

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique
Filière : Génie Mécanique
Option: Transport et distribution des Hydrocarbures

Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme de:

MASTER

Thème

**Caractérisations mécaniques et structurelles d'un
acier de construction des pipelines (API 5L X60)**

Présenté par:
Ahlam ACHOURI

Proposé et dirigé par:
Dr. F.Zohra LAMMEDI

Promotion: Juin 2017

Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier «Dieu» le tout puissant. Au terme de ce travail, il m'est agréable de remercier vivement tous ceux qui, grâce à leur aide précieuse, ont permis la réalisation de ce mémoire.

Je voudrais en premier lieu remercier Mlle LEMMADI Fatima Zohra, doctorante au département de Métallurgie l'Université de Biskra, pour avoir accepté de diriger ce travail et pour leurs conseils scientifiques au cours de la réalisation de ce mémoire.

Je remercie également Mr. DJEMAI Hocine et Mr. BENTRAH Hamza, qu'ils ont accepté de présider, examiner et évaluer le contenu scientifique de ce mémoire.

Aussi mon vif remerciement à Mr. BENTRAH Hamza, Docteur au département de génie mécanique à L'Université Mohamed Kheider- Biskra, pour les aides afin de compléter cette étude.

A tous les professeurs et les cadres qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.

Mes remerciements s'adressent également à tous les membres du laboratoire métallurgie ; et de l'atelier mécanique.

Monsieur GASMI Brahim, ingénieur et responsable du laboratoire MEB DRX à l'Université de Biskra qui mon beaucoup aidé dans les analyse de DRX.

En fin, je remercie très fortement mes parents, ma famille et mes amies.

Liste des figures et des tableaux

Liste des figures

figure		page
I.1	Diagramme fer-carbone	3
I.2	structure ferritique	4
I.3	structure austénitique	5
I.4	structure cémentite	5
I.5	structure perlitique	6
I.6	structure martensitique	6
I.7	désignation des aciers	9
I.8	cycle thermique de traitement	11
I.9	cycle thermique de revenu	13
II.1	Soudure spiral et soudure longitudinalement	17
II.2	causes des incidents significatifs des pipelines souterrains et sous-marins	18
II.3	Développement des pipelines en acier à haute résistance dans le temps	19
II.4	Structure feritto-perlite et structure feritto-bainitiques	20
II.5	Développement des aciers a haute limite d'élasticité avec le temps des pipelines (API grade)	21
II.6	Courbe de traction	22
II.7	diagramme(C, Ceq) pour les aciers des tubes	24
II.8	Transition de mode de rupture dans les aciers ferritiques	25
III.1	Cycle thermique de travail	28
III.2	Détection de température de trempe par diagramme fer-carbone	28
III.3	Four électrique	29
III.4	Une polisseuse	30
III.5	Microscope optique de type Hund	31
III.6	Diffractomètre de type PAN alytical X' Pert PRO	32
III.7	dispositif d'essai de corrosion	33
III.8	Microduremètre de type Zwick /Roll	34
IV.1	Examen métallographique optique de l'acier a l'état brut	35
IV.2	Examen métallographique optique de l'acier trempé (950°C pendant 1h	36
IV.3	Examen métallographique optique de l'acier (revenu à 220 °C pendant 30 min)	36
IV.4	Examen métallographique optique de l'acier (revenu à 220 °C pendant 60 min)	36
IV.5	Examen métallographique optique de l'acier (revenu à 220 °C pendant 120 min)	37

Liste des figures et des tableaux

IV.6	Examen métallographique optique de l'acier (revenu à 220 °C pendant 180 min)	37
IV.7	Le diffractogramme de l'acier à l'état brut	38
IV.8	Le diffractogramme de l'acier à l'état trempé	39
IV.9	Le diffractogramme de l'acier à l'état revenu	40
IV.10	Courbe de polarisation de l'acier API 5 L X60 dans l'eau de mer à 30°C ; a) courbe linéaire, b) courbe logarithmique	42
IV.11	La variation de la dureté en fonction de temps de maintien	44
IV.12	La variation de la résistance de mécanique en fonction de temps de maintien	45

Liste des tableaux

Tableau		page
Tab. I.1	Compositions chimiques des différentes familles d'aciers inoxydables	8
Tab. I.2	Pourcentages des éléments d'additions	10
Tab. II.1	Propriétés mécaniques des aciers des pipelines norme API	23
Tab.III.1	Composition chimique de l'acier X60 étudié	27
Tab.III.2	Résumé des paramètres des diffractions utilisées pour applications métallurgique.	32
Tab.IV.1	les caractéristiques des pics du l'acier a l'état brut	37
Tab.IV.2	les caractéristiques des pics du l'acier a l'état trempé	38
Tab.IV.3	les caractéristiques des pics du l'acier a l'état revenu	38
Tab.IV.4	Valeurs de paramètre cristallin	40
Tab.IV.5	Les valeurs des paramètres électrochimiques de l'acier API 5 L X 60 dans l'eau de mer 30°C	41
Tab.IV.6	Mesure de la dureté	43
Tab.IV.7	Mesure de la résistance mécanique	44

Liste des abréviations

Liste des abréviations

API : American Petroleum institut

R_m : Résistance à la rupture

R_e : La limite d'élasticité

A: L'allongement

C: Carbone

Cr: Chrome

Mn: Manganèse

Ni: Nickel

V : Vanadium

Nb :Niobium

TMCP: ThermoMechanical controlled processing

C_{eq} : Carbone équivalent

BDWTT: Battelle Drop Weight Tear Test

ACC : Accélération cooling (refroidissement accéléré)

λ : La longueur d'onde du faisceau incident

d_{hkl}: Le paramètre réticulaire repéré par les indices de Miller

θ : l'Angle de diffraction

n: L'entier naturel représentant l'ordre de diffraction

α : Ferrite

γ : Austénite

DRX : Diffraction par rayon X

FWHM : La hauteur des pics a mis largeur

ICDD : Internationale centre

a : Paramètre cristallin

E_{corr} : potentiel de corrosion

E_{pit} : Potentiel de piqueration

Liste des abréviations

Introduction générale

L'acheminement des hydrocarbures (les produits pétroliers et le gaz naturel) s'effectue par canalisations en acier depuis les régions de production vers les zones de raffinage et les centres de distribution et de consommation. L'augmentation de la demande d'énergies telles que le gaz et le pétrole nécessite de construction de nouvelles lignes de pipelines. En effet, ces derniers, sont devenus, ces 50 dernières années le moyen d'acheminement le moins coûteux et le plus sûr pour de grandes quantités d'énergies et sur des longues distances.

Quelque soit l'endroit que le pipeline traverse (mer ou terre), ce dernier est toujours exposé aux risques d'endommagements que ce soit par des interférences externes ou environnementales. Pour cela développement de nouveaux aciers pour les canalisations s'avère nécessaire tout en améliorant leur propriétés structurelles et mécaniques.

La caractérisation mécanique des aciers des tubes est l'une des nécessités les plus impérieuses pour leur assurer une utilisation rationnelle. Les grandeurs mécaniques comme la limite d'élasticité, la résistance à la contrainte, la résilience et autres ont beaucoup d'utilité pour la construction et l'exploitation des conduites.

Notre travail a pour objectif de proposer une étude sur les différentes propriétés d'un acier de norme API utilisé pour les fabrications des canalisations de transport des hydrocarbures ; avant et après le traitement thermique.

Ce mémoire est composé de trois (03) chapitres :

- Le premier chapitre est une notion générale des données existantes sur les aciers et leurs caractérisations.
- Nous présenterons dans le deuxième chapitre les propriétés des pipelines (leur fabrication, les principales causes de défaillances, aussi les aciers de construction des pipelines et les propriétés mécaniques).

- Dans le troisième chapitre, nous avons présenté notre matériau d'étude leur norme et leur compositions chimique, aussi les principaux méthodes et techniques expérimentales de préparation et de caractérisation des échantillons présentés comme l'examen métallographique et les différents essais mécanique.
- le quatrième chapitre contient interprétation des résultats obtenus.

Nous terminerons ce travail par une conclusion général.

I.1. Introduction

Un matériau est un solide trouvé à l'état naturel ou qu'il élaboré à partir d'autres matériaux. Ils sont à la source de la technologie et du monde industriel. Le succès commercial d'un produit fabriqué résultent en grande partie du ou des matériaux choisis. Les matériaux sont classés par grande famille : métalliques, polymères, céramiques et composites.

Dans ce chapitre nous allons présente une généralité sur les aciers (famille métalliques).

I.2. Le diagramme binaire Fer-Carbone

Ce diagramme est très important pour les opérations de production, formage, soudage, et traitement thermique des aciers et des fontes. Avant de l'utiliser, il est nécessaire d'en comprendre parfaitement chaque région [1].

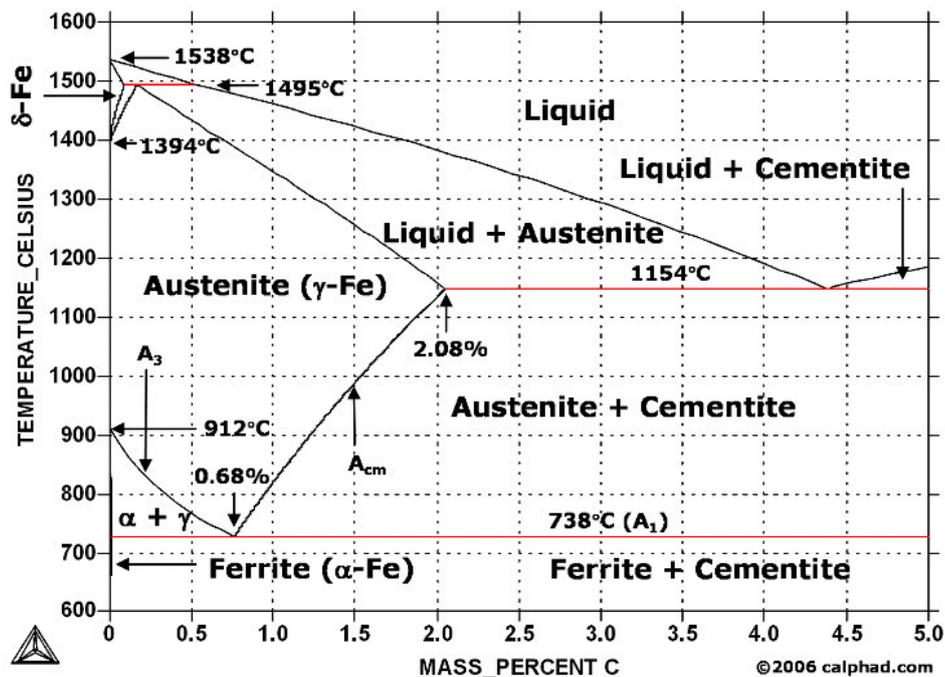


Fig. I.1 : Diagramme fer-carbone [1].

➤ Teneur de carbone

A partir de le diagramme Fer –Carbone on aura :

- (0,022 à 0,77 % de carbone) sont les aciers Hypoeutectoïdes. Ils sont le plus

Malléables.

- (0,77 % de carbone) c'est l'acier eutectoïde.
- (0,77 à 2,14 % de carbone) : les aciers hypereutectoïde qui sont les plus durs et ne sont pas réputés soudables.
- 2,14 % de carbone correspond à la zone d'influence de l'eutectique (lédéburite); il existe toutefois des aciers lédéburitiques.

I.2.1. Les phases de diagramme Fe-C

I.2.1.1. La ferrite

Cette phase contient une très petite quantité de carbone. La ferrite est aussi connue sous le terme de ferrite alpha ou fer alpha. Cette phase contient un maximum de 0.02% de carbone à 727°C (1341°F). Lorsque la température augmente jusqu'à 912°C (1674°F), la teneur en carbone dans la ferrite tend vers zéro. Aussi, lorsque la ferrite est refroidie à température ambiante, la quantité de carbone diminue. La formation de la ferrite commence dès qu'un acier ou une fonte est refroidie en dessous de 727°C (1341°F). La structure ferritique est cubique centrée et est à la fois ductile et tenace [2].

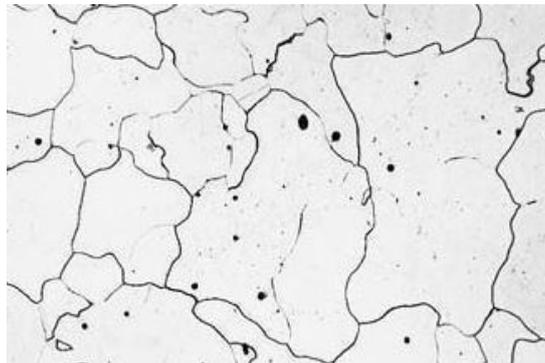


Fig. I.2: Structure ferritique [3].

I.2.1.2. L'austénite

L'austénite C'est la dernière zone importante sur le diagramme fer-carbone. Cette phase est stable au-dessus de 727°C (1341°F) et en dessous de 1538°C (2800°F). L'austénite peut contenir 1.86% de carbone. Même si elle ne se forme pas à température ambiante, c'est une région importante pour le traitement thermique des aciers. C'est une structure cubique faces centrées, qui est différente de la structure cubique centrée de la ferrite. L'austénite est également appelée fer gamma [2].

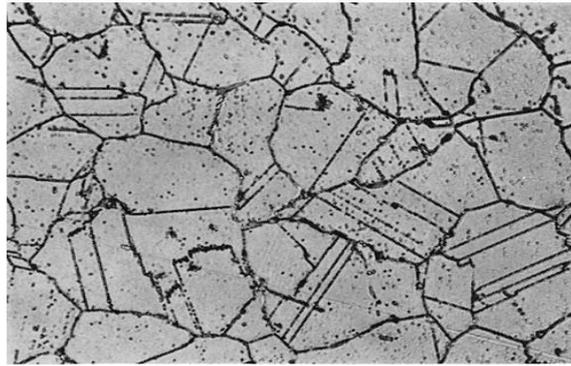


Fig. I.3 : Structure austénitique [3].

I.2.1.3. La cémentite

La cémentite pure a la formule moléculaire Fe_3C . Elle contient 6.69% de carbone. A cause de cette haute teneur en carbone, la cémentite pure n'est pas indiquée sur la figure I.1. Comme mentionné auparavant, une concentration forte en carbone s'accompagne d'une augmentation de la dureté et de la fragilité. La cémentite, avec sa forte teneur en carbone, est dure et fragile. Cette phase est aussi connue sous le terme carbure de fer [2].

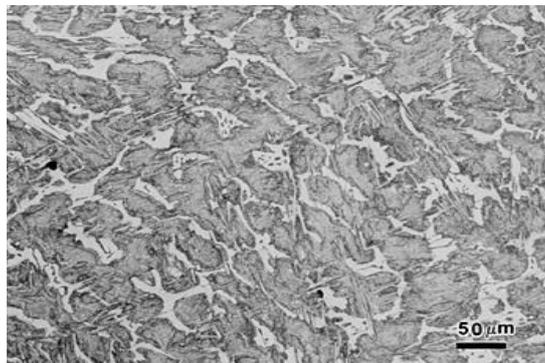


Fig. I.4: Structure cémentite [3].

I.2.1.4. La perlite

La perlite est une combinaison de ferrite et de cémentite. Ces deux phases se trouvent en couches alternées dans la microstructure.

La perlite pure se forme à $727^{\circ}C$ ($1341^{\circ}F$), et contient 0.77% de carbone. Cette phase comporte toujours 0.77% de carbone. Pour un acier ou de la fonte contenant plus de 0.77% de carbone, la perlite se forme avec de la cémentite [2].



Fig. I.5: Structure perlitique [3].

I.2.1.5. La martensite (M)

Cette phase cristallise dans le système quadratique. On peut la considérer comme une solution solide de carbone dans le réseau distordu de la ferrite. Cette distorsion est la caractéristique d'un acier refroidi rapidement depuis la température de l'austénitisation [2].

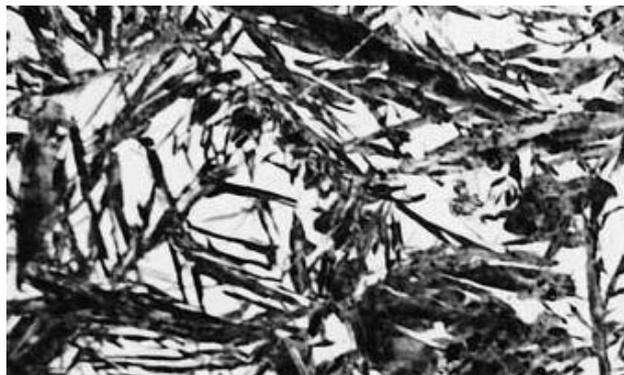


Fig. I.6: Structure martensitique [3].

I.3. Les aciers

I.3.1. Définition de l'acier

L'acier peut être défini comme un matériau composé essentiellement de fer et présentant une teneur en carbone inférieure à 2 %. La teneur en carbone a une influence considérable (et assez complexe), les propriétés de l'acier : en deçà de 0,008 % l'alliage est plutôt malléable et on parle de « fer ». Au delà de 2% les inclusions de carbone sous forme graphite fragilisent la microstructure et on parle de fonte. Il peut encore contenir d'autres éléments mais de tous ces éléments d'alliage, le carbone a l'effet le plus prononcé sur les propriétés de l'acier ; si l'on ajoute plus de 0,5 % d'éléments d'alliage à l'acier, on parle d'acier allié. Si la proportion d'éléments d'alliage est inférieure à ce chiffre, on parle d'acier non allié [4].

1.3.2. Les composants des aciers

Les constituants les plus importants sont le Fer et le Carbone, et les éléments chimiques présents dans l'acier peuvent être classés en trois (03) catégories :

a. Les impuretés : originellement présentes dans les ingrédients de haut fourneau qui serviront à produire la fonte qui servira à fabriquer l'acier. Ce sont le soufre (S) et le phosphore (P) présent dans le coke mais aussi le plomb (Pb) et l'étain (Sn) qui peuvent être présents dans les aciers de récupération ainsi que nombre d'autres éléments à bas point de fusion comme l'arsenic (As), l'antimoine (Sb).

b. Les éléments d'additions : des éléments chimiques peuvent être ajoutés pour résister à des sollicitations mécaniques ou chimiques ou une combinaison des deux, les principaux sont le manganèse (Mn), le chrome (Cr), le nickel (Ni), le molybdène (Mo).

c. Les éléments d'accompagnements : que l'aciériste utilise en vue de maîtriser les diverses réactions physico-chimiques nécessaires pour obtenir en final un acier conforme à la spécification. C'est le cas d'éléments comme l'aluminium, le silicium, le calcium [1].

I.4. Les type des aciers

Il ya plusieurs d'éléments ajoutés au fer plus que le carbone, chaque éléments a un pourcentage connu. On peut classer les divers types d'alliages à base de fer selon leur composition chimique ou selon leur domaine d'utilisation.

I.4.1. Les aciers au carbone d'usage général

Les aciers ordinaires sont des aciers standards d'usage général qui sont parfois improprement appelés aciers au carbone. Ils sont utilisés tels quels, sans traitement ultérieur, constituent environ 80 % de la production des aciers .Outre le carbone, ces aciers contiennent des éléments d'addition et des impuretés dont la présence découle de leur mode d'élaboration : manganèse (1.2 %), silicium (0.6 %), soufre (0.06 %), phosphore (0.06 %). Ces pourcentages présentent les teneurs limites de ces éléments dans ces aciers [5].

I.4.2. Les aciers inoxydables

Les aciers inoxydables sont des alliages métalliques à base d'acier (alliage : fer-carbone) qui doivent contenir au moins 10,5 % de chrome et des éléments d'alliage comme le carbone, le nickel, le molybdène, le silicium, etc. Selon le pourcentage de ces éléments, la structure d'acier en condition d'emploi sera martensitique, austénitique ou ferritique.

La principale propriété des aciers inoxydables est leur excellente résistance à la corrosion. Cette propriété donne au matériau une durée de vie quasi exceptionnelle dans la très grande majorité des milieux [6].

Catégorie d'acier	Composition (% pds)				
	C	Cr	Ni	Mo	Autres
Ferrite	< 0.1	13 - 30	0 - 5	< 5	Ti
Martensitique	0,05 - 1.2	12 - 18	< 7	-	-
Austénitique	< 0,2	16 - 35	7 - 26	< 6	N, Cu, Ti
Austéno-ferritique	< 0,05	18 - 27	4 - 7	< 4	N (<0.3)

Tab I.1: Compositions chimiques des différentes familles d'aciers inoxydables [7].

I.4.3. Les aciers de traitements thermiques

On définit les aciers de traitements thermiques par rapport à leur composition chimique, car elle permet de déterminer les traitements qu'on peut leur appliquer en fonction des propriétés désirées. Les aciers de traitements thermiques sont soit des aciers au carbone sans autres éléments d'additions que des éléments standard Mn et Si, soit des aciers alliés contenant en proportions variables d'un ou plusieurs éléments d'addition (Cr, Ni, V, etc.) [5].

I.4.4. Les aciers à outils

Les aciers à outils ont une importance technologique primordiale, aucune étape de la fabrication et quel que soit le procédé employé ne peut se passer d'outil. La production mondiale de ce genre d'acier ne représente qu'un faible pourcentage ~ 0.1 %, mais compte par exemple en Amérique plus de 75 nuances. Chacune de ces nuances est destinée à une fonction bien spécifique [8].

I.5. Désignation des aciers

Les aciers sont classés en deux groupes :

- Aciers non alliés (aciers ordinaires, aciers spéciaux,...).
- Aciers alliés (faiblement et fortement alliés).

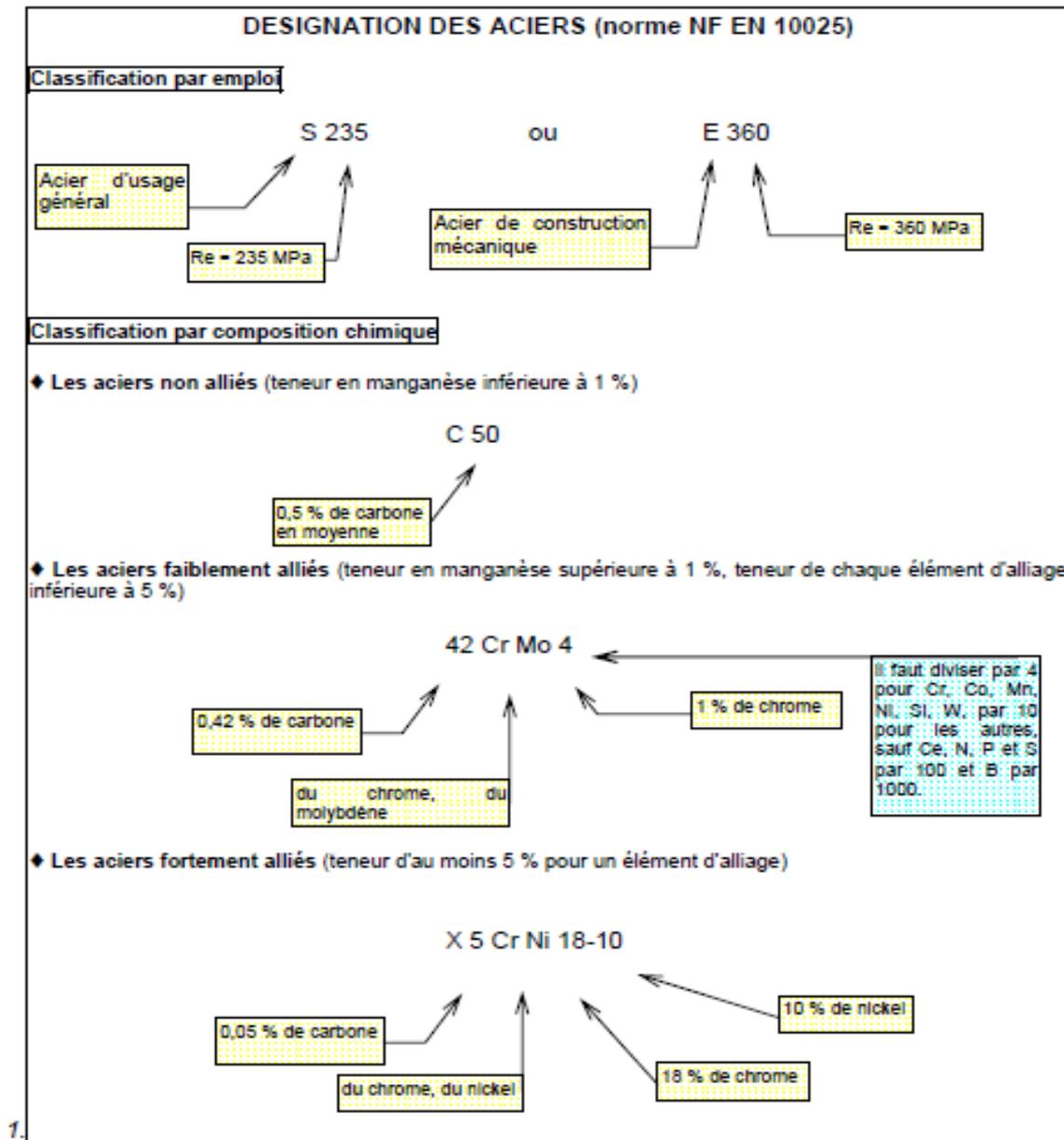


Fig. I.7: Désignation des aciers [5].

I.5.1. Classification par l'emploi

Pour la classification par l'emploi il existe de types :

I.5.1.a. Aciers d'usage general : Il ont une faible teneur en carbone et sont le plus utilisés, leur qualité pouvant varier. Leur application va de la construction soudeée à l'ameublement en passant par l'électroménager [9].

I.5.1.b. Aciers de construction mécanique : Cette nuance est indiquée par la lettre **A** suivie d'un nombre correspondant à la limite minimale de résistance à la rupture par traction (R_m) en daN/mm, éventuellement suivi des chiffres 1, 2, 3, ou 4. Par exemple : A 33, A 50.

Les aciers destinés à la construction métallique. Cette nuance est désignée par la lettre **E** suivie d'un nombre correspondant à la limite d'élasticité minimale à la traction (R_e) et éventuellement suivie d'un chiffre 1, 2, 3, 4. Par exemple : E 24, E 26, E 36 [1].

I.5.2. Classification par la composition chimique

Le tableau ci-dessous nous donne un aperçu sur le pourcentage des éléments d'alliages dans les aciers non alliés et alliés [10].

% des éléments d'addition	Acier non Allié	Acier faiblement allié	Acier fortement allié
Al	< 0,3	-	> 0,3
B	-	-	> 0
Co	< 0,2	0,2...0,3	> 0,3
Cr	< 0,3	0,3...0,5	> 0,5
Cu	< 0,4	-	> 0,4
Mn + Si	< 1,5	1,5...3	> 3
Mo	< 0,05	0,05...0,1	> 0,1
Ni	< 0,3	0,3...0,5	> 0,5
Pb	< 0,4	-	> 0,4
V	< 0,05	0,05...0,1	> 0,1
W	< 0,2	0,2...0,3	> 0,3

Tab.I.2: Pourcentages des element d'adition [10].

I.6. Traitement thermique des aciers

I.6.1. Définition

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement appliqués à des métaux et alliages. De manière générale, les traitements thermiques agissent au niveau microstructural des métaux. Ils permettent de modifier les propriétés mécaniques (en les augmentant ou en les diminuant), les propriétés physiques (par exemple, les conductibilités thermiques et électriques) et les

propriétés chimiques (par exemple, la résistance en corrosion). En somme, les traitements thermiques sont des opérations qui consistent à faire varier la température des métaux qui reste néanmoins à l'état solide. La variation de la température en fonction du temps est appelée *cycle thermique (chauffage, maintien et refroidissement)* [11-12].

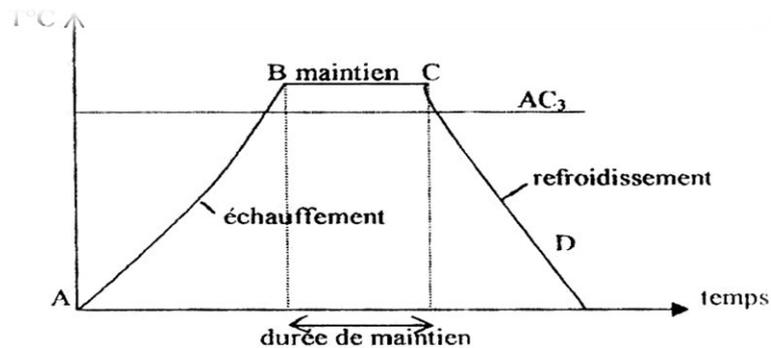


Fig. I.8: Cycle thermique de traitement [11].

Cycle thermique de traitement

Chauffage (AB): L'échauffement est effectué à une température supérieure à la température de transformation.

Le maintien(BC): pour le maintien, la température est définie ($T = \text{constante}$).

Le refroidissement(CD) : Refroidissement avec une vitesse donnée :

- lente (dans le four, à l'air).
- Assez rapide (dans l'huile).
- Très rapide (dans l'eau).

I.6.2. But de traitement

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but : d'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir de l'augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique R_m , R_e , et l'allongement $A\%$ en donnant une meilleure tenue de l'élément, et de l'augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs ; de régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage ; de

supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant subit une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage) [11].

I.6.3. Les principaux types de traitement thermique

I.6.3.1. Trempe

C'est un traitement thermique de durcissement consistant à chauffer la pièce à une température supérieure à la ligne de transformation fer $\alpha \rightarrow$ fer γ (austénisation), puis on lui fait subir un refroidissement rapide pour obtenir une dureté maximale [13].

La trempe consiste en un refroidissement rapide d'un acier austénitisé et a pour but de donner à l'acier la plus grande dureté possible par formation de la martensite ou de la perlite fine.

La trempe est un traitement thermique consistant à augmenter la dureté d'une pièce. Il faut chauffer l'acier à une température correspondante à son point de transformation puis à la refroidir plus ou moins brusquement afin de lui permettre de conserver à froid la structure particulière obtenue à haute température [14].

I.6.3.2. Revenu

Un acier trempé est dur, mais généralement beaucoup trop fragile pour être utilisé directement. Le revenu consiste à chauffer une pièce qui vient d'être trempée à une température inférieure au point de transformation, à la maintenir à cette température, puis à la refroidir généralement à l'air, parfois à l'eau. Le revenu a pour but d'éliminer les contraintes résiduelles provenant de la trempe et d'augmenter la ténacité. L'augmentation de la ténacité s'obtient malheureusement toujours plus ou moins au détriment de la dureté et de la limite d'élasticité. Les contraintes résiduelles se forment en raison des grandes différences de température entre le cœur et la surface de la pièce lors de la trempe. La dilatation thermique provoque des contraintes qui dépassent la limite d'écoulement plastique et parfois même la résistance à la rupture (fissures de trempe). D'autres contraintes résiduelles, qui varient fortement d'un grain à l'autre, prennent naissance lors de la transformation martensitique et ont pour origine le changement de la forme (cisaillement des atomes le long des plans cristallographiques) et le changement de volume qu'entraîne cette transformation [14].

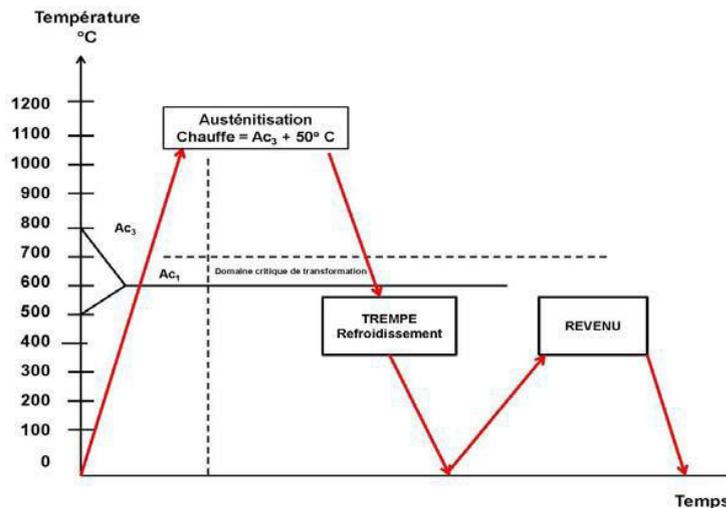


Fig. I.9: Cycle thermique de revenu [12].

➤ Les types de revenu

a. Revenu à basse température

Le revenu à basse température s'effectue avec un chauffage vers $250^\circ C$ et permet de diminuer les contraintes internes. Il transforme la martensite de trempe en martensite de revenu. Ce revenu augmente la résistance et améliore la ductilité sans altérer sensiblement la dureté (58 à 63 HRC), d'où une bonne tenue à l'usure. Il s'applique aux outils de coupe et aux instruments de mesure en aciers au carbone et faiblement alliés. La durée de ce revenu varie de 1 à 3 heures.

b. Revenu à température intermédiaire

Le revenu à température intermédiaire se réalise entre 350 et $500^\circ C$ et s'emploie pour les ressorts variés et les estampes. Il permet d'obtenir une limite élastique et une résistance à la fatigue élevées. La structure est de type troostite de revenu ou troostite - martensite dont les duretés varient de 40 à 50 HRC. Le refroidissement après revenu à 400 ou $450^\circ C$ se fait à l'eau, ce qui contribue à la formation en surface de contraintes de compression résiduelles qui élèvent la limite de fatigue des ressorts.

c. Revenu à haute température

Le revenu à haute température se fait entre 500 et $680^\circ C$, il donne à l'acier la structure sorbite de revenu. Ce type de revenu crée un meilleur rapport entre la résistance et la ductilité de l'acier. La trempe suivie de revenu à haute température (ce traitement double est appelé amélioration) améliore, par rapport à l'état normalisé, ou recuit, les limites de rupture et d'élasticité, la striction et surtout la résilience. L'amélioration est appliquée surtout aux aciers de construction à moyen carbone (0,3 à 0,5%) [11].

I.6.3.3. Recuit

Le recuit est un traitement qui a tendance à rapprocher l'acier de son état d'équilibre sur le plan physico-chimique. Il a pour but de réduire les contraintes internes dans le métal. Ces contraintes peuvent provenir d'un laminage, d'un étirage, d'un soudage ou d'un autre traitement thermique (trempe, revenu). Le recuit permet de rendre l'acier plus mou, donc plus facile à usiner. Le cycle opératoire du recuit comprend les étapes suivantes :

1. Chauffage jusqu'à une température dite de recuit (qui dépend du type de recuit).
2. Maintient isotherme à la température de recuit ou à des oscillations autour de cette température.
3. Un refroidissement très lent (à l'air calme) [14].

Le recuit augmente le taux de cristallinité, le module d'élasticité, la dureté, la masse volumique et la résistance à l'abrasion mais il diminue la résistance au choc et l'allongement à la rupture [15].

I.7. Conclusion

L'acier c'est la matière le plus utilisé dans l'industrie pour les différentes fabrications, Dans ce chapitre nous avons donné une notion générale sur les aciers et leurs composants, leur type et domaine d'utilisation

Le traitement thermique est une opération très importante pour l'amélioration des propriétés d'un métal, pour cela nous avons donné une aide sur le but de cette opération et l'influence de leur différent type sur les propriétés des aciers.

II .1. Introduction

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. Selon la nature du fluide transporté, les professionnels distinguent l'oléoduc dans le cas de pétrole, du gazoduc dans le cas de gaz [16].

II.2. Les propriétés des pipelines

II.2.1. Fabrication des tubes de pipeline

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

- Les tubes non soudés.
- Les tubes soudés en spirale et longitudinalement.

On se limitera dans le cadre de cette étude à la présentation du mode de fabrication des tubes dits de grandes diamètres et utilisés dans les transports .cette appellation est réservée aux tubes de diamètres extérieurs supérieurs à 16 '' (406,4mm).Ils sont obtenus par formage suivi de l'opération de soudages en long ou en spirale de tôles laminés à chaud [17].

II.2.1.1. Fabrication des tubes sans soudures

Le laminage est un procédé de déformation plastique continue, obtenue par les cylindres du laminoir. Cette déformation est caractérisés par un amincissement et un allongement (la pièce de laminée ne s'élargit presque pas) .le laminage en passes successives peut produire une forte réduction d'épaisseur. Le coefficient de corroyage est le rapport entre la section du produit avant et après laminage. Le laminage modifie la structure cristalline primaire du lingot affine le grain, homogénéise la composition et améliore les caractéristiques, le surtout dans le sens longitudinal, en raison de l'orientation donnés aux structures cristallines [17].

Les tubes laminés sans soudure sont obtenus par laminage à chaud ; utilisé pour faible diamètres jusqu'à un maximum 16'' à 24'' (406,4 à 609 mm).

II.2.1.2. Fabrications des tubes soudés

Les tubes soudés longitudinalement sont obtenus par cintrage d'une tôle et soudure le long de génératrice ; deux procédés de soudure sont employés soudure à l'arc immergé, comportant un apport de métal, soit la soudure par rapprochement et fusions obtenue par action de courant de forte intensité ; les diamètres maximaux obtenus dans cette catégorie de fabrication sont actuellement de 56'' (1422,4 mm) [18].

Les tubes soudés en spirale sont obtenus par enroulement et soudure hélicoïdale d'un ruban de tôle approvisionné sous forme de bobines, ce procédé exige un contrôle très sévère de la soudure en usine, en raison des nombreuses reprises qu'il entraîne, et impose un appareillage très étudiés et une bonne qualité des tôles, pour garantir une bonne fiabilité de la fabrication.

Il permet d'ailleurs d'atteindre de très gros diamètres, très largement supérieurs aux diamètres obtenus industriellement par soudure longitudinale puisque l'on a fabriqué jusqu'à des diamètres 100'' (2540 mm) avec une épaisseur de 1'' (25.4mm) [18].

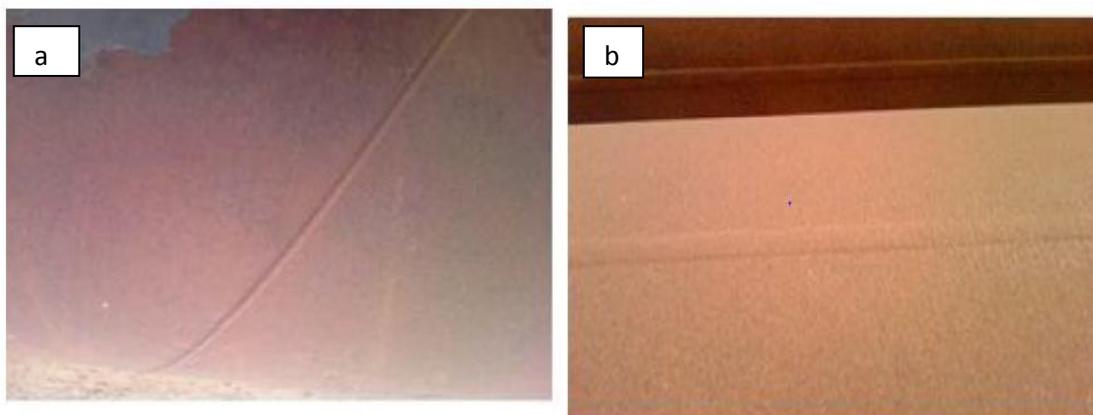


Fig. II.1: a) Soudure spiral

b) Soudure longitudinalement [18].

II.2.2. Les caractéristiques des pipelines

Un pipeline se caractérise tout d'abord par sa ligne qui est constituée de 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 [19].

II.2.3. Défaillances dans les ouvrages de pipelines

Les principales causes des défaillances dans les canalisations sont de diverses natures. Elles peuvent se manifester soit par une rupture, soit par une fuite. La plupart de ces défaillances sont causées par des piqures de corrosion, ou par des fissurations comme la corrosion sous contrainte, mais il existe également des problèmes liés aux défauts de soudage. Les mouvements de terrain (glissement du sol, tremblement de terre,...) peuvent aussi être la cause de dommage sur les gazoducs enterrés [20].

Autre types de défaillance existe comme :

- ✓ Défaillances par rupture fragile et ductile.
- ✓ Défaillances par déformation plastique.
- ✓ Fissuration des pipelines.

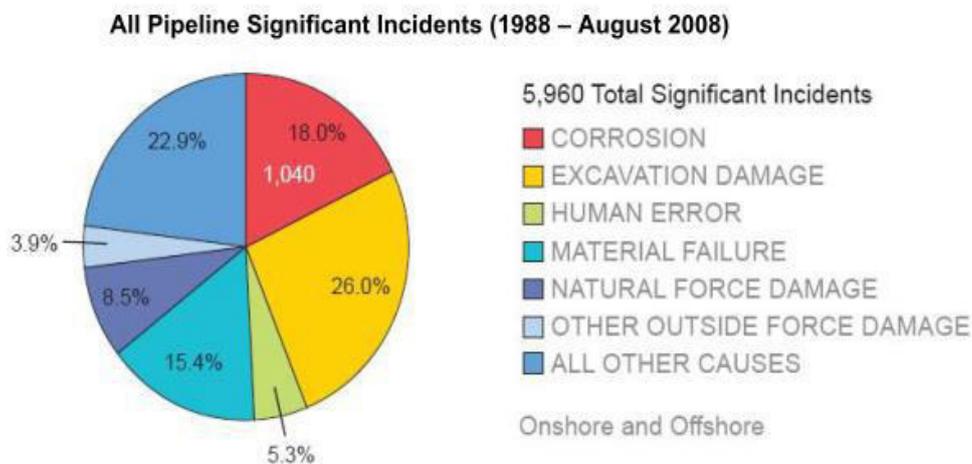


Fig.II.2: Causes des incidents significatifs des pipelines souterrains et sous-marin [20].

II.3. Les aciers des pipelines

II.3.1. Spécifications des aciers des pipelines

Les tubes en acier sont utilisés dans la plupart des canalisations transportant des hydrocarbures, ils sont conformément aux spécifications d'American Petroleum Institut (API 1994,2000), de l'American Society of Mechanical Engineers (ASME) de l'American National Standards Institute (ANSI) et de l'American Society of Testing Materials (ASTM) [21].

II.3.2. Caractérisations des aciers API

Les qualités d'aciers couramment utilisés dans la construction de pipeline sont définies dans deux spécifications API [American petroleum Institute] qui sont adaptées depuis 1922 par l'industrie américaine pétrolière [22].

- Dénommées **5L** pour les qualités normales.
- **5L X** pour les qualités à haute résistance.

II.3.3. Développement des aciers de pipeline

Environ 8 millions de tonnes de pipelines sont produites chaque année dans le monde. La plus grande partie des tubes est composée de matériaux de grade standard, inférieur aux aciers de grade X70. Les grades supérieurs X70 et X80 sont aujourd'hui utilisés pour les pipelines sur longues distances, et les grades X90 et X100 sont en cours d'évaluation. Les développements des aciers X70 et X120 sont en cours [23].

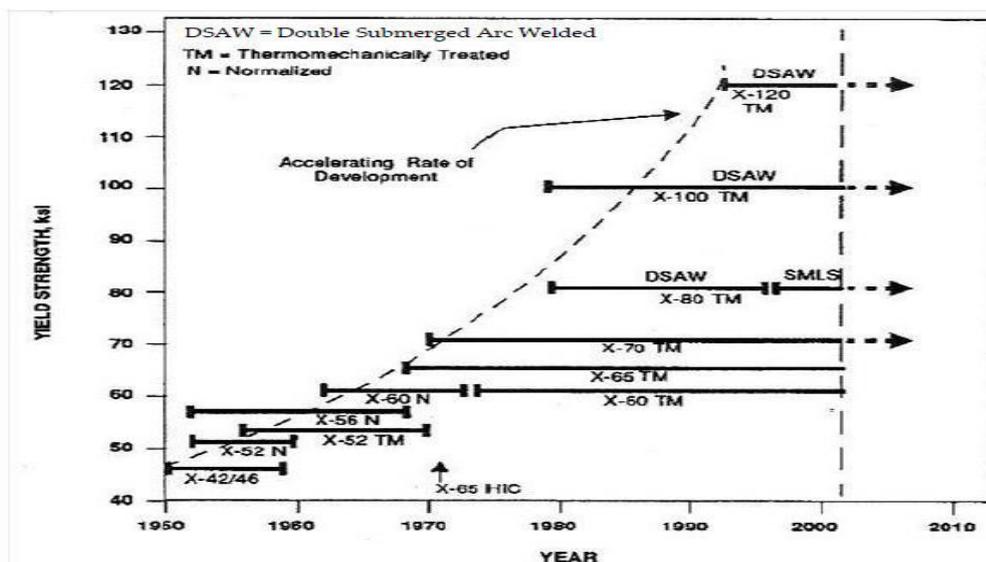


Fig. II. 3: Développement des pipelines en acier à haute résistance dans le temps [23].

En raison de leur faible coût, la maîtrise des techniques de leur élaboration et leur production, Les aciers au carbone sont les plus utilisés dans la construction des pipelines. Ils sont largement employés dans le secteur de l'énergie, comme les plateformes de forage, le transport du pétrole ou du gaz naturel par le biais de gazoducs ou d'oléoducs. Ces aciers sont habituellement de nuances telles que X52, X60, X65, X80, X70, etc. [19].

Les aciers sont passé du grade X52-X70(de structure ferrite perlitique). Le passage a des grades supérieurs X80-X100(structure ferrite bainitiques).

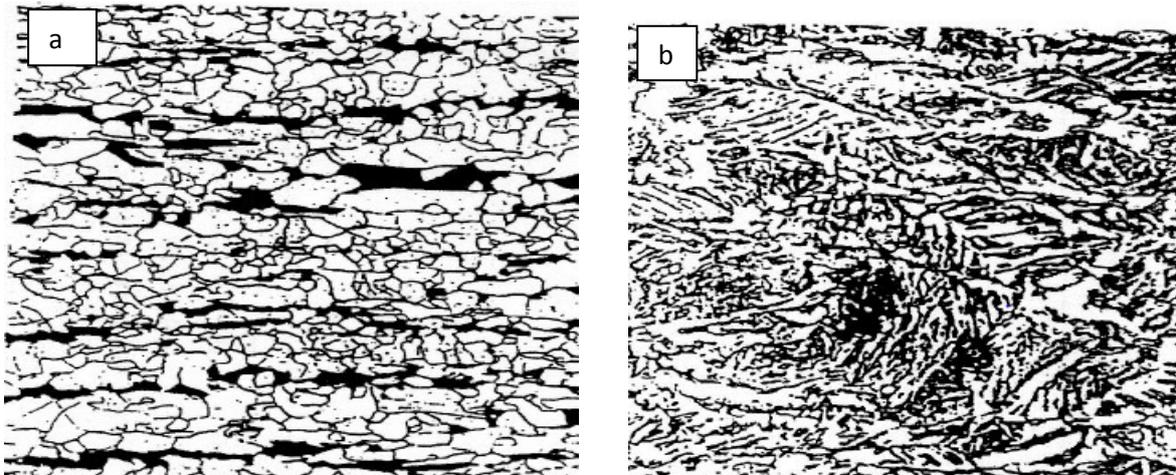


Fig.II.4: a) Structure ferrite-perlite

b) Structure ferrite-bainitiques [22].

II.4. Propriétés mécaniques des aciers de pipeline

La production des tubes de conduite représente à elle seule 10 à 15% du marché mondial de l'acier. Il s'agit donc d'un débouché majeur pour l'industrie sidérurgique, qui justifie le développement de familles d'aciers spécifiques. Les aciers pour pipeline doivent combiner propriétés parfois antinomiques :

- une haute limite d'élasticité, les tubes étant soumis à des pressions de service sévères.
- une bonne ténacité, notamment pour les conduites posées dans les régions arctiques.
- une bonne soudabilité qui impose de réduire au maximum les éléments d'addition [24].

II.4.1. Limite d'élasticité

L'amélioration constante de la limite d'élasticité constatée depuis les années 70 est liée au développement des tôles TMCP ; obtenues par laminage thermomécanique qu'il est remplacé le laminage suivi d'une normalisation. Le laminage thermomécanique permet de produire des matériaux équivalents à des X70, à partir d'aciers à faible teneur en carbone et microalliés au niobium et vanadium. Un autre procédé amélioré émerge dans les années 80 ; la combinaison d'un laminage thermomécanique avec un refroidissement accéléré (TM+ACC),

par cette méthode, il est devenu possible de produire des matériaux à plus haute limite d'élasticité, tels que l'X80 qui contiennent encore moins de carbone et de ce fait possèdent une excellente soudabilité.

Dans les années 90, le laminage thermomécanique est suivi d'un refroidissement accéléré et d'une trempe (TM+ACC/DQ). Ce dernier procédé, laminage thermomécanique combiné à un refroidissement accéléré, en plus des additions de molybdène, de cuivre et de nickel permet d'augmenter le niveau de résistance jusqu'au grade X100),

L'augmentation de la limite d'élasticité a principalement été obtenue par affinement de la taille du grain ferritique [23-25].

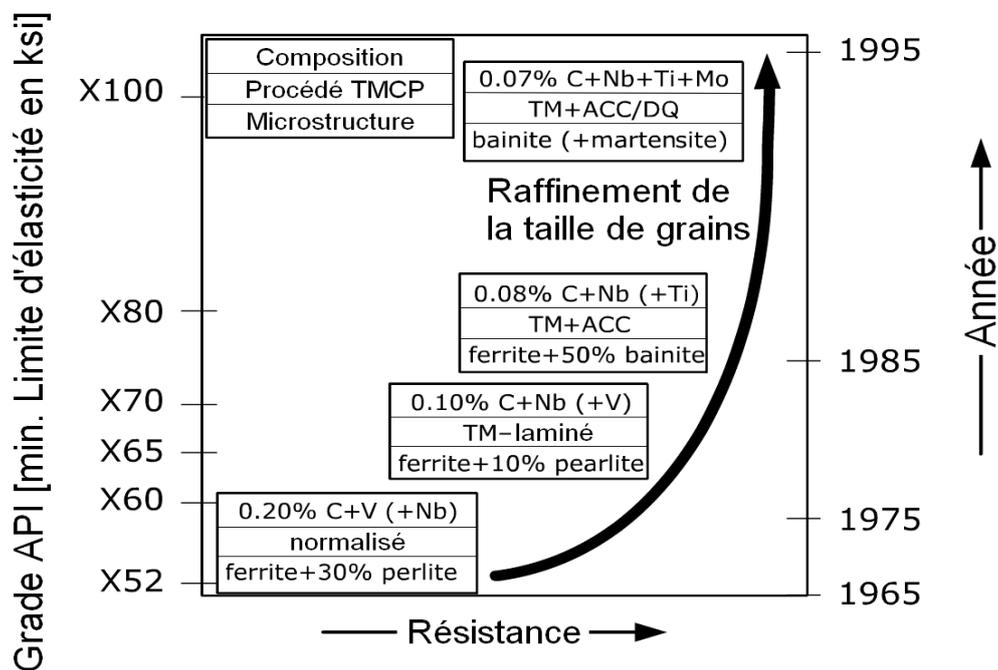


Fig.II.5: Développement des aciers a haute limite d'élasticité avec le temps des pipelines (API grade) [23].

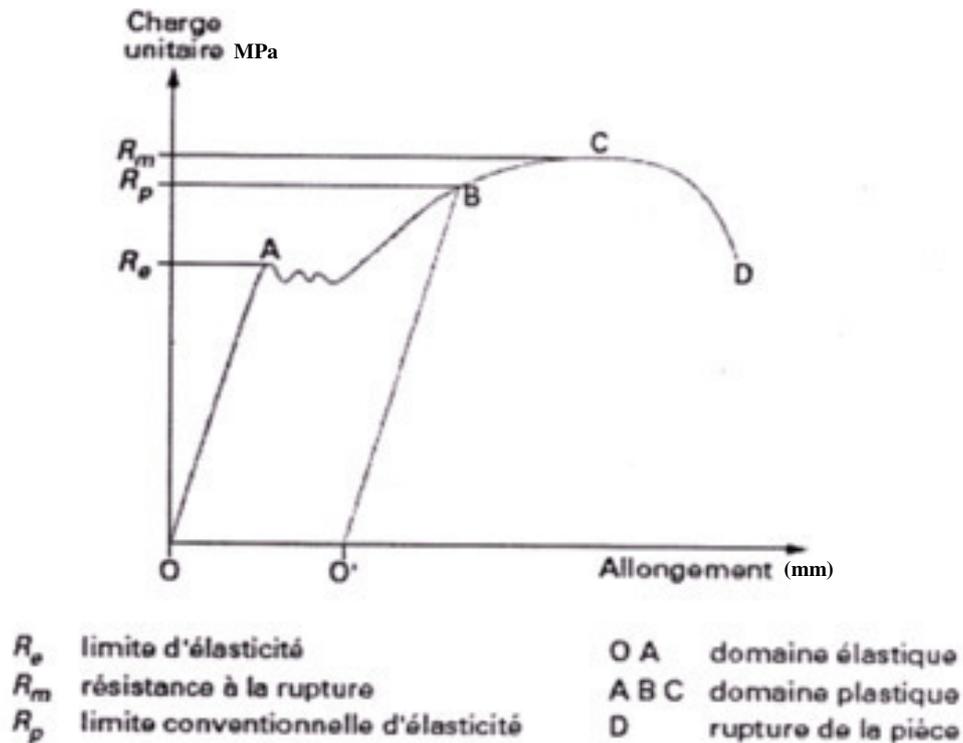


Fig. II.6: Courbe de traction [26].

La courbe de traction relative à des métaux comportement ductile permet de déterminer les grandeurs caractéristiques suivant :

- ✓ La limite d'élasticité (R_e) qui correspond à la contrainte nominale à partir de quel produit la déformation plastique.
- ✓ Le module d'élasticité E (module d'YOUNG) est donné par la pente de la partie élastique de courbe.
- ✓ La résistance à la rupture (R_m) qui correspond à la contrainte maximale supportée l'éprouvette.
- ✓ La limite d'élasticité conventionnelle ($R_e 0,2$) à 0,2%.

Les qualités d'acier le plus employées ont les propriétés mécaniques présentées dans le tableau suivant [22] :

Spécification API	Grade	Limite d'élasticité (Kgf /mm ²)	Resistance a la rupture (Kgf /mm ²)
5L	A	21	34
5L	B	25	42
5LX	X42	29	42
5LX	X46	32	45
5LX	X52	37	47
5LX	X56	39	52
5LX	X60	41	55
5LX	X65	46	56
5LX	X70	48	56

Tab. II.1: Propriétés mécaniques des aciers des pipelines norme API [22].

II.4.2. Soudabilité

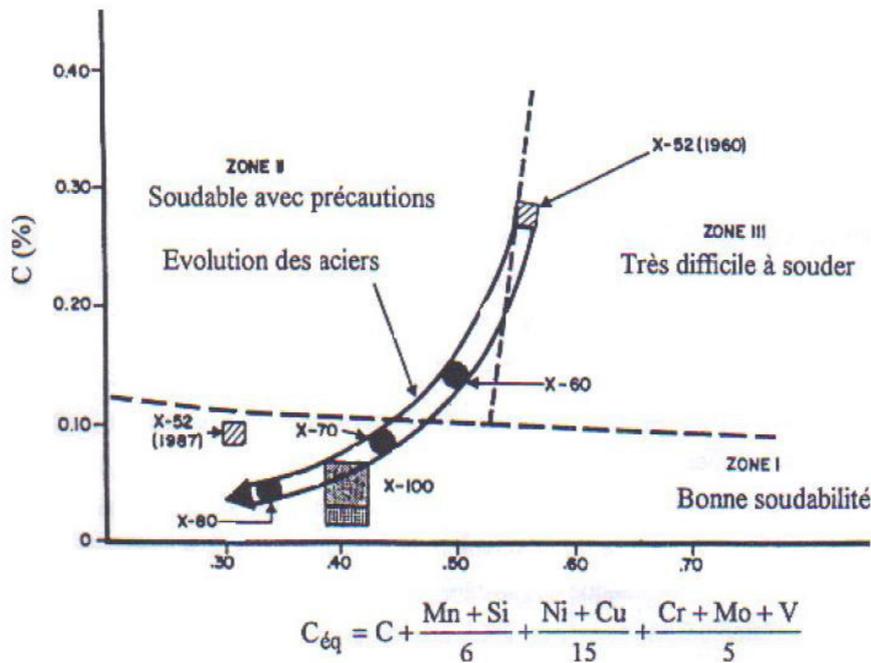
Compte tenu du procédé de fabrication d'un gazoduc, les propriétés de soudabilité de l'acier sont très importantes. Elles seront meilleures si la teneur en carbone est faible, le rôle des autres éléments d'alliages n'est cependant pas négligeable.

A l'exception des tubes sans soudure, tous les aciers sont soudés deux fois, une fois lors de fabrication, une deuxième fois à la pose : la soudabilité est donc le deuxième critère de choix, après la résistance mécanique 'acier doit donc posséder d'excellente caractéristique de soudabilité.

La formule de IIS (institut internationale de la soudure) c'est la formule la plus utilisée :

$$C_{eq} = C + \frac{Mn+Si}{6} + \frac{Ni+Cu}{15} + \frac{Cr+Mo+V}{5} \quad (II.1)$$

Les propriétés de soudabilité sont meilleures si ce paramètre C_{eq} est plus faible ceci explique l'évolution des aciers pour tubes constaté au cours des 40 dernières années et est présentée dans un diagramme (C, C_{eq}). aujourd'hui le plupart des aciers utilisés pour fabriquer des tubes ont une teneur en carbone de l'ordre de 0,05% [27].



F.II.7: Diagramme(C, Ceq) pour les aciers des tubes [27].

Une autre formule d'essence japonaise s'appliquerait à un large éventail de nuance d'acier à haute d'élasticité à plus bas carbone (cas des aciers de tubes).

$$Pcm = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{5} + 5B \tag{II.2}$$

II.4.3. Ténacité

La première caractéristique de la ténacité d'un acier est la température de la transition, ductile fragile, ou l'on cherche à diminuer celle-ci pour privilégier le domaine ductile ou la ténacité est bien meilleure.

La résilience des aciers pour tubes est usuellement appréciée par les essais CHARPY V et BDWTT. Celle-ci est fortement dépendante de la température. Il existe en effet, pour les aciers ferritiques, une transition entre les ruptures fragile et ductile. Le premier mode intervient à basse température. Il est associé à une rupture par clivage cristallographique et une faible ténacité. Au contraire, la rupture ductile se produit à plus haute température. Elle s'accompagne d'une grande absorption d'énergie par déformation plastique. Les aciers pour tubes doivent donc posséder une température de transition suffisamment basse en regard des conditions de service (celles-ci peuvent être extrêmes, comme dans les zones arctiques), et un niveau de résilience suffisant en rupture ductile [25].

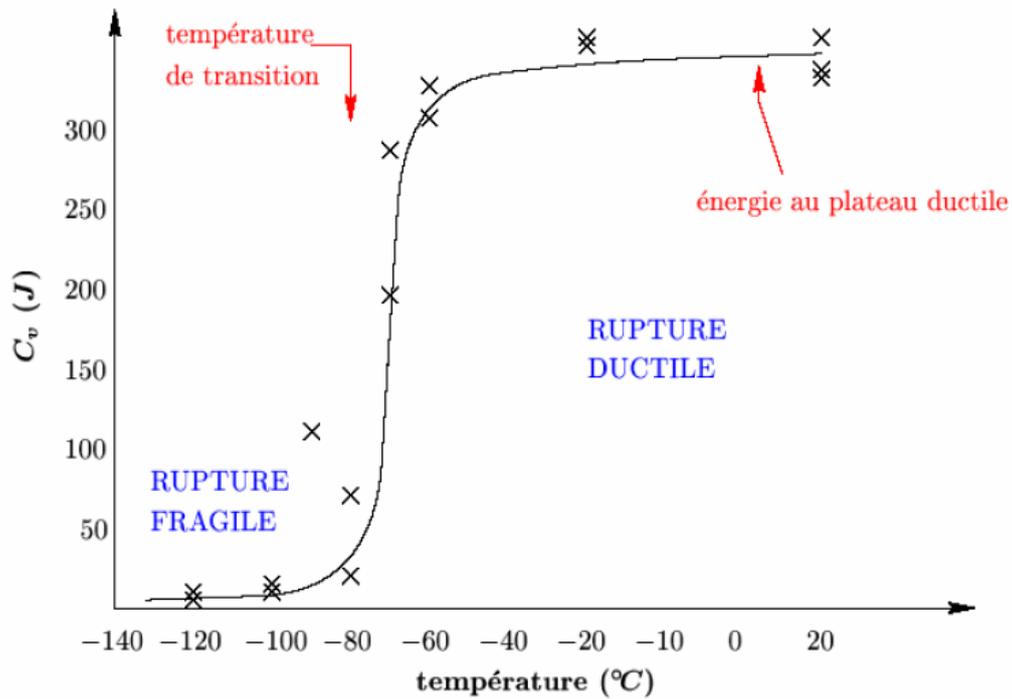


Fig. II.8: Transition de mode de rupture dans les aciers ferritiques [25].

II.4.4. Dureté

La dureté est la mesure de résistance d'un matériau à la pénétration d'un indenteur, de géométrie variable suivant le type d'essai. Deux types de dureté ont été réalisés, la microdureté et la macrodureté. Ces techniques se distinguent de par la taille du pénétrateur donc de la taille de la zone analysée. La microdureté est utilisée pour une étude locale tandis que la macrodureté permet une mesure globale du matériau [28].

II.5. Conclusion

L'amélioration des propriétés mécanique des aciers des pipelines est très importance pour assuré la long durés de vie de pipeline, aussi pour évitera les principaux causes des défaillances de ces canalisations.

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous exposons le matériau étudié et les différentes techniques expérimentales utilisées pour notre étude.

III.2. l'acier d'étude

L'acier étudié est un acier micro allié de norme API 5L X 60 utilisé généralement pour la construction des pipelines d'hydrocarbures (gazoduc et oléoduc).

Cet acier (API 5L X60) est désigné par sa limite élastique.

- API 5L signifie : pipeline.
- X60 signifie : le grade de l'acier. Les autres grades sont, par exemple, A, B, X42, X52
- Le chiffre 60 signifie : 60000 psi, c'est la limite élastique de l'acier en psi « pound per Square inch » (livre par pouce carré) [24].

A partir de la certification d'analyse, l'acier contient les éléments suivants:

Elément	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Co
(%) en massique	0,095	0,190	1,390	0,013	0,005	0,029	0,038	0,005	0,004
Elément	Al	B	Cu	Nb	Ti	V	W	N	Fe
(%) en massique	0,048	0,000	0,026	0,042	0,016	0,046	0,010	0,004	98,039

Tab.III.1: Composition chimique de l'acier X60 étudié.

III.2. Méthodes expérimentales utilisées

III.2.1. Préparations des échantillons

Les échantillons qui sont utilisés sont découpés sous forme carrée (20mm*20mm). Ils sont préparés pour l'essai de microdureté, et pour voir la structure.

III.2.2. Traitement thermique

Pour l'étude des caractéristiques de nos échantillons à l'état brut et à l'état traité, on a choisi les traitements thermiques suivants :

Une trempe à l'eau à (950 °C) avec une maintient de 60min; pour l'investigation de l'homogénéisation des structures, puis un revenu à (220 °C) pour des différent temps de maintient 30min, 60min, 120min, et 180min suivi d'un refroidissement à l'air libre (fig.III.1).

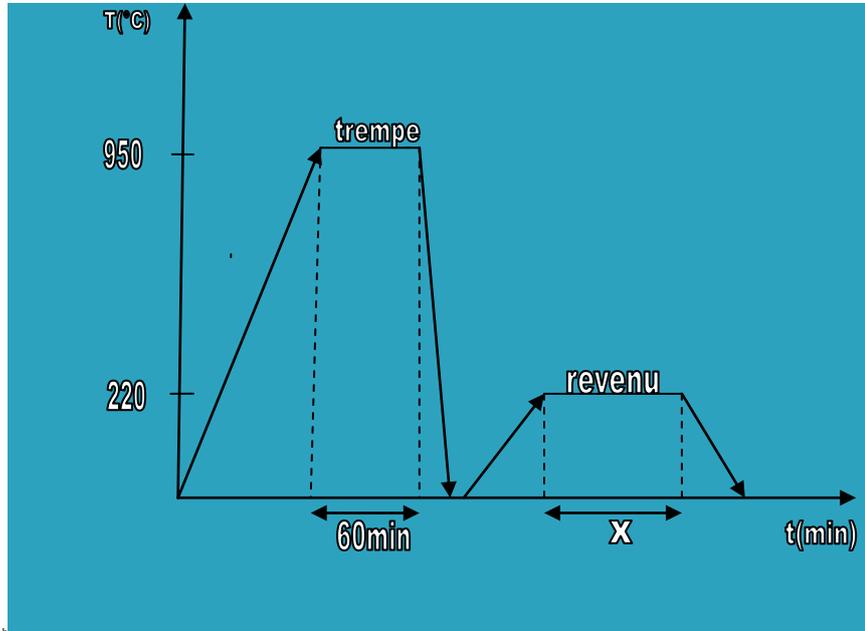


Fig.III.1: Cycle thermique de travail.

X : temps de maintient pour le revenu.

La température de traitement thermique par la trempe est détectée à partir de diagramme d'équilibre Fer-Carbone.

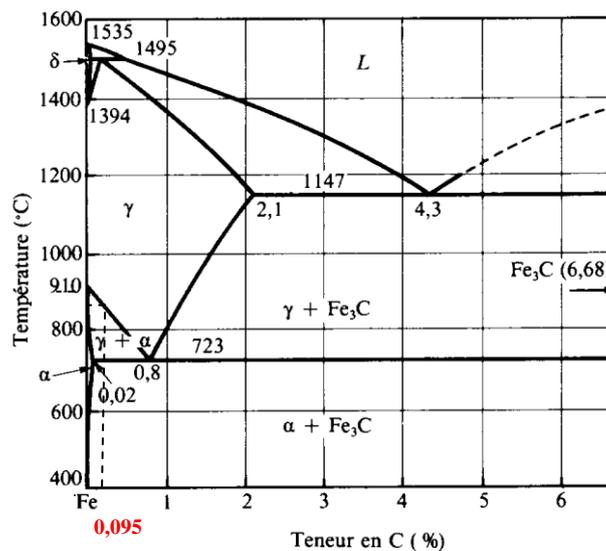


Fig.III.2: détection de température de trempe.

Pour ces traitements thermiques ; on utilise un four électrique à Température maximale $T_{\max} = 1400\text{ °C}$ (fig.III.3).



Fig.III.3 : four électrique.

III.2.3. Micrographie

Le but essentiel de la micrographie est la connaître de la structure et les principales modifications après le traitement thermique.

Après le découpage d'échantillons on doit suivre les étapes suivantes :

III.2.3.1. Polissage

C'est une opération mécanique qui permet d'avoir des états de surface semblable et celui d'un miroir. Dans cet opération on utilise une polisseuse de type (FORCIPOL 2V) (Fig.III.4), et collé les papiers abrasifs sur les disques tournants ; pour éviter le frottement d'échantillon sur le papier abrasifs qu'il provoque l'échauffement local on jet l'eau.

Ce polissage s'effectue par l'utilisation des papiers abrasif de différents granulométrie(120,180,240 ,320,600,800,1000,et 1200).

La durée de polissage à chaque granulométrie est 6-8 minutes.

Si le polissage est fin on terminé la finition par un papier tissu et la pate diamantée.et chaque fois nettoyées les échantillons par l'éthanol.



Fig.III.4: Une Polisseuse.

III.2.3.2. Attaque chimique

Pour relever la structure de nos échantillons, nous avons attaqué chimiquement la surface polie par le Nital 4% (solution alcoolique-nitrique) de composition :

- 4 ml d'acide nitrique HNO_3 .
- 96 ml d'éthanol $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$.

La durée d'attaque est 12 secondes.

Les échantillons ont ensuite lavés par l'eau distillée et bien séchés pour l'observation.

III.2.3.3. Examen au microscope

L'observation de la structure des échantillons préparés a été réalisée à l'aide d'un microscope optique (Hund) avec un agrandissement de (X40).



Fig.III.5: Microscope optique de type Hund.

III.2.4. Diffraction par rayon X

La technique d'analyse par diffraction des rayons X repose sur l'interaction élastique d'un faisceau monochromatique de photons X avec la matière cristallisée. La diffraction résultante aboutit à l'obtention d'un diffractogramme et permet la détermination des distances réticulaires des plans de diffraction.

La loi de Bragg définit la relation entre la longueur d'onde du faisceau incident (λ), le paramètre réticulaire repéré par les indices de Miller (d_{hkl}) et l'angle de diffraction (θ), l'entier naturel n représentant l'ordre de diffraction.

$$n \lambda = 2 d_{hkl} \sin(\theta) \quad (\text{III.1})$$

L'ensemble des spectres de diffraction ont été réalisés sur un diffractomètre (PANalytical X'Pert PRO), lié à un micro-ordinateur pour enregistrer les diffractions (Fig. III.6).

La diffraction des rayons X permet l'analyse qualitative et quantitative de la matrice condensée ; la forme des pics de diffraction peut être reliée à la microstructure cristalline la connaissance des positions des pics et l'intensité du faisceau diffracté permettent l'identification des phases présentes, la DRX permet aussi la mesure des contraintes résiduelles, le paramètre de la maille, la taille des grains, et l'étude des textures données dans le tableau(III.2).

Position de pics de diffractions (2θ)	Nature et structure d'un métal, d'une phase ou d'un composé intermétallique, composition d'une solution solide transformation ordre – désordre.
Variation de position d'un pic de diffraction	Contraintes résiduelle.
Intensités des pics de diffraction(I)	Dosage de phase (concentration).
Variation de l'intensité d'un pic	Texture cristallographique mesure d'épaisseur.
Forme d'un pic de diffraction	Taille de grain cristallite micro déformation (taux d'écrouissage).

Tab.III.2: Résumé des paramètres des diffractions utilisées pour applications métallurgique [29].

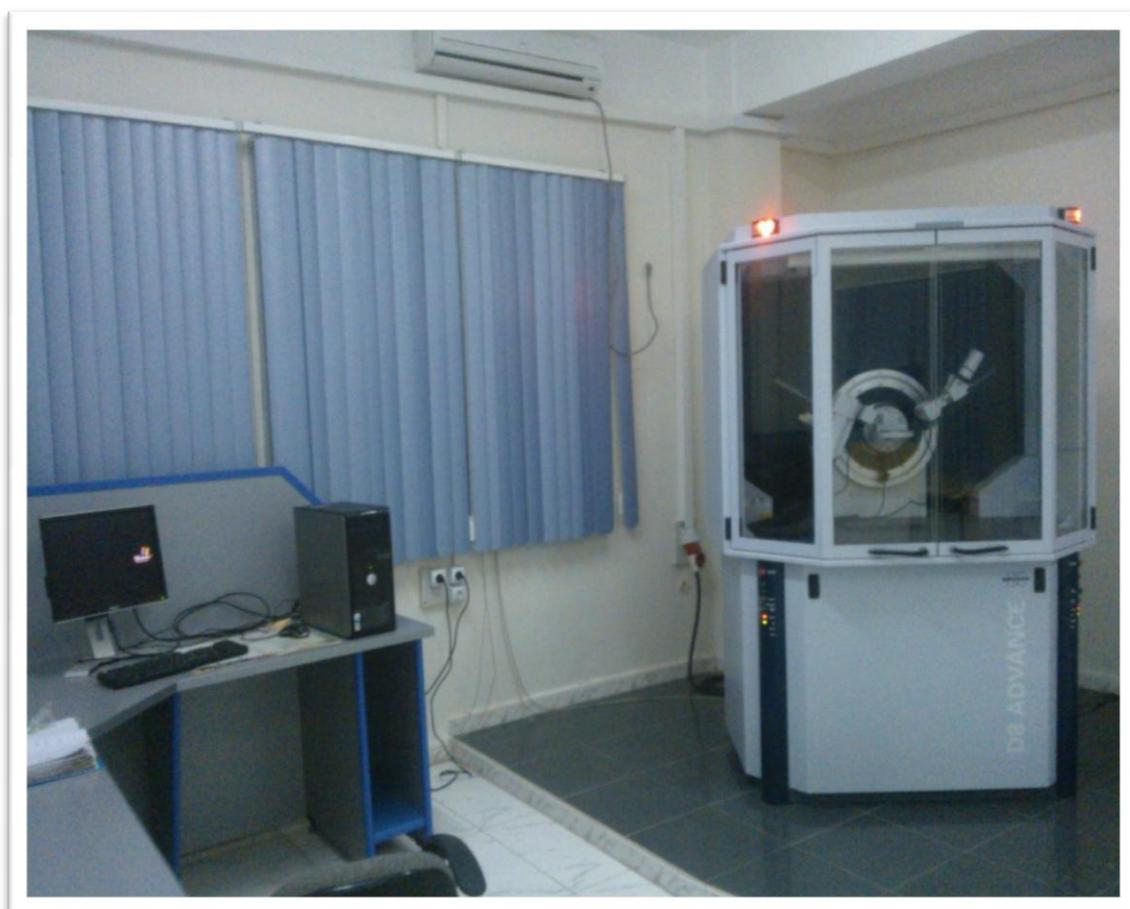


Fig. III.6: Diffractomètre de type PAN alytical X' Pert PRO.

III.2.5. Essai de corrosion

A notre étude nous avons utilisé la méthode électrochimique (courbe de polarisation) pour l'étude de corrosion.

La surfaces d'échantillon est préalablement découpé sous forme carré exposant une surface de $1,255\text{cm}^2$. La mesure électrochimique de polarisation potentiodynamique est été effectuée en cellule électrochimique en verre conventionnelle à trois électrode :électrode auxiliaire en platine,électrode de référence (Hg /HgCl),l'échantillons en acier X-60 ont été employés comme électrode de travail. Avant chaque expérience, la cellule a été nettoyée à l'éthanol, rincée à l'eau distillée et séchée avec du papier absorbant.

Les courbes intensité/potential sont obtenues avec une vitesse de balayage de potentiel de $1,66\text{ mV/s}$.

Le dispositif expérimental utilisé pour l'étude électrochimique est présenté par la figure (Fig.7) et il comprend en particulier:



- a- Cellule de mesure
- b- Potentiostat Voltalab
- c- Logiciel Voltat-Master

Fig.III.7:dispositif d'essai de corrosion.

III.2.6. Caractérisations mécaniques

III.2.6.1. Mesure de la microdureté

L'essai consiste à appliquer sur une éprouvette, un pénétrateur (dont la forme varie selon le type de l'essai) sous une charge F (variable). La microdureté mesurée c'est la microdureté

de VICKERS (utilisée pour mesurer la microdureté de couches superficielles des échantillons avec l'application d'une faible charge) d'une charge $F=500$ g pendant 10s. Chaque mesure correspond à une moyenne de 3 points.

La plupart des machines en utilisation permettent la lecture directe de la microdureté sur la graduation de l'appareil de mesure.

Des correspondances entre les résultats des mesures de microdureté et le niveau des caractéristiques de résistance (essentiellement la résistance à la traction R_m) ont été établies; elles dépendent de la nature du métal de base.

III.2.6.2. Mesure de la résistance mécanique

Chaque acier est caractérisé par leur résistance mécanique (résistance des efforts extérieurs), suivant la nature de ces efforts on distingue : la résistance à la traction, à la compression...etc.

A partir de la mesure de microdureté et par le même instrument (Fig.III.8) nous avons mesuré la résistance mécanique de notre acier.



Fig. III.8: Microduremètre de type, Zwick /Roll.

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous avons présentés les résultats obtenus des essais mécaniques et microstructures optiques qu'ils effectuent sur notre acier à l'état brut, et après les traitements thermiques de revenu à une température de 220°C aux différents temps de maintien.

IV.2. Métallographie

L'observation métallographique de l'état brut de l'acier de notre étude (API 5L X60) montre une structure ferrito-perlitique (Fig.IV.1) [30]; est une matrice composée par des grains ferritiques en blanc avec des colonies de perlite en noir ou niveau des joints des grains. Nous avons vu que la ferrite est majoritaire dans cette structure, est un solide de carbone en fer (α).

Après traitement thermique de trempe. Ce traitement comprend un chauffage à une température de 950°C pendant 60min puis trempe à l'eau, nous observons une structure ferrito perlitique avec diminution de la taille des grains ferritiques. Nous remarquons aussi quelques aiguilles qui illustrent la présence de la martensite (Fig. IV.2).

Dans les figures (IV.3.4.5 et 6) nous représentons les microstructures de l'acier à l'état revenu à température 220°C pendant (30min, 60min, 120min et 180min) respectivement. Les microstructures observées sont pratiquement semblables.

Dans le cas revenu pendant 30min, nous avons observé l'absence des aiguilles de martensite, avec un affinement de la taille des grains par rapport à l'état brut (Fig.IV.3).

Dans les cas de revenu pendant (60min, 120min et 180 min) nous avons observé une augmentation des tailles des grains, est due à la diminution des contraintes de trempe et la relaxation des atomes.

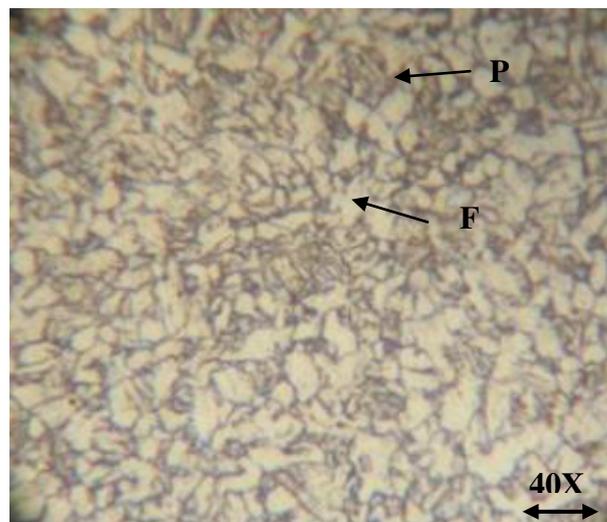


Fig.IV.1: Examen métallographique optique de l'acier (état brut).

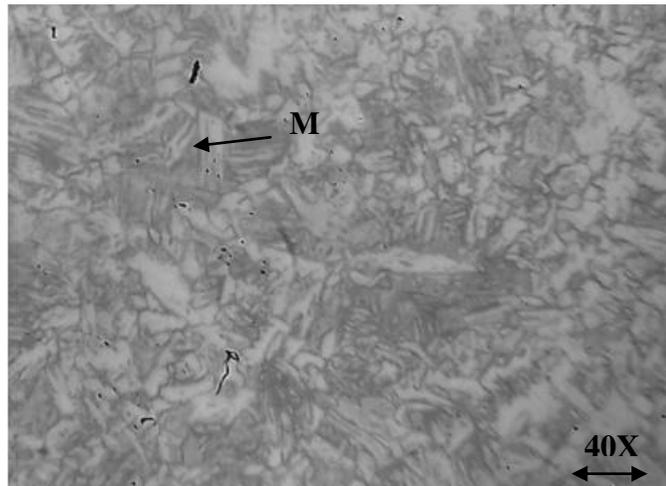


Fig.IV.2: Examen métallographique optique de l'acier (trempe à 950 °C pendant 60 min).

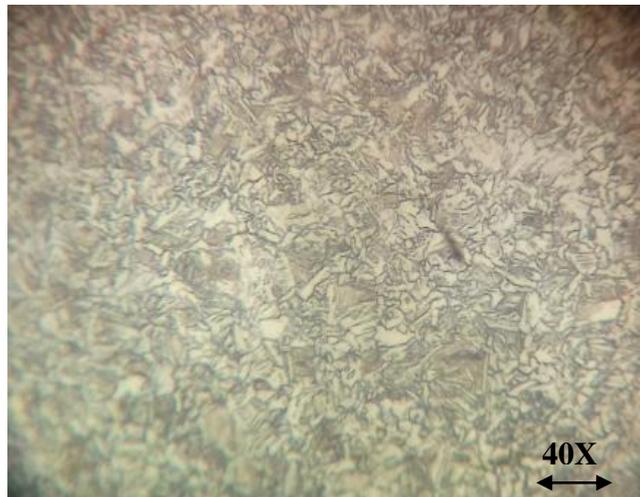


Fig.IV.3: Examen métallographique optique de l'acier (revenu à 220 °C pendant 30 min).



Fig.IV.4: Examen métallographique optique de l'acier (revenu à 220 °C pendant 60 min).

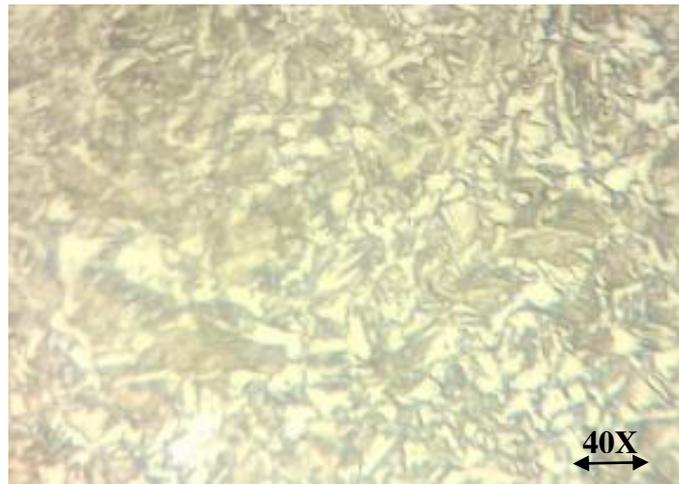


Fig.IV.5: Examen métallographique optique de l'acier (revenu à 220 °C pendant 120 min).

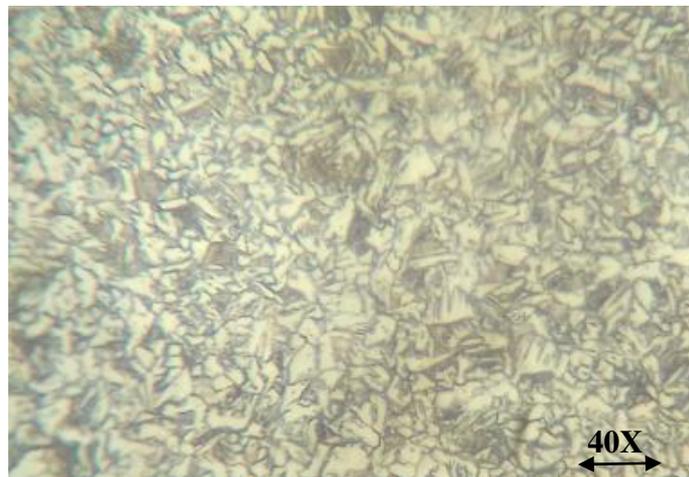


Fig.IV.6: Examen métallographique optique de l'acier (revenu à 220 °C pendant 180 min).

IV.3. Diffraction des rayons X

a) L'état brut

La figure (IV.7) illustre le diffractogramme de l'acier à l'état brut. Elle présente les deux pics diffractés qui correspondent à la phase ferrite (α) et un seul pic illustre la phase austénite (γ), selon le programme [ICDD] nous avons le tableau suivant détaillé les caractérisations de chaque pic :

No.	Pos. [2θ]	(hkl)	FWHM	d (Å)	L'intensité(%)
1	45,08	(110)	0,4133	2,0110	100
2	65,29	(200)	0,5904	1,4291	25,91
3	82,57	(211)	0,8640	1,1673	23,66

Tab. IV.1: Les caractéristiques des pics du l'acier à l'état brut.

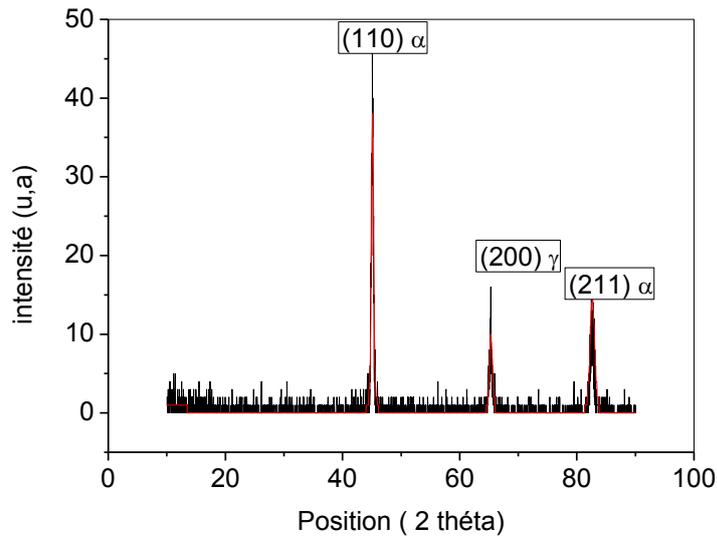


Fig.IV.7: Le diffractogramme de l’acier à l’état brut.

b) L’état traité

Les tableaux suivant (Tab.IV.2 et 3) représentent les caractéristiques de chaque pic après les traitements thermiques de trempe et revenu pendant 60min.et la variation de $\Delta 2\theta$ de chaque état de traitement par rapport l’état brut.

No.	Pos. [$^{\circ}2\theta$]	$\Delta 2\theta$	(hkl)	FWHM	d (A $^{\circ}$)	L’intensité(%)
1	10,27	/	(110)	0,3542	8,6110	5,13
2	44,99	-0,099	(110)	0,3542	2,0145	100
3	65,18	-0,011	(200)	0,9446	1,4311	12,12
4	82,58	0,01	(211)	0,5760	1,1673	21,9

Tab. IV.2: Les caractéristiques des pics du l’acier a l’état trempé.

No.	Pos. [$^{\circ}2\theta$]	$\Delta 2\theta^{\circ}$	(hkl)	FWHM	d (A $^{\circ}$)	L’intensité(%)
1	45,06	-0,02	(110)	0,1771	2,0118	100
2	65,28	-0,01	(200)	0,4723	1,4292	21,39
3	82,60	0,03	(211)	0,5760	1,1670	27,59

Tab. IV.3: Les caractéristiques des pics du l’acier a l’état revenu.

• **Variation de positions des pics**

D’après la diffraction des rayons X de l’acier à l’état trempé (950°C), nous avons remarqué l’apparition de nouveau pic de plan (110) d’une position $2\theta= 10.27^{\circ}$ avec une Faible intensité (Fig.IV.8), ce pic est probablement présente l’oxyde de fer (Fe₂O₂CO₃) [ICDD].

Dans les spectres de l'état traité (Fig.IV.8 et 9), nous avons un décalage de pic (110) vers le petit angle de variation $\Delta 2\theta = -0,09^\circ$ pour l'état trempée et une variation de $\Delta 2\theta = -0,02^\circ$ dans l'état revenu (220°C pendant 60 min) Par rapport l'état brut.

Nous avons un décalage vers le petit angle dans le pic (200) dans la phase austénite a $\Delta 2\theta = -0,11^\circ$ pour le trempé et $\Delta 2\theta = -0,01^\circ$ pour le revenu.

Le troisième pic de plan (211) de position $2\theta = 82,57^\circ$ quitté sa position après le trempé a une petite variation $\Delta 2\theta = 0,01^\circ$, pour le revenu le pic est déplacé vers le grand angle par une variation de $\Delta 2\theta = 0,03^\circ$ pour obtenir une position égale $2\theta = 82,60^\circ$.

A partir de ces résultats nous pouvons expliquer deux effets effectués sur la maille ; si le pic déplacé vers le petit angle nous avons aura un gonflement de la maille cristalline comme l'analyse de l'acier à l'état trempé et revenu pour les deux pics (110) et (200) par rapport l'état brut. Si le pic déplacé vers le grand angle donc nous avons aura un relâchement de la maille cristalline.

Le résultat d'analyse de l'acier à l'état revenu à 220°C pendant 60min, montre un relâchement de la maille par rapport l'état trempé (les trois pics sont déplacés vers le grand angle après le revenu, et sa illustre par la diminution des effets non acceptables de trempé.

- **l'intensité des pics**

Par rapport les valeurs de l'intensité de les trois pics (110), (200) et (211) à l'état brut, ces valeurs sont diminuées après le trempé ; mais à partir de le traitement thermique par revenu les valeurs augmentées, nous avons expliquées ce résultat ce implique d'un changement de la direction de l'orientation des rayons X vers le plan (110) de ferrite [32].

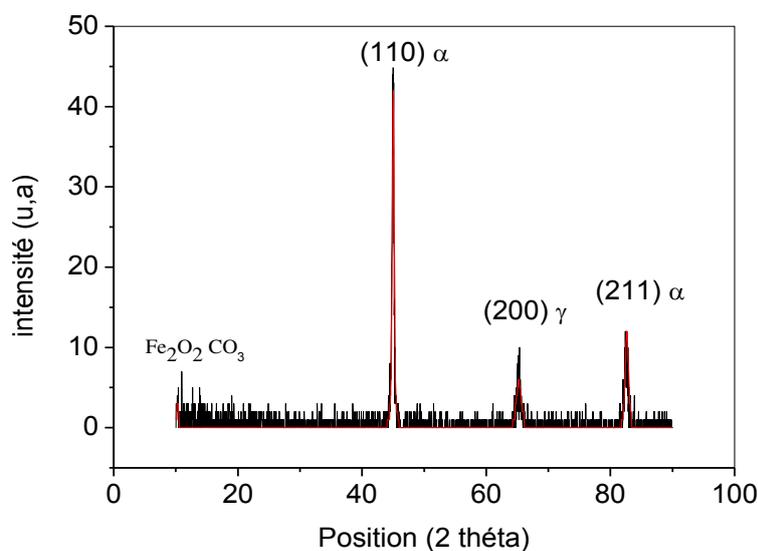


Fig.IV.8: Le diffractogramme de l'acier à l'état trempé.

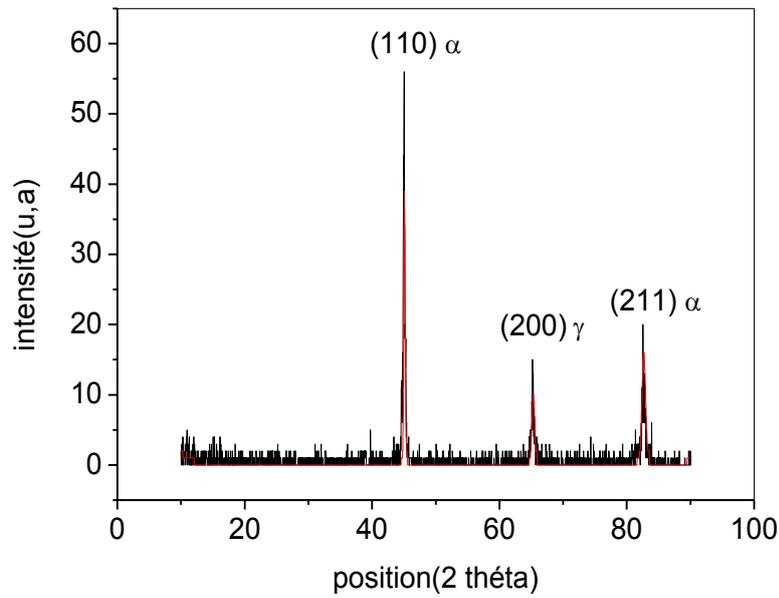


Fig.IV.9: Le diffractogramme de l'acier à l'état revenu.

• **Le paramètre cristallin**

A partir de la loi de Bragg (III.1), le paramètre cristallin (a) est calculé par la relation suivante : $a = d \cdot \sqrt{(h^2 + k^2 + l^2)}$

Le tableau suivant présenté les résultats :

Etat d'acier	Le paramètre cristallin (A°)
Brut	2,843
Trempe	2,850
Revenu (220°C pendent 60min)	2,845

Tab.IV.4: Valeurs de paramètre cristallin.

Dans ce tableau nous avons une petit augmentation de paramètre cristallin a l'état trempé (a=2.850) par apport l'état brut .Cette résultat est montrée notre interprétation de diffraction de rayon X ou nous avons obtient un gonflement de maille dans l'état trempé.

IV.4. Essai de corrosion

Pour déterminer le domaine des potentiels de la corrosion généralisée par piqûre, un teste de polarisation potentiodynamique a été réalisé.

A partir de la courbe de polarisation de l'acier API 5L X60 (Fig.IV.10) nous avons trouvé trois zones principales :

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 H₂O



Le domaine actif (la zone II) : situé entre E_{corr} et E_{pit}, dans ce domaine il y a une dissolution active de l'acier selon l'équation.



Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-2)

Les électrons libérés par la dissolution active sont repris par l'oxygène dissous du milieu pour former les hydroxydes OH⁻ selon la réaction.



La cinétique de corrosion est entièrement fixée par les réactions de transfert de charge. La zone III : c'est la zone de la corrosion par piqûre, après E_{pit}, la densité de courant augmente rapidement.

Le tableau (IV.5) regroupe les valeurs des paramètres électrochimiques déterminées à partir des courbes de polarisation précédemment obtenues :

Milieu	E _{corr} (mV)	I _{corr} (μA /cm ²)	E _{pit} (mVvs.SCE)
L'eau de mer	-723.7	31,622	-632

Tab.IV.5: Les valeurs des paramètres électrochimiques de l'acier API 5 L X 60
Dans l'eau de mer 30°C.

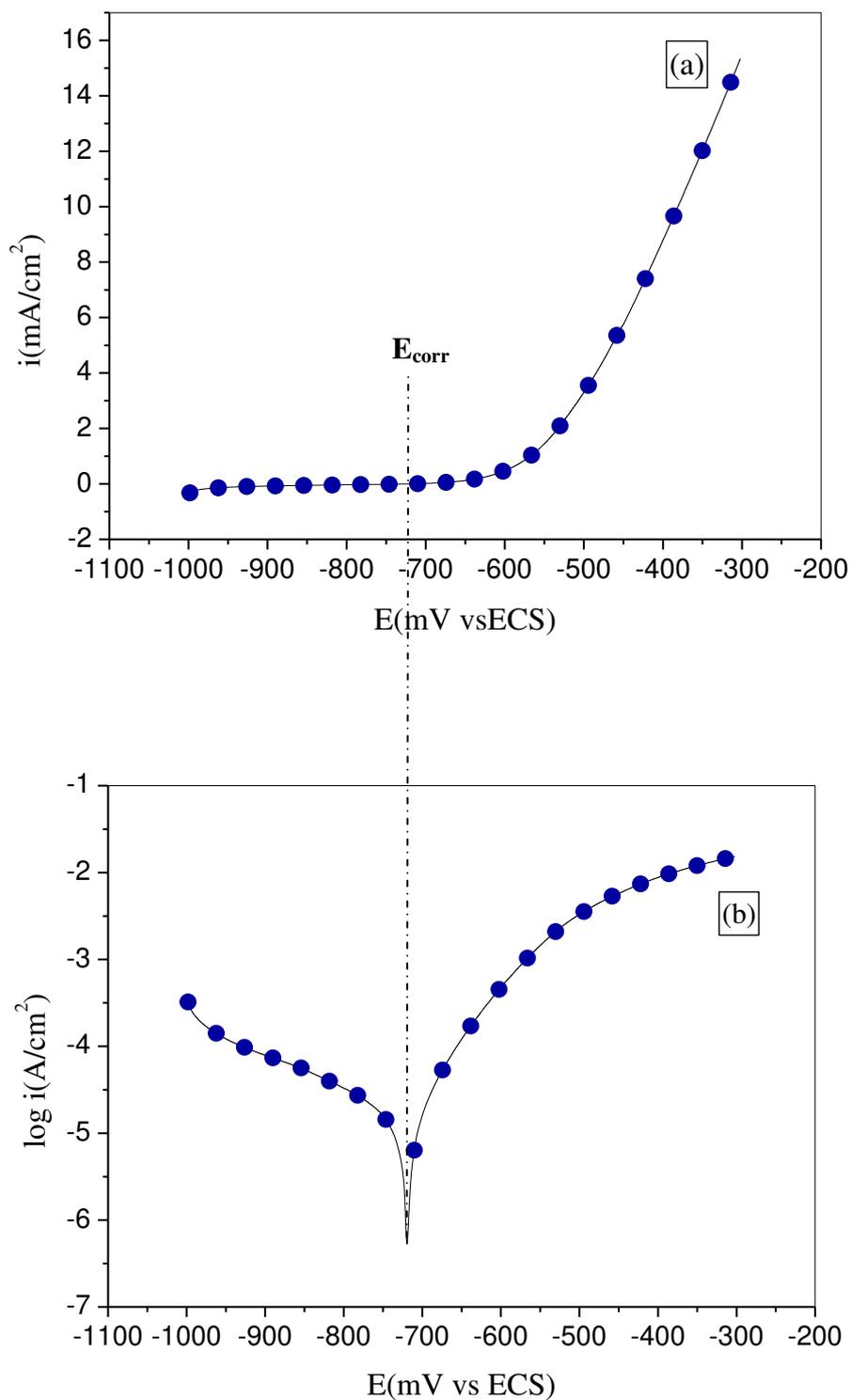


Fig.IV.10: Courbes de polarisation de l'acier API 5 L X60 dans l'eau de mer à 30°C

a) courbe linéaire, b) courbe logarithmique.

IV.5. Essais mécaniques

IV.5.1. La microdureté

Le tableau suivant représente le résultat obtenu par la mesure de microdureté.

Etats d'acier	Temps de maintient (min)	Mesure de la microdureté
Brut	/	186.5
Revenu à 220 °C	30	242.5
	60	201
	120	190
	180	207.5

Tab.IV.6: Mesure de la microdureté.

Après la mesure de la microdureté de l'acier a l'état brut ; nous trouvons que la valeur de ce dernier est égal 186.5 HV.

La figure (IV.11) illustre la variation des microduretés de l'acier a l'état revenu à température 220°C aux différent temps de maintient (30min, 60min, 120min et 180min).

Dans ce courbe nous remarquons une diminution des valeurs de microdureté avec l'augmentation de temps de maintient jusqu'à 120min. Donc il y a un adoucissement de l'acier.

Dans le dernier temps de maintient (180min) nous avons aura une petit augmentation de valeur de microdureté a partir de ce temps, cette remarque est expliquer par l'affinement des grains comme nous vus dans la microstructure (Fig.IV.6).

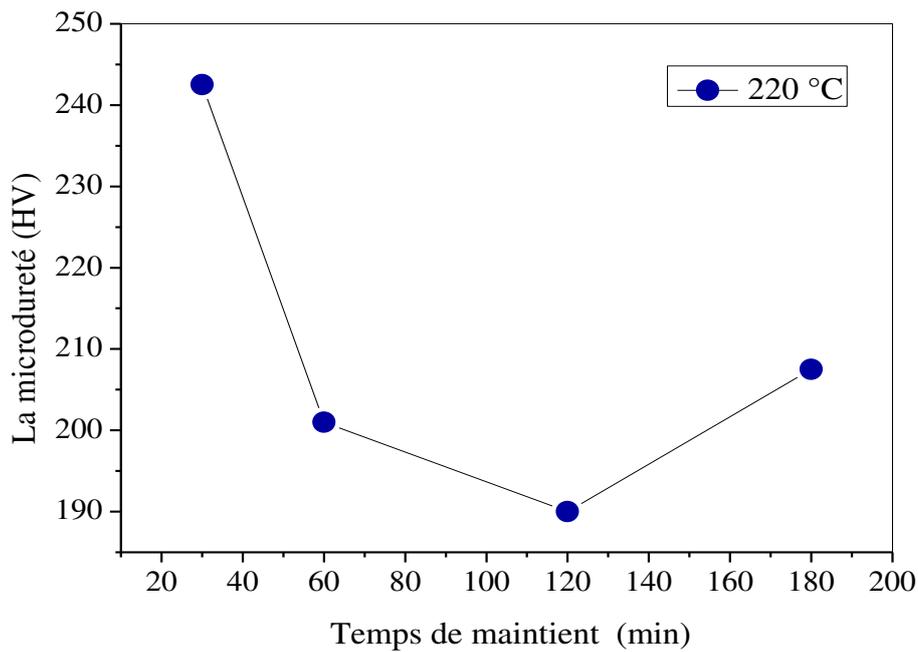


Fig. IV.11: La variation de microdureté après le traitement thermique par revenu (30min, 60min, 120min et 180min).

IV.5.2. La résistance mécanique

Etats d'acier	Temps de maintient (min)	Mesure de la Rm(MPa)
Brut	/	596
Revenu à 220 °C	30	778
	60	643
	120	607
	180	664

Tab.IV.7: Mesure de résistance mécanique.

La mesure de la résistance mécanique est liée par la microdureté, à l'état brut l'acier a une résistance de 596 MPa ; Les mesures de la résistance mécanique sont montrés une augmentation de cette dernière après le traitement thermique (ce que montre l'amélioration de cette propriétés par le revenu).

Dans la figure (IV.12) nous avons présenté la variation de la résistance mécanique en fonction de temps de maintient (30min, 60min, 120min et 180 min) de revenu à 220°C, nous avons remarqué la diminution de ces valeurs avec l'augmentation de temps de maintient.

D'après le traitement thermique de revenu à 30 min nous observons que cette valeur est la meilleure par rapport aux autres valeurs de différents temps de maintien. Et ça est montré par l'observation optique de structure pendant 30 min (Fig. IV.3). Où nous remarquons l'affinement des grains.

Après le revenu pendant (60 et 120 min) les valeurs de résistance mécanique sont (643 MPa et 607 MPa) respectivement. Donc elles sont diminuées par rapport à la valeur de revenu pendant 30 min. On peut expliquer ce résultat par la diminution de l'effet résiduel de trempe par ce traitement thermique (revenu).

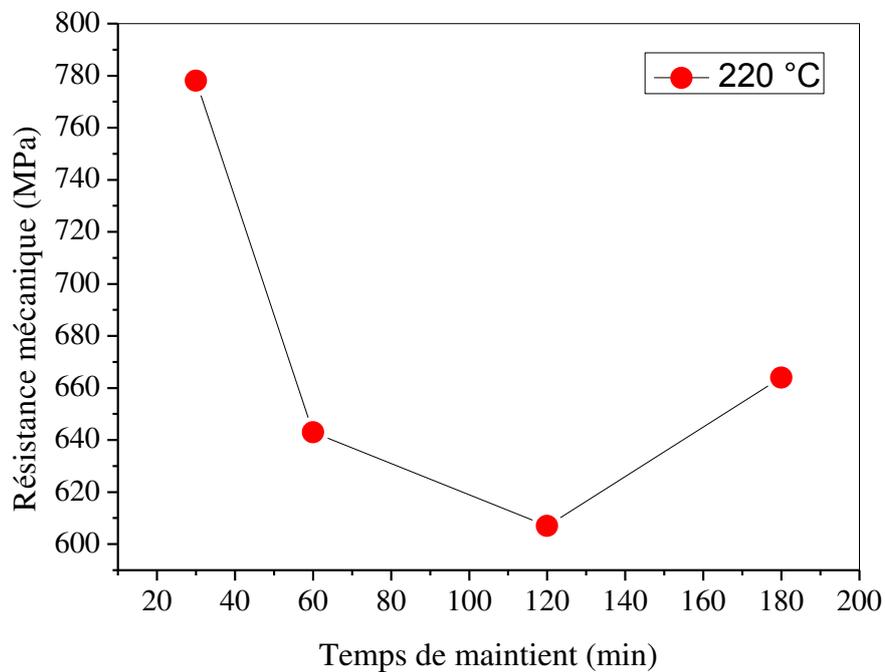


Fig. IV.12: La variation de la résistance mécanique après le traitement thermique de revenu (30 min, 60 min, 120 min et 180 min).

Conclusion générale

Dans ce travail nous avons étudié les propriétés mécaniques et métallurgiques d'un acier faiblement allié (API 5L X60) à l'état brut et après le traitement thermique de revenu 220°C pendant différents temps de maintien (30min, 60min, 120min et 180min). Pour cela nous avons utilisé : un microscope optique, microduremètre, l'analyse de diffraction des rayons X, le test électrochimique

Les principaux résultats de la mémoire peuvent se résumer de la manière suivante :

Microscope optique

- ✓ L'état brut de l'acier montre une structure ferrito-perlitique.
- ✓ Après le traitement thermique de trempe, nous avons remarqués l'existence de martensite avec des agrégats de ferrite et perlite,
- ✓ A l'état de revenu nous avons eu un affinement des tailles des grains.

Diffraction des rayons X

- ✓ L'analyse de DRX de l'acier à l'état brut montre (110) et (211) de α et (111) de γ .
- ✓ Le DRX de l'état trempé montre l'apparition de Oxyde de fer à position $2\theta=10,27^\circ$.
- ✓ Les deux états de l'acier (trempé et revenu) montre un gonflement de la maille pour les deux pics (110) et (111).
- ✓ Le DRX de l'état revenu montre un relâchement de la maille par rapport à l'état trempé.

Essais mécaniques

- ✓ La microdureté est diminuée avec l'augmentation de temps de maintien.
- ✓ Le meilleur durcissement par revenu est obtenu pendant 30min.
- ✓ Le meilleur adoucissement par revenu est obtenu pendant 120min.
- ✓ Les résultats de résistance mécanique est parallèle avec la mesure de la microdureté.

Références

- [1] Mémoire master (Le procédé de fabrication des pipes(X52) pour transport hydrocarbures (à El-Hadjar)) Lahcène SAOU, Université Mohamed Kheider, 2015.
- [2] Mémoire master (Effet des Traitements Thermiques sur Les aciers ordinaires) Abderrahim BENAICHA, Mohamed Kheider, 2015.
- [3] Disponible sur le site http://courses.washington.edu/mse/labs/Heat_Treatment-micrographs.html, Fundamentals of materials science, téléchargé 15-12-2016
- [4] Disponible sur http://s2i.chaptal.free.fr/Construction/designation_des_materiaux.
- [5] Mémoire magister de (Caractérisation structurale et mécanique du joint soudé de liaison bimétallique Acier Ordinaire E36 /Acier anti-usure NAXTRA70 utilisé par l'Unité Grue de Bejaia dans l'assemblage de la pelle chargeuse et godet d'excavation) de Hanifa MAROUF, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
- [6] Mémoire magister de (Essai de traction assisté par corrélation par d'images sur joint soudés en aciers inoxydables austénitiques (AISI 316L)) de Hacène SERRAR, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique ,2009 .
- [7] Thèse doctora (Apport des mesures de champs cinématique à l'étude des micromécanismes d'endommagement en fatigue plastique d'un acier inoxydable duplex) d'Ahmed ALBARTALI, Ecole Centrale de Lille ,2007.
- [8] Disponible sur http://www.ats-ffa.org/fiches/acier_outils.htm téléchargé 05-02-2017
- [9] OLIVER Myreim (Les acier dans la construction).
- [10] S.BENSSAADA (Elaboration des métaux ferreux (fontes et aciers).
- [11] S. BENSAAADA (Traitement thermiques des aciers et fontes).
- [12] Raymond Langevin ; PERFORM (Guide d'Auto Apprentissage pour les opérations de traitement thermique).
- [13] Disponible ver <http://ptetoile.free.fr/> (traitement thermique des aciers).
- [14] Mémoire magister (Effet de traitement thermique sur la qualité d'une soudure en acier) d'Ibrahim SERARIA, Université Mohamed Kheider, Biskra, 2016.
- [15]Mémoire magister (Contribution à l'étude de l'effet du traitement thermique sur les diverses propriétés d'un nanocomposite à matrice polypropylène) de Abdelhak MOUMEN Université Ferhat Abbas, Sétif.1, 2014.
-

Références

- [16] L.Garverick, Corrosion in the petrochemical industry, Edition ASM international, the materials information society, 1994.
- [17] Abdelkader SEDRINI (Etude sur le comportement en endommagement des aciers API 5X65 du model Weibull), ingénieur mécaniques université Tlemcen 2007.
- [18] Mémoire magister (Contribution à la détermination des critères de qualité des tubes soudent soumis à une pression intérieure) d'Abdelkadar BOUZIANE, Université M' hamed Bougara, Boumerdas, 2008.
- [19] Mémoire de magister (Ammonium quaternaire du platformat : synthèse et application a l'inhibition de la corrosion acide d'acier) de Amel KOUACHE, Université Saad Dahlab de Blida, 2011.
- [20] Thèse doctora (Etude de la nocivité des défauts dans les canalisations sous environnement hydrogène) de Tassadit BELLAHCENE, Université Mouloud Mammeri deTizi-Ouzou.
- [21] Overview of the design, construction, and operation of interstate liquid petroleum pipelines by Pharris¹ and R.L. Kolpa²; November 2007.
- [22] Mémoire magister (Etude sur la défaisance des aciers APL-5LX60 pour pipeline cas de la ligne GZI) Ibrahim JDID, Université Abou Beker Belkaid, Tlemcen, 2013.
- [23] Thèse doctora (Estimation du risque de rupture fragile de soudures de pipelines en aciers a haut grade : caractérisation et modélisation) de Anne-Sophie BILAT Ingénieur matériaux de Polytech'Lille Le 1er juin 2007.
- [24] Thèse doctora (Compréhension et modélisation du comportement a la rupture d'aciers pour tubes lors de l'essai BATTELLE) de Olivier CLEIZERGUES, Université des Sciences et Technologies de Lille, 1998.
- [25] Thèse doctora (Conception et simulation numérique des caractéristiques mécaniques des pipelines) d'Abdelmoumene GUEDRI, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2008.
-

Références

[26] Mémoire du magister, (Analyse de la fiabilité de l'acier API 5L X60 pour pipelines corrodés modèle basé sur le critère B31G), Salim BELAID (science des matériaux), Université Abou Beker Belkaid Tlemcen, 03 mars 2008.

[27] Mémoire magister (Corrosion localisée des aciers API 5L-X52 de la ligne ASR/ MP sollicité en sol Algérien) Amina BENDJEBBOUR, Université Abou Beker Belkaid Tlemcen 2011.

[28] Thèse doctora (Science et Génie des matériaux) de Caractérisation mécanique et étude des mécanismes de vieillissement thermique et thermomécanique de l'acier inoxydable martensitique 15-5PH, soudé par faisceau d'électrons) Emilie HERNY 8 décembre 2006.

[29] Thèse de doctora (effet de traitement thermique sur les caractérisations et la taille des grains sur les alliages à base d'Aluminium) de Lemmadi Fatima Zohra, Université Mohamed Kheider Biskra ,2014.

[30] F.Z. Lemmadi 1, A. Chala 2, S. Ferhati 3, F. Chabane 1, S. Benramache 2 (structural and Mechanical Behavior during QUENCHING o40CrMoV5stee , Journal of Science and Engineering Vol. 3 (1), 2013, 1-6

[31] Thèse Doctorat (Etude Du Joint Soudé D'un Alliage D'aluminium), **C. BOUREMEL** Université De Mouhamed Kheider ; Biskra, 2015.

[32] Thèse De Doctora (Les Mécanismes De Recristallisation Et De Croissance Des Grains Dans Les Métaux Et Alliages Métalliques Léger) de G. BENCHABANE, Sciences Exactes, Université De Mouhamed Kheider, Biskra, (2009)

.

Résumé

Dans cette étude nous avons traité les propriétés mécaniques et structurales d'un acier utilisé pour les fabrications des canalisations de transport des hydrocarbures (petrol, gaz) avant et après le traitement thermique de revenu à 220°C aux différent temps de maintient (30min, 60min, 120min et 180min).

Pour cette étude nous avons utilisé les appareillages suivants : une Microscope, Microduremètre, Diffractogramme.....

Mots clés : Acier (API 5L X60), traitement thermique, revenu.

ملخص

تناولنا في هذا الموضوع دراسة الخصائص الميكانيكية و البنيوية لأحد أنواع الفولاذ المستعمل في صناعة

أنابيب نقل المحروقات (الغاز و البترول) وذلك قبل وبعد المعالجة الحرارية بلسقاية في درجة حرارة 220 °C خلال أوقات زمنية مختلفة (30 د, 60 د , 120 د و 180 د) و لهذا الغرض استعملنا الأجهزة التالية الميكروسكوب جهاز قياس الصلادة جهاز التحليل بالأشعة السينية.....

الكلمات المفتاحية : الفولاذ (API 5L X60) , المعالجة الحرارية , السقاية .