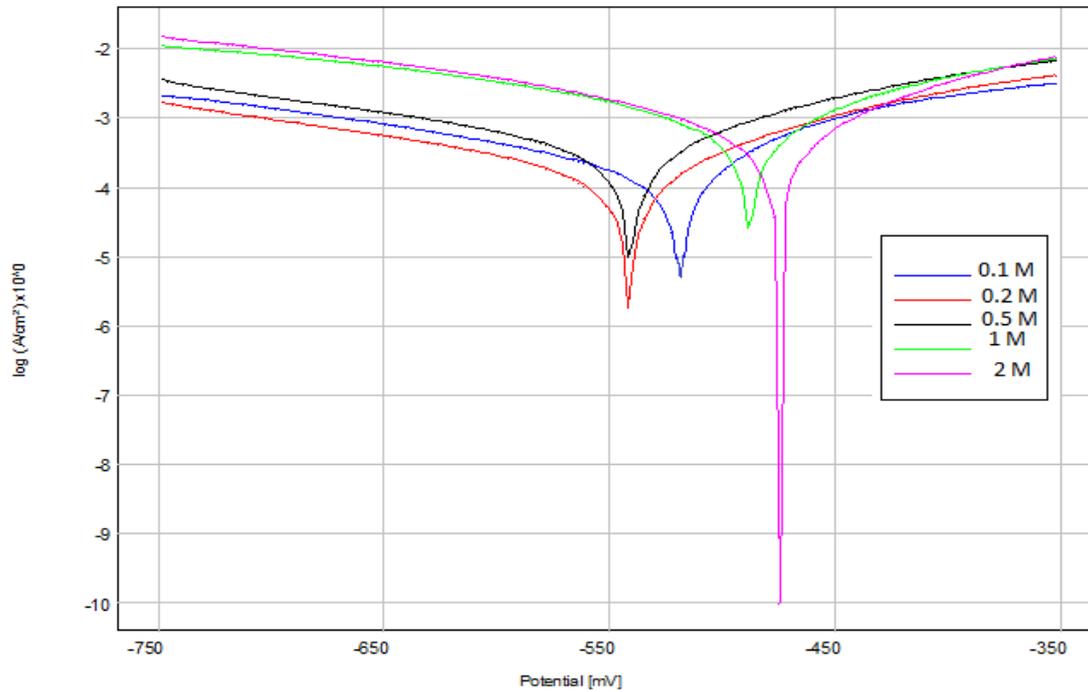


**La zone III :** c'est la zone de la corrosion par pique, après  $E_{\text{pit}}$  la densité de courant augmente rapidement .on a observé l'absence de la couche passive à cause de présence des anions  $Cl^-$ .

Alors, on peut voir que la cinétique de corrosion est entièrement fixée par les réactions de transfert de charge.

## III.4.2. Les courbes de la polarisation

Les courbes de polarisations pour l'acier X70 pour différentes concentrations de HCl sont présentées dans la figure III.6 :



*Figure III.7. Courbes de Tafel de l'acier X70 en fonction de concentration.*

La cinétique de corrosion est entièrement fixée par la réaction de transfert de charge. Le tableau III.4 regroupe les valeurs des paramètres électrochimiques déterminés à partir des courbes de polarisation.

Concentrations Par (M)	$E_{corr.}$ (mV / ECS)	$R_p$ ( $\Omega.cm^2$ )	$I_{corr.}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$B_a$ (mv)	$B_c$ (mv)	$T_{corr}$ (mm/an)
0.1	-523.6	144.37	0.2210	110.6	-232.0	2.574
0.2	-545.3	169.89	0.1772	115.7	-215.5	2.072
0.5	-544.8	77.25	0.3991	131.1	224.8	4.667
1	-491.8	33.66	1.4044	197.6	283.8	16.42
2	-479.7	41.61	0.7442	141.4	291.5	8.704

Tableau III.4. Calcul des paramètres cinétiques pour la variation de la concentration.

A partir du tableau on peut constater que la vitesse de corrosion de l'acier API 5L X 70. Dans le milieu HCl (1M) est plus grande que celles des autres concentrations, ce qui confirme que le milieu HCl (1M) le plus corrosif.

#### III.4.3. La résistance de la polarisation

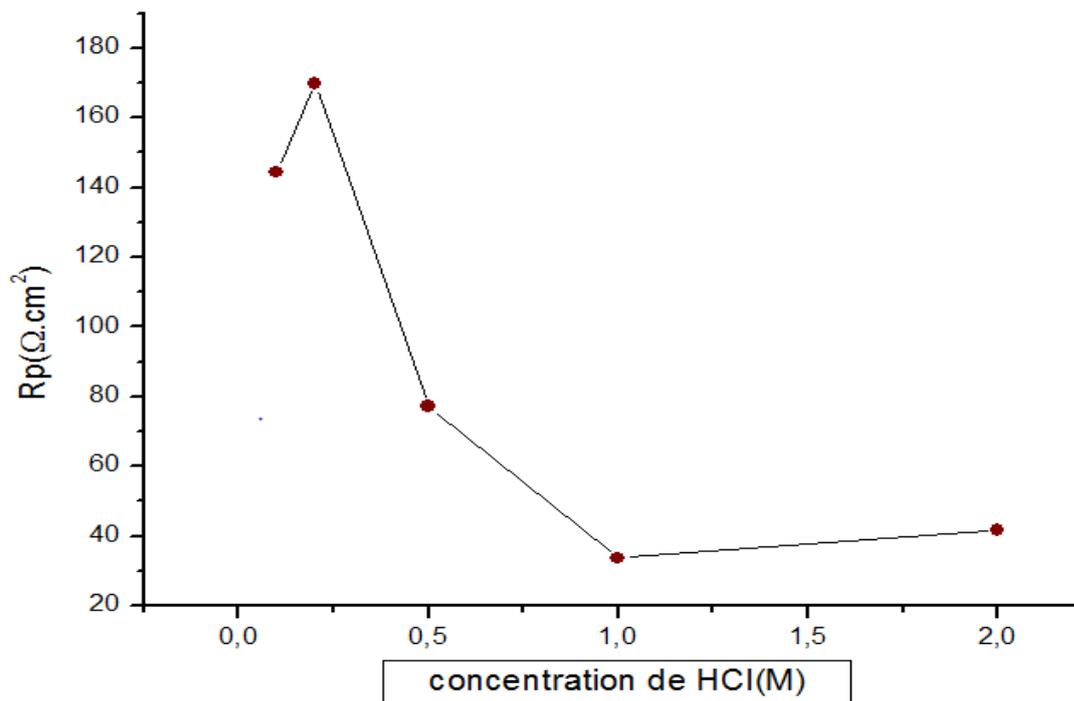


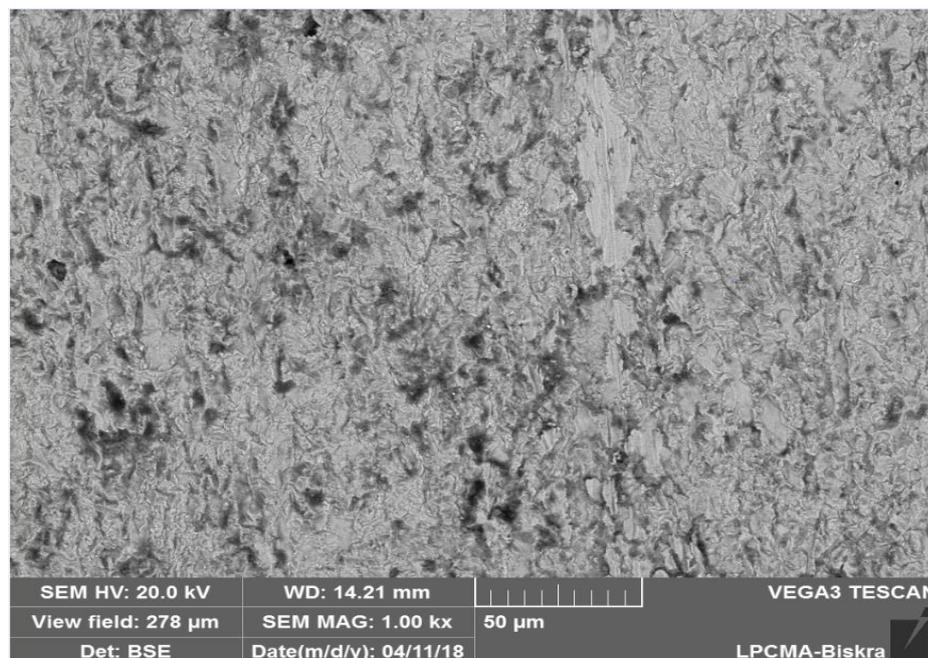
Figure III.8 : Variations de résistance à la corrosion en fonction des concentrations de HCl.

Les valeurs des résistances de polarisation pour différentes concentration de milieu HCl sont présentées dans la figure. On peut voir que la résistance de polarisation augmente progressivement à 0.2 M de puis elle diminue considérablement jusqu'à 1M de HCl qui indique l'augmentation de la vitesse de corrosion. Ce résultat est semblable aux travaux J. Tang et al [36].

#### III.4.4. Caractérisation métallographique

Pour évaluer la corrosion par piqûre de l'acier après le teste d'immersion d'échantillon pendant (7 jours) dans une solution d'acide hydrochlorique de concentration 1M, Il était nécessaire d'enlever ou diminuer la couche de produit de corrosion pour accéder a l'acier nu. Les produits de corrosion ont été éliminés par un polissage de la surface par un pipier grade 5000 pendant 60 secondes.

La figure III.9 présente la micrographie MEB des piqûres de l'acier API 5L X70 en milieu HCl La corrosion se produit localement formant des piqûres (zones sombres) à la surface d'acier (zones lumineuses), ces piqûres ont pu se développer rapidement avec le temps d'immersion.



*Figure III.9. La Micrographie MEB de e la corrosion par piqûre de l'acier API 5L X70*

# Conclusion générale

---

Comme il a été signalé au début, que l'objectif de ce présent travail a été consacré à faire une Etude sur les propriétés tribologiques, mécanique et électrochimique de l'acier des pipelines API 5L X70.

L'étude a commencé par le choix de la nuance la plus utilisée API 5L X70.

L'étude tribologique a pour objectif d'identifier les différents concepts et méthodes liés aux mécanismes de dégradation des surfaces.

- ☞ Au cours des essais, nous avons observé : La perturbation du coefficient de frottement observée était liée à la formation de débris.
- ☞ On remarque que pour différents vitesses de rotation et différents charges il y a une seule valeur du taux de l'usure constant ( $Ku=4.E10^{-3}m^3/N.m$ ), c'est la moyenne des séries des points, alors un seul phénomène de l'usure.
- ☞ Les mesures tribologiques ont montré des dommages d'usure sur les deux surfaces du Si3N4 balle et l'échantillon de l'acier de pipeline (X70). L'endommagement de la surface de la balle du pion disque est causé après frottement avec l'acier de pipeline X70 qui a une dureté plus élevée.
- ☞ Le type d'usure c'est l'usure par abrasion  
L'étude mécanique telle que la traction concerne l'analyse de contrainte dans une plaque de traction. et la dureté.
- ☞ L'acier API 5L X70 utilisé pour la fabrication des pipelines possède des propriétés particulières répondant bien aux conditions de choix pour une telle utilisation à cause de sa haute limite élastique (R0.2) égale 487.55 MPa et une résistance mécanique Rm égale à 678.9 MPa. de sa bonne ductilité avec une micro dureté largement admissible.

Les essais de la corrosion se focalisent sur l'étude de comportement électrochimique de l'acier au carbone XC70 sous l'effet de la concentration en milieu acide hydrochlorique

- ☞ Pour déterminer la cinétique du phénomène de corrosion, des méthodes basées essentiellement sur l'étude électrochimique telles que la potentiodynamique ont été employées afin de suivre ce phénomène. Sous l'effet de Concentration. En premier temps et par suivie cinétique, on a tracé les branches de Tafel anodique et cathodique à partir des courbes de polarisations pour différentes concentrations et calculer les paramètres cinétiques. En vue des différentes résultats obtenues lors de ce travail, on a conclu que :

## *Conclusion générale*

---

- ↻ la résistance de polarisation augmente progressivement à 0.2 M de puis elle diminue considérablement jusqu'à 1M de HCl qui signifie que ce milieu est le plus corrosif
- ↻ Les observations par microscopie électronique à balayage (MEB) confirment la présence des taches sur la surface de l'acier résultant de l'interaction avec HCl se forme des piqûres

## *Références bibliographiques*

---

- [1] Y.Chemani, Etude sur les procédés de traitement des tubes de pipelines corrodés acier API 5L X60, mémoire du master, université de Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, juin 2013
- [2] Shang, Hsu Yang , methodology for analysis of defective pipeline by introducing stress concentration factor into beam-pipe finite element formulation Acta Scientiarum. Technology, vol. 38, núm. 3, julio-septiembre, 2016, pp. 313-320 Universidade Estadual de Maringá, Brasil
- [3] F. HADJOU, Etude du comportement en fatigue des aciers pour pipelines à différents grades, Mémoire pour l'obtention du diplôme en Post-Graduation Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, 2013.
- [4] T. Natech, Réhabilitation et renforcement des canalisations sous pression en présence des défauts de surface, thèse doctorat, l'université Mohamed Boudiaf, (Oran ), 2015
- [5] R.Winston Revie, H.H.Uhlig, Corrosion and corrosion control: an introduction to corrosion science and engineering, Edition Wiley, Etats-unis, (2008).
- [6] «Welding pressure pipelines & piping systems», ed. THE LINCOLN ELECTRIC.
- [7] O. Bouledroua, M. Ouled Mbereick, M. Hadj Meliani, Qualification d'un Acier API 5L X70 : Etude Expérimentale et Validation Numérique, Revue « Nature & Technologie ». A- Sciences fondamentales et Engineering, n° 13/ Juin 2015. Pages 34 à 39
- [8] J.M. Gray (2001), Niobium bearing steels in pipeline projects, Niobium Science and Technology, Dec 2 & 5, 2001.
- [9] M. Nehal, étude mécano-fiabiliste des pipelines destinés aux hydrocarbures, thèse doctorat, université de Badji Mokhtar, Annaba, 2016
- [10] M. Baker, Integrity management program stress corrosion cracking study. Office of pipeline safety OPS TT08, 2004.
- [11] D. F. Moore, principes et applications de la tribologie, edit. PERBEGAMON PRESS (1975).
- [12] Schey, J.A, Tribology in metal working, fracturing lubrication and wear ,ASM USA (1983)
- [13] O. Belahssen, Etude comparative du comportement chimique et tribologique des aciers nitrurés, thèse doctorat, Université Mohamed Khider de Biskra, décembre 2013

## *Références bibliographiques*

---

- [14] I. M. Hutchings, Tribology. Friction and wear of engineering materials, edit. EDWARDARNOLD (1992)
- [15] H. Czichos, Tribology series, 1. Tribology, edit. ELSEVIER (1978).
- [16] T.T.X. Hang, T.A. Truc, N.T. Duong, N. Pébère, M.G. Olivier, Prog. Org. Coat. 74(2012), 343.
- [17] Achour Ali, étude du comportement en usure Des outils de coupe en fonction du revêtement, thèse doctorat, Université Mentouri – Constantine, 2006 .
- [18] Djafri Mohammed, etude numerique et experimentale du comportement Tribologique des contacts glissant - application aux freins à disques, thèse doctorat, universite d'oran Mohamed Boudiaf, 2014-2015
- [19] D. DOWSON, History of Tribology. 2ndédition.Londres et Bury St Edmonds, UK : Professional Engineering Publishing, 1998.
- [20] M. Blétry, Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux, Polycop, 2006-2007.
- [21] G. Desjardin, Optimized pipeline repair and inspection planning using in-line inspection data. Pipeline pigging integrity assesement and repair conference. Houston, 2002.
- [22] Rapport d'enquête de pipeline (Canada 20 février 2009).
- [23] Y.lazhar,Etude de la corrosion localisée par piqures des aciers inoxydable 304L et 430 :effet de la déformation à froid par traction et laminage, thèse doctorat, université de constantine 1, mai 2013
- [24] American Petroleum Institute. Specification for Line Pipe. ANSI/API Specification 5L. 44th ed. American Petroleum Institute; 2008.
- [25] D. Benmessaoud Left, M. Zertoubi, A. Irhzo, M. Azzi ,Huiles et Extraits de plantes comme inhibiteurs de corrosion pour différents métaux et alliages dans le milieu acide chlorhydrique. (Review: oils and extracts plants as corrosion inhibitors for different metals and alloys in hydrochloric acid medium).2013
- [26] L.JAUBERT, Etude de la corrosion uniforme d'aciers non alliés et inoxydables : utilisation conjointe de l'émission acoustique et des techniques électrochimiques, thèse de doctorat L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Septembre 2004

## *Références bibliographiques*

---

- [27] A.BENHAMMOUDA , Caractérisations mécaniques et électrochimiques d'un joint soudé en acier API 5L X70, Mémoire de fin d'études ingénieur, Ecole nationale supérieure des mines et métallurgie ENS mm-annaba- juin 2016
- [28] M. MEHANNA, Mécanismes de transfert direct en corrosion microbienne des aciers : Application à Gobeter sulfurreducens et à l'hydrogénase de Clostridium acetobutylicum, thèse doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse, janvier 2009
- [29] H. Uhlig, Corrosion et protection, DUNOD, 1970.
- [30] J. Benard, A. Michel, "Métallurgie Générale", Ed. Masson, Paris, (1991).
- [31] D. David, analogue archéologique et corrosion, BIO intelligence service, avril 2001,70p
- [32] H.MARMI, Amélioration de la résistance à la corrosion électrochimique des aciers par utilisation des inhibiteurs, thèse doctorat, université de Mohamed kheider de Biskra, juillet 2017.
- [33] Hachmi Guettaf Temam, Elaboration et Caractérisation des Revêtements de Nickel et de ses Composites Ni/Mo Elaborés par voie Electrolytiques en Présence d'un Inhibiteur de Corrosion, thèse doctorat, université de Mohamed kheider de Biskra, octobre 2015.
- [34] AMARA ZENATI A., «Étude du comportement des aciers API 5L X60 sollicités par contraintes mécaniques et milieu de sol Algérien Simulé», Thèse doctorat en Génie Mécanique, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen 2013
- [35] V. Smanio-Renaud. « Étude des mécanismes de fragilisation par l'hydrogène des aciers non alliés en milieu H<sub>2</sub>S humide : contribution de l'émission acoustique »
- [36] Brad Bellinger, Summary of Technical Differences between API 5L (43rd ed.) and ISO 3183 (2nd ed.) / API 5L (44th ed.), Senior Standards Associate.

## Résumé

Bien que le transport des hydrocarbures par les pipelines soit considéré comme un moyen de transport garanti en dépit de la gestion sévère du réseau de pipelines, des dégradations sont identifiées principalement dans la veuille des travaux effectués dans ce domaine. La sécurité du réseau de transport et la disponibilité, exempte de perturbations de produits pétroliers sont inéluctables si l'on veut assurer la prospérité économique.

La multiplication des accidents plus ou moins graves, notamment dus à la corrosion, et à l'usure ainsi que leur incidence sur l'économie mondiale et leur impact sur l'environnement rendent le transport des hydrocarbures de plus en plus préoccupant. Les cas les plus fréquents sont relatifs à des incidents amorcés à partir de défauts issus soit de l'élaboration du matériau, soit de la fabrication, de l'assemblage, de la réparation ou des conditions d'exploitations des tubes.

Nous mettons en évidence l'étude des propriétés de l'acier API 5L X 70 L'étude tribologique à pour objectif d'identifier les différents concepts et méthodes liés aux mécanismes de dégradation des surfaces. Les propriétés mécaniques afin d'identifier le comportement des aciers des pipelines sous les contraintes. L'étude de comportement électrochimique de l'acier au carbone XC70 sous l'effet de la concentration en milieu acide hydrochlorique.

**Mots-clés :** Pipeline API 5L X 70, Tribologie, propriétés mécanique, corrosion.

## Abstract

Although the transport of hydrocarbons by pipelines is considering as a means of transport guaranteed despite the severe management of the pipeline network, degradations are identifying mainly in the wake of work in this area. The safety of the transportation system and the availability, free of disturbances of petroleum products, are inevitable in order to ensure economic prosperity.

The proliferation of more or less serious accidents, in particular due to corrosion and wear, their impact on the global economy and their impact on the environment make the transport of hydrocarbons more and more worrying. The most frequent cases relate to incidents initiated from defects resulting either from the development of the material, or the manufacture, assembly, repair or operating conditions of the tubes.

We highlight the study of the properties of API 5L X 70 steel the tribological study aims to identify the different concepts and methods related to the mechanisms of surface degradation. Mechanical properties to identify the behavior of pipeline steels under constraints. The study of the electrochemical behavior of carbon steel XC70 under the effect of the concentration in hydrochloric acid medium.

**Keywords:** API 5L X 70 pipeline, Tribology, mechanical properties, corrosion.