

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 : des Sciences et de la Technologie
Option: transport d'hydrocarbures

Réf:.....

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

MASTER

Thème

**Les effets des traitements thermiques sur les aciers de
Construction des pipelines de pétrole (API5L- X60)**

Présenté par:
Massouda KADDOURI

Proposé et dirigé par:
Dr. Fatima.Z.LAEMMADI

Promotion : Juin 2017

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mes chers parents, Que dieu les protège

À mes frères et sœurs

À tous mes amis et collègues

Remerciement

*Nous remercions tout d'abord « **ALLAH** » le tout puissant qui nous a fourni l'aide et la confiance pour réaliser ce modeste travail.*

*Au terme de ce travail, Je remercie vivement **Mlle Fatima Zohra LEMMADI** doctorante à l'Université de Biskra et mon directeur de mémoire, pour l'intérêt qu'elle a porté à mon travail, pour ses compétences scientifiques, sa rigueur et son soutien.*

*Mes remerciements vont également à **Mr SALIM MESSOUDI** et **Mr HAMZA BENTRAH** d'avoir accepté de faire part de mon jury de soutenance en qualité de Président et examinateur.*

*Mon vif remerciement à **Mr HAMZA BENTRAH**, docteur au département de Métallurgie université de Biskra pour les aides afin de compléter cette étude.*

*Monsieur **IBRAHIM GASMI**, ingénieur et responsable du laboratoire MEB et DRX à l'Université de Biskra qui m'a beaucoup aidé dans les analyses de DRX.*

*A tous les professeurs et les cadres du hall mécanique, sans oublier **Mr SAMIR** le responsable du laboratoire de métallurgie au sein de département de génie mécanique ; qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.*

*Tous mes remerciements profonds à **ma famille, mes amis et mes collègues.***

Liste des tableaux

Tableau .I.1.le composition chimique d'acier faiblement allié.

Tableau. I.2.composition chimique des aciers pour pipelines norme API.

Tableau .III.1.Composition chimique de l'acier X60 étudié.

Tableau. IV.1. les caractéristiques des pics du l'échantillon brut.

Tableau. IV.2. les caractéristiques des pics du l'échantillon trempé.

Tableau. IV.3. les caractéristiques des pics du l'échantillon traité par revenu.

Tableau .IV.4. Mesure de la dureté.

Tableau .IV.5 . La valeur de paramètre électrochimique de l'acier API 5 L X42 en milieu Hcl à 30°C. (État brut).

Liste des figures

Figure .I.1. Diagramme Fe-Fe₃C, la ferrite CC est note δ ou α et l'austénite correspond à la structure CFC note γ .

Figure. I.2. Observation au MEB. structure (perlitique).

Figure .I.3. Nous donne une idée de l'influence de la vitesse de refroidissement sur les Différentes transformations de l'austénite.

Figure .I.4.Observation au microscope optique de l'acier X60 (Structure bainitique).

Figure .I.5. Diagramme TTT.

Figure .I.6 . Acier martensitique.

Figure. I.7.Acier ferritique.

Figure. II. 1 . Cycle de traitement thermique.

Figure. II. 2 . Chauffages de pièce.

Figure. II. 3 . Les étapes de chauffage.

Figure. II. 4 . Le cycle de la trempe.

Figure .II.5 . Cycle complet (trempe, revenu).

Figure .II.6 . Cycle thermique du recuit.

Figure.II.7 .Les figures présentent l'état de structure d'un acier avant et après homogénéisation.

Figure .II.8 . Cycles thermiques des différents recuits.

Figure. II.9 . Microstructure de Le Recuit.

Figure .III.1 . Four électrique.

Figure . III.2. L'échantillon préparé pour le microscope optique.

Figure .III.3 .Instruments de type FORCIPOL 2V Metkon.

Figure .III.5 . Microduremètre Vickers de 402MVD Z.

Figure .III.6.Diffractomètre PanalyticalX'pert (D8 ADVENCE) BRUKER.

Figure III.7.Photographie du dispositif de mesures électrochimiques.

Figure .IV .1 .L'observation microscopique de l'acier (état brut).

Figure. IV .2 .L'observation microscopique de l'acier (état trempé).

Figure. IV .3 . L'observation microscopique de l'acier (revenu à 300°C pendant 30min).

Figure .IV .4 . L'observation microscopique de l'acier (revenu à 300°C pendant 60min).

Figure .IV .5 . L'observation microscopique de l'acier (revenu à 300°C pendant 120min).

Figure .IV .6 . L'observation microscopique de l'acier (revenu à 300°C pendant 180min).

Figure. IV .7 .Diffratgramme d'acier [(a) état brut, (b) trempé ,(c) revenu].

Figure .IV .8. Les variations de la dureté en fonction des temps des maintiens à 300°C.

Figure .IV.9.Courbes de polarisation de l'acier API 5 L X60 en milieu HCl à 30°C, (a) courbe linéaire, (b) courbe logarithmique.(état brut).

Sommaire

Sommaire

Dédicace	
Remerciements	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Introduction générale	1
I.1.Introduction	2
I.2.Définition de l'acier	2
I.3. Diagrammes fer carbone	2
I.4. Les transformations de phase dans les aciers	3
I.4.1. Transformation au cours de chauffage (Austénitisation)	3
I.4.2.Transformations par diffusion	4
I.4.3. Transformation perlitique	4
I.4.4. Transformation martensitique	6
I.4.5. La transformation bainitique	7
I.4.6.Transformations isothermes	8
I.5.Les aciers peuvent être classifiés selon	10
I.5.1.Acier faiblement allié	11
I.5.1.1. Les aciers à faible teneur de carbone (%C < 0.25%)	11
I.5.1.2. Les aciers à moyenne teneur de carbone (0.25% à 0.6% de C)	11
I.5.1.3. Les aciers à forte teneur de carbone (0.6% à 1.4% de C)	12
I.5.2.Aciers fortement alliés	12
I.5.2.1.Les aciers inoxydables	12
I.6.Les aciers des pipelines.	14
I.7.Influence spécifique des éléments d'addition	16
II.1. Interdiction	18
II.2. Le but de traitement thermique.	18
II.3 . Définitions	19
II.4.Les principes de traitement thermique	19
II.4.1. Chauffage des pièces	19
II.4.2. Les Types de fours et leurs atmosphères	21
II.4.3.Refroidissement des pièces	21
II.5.Les types du traitement thermique	22
II.5.1.Trempe	22
II. 5.1.1. Définition	22
II.5.1.2. Les types de trempe	22
II.5.1.3. Cycle de trempe	22

II.5.2.Le Revenu	23
II.5.2.1.Principe et But de Revenu	23
II.5.2.2.Les types de revenu	24
II.5.3.Recuit	25
II.5.3.1.Le but de recuit	25
II.5.3.2.Les principe de recuit	25
II.5.3.3.Les types de recuit	25
III.1.Matériau étudié	29
III.2 Méthodes expérimentales utilisées	29
III.2.1 Traitements thermiques	29
III.3.Préparation métallographique	30
III.3.1. Microscopie optique (MO) :	31
III.3.2. Microduremètre	32
III.3.3.La diffraction des rayons X	33
III.3.4.Mesures électrochimiques	34
IV.1. Introduction	36
IV.2.Métallographie	36
IV.3 L'analyses par la diffraction des rayon-x :	38
IV.4.Les mesures de la microdureté	40
IV.5.Les courbes de polarisation	42
Conclusion générale	44
Référence bibliographique	

Introduction générale

L'acier est un alliage de fer contenant moins de 2 % de carbone. Il peut être répertorié selon cette teneur en carbone qui fixe son niveau de dureté maximale à l'état trempé.

Un acier de haute teneur en carbone sera employé pour sa grande dureté alors qu'un acier de teneur plus faible est moins dur et plus malléable. Il contient généralement de petites quantités d'autres éléments que le fer et le carbone, incorporés, volontairement ou non, au cours de son élaboration. On peut également y ajouter des quantités plus importantes d'éléments d'alliage; il est considéré alors comme un acier allié.

Les aciers au carbone sont les plus utilisés dans la construction des pipelines. En raison de leur faible coût, la maîtrise des techniques de leur élaboration et leur production 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 X60, X65, X52, X70 etc...

L'objectif essentiel de notre travail est l'étude de l'effet du traitement thermique sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier X60. Cet acier utilisé dans la fabrication des pipelines

Nous avons suivi : Le comportement de cet acier en fonction des traitements thermiques de trempe et revenu. Le présent travail est organisé comme suit :

Le chapitre I : Dans la première partie, nous parlerons des aciers et leurs caractérisations

Le chapitre II : Cette partie contient les types de traitement thermique

Le chapitre III : présente le matériau étudié et les techniques expérimentales

Le chapitre IV : le dernier chapitre comportera les résultats expérimentaux qui concernent l'effet du traitement thermique sur les transformations de phases et leurs interprétations.

Et à la fin nous essayerons de résumer cet humble travail à travers une conclusion générale.

Chapitre I

Généralité sur

les aciers

I.1.Introduction

Selon l'association mondiale de l'acier, il y a plus de 3500 qualités différentes d'acier avec des propriétés physiques, chimiques et environnementales uniques. Ainsi, quand quelqu'un utilise le terme acier, il est inutile de dire que c'est très vague comme expression. Dans la vie de tous les jours, cela n'a pas de conséquences graves, mais dans des travaux d'usinage d'une certaine envergure, aucun choix ne doit être fait au hasard et un type d'acier précis doit être choisi. [1]

I.2.Définition de l'acier

L'acier est un alliage de fer contenant moins de 2 % de carbone. Il peut être répertorié selon cette teneur en carbone qui fixe son niveau de dureté maximale à l'état trempé. Un acier de haute teneur en carbone sera employé pour sa grande dureté alors qu'un acier de teneur plus faible est moins dur et plus malléable. Il contient généralement de petites quantités d'autres éléments que le fer et le carbone, incorporés, volontairement ou non, au cours de son élaboration. On peut également y ajouter des quantités plus importantes d'éléments d'alliage; il est considéré alors comme un acier allié. [2]

I.3. Diagrammes fer carbone

Les aciers microalliés à basse teneur en carbone présentent en quasi-équilibre les mêmes types de transformations allotropiques à partir de l'austénite que le fer pur. En effet, le fer est un élément qui possède plusieurs formes allotropiques, c'est-à-dire que selon les conditions en température et en pression, différentes structures cristallines sont observées. Ainsi à la pression atmosphérique. (figure I.1)

- Entre 1538°C et 1394°C d'une part et 912°C et -273°C d'autre part, la structure cristalline du fer pur est cubique centrée (CC), cette structure n'est pas compacte, et la forme cristalline du fer est dite fer α et fer δ respectivement. Dans les aciers, la phase associée est nommée ferrite.
- Entre 1394°C et 912°C, la structure cristalline du fer pur est cubique à faces centrées (CFC), cette structure est compacte et cette forme est dite fer γ . La phase associée est nommée austénite dans les aciers.

De plus, l'évolution des paramètres de maille lors des transformations allotropiques engendrent des modifications du volume spécifique du fer.

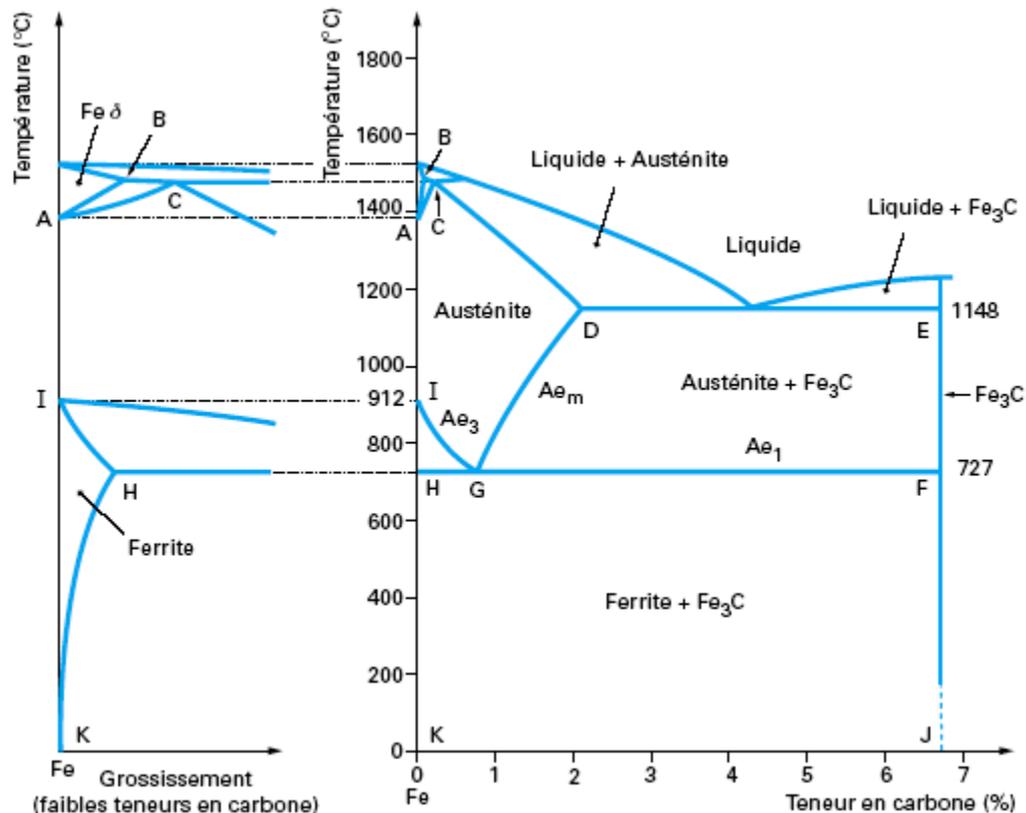


Figure .I.1. Diagramme Fe-Fe₃C, la ferrite CC est noté δ ou α et l'austénite correspond à la structure CFC noté γ . [1]

I.4. Les transformations de phase dans les aciers

I.4.1. Transformation au cours de chauffage (Austénitisation)

L'austénitisation a pour objet de mettre en solution le Carbone et, éventuellement, les éléments d'alliage précipitent sous forme de carbures. Pour ce faire, il est nécessaire de se placer dans les conditions où le carbone est soluble dans le fer, c'est-à-dire de provoquer, par chauffage, la transformation du fer α en fer γ . La transformation austénitique peut être obtenue si la température est supérieure à AC_3 , plus elle est élevée plus le grain austénitique est gros et cela influence notablement les conditions de transformations au refroidissement.

On appelle conditions d'austénitisation, les paramètres intervenant dans la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$, les principaux sont :

- la vitesse de montée en température, la nature et la teneur des éléments alliés, qui influent sur la cinétique de transformation et les points de début et de fin de transformation,
- la température et la durée du maintien, au-delà de AC_3 pour la quantité d'austénite nouvellement formée, qui définissent la taille de grain austénitique.

En refroidissement, on a l'habitude de distinguer les transformations par diffusion, les transformations par cisaillement (ou martensitiques), les transformations intermédiaires (réactions massives ou bainitiques).

I.4.2. Transformations par diffusion

La température de maintien isotherme déterminée, l'austénite se décompose pendant la période de croissance en agrégats ferrite-carbures après un temps d'incubation. Cette décomposition est gouvernée par le changement de réseau cristallin du fer γ (CFC) vers le fer α (CC) d'autant plus que l'on s'éloigne de Ac_3 et par la tendance à la formation de carbures d'autant plus facile que la température est élevée (phénomène thermiquement active).

En conditions an isothermes, les transformations par diffusion se produisent pour des vitesses de refroidissement relativement faibles. En général, ces transformations interviennent à température relativement haute et leurs cinétiques sont très sensibles à cette dernière. Ces transformations atteignent souvent un état stable après passage par plusieurs stades de transition métastables de stabilité croissante. Parmi les transformations par diffusion, on distingue la transformation ferrite-perlitique.

L'augmentation de la taille de grain austénitique conduit à une augmentation de la durée de germination du fait que celle-ci se développe essentiellement aux joints des grains et que ceux-ci se voient diminues dans ce cas, les grains étant moins nombreux. [17]

I.4.3. Transformation perlitique

Pour des températures de transformation entre 720°C et 450°C (phase perlitique), débute la transformation par la formation des premiers germes de cémentite sur les joints des cristaux de l'austénite, ces germes se développent à l'intérieur des cristaux γ et le voisinage des cristaux de cémentite s'appauvrit en carbone et se fustige en ferrite α .

La solubilité du carbone dans la ferrite est très faible, ce qui conduit à la précipitation du carbone se trouvant dans la ferrite dans le domaine de l'austénite voisin et ce qui donne la formation de la perlite ($Fe\alpha +$ cémentite).

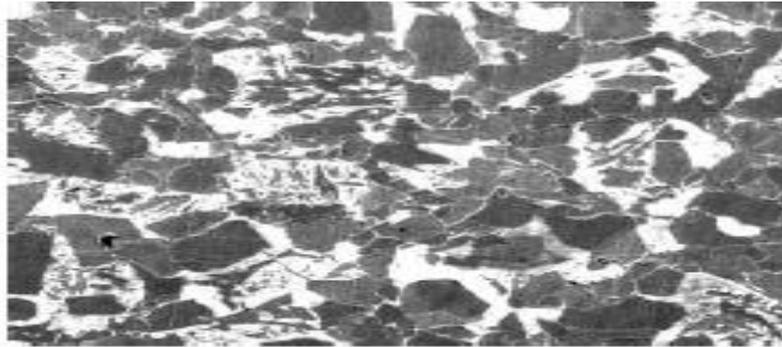


Figure I.2. Observation au MEB. Structure (perlitique). [13]

La transformation perlite a le caractère de diffusion, à première étape, elle est caractérisée par l'apparition des germes de cémentite sur les joints des grains de l'austénite.

La deuxième étape montre le développement des germes de la cémentite tout en provoquant l'appauvrissement des places voisines en carbone et en se transformant en ferrite et enfin la troisième étape c'est la formation de la perlite. Une petite surfusion donne un petit nombre de germes de cémentite avec des lamelles épaisses, mais quand la vitesse est assez considérable, c'est à dire le degré de surfusion est élevé, dans ce cas le nombre de grains est plus grand et les lamelles de la perlite sont plus fines c'est à dire on a le constituant Sorite ou Trottime.

La perlite, le sorite et la trottime se distinguent l'une de l'autre par l'épaisseur des lamelles.

Dans la perlite, leur dureté est aussi différente : [17]

- Perlite : HV 200.
- Sorite : HB 300.
- Trottime : HB 400.

Le sorite et la trottime sont des perlites très fines obtenues par vitesses de refroidissement assez importantes. La distance entre les lamelles est déterminée par la vitesse de diffusion du carbone dans l'austénite. Cette distance diminue avec l'augmentation de la température, ce qui conduit à l'obtention de lamelles épaisses (faible dureté).

La transformation perlite a le caractère de diffusion, à première étape, elle est caractérisée par l'apparition des germes de cémentite sur les joints des grains de l'austénite.

La deuxième étape montre le développement des germes de la cémentite tout en provoquant l'appauvrissement des places voisines en carbone et en se transformant en ferrite et enfin la troisième étape c'est la formation de la perlite. Une petite surfusion donne un petit nombre de germes de cémentite avec des lamelles épaisses, mais quand la vitesse est assez considérable, c'est à dire le degré de surfusion est élevé, dans ce cas le nombre de grains est plus grand et

les lamelles de la perlite sont plus fines c'est à dire on a le constituant Sorite ou Trottime. La perlite, le sorite et la trottime se distinguent l'une de l'autre par l'épaisseur des lamelles. Dans la perlite, leur dureté est aussi différente :

- Perlite : HV 200.
- Sorite : HB 300.
- Trottime : HB 400.

Le sorite et la trottime sont des perlites très fines obtenues par vitesses de refroidissement assez importantes. La distance entre les lamelles est déterminée par la vitesse de diffusion du carbone dans l'austénite. Cette distance diminue avec l'augmentation de la température, ce qui conduit à l'obtention de lamelles épaisses (faible dureté).

I.4.4. Transformation martensitique

C'est au dessous d'une température d'environ 180°C que se forme la cémentite à partir de l'austénite sur fusionnée. Lorsque la température de l'austénite sur fusionnée diminue jusqu'à environ T 180°C, ou même plus bas, le processus de diffusion est complètement arrêté et une transformation sans diffusion se produit, elle est appelée transformation martensitique. La martensite est une solution solide de carbone dans le fer α mais très saturée, son réseau cristallin est très distorse (déformé).

La transformation martensitique se produit sans déplacement des atomes de carbone, seulement les atomes de fer qui se déplacent à une distance plus petite que la distance inter-atomique, cette transformation se produit très vite. Les points de début et fin de transformation dépendent du pourcentage de carbone, avec l'augmentation du % C, les points M_f et M_s diminuent.

La martensite a une structure très dure, le phénomène de durcissement a un caractère physico-chimique avec le réseau cristallin du fer α très déformé par la présence des atomes de carbone ce qui explique son durcissement.

Pour des refroidissements continus, les diagrammes TTT ne correspondent plus à cette réalité, mais il existe d'autres types de diagramme appelés diagramme de surfusion.

La (figure I.3) nous donne une idée de l'influence de la vitesse de refroidissement sur les différentes transformations de l'austénite.

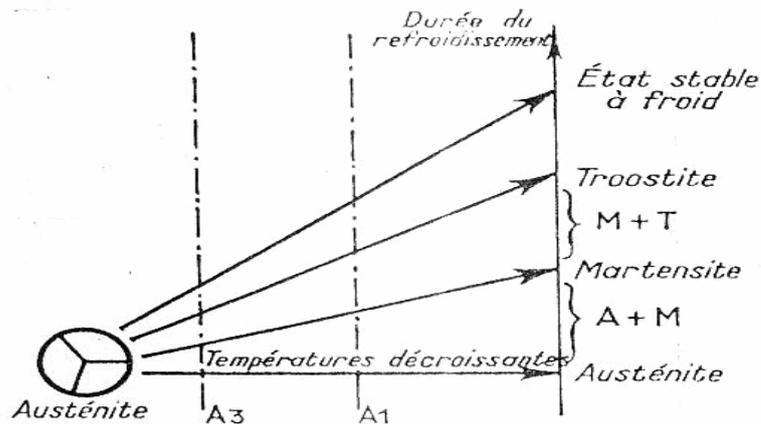


Figure I.3. Nous donne une idée de l'influence de la vitesse de refroidissement sur les Différentes transformations de l'austénite. [18]

Quand la température du milieu de trempe est supérieure au point M_f , l'austénite ne se transforme pas complètement en martensite, d'habitude il y a une certaine quantité d'austénite résiduelle. Elle est instable et lors des basses températures elle peut donner la martensite.

Cette transformation provoque des déformations plastiques, donc l'austénite résiduelle dégrade les propriétés de la structure en diminuant la dureté (tenue à l'usure).

Pour des températures $T < 100^\circ\text{C}$, la martensite et l'austénite sont très stables et on a plus de transformation de structure.

Pour des procédés techniques de traitement thermique important tels que recuit de normalisation, trempe etc., l'acier est refroidi continuellement à partir du domaine de l'austénite.

La trempe s'effectue soit dans l'eau, l'huile, dans un four ou à l'air, dans ce cas l'austénite ne se transforme pas à une certaine température constante, mais la transformation de cette dernière s'étend sur un intervalle de température, par la suite on obtient des aciers traités en même temps avec des structures différents. Par exemple:(martensite et bainite), (perlite à coté de la bainite) ou encore (perlite avec bainite et martensite).[18]

I.4.5. La transformation bainitique

Au cours de la transformation bainitiques. Un germe de ferrite prend naissance sur le joint de pains et se développe dans l'austénite conduisant à une plaquette ferritique sursaturée en carbone. En se développant, la plaquette rejette le carbone en excès dans l'austénite adjacente.

Ce stade est suivi par la précipitation de cémentite dans et ou entre les plaquettes de ferrite pour la bainite inférieure et uniquement entre les plaquettes ferritiques pour la bainite supérieure.

Par ailleurs, le mécanisme de la formation de la bainite ressemble à celui de la martensite. Par un mécanisme de cisaillement, les atomes de la maille d'austénite se déplacent dans un mouvement coopératif dans la direction de cisaillement, parallèlement à un plan fixe. pour se stabiliser dans les positions correspondantes à la maille de la ferrite D'après les observations métallographiques. La formation des grains de ferrite et la précipitation de cémenta e semblent progresser en cascade provoquant le développement latéral des paquets bainitiques perpendiculairement à leur direction principale de croissance.

La germination de la bainite est de type interracial : de nouvelles plaquettes de ferrite se forment à partir des interfaces ferrite aciculaire austénite déjà existantes Le champ de contraintes près de la pointe de la latte favorise la même variante d'orientation, tandis que celui des cotes encouragerait une variante accommodée.

Le résultat final de la transformation bainitique conduit à des plaquettes disposées parallèlement entre elles et avec une orientation cristallographique très proche. Sous certaines conditions, cette transformation peut donner lieu à une autre disposition des plaquettes, et la microstructure qui en résulte est la ferrite aciculaire. [7]

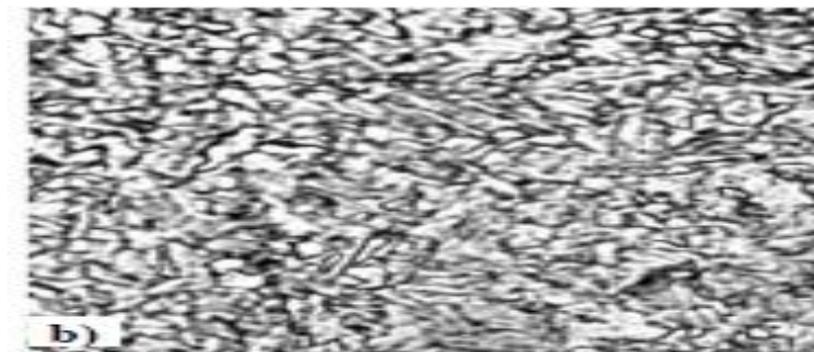


Figure .I.4. Observation au microscope optique de l'acier X60 (Structure bainitique) .[13]

I.4.6. Transformations isothermes

Le diagramme d'équilibre déjà envisagé au chapitre précédent, indique la constitution normale de l'acier, constitution d'équilibre, pour les différentes températures. L'expérience prouve que cette constitution n'est acquise que si la température varie assez lentement pour donner aux transformations le temps de s'effectuer. Dans le cas contraire, non seulement les transformations pourront ne pas avoir lieu du tout ou au contraire se faire incomplètement. On

obtient dans ces deux cas de nouveaux constituants que le diagramme d'équilibre ne peut indiquer, ils correspondent à des états hors d'équilibre ou états trempés. Si un acier à structure austénitique est obtenu par chauffage à une température supérieure à AC_3 , est surfusionné à une température inférieure à A_1 , l'austénite acquiert un état métastable et subit des transformations. Pour décrire l'allure cinétique des transformations, on utilise le diagramme TTT (figure. I.5).

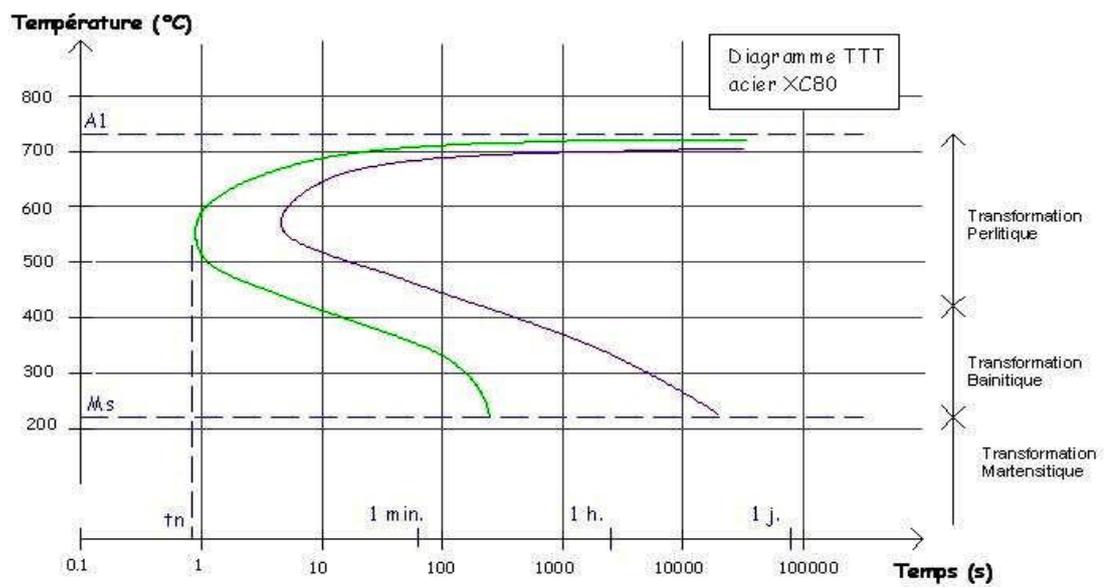


Figure I.5. Diagramme TTT. [18]

Le diagramme de transformation isotherme (Temps, Température, Transformation), dont les abscisses indiquent le temps et les ordonnées la température, la courbe de gauche montre le début de la transformation de l'austénite en mélange mécanique et la courbe de droite montre la fin de la transformation de l'austénite.

Le domaine situé à gauche de la courbe gauche détermine la durée d'incubation dans l'intervalle de température et de temps déterminés, pendant lesquels la transformation ne se produit pas, (l'austénite est à l'état sur fusionné et ne se décompose pas). C'est la période d'incubation qui caractérise la stabilité de l'austénite sur fusionnée. Quand l'acier est sur fusionné à un petit degré, le nombre de germes est petit et le temps d'incubation est grand.

Au fur et à mesure de l'augmentation du degré de surfusion, le nombre de germes augmentent et le temps d'incubation diminue.

L'abaissement de la température provoque une diminution de la vitesse de diffusion et la stabilité de l'austénite augmente au dessous de 555°C , la limite supérieure du diagramme TTT est donnée par le point A_1 aux environs de 720°C et la limite inférieure par le point de

martensite $M_S = 180^\circ\text{C}$. A droite de la courbe de droite sont données les différentes structures à obtenir et entre les deux courbes (partie hachurée) la transformation de l'austénite est saisie. La ligne qui représente la précipitation de la cémentite secondaire sur le diagramme TTT existe seulement pour les aciers hypereutectoïdes. Pour un acier hypoeutectoïde, elle n'existe pas, mais il possède une ligne correspondant à la précipitation de la ferrite prééuteutoïde, suivant le degré de surfusion de l'austénite.

Dans le diagramme TTT existe trois domaines de températures ou zones de transformation :

- Domaine perlitique (au dessus de 550°C).
- Domaine bainitique (intermédiaire) entre 550 et 200°C .
- Domaine martensitique au dessous de 200°C .

Un acier porté à une température supérieure à A_3 devient austénitique et par refroidissement à une vitesse suffisante, on obtient de la martensite qui correspond au maximum de dureté. Si le bain de refroidissement est à une température supérieure à A_r tout en conservant un pouvoir refroidisseur suffisant, on aura l'austénite mais pas de martensite. Si la température maintenue constante est proche de A_r tout en lui étant supérieure, l'austénite, au bout d'un temps qui peut varier de quelques heures à quelques jours se transforme en un constituant nouveau appelé bainite, qui semble correspondre à une disposition particulière de ferrite et de cémentite, ce constituant confère au métal une dureté presque aussi élevée que celle de la martensite et une ténacité plus grande.

Enfin si cette température est maintenue pendant un temps assez court (quelques minutes), l'austénite donne au refroidissement de la martensite, mais en raison de l'homogénéisation température réalisée pendant l'arrêt momentané du refroidissement, les risques de tapures sont écartés et les refroidissements sont réduits. [18]

I.5. Les aciers peuvent être classifiés selon

- La composition, telle que le carbone, faiblement allié, ou les aciers inoxydables... ;
- Les méthodes de fabrication, telles que le four Thomas, processus de base de l'oxygène, ou méthodes de four électrique .
- La méthode de finition, telle que le laminage à chaud ou laminage à froid
- La forme de produit, telle que la barre, le plat, la feuille, la bande, la tuyauterie, ou la forme structurale.
- L'utilisation des désoxydants, telle que l'acier calmé, semi calmé, couvert, ou bordé
- La microstructure, telle que de ferrite, perlitique, et martensitique.....
- Le niveau exigé de force, comme indiqué dans des normes d'ASTM

-Le traitement thermique, tel que le recuit, et le traitement thermomécanique.

Des systèmes de classification mentionnés ci-dessus, la composition chimique est le plus largement utilisée internationalement et sera soulignée comme suit [3]

I.5.1. Acier faiblement allié.

Tableau .I.1. la composition chimique d'acier faiblement allié [5]

	Acier	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	V	N ₂
Aciers faiblement alliés	1	0,10	0,49	0,35	0,007	0,003	0,14	2,01	0,02	0,88	0,03	0,15	0,0074
	2	0,09	0,49	0,27	0,008	0,004	0,07	1,86	0,34	1,02	0,03	0,14	0,0060
	3	0,09	0,48	0,31	0,008	0,004	0,95	2,02	0,28	0,16	0,04	0,15	0,0088
	4	0,09	0,47	0,32	0,008	0,004	0,87	1,32	0,27	0,55	0,04	0,15	0,0077
	5	0,07	0,49	0,37	0,010	0,005	0,44	1,45	0,25	0,73	0,05	0,15	0,0068
	6	0,07	0,50	0,30	0,009	0,003	0,49	1,95	0,32	0,85	0,04	0,15	0,0090
Référence	7	0,18	1,52	0,35	0,023	0,018	0,03	0,18	0,03	0,06	0,01	0,01	0,005

I.5.1.1. Les aciers à faible teneur de carbone (%C < 0.25%)

Ces aciers sont produits en grande quantité et à moindre coût et se caractérisent par une grande ductilité et une grande ténacité mais une faible résistance.

Ils sont généralement renforcés par écrouissage (amélioration de la résistance et de la dureté par déformation plastique). Leur résistance à la traction se situe entre 415 et 550 MPa et leur allongement à la rupture peut atteindre 25 %. Par ailleurs, ils peuvent être facilement usinés et soudés. On les trouve dans diverses applications (éléments de construction tels que les poutres, les profilés, les cornières, carrosserie de voitures, boîtes de conserve,).[4]

I.5.1.2. Les aciers à moyenne teneur de carbone (0.25% à 0.6% de C)

Ces aciers offrent de meilleures combinaisons résistance-ductilité lorsqu'ils sont traités thermiquement (austénisation, temple, revenu et recuit). L'apport d'éléments d'addition tels que le chrome, le nickel et le molybdène facilitent ces traitements. Ces aciers sont utilisés dans la fabrication de vilebrequins, d'engrenages, de roues et voies ferrées et autres pièces de structures qui nécessitent de grandes résistances et ductilité.

L'austénisation consiste à chauffer au cours de l'élaboration l'alliage à une température comprise entre 750 et 900°C pour obtenir la structure austénite c.f.c (ou fer gamma) .

I.5.1.3. Les aciers à forte teneur de carbone (0.6% à 1.4% de C)

Ils sont caractérisés par une grande dureté, une grande résistance et une faible ductilité. Etant résistant à l'usure, ils sont, utilisés dans la fabrication d'outils de coupe, des lames de scies et de matrices. On associe souvent à ces aciers des éléments d'addition tels que le chrome, le vanadium et le tungstène afin d'obtenir des composés de carbures pour améliorer leur dureté. [6]

I.5.2. Aciers fortement alliés

Pour ces aciers, un élément au moins atteint une teneur de 5%, parmi ces aciers on trouve les aciers rapides pour la confection des outils de coupe et les aciers inoxydables.[8]

I.5.2.1. Les aciers inoxydables

Aujourd'hui, nous avons un extraordinaire développement des aciers inoxydables, cela est dû en grande partie à la disponibilité des éléments métalliques entrant dans leur composition, c'est-à-dire le chrome, le nickel le molybdène et le manganèse, ce dernier pouvant être utilisé comme substitut au nickel Un métal est dit inoxydable s'il résiste bien à l'action de l'atmosphère à divers degrés d'humidité et de salinité, à des attaques chimiques (acides, bases, sels, tout autre agent de corrosion). Dans de nombreuses applications devenues de plus en plus sévères en termes de corrosion. on a dû substituer des aciers spéciaux et alliés à l'acier ordinaire. Les aciers réfractaires sont destinés à travailler à chaud (températures supérieures à 550°C), dans des milieux agressifs tels que les milieux oxydants de toute nature (présence d'oxygène, soufre...), réducteurs (hydrogène), les métaux et sels fondus etc. La température de fonctionnement élevée nécessite, de plus, une bonne tenue mécanique à chaud, en particulier une bonne résistance au fluage. La plupart de ces aciers réfractaires sont des aciers inoxydables dont les propriétés sont améliorées par des additions de molybdène, titane, niobium. etc. Les aciers inoxydables comprennent un ensemble de familles d'alliages métalliques qui contiennent tous du fer et du chrome : c'est essentiellement le chrome qui confère aux aciers une bonne résistance à la corrosion par formation en extrême surface d'une très fine couche d'oxyde de chrome non poreuse. Suivant leur teneur en chrome dont le seuil minimal est de 13% et les traitements métallurgiques qu'ils ont subis, ils présentent un large éventail de propriétés. Entre autres, on distingue :

a) Aciers martensitiques : Leur teneur en chrome ne dépasse pas 17% et leur teneur en carbone, qui est fonction de la teneur en chrome peut atteindre 1.1%.

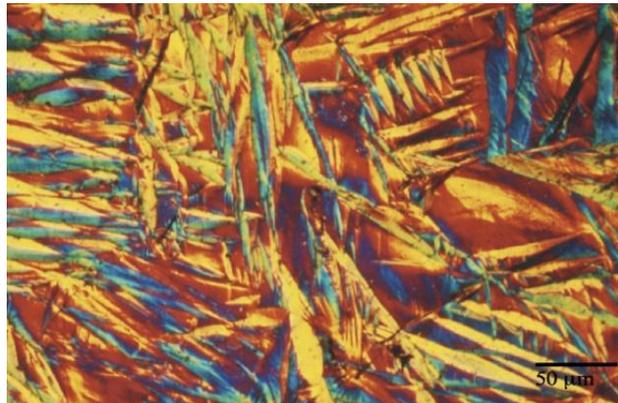


Figure .I.6 . Acier martensitique .[13]

b) Aciers ferritiques : Leur teneur en carbone est faible (inférieure à 0.08 %). Un acier qui contient plus de 12 % de chrome demeure ferritique à toutes les températures ; il ne peut plus prendre la trempe martensitique. Ils peuvent contenir entre 12 et 30 % de chrome. Ils sont aux chauffages sensibles au grossissement des grains, ce qui entraîne une dégradation de leur ductilité et de leur ténacité.

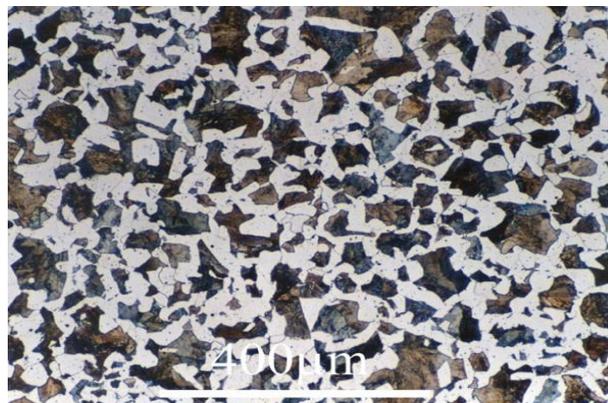


Figure. I.7.acier ferritique.[13]

c) Aciers austénitiques : Malgré les progrès incontestables réalisés, en matière de ductilité et de ténacité, par les aciers inoxydables ferritiques, les aciers inoxydables austénitiques du type Fe-Cr-Ni représentent encore 80 % du marché mondial. Comme le nickel est un élément gammagène. il a tendance à stabiliser l austénite. Selon leurs teneurs en chrome, en nickel et en carbone, certains aciers peuvent conserver une structure austénitique (C.F.C). L'addition de nickel élément gammagène. En quantité suffisante permet à l'acier de conserver sa structure austénitique à la température ambiante. Dans de nombreux milieux, leur résistance à la corrosion est remarquable, ainsi d'ailleurs que les propriétés mécaniques et

leur formabilité. De par leur structure (C.F.C), ils ne présentent aucune transition ductile-fragile; on peut donc les utiliser à très basse température (transport et stockage de gaz liquéfiés, par exemple). Finalement, leur résistance à la corrosion et à l'oxydation permet leur emploi à haute température (jusqu'à 900 ou 1000°C, selon les nuances). A ces propriétés, il faut ajouter une excellente soudabilité opératoire et métallurgique, ce qui facilite la mise en œuvre [9].

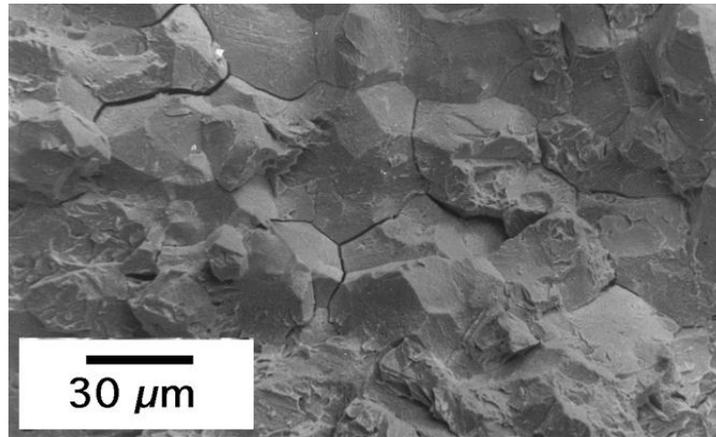


Figure .I.8. Acier austénitique. [13]

I.6.Les aciers des pipelines.

Les aciers au carbone sont les plus utilisés dans la construction des pipelines .En raison de leur faible cout, la maitrise des techniques de leur élaboration et leur production ils sont largement employés dans les secteur de l'énergie, comme les plateforme de forage , le transport du pétrole ou du gaz naturel par le biais de gazoducs ou d'oléoducs .Ces aciers sont habituellement de nuances telle que X60, X65, X52, X 70 etc...

Tableau. I.2.composition chimique des aciers pour pipelines norme API [14]

Normes	Acier	Composition Chimique%							
		C	M _n	P	S	S _i	V	N _b	T _i
API 5L	L210ou A	≤ 0.22	≤0.90	≤0.030	≤0.030	-	-	-	-
	L245ou B	≤ 0.28	≤1.20	≤0.030	≤0.030	-	-	-	-
	L290 ou X 42	≤ 0.28	≤1.30	≤0.030	≤0.030	-	-	-	-
	L320 ou X 46	≤0.28	≤1.40	≤0.030	≤0.030	-	-	-	-
	L360 ou X52	≤0.28	≤1.40	≤0.030	≤0.030	-	-	-	-
	L390 ou X 56	≤0.28	≤1.40	≤0.030	≤0.030	-	-	-	-
	L415 ou X 60	≤0.24	≤1.40	≤0.030	≤0.030	-	-	-	-
	L245 R ou BR	≤0.24	≤1.20	≤0.025	≤0.015	0.40	-	-	0.04
	L290RouX4R	≤0.24	≤1.20	≤0.025	≤0.015	0.40	0.06	0.05	0.04
	L245N or BN	≤0.24	≤1.20	≤0.025	≤0.015	0.40	-	-	0.04
	L290NouX42N	≤0.24	≤1.20	≤0.025	≤0.015	0.40	-	0.05	0.04
	L320NouX46N	≤0.24	≤1.40	≤0.025	≤0.015	0.40	0.06	0.05	0.04
	L360NouX52N	≤0.24	≤1.40	≤0.025	≤0.015	0.45	0.07	0.05	0.04
	L390NouX5N	≤0.24	≤1.40	≤0.025	≤0.015	0.45	0.10	0.05	0.04
	L415NouX6N	≤0.24	≤1.40	≤0.025	≤0.015	0.45	0.10	0.05	0.04

Composition	C	Mn	Nb	V
GRADE B	0.06 à 1.2	0.7 à 1	-	-
X52	0.06 à 1.2	1 à 1.400	0.03 à 0.05	-
X65	0.06 à 1.0	1.300 à 1.600	0.04 à 0.07	0.03 à 0.07
X70	0.06 à 1.20	1.450 à 1.650	0.04 à 0.07	0.04 à 0.07

I.7. Influence spécifique des éléments d'addition

Les principaux éléments d'addition du fer sont : **le carbone, le chrome, le nickel. Le tungstène, le molybdène, le vanadium, le manganèse, l'aluminium, le silicium, le titane, le niobium, l'azote...** ; ils ont une influence significative sur les caractéristiques. L'action des éléments d'addition dépend essentiellement des deux facteurs décrits ci-dessous :

- Modification du domaine de stabilité d'Austénite. Certains éléments, comme le carbone, le nickel et le manganèse élargissent le domaine de stabilité de l'austénite et abaissent les températures de transformations. Avec des teneurs en nickel ou en manganèse suffisamment élevées, l'acier présente, même à la température ambiante, une structure austénitique (additions de plus de 20% de nickel ou de plus de 10 % de manganèse) Ces éléments sont dits gammagènes. D'autres éléments, par contre dits alphagènes rétrécissent le domaine de stabilité de l'austénite et élèvent les températures de transformations on retrouve là, entre autres, Cr, Mo, Ti, W, V, Nb et Si.

- La tendance des éléments d'addition à se substituer en partie aux atomes de 1er de la cémentite Fe_3C (cas du manganèse) ou à former des carbures spécifiques (MC). Citons dans l'ordre croissant d'affinité pour le carbone : Cr, W, Mo, V, Ti, et Nb. Par contre Si et Ni ne forment pas de carbures et se retrouvent en solution dans la ferrite. La présence des carbures autres que la cémentite est souvent souhaitable dans les aciers, car ils augmentent la résistance à l'usure et la tenue à chaud. Toutefois, à cause de la stabilité de ces carbures à haute température, il est souvent difficile de les mettre entièrement en solution dans l'austénite sans provoquer un grossissement des grains, qui est toujours préjudiciable aux propriétés des pièces trempées.

❖ **Le soufre**

Le soufre il diminue la résistance à la corrosion.

❖ **le vanadium**

Il affine le grain primaire donc la structure de coulée; puissant générateur de carbures, d'où accroissement de la résistance à l'usure, de la tenue en coupe et à la chaleur; de ce fait, utilisation privilégiée comme composant additionnel d'alliage dans les aciers rapides, de travail à chaud et résistant au fouage à température élevée. Amélioration substantielle de la résistance au revenu, réduction de la sensibilité à la surchauffe. V affinant le grain et inhibant la trempe à l'air suite à la formation de carbures, il favorise l'aptitude au soudage des aciers de traitement. Suite à la constitution de carbures, accroissement de la résistance à l'hydrogène

sous pression V rétrécit la zone γ et décale le point Curie en direction de températures plus élevées.

❖ **le zirconium**

Générateur de carbures; utilisation métallurgique en tant qu'élément additionnel de désoxydation, dénituration et désulfuration car laissant peu d'impuretés. Les additions de Zr dans des aciers de décolletage sulfureux et entièrement calmés exercent une influence favorable sur la formation de sulfures et évitent ainsi une cassure au rouge. Il accroît la longévité des matériaux de confection des conducteurs chauffants et provoque une striction de la zone γ . [9]

Chapitre II

traitement

thermique

II.1. Interdiction

Le traitement thermique d'un matériau est un groupe de procédés industriels utilisés pour améliorer les caractéristiques des matériaux de ce dernier. Ce traitement est utilisé lors de la fabrication des matériaux comme le verre, le bois, les aliments et surtout les métaux.

Le traitement thermique implique l'utilisation du chauffage et/ou du refroidissement, normalement à des températures extrêmes, pour obtenir le résultat souhaité, tel que la modification de la friabilité, de la dureté, de la ductilité, de la fragilité, de la plasticité, de l'élasticité ou de la résistance mécanique des matériaux. [10]

II.2. Le but de traitement thermique.

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 des modifications suivantes.

-Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique R_m , R_e , A % en donnant une meilleure tenue de l'élément.

-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 d'être soumis à une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage).

-En dehors du recuit de recristallisation qui permet de supprimer l'écrouissage, les traitements thermiques ne s'appliquent pas aux métaux purs, mais seulement à quelques alliages pour lesquels on recherche principalement une augmentation de la limite élastique et une diminution de la fragilité. Les traitements thermiques sont appliqués surtout aux aciers XC et aciers alliés ZR alliages non ferreux. En général les traitements thermiques ne changent pas la composition chimique de l'alliage. [14]

II.3. Définitions

Les procédés des traitements thermiques Effectuer un traitement thermique sur une pièce, c'est faire subir à celle-ci une variation de la température en fonction du temps. Le procédé de traitement thermique se compose de (**figure II. 1**). [10]

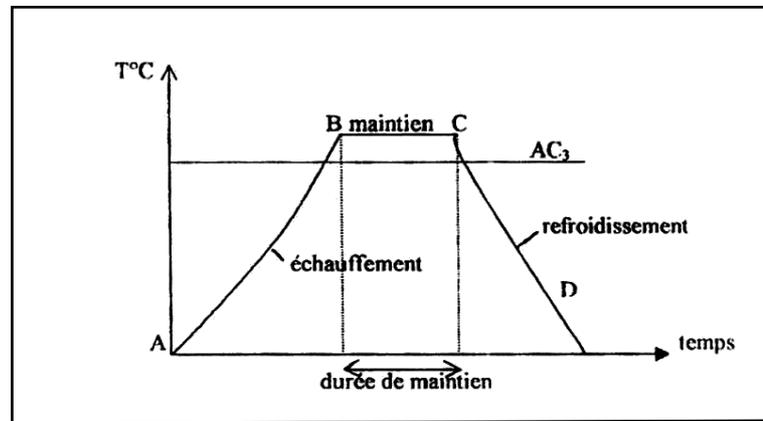


Figure. II. 1 .cycle de traitement thermique. [10]

AB : L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation (par exemple : AC₃)

BC : Maintient à une température définie.

CD : Refroidissement avec une vitesse donnée :

-Lente (dans le four, à l'air).

-Assez rapide (dans l'huile).

-Très rapide (dans l'eau).

II.4. Les principes de traitement thermique

II.4.1. Chauffage des pièces :

La première étape de chaque traitement thermique est le chauffage de la pièce à la température exigée. Le chauffage doit s'effectuer très rapidement pour avoir une faible consommation d'énergie et une grande productivité. Il existe deux possibilités pour le chauffage des pièces.

A : Par transmission de la chaleur On distingue trois possibilités

❖ Par conductibilité

La pièce est chauffée dans un four ordinaire où elle est en contact qu'avec le sol du four, elle ne reçoit par conductibilité qu'une petite quantité de la chaleur dépensée.

❖ **Par convection**

Dans ce cas, la pièce est chauffée par contact avec un fluide chaud (gaz ou liquide) qui se déplace et lèche la pièce en lui cédant une grande partie de la chaleur dé pensée.[10]

❖ **Par rayonnement**

La chaleur absorbée par les parois et la voûte du four est rayonnée vers la pièce qui l'absorbe. C'est le cas où l'apport de chaleur est le plus important. Dans la plupart des cas, le chauffage des pièces, est effectué simultanément par convection et rayonnement.[10]

b. Par production de la chaleur dans la pièce

C'est une possibilité de chauffer la pièce en créant dans cette dernière un flux de courant, soit par l'utilisation de la pièce comme conducteur dans un circuit électrique (chauffage par résistance) ou l'emplacement de la pièce dans un champ variable (chauffage par induction) comme le montre les (figures. II. 2). [14]

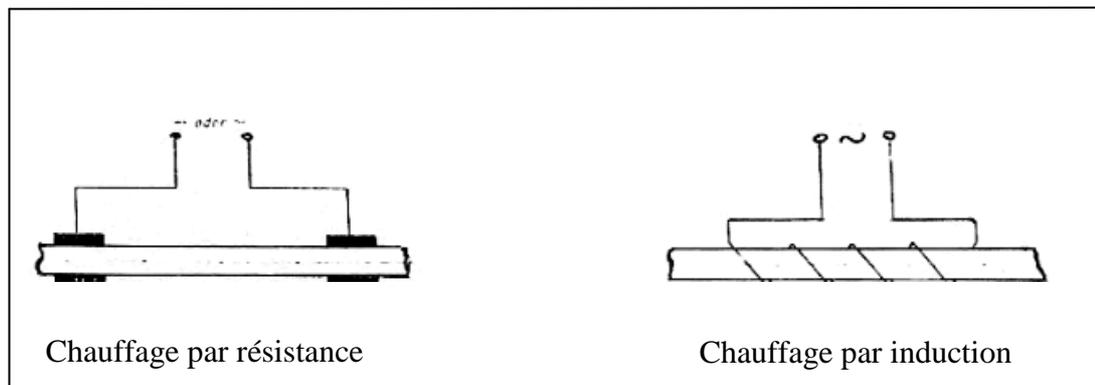


Figure. II. 2. Chauffages de pièce. [10]

Cette méthode est utilisée surtout pour les pièces à sections petites et uniformes. On peut obtenir des vitesses de chauffage très élevées. Par exemple pour une pièce de section \varnothing 150 mm, la durée de chauffage pour atteindre

$T = 1200^{\circ}\text{C}$ est de

-20 mn pour le chauffage par induction.

-8 mn pour le chauffage par résistance.

-2 à 3 heures pour le chauffage dans un four.

Cette méthode est rentable seulement pour des sections inférieures à 150 mm.

Les difficultés qui peuvent se présenter lors d'un chauffage rapide sont les fissures et étirages des pièces à la suite de la différence de dilatation de la couche extérieure et du cœur de la pièce où se créent des contraintes pouvant provoquer des fissures pour des températures basses et des déformations plastiques pour des températures élevées.

Quelque soit le procédé de chauffage utilisé, il existe toujours une différence de température dans les différentes parties de la pièce. Répartition de la chaleur non uniforme.

La (**figure .II.3**) représente la courbe de chauffage pour le contour de la pièce et le cœur de la pièce, la courbe est simplifiée comme une droite.

Durant le chauffage, on distingue trois étapes

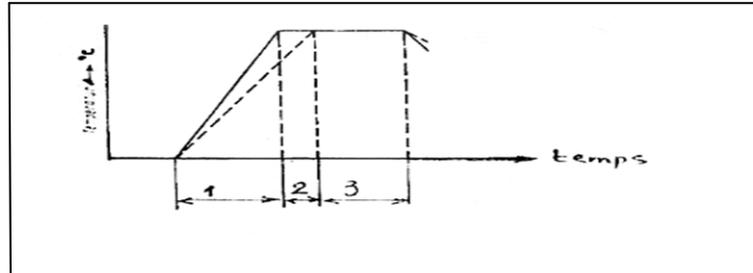


Figure. II. 3. Les étapes de chauffage [10]

II.4.2. Les Types de fours et leurs atmosphères

❖ Fours à sole

Dans les fours à sole, le chauffage se fait surtout par rayonnement et ils présentent une chambre dans laquelle on met la pièce à chauffer. Dans certains cas une deuxième chambre située au dessus de la première et récupérant une partie de la chaleur formée, sert comme chambre de préchauffage.

❖ Fours électriques

Les fours électriques peuvent être à sole ou à bain de sel. Ils sont chauffés le plus souvent par résistances métalliques en nickel chrome pour des températures ne dépassant pas 1000°C et en silicium pour des températures de 1300°C. Les fours électriques à bain de sel à haute température sont à électrodes, le sel fondu formant résistance entre celles ci.

❖ Fours Atmosphères

Lorsque les pièces sont chauffées jusqu'aux hautes températures dans ces fours à flammes ou dans les fours électriques, les gaz entrent en réaction avec la surface du métal, ce qui entraîne l'oxydation ou la décarburation des couches superficielles des pièces.

II.4.3. Refroidissement des pièces

Le point important pour la détermination du régime de refroidissement de la pièce est celui de l'état de structure souhaitée à obtenir. Bien sûr, on cherche toujours à refroidir rapidement pour avoir une productivité élevée, mais on doit prendre en considération les dangers de fissuration et d'étrépage des

pièces. La vitesse de refroidissement nécessaire à l'obtention d'un état de structure est déterminée selon le diagramme TTT (Température, Transformation, Temps). Le refroidissement s'effectue dans des bacs utilisant l'eau ou l'huile, dans les deux cas, le bain est maintenu à température constante. L'eau chaude se trouvant constamment remplacée par de l'eau froide arrivant par le bas du bac.[10]

II.5. Les types du traitement thermique

II.5.1. Trempe

II. 5.1.1. Définition

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.[11]

II.5.1.2. Les types de trempe

❖ Trempe martensitique

La trempe est un procédé de traitement d'un matériau. Il concerne surtout les métaux et le verre. Ce traitement peut être thermique (refroidissement rapide) ou chimique (immersion dans un bain de sel fondu), il peut aussi être dans la masse du matériau ou uniquement à sa surface. [11]

❖ Trempe bainitique

C'est une austénisation suivie d'un refroidissement rapide jusqu'à θ_b (température de trempe bainitique), maintenue pendant le temps nécessaire à la transformation complète de l'austénite. On refroidit ensuite jusqu'à température ambiante. [11]

❖ Trempe d'aciers austénitiques ou hypertrempe

Sur certains aciers austénitiques, cette trempe crée une structure d'austénite homogène à température ambiante. Elle provoque l'adoucissement du matériau (comme certains aciers inox). Elle se produit si la température de trempe est trop élevée. [11]

II.5.1.3. Cycle de trempe

On cherche à obtenir la transformation de l'austénite (stable à température élevée) en constituants métastables (pas stables mais la très faible vitesse de réaction donne une apparence de stabilité) : solution sursaturée de carbone dans le fer α . Le cycle de trempe comprend 2 étapes : l'austénisation puis le refroidissement. [11]

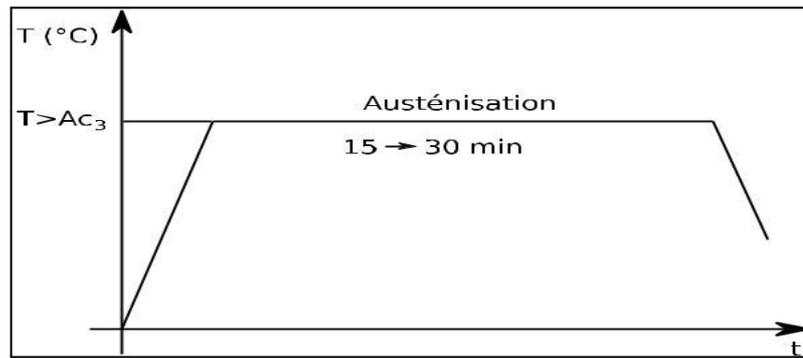


Figure II. 4. Le cycle de la trempe. [11]

II.5.2.Le Revenu

II.5.2.1.Principe et But de Revenu

La trempe an isotherme est en général un traitement énergétique conduisant à un métal à R_m , R_e , H élevées du fait de la présence recherchée de martensite, mais dont la ductilité ($A\%$) et la résilience (K) sont très faibles pour la même raison. Si on tient compte également d'un niveau de contraintes propres souvent important, il est évident qu'un acier ne peut être utilisé en service directement à l'état trempé.[12]

L'opération de revenu est destinée à corriger plus ou moins complètement ces inconvénients. Elle conduit à un métal de caractéristiques convenables présentant un compromis satisfaisant entre R_m , R_e , d'une part et $A\%$, K d'autre part. Contrairement à la trempe qui est une opération rapide et de contrôle difficile, le revenu permet un contrôle aisé des transformations et des propriétés du métal.

Le revenu est un traitement thermique effectué après trempe en continu, il consiste en :

- Un réchauffage à une température $T_R < A_{c1}$,
- Un maintien de durée t_R à T_R .
- Un refroidissement jusqu'à la température ambiante de préférence lentement.

Le revenu provoque une évolution du matériau vers un état plus proche de l'état physico-chimique d'équilibre sans toutefois rechercher à atteindre celui-ci. Le choix de T_R et t_R permet de contrôler ce retour plus ou moins complet vers l'état d'équilibre.

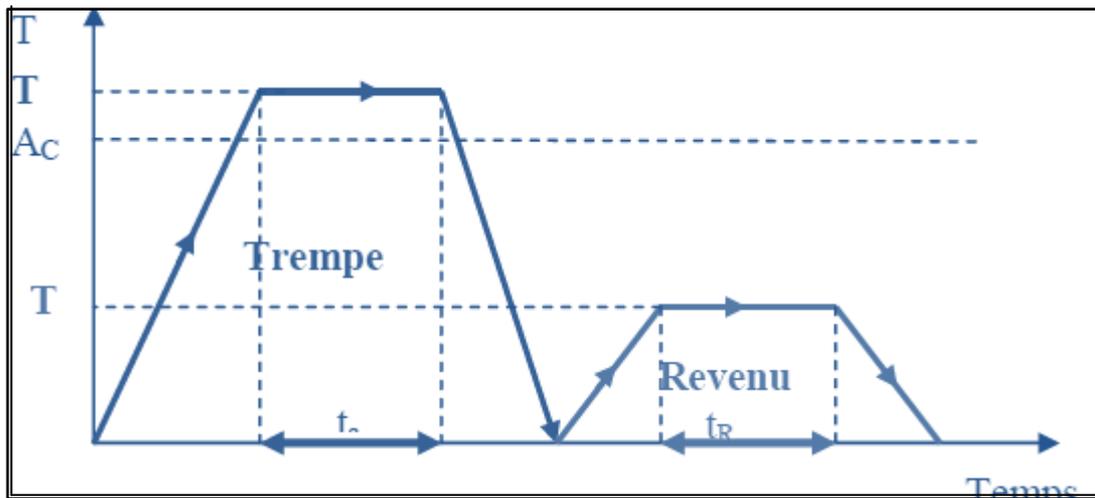


Figure .II.5 . Cycle complet (trempe, revenu). [12]

II.5.2.2. Différents types de revenu

En fonction du résultat attendu, on distingue plusieurs types de revenu :

❖ Revenu de relaxation ou de détente :

Il s'effectue entre 180°C et 220°C - 250°C . Il ne provoque aucune modification de structure mais une relaxation des contraintes multiples dues au refroidissement brusque de la trempe et au changement de structure austénite et martensite. Il provoque une légère diminution de la dureté et une légère remontée de la résilience. Il est fait sur des pièces soumises à des fortes sollicitations sans choc ou devant conserver une forte dureté superficielle. [12]

❖ Revenu de structure ou classique :

Dans ce cas, le revenu s'effectue entre 500°C et A_{c1} . On observe une augmentation des caractéristiques K, A et Z et une diminution plus importante de H, R_m et R_e . Ce type de revenu permet d'établir un compromis entre les caractéristiques mécaniques suivant l'emploi des aciers.

❖ Revenu de durcissement :

Des revenus effectués entre 450 et 600°C sur des aciers alliés peuvent provoquer des durcissements appelés durcissements secondaires (cas des aciers à outils au chrome ou des aciers rapides). Il y a d'abord précipitation des carbures complexes maintenu en solution dans un reste d'austénite résiduelle puis une déstabilisation de cette dernière qui se transforme en martensite au moment du refroidissement. Ces deux transformations successives vont donc nécessiter un second revenu pour éviter que la martensite secondaire ne provoque pas fragilité excessive. (Dans certains aciers rapides, trois revenus successifs peuvent être nécessaires). [12]

II.5.3.Recuit

II.5.3.1.Le but de recuit

Le recuit d'une pièce métallique ou d'un matériau est un procédé correspondant à un cycle de chauffage. Celui-ci consiste en une étape de montée graduelle en température suivie d'un refroidissement contrôlé. Cette procédure, courante en sciences des matériaux, permet de modifier les caractéristiques physiques du métal ou du matériau étudié. Cette action est particulièrement employée pour faciliter la relaxation des contraintes pouvant s'accumuler au cœur de la matière, sous l'effet de contraintes mécaniques ou thermiques, intervenant dans les étapes de synthèse et de mise en forme des matériaux. À l'occasion d'un recuit, les grains (mono-cristaux) de matière se reforment et retrouvent en quelque sorte, leur « état d'équilibre ».[8]

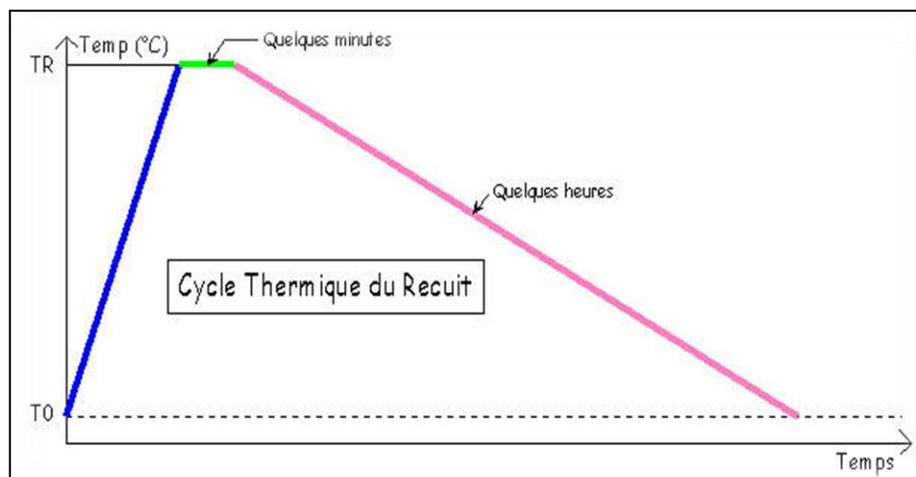


Figure .II.6 . Cycle thermique du recuit .[8]

II.5.3.2.Les principe de recuit

❖ Chauffage

Le chauffage se fera à vitesse modérée. Certains aciers "difficiles" demanderont des paliers intermédiaires ou des vitesses de montée en température précises.

La température de recuit (TR sur le graphe) est spécifique à chaque acier. Une fourchette est généralement donnée par le fournisseur d'acier. A défaut, il sera toujours possible d'utiliser les données techniques d'un acier proche ou similaire.

En général, cette température est de l'ordre de :

- > Pour les aciers hypoeutectoïdes = $AC3+50^{\circ}C$.
- > Pour les aciers hypereutectoïdes = $AC1+50^{\circ}C$.

❖ **Maintenue**

La température de recuit sera maintenue pendant un moment. Les ouvrages théoriques donnent en général des durées genre 1 minute par millimètre de la pièce. Si la montée en température n'a pas été trop rapide, la température est relativement homogène (surtout sur une pièce de 3 ou 4 millimètres d'épaisseur) et on peut diminuer le temps de maintien en température.[8]

❖ **Refroidissement**

Idéalement, le refroidissement devrait être le plus lent possible. Dans la pratique, il doit être adapté à l'acier. Certains aciers (particulièrement ceux avec du Chrome) exigent un refroidissement très lent.

Le meilleur compromis, influant directement sur les moyens à mettre en oeuvre, découle de l'expérience acquise avec un acier.

II.5.3.3. Les types de recuit

❖ **Recuit complet**

Couramment appelé recuit. Il est effectué sur des pièces ayant subi des traitements thermiques ou mécaniques dont on désire supprimer les effets (constituants durs) pour en faciliter l'usinage. La pièce est portée à $AC3 + 50^{\circ}C$ environ 30mn puis refroidie lentement à l'air ou au four.

❖ **Recuit d'adoucissement :**

Il est effectué sur des aciers auto - trempant. La pièce est chauffée à une température inférieure à $AC1$ pendant 6 à 8 heures puis refroidie à l'air libre. Cette basse température évite la réalisation d'une trempe.

❖ **Recuit de coalescence**

Il est effectué sur des pièces à fort pourcentage de carbone (exemple: Z200C13 - 100C6), dans le but d'obtenir l'adoucissement maximal. La pièce est chauffée en dessous de $AC1$ pendant 30mn puis refroidie à l'air libre.

❖ **Recuit d'homogénéisation**

Aussi appelé recuit de diffusion il est surtout effectué sur des aciers bruts de coulée ou sur des aciers moulés aux dimensions importantes pour supprimer l'hétérogénéité chimique. La pièce est portée à une température aussi élevée que possible sans atteindre le solidus réel. Pratiquement, la température est

de l'ordre de $AC3 + 200^{\circ}C$ La durée de ce traitement est de plusieurs heures. Le métal qui a été surchauffé est suivi d'un recuit de régénération.

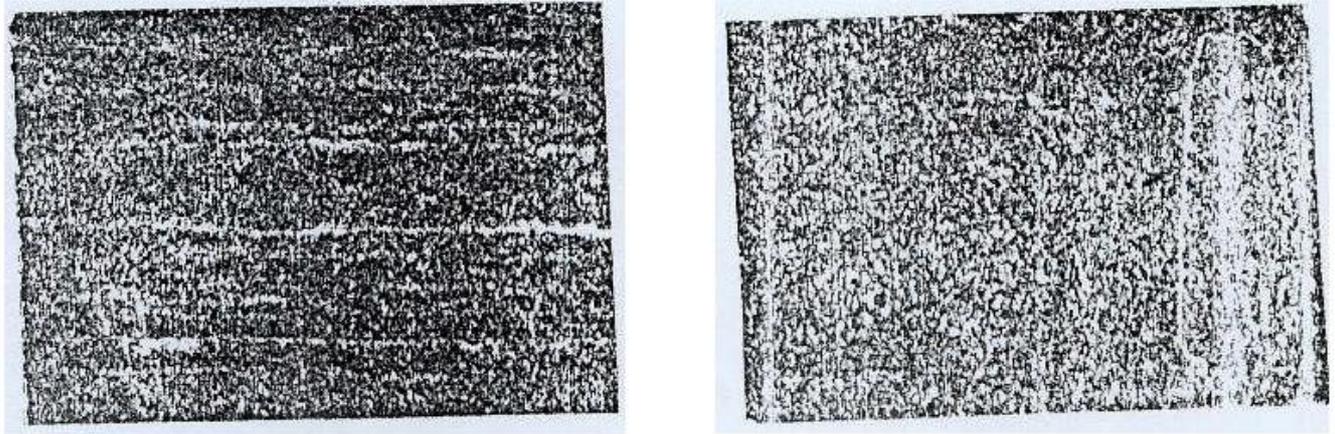


Figure .II.7 . Les figures présentent l'état de structure d'un acier avant et après homogénéisation

❖ **Recuit de normalisation**

C'est une variante du recuit de régénération qui s'applique aux pièces brutes de forgeage ou de laminage. Il s'effectue dans les mêmes conditions de chauffe ; la pièce est ensuite refroidie à l'air calme.

❖ **Recuit de détente ou de stabilisation**

Il est effectué sur des pièces après moulage ou soudage pour éliminer les tensions internes avant l'usinage. La pièce est chauffée vers $600^{\circ}C$ pendant environ une heure puis refroidie à l'air libre.

❖ **Recuit de recristallisation ou de restauration**

Il est effectué sur des pièces écrouies à une température de l'ordre de $600^{\circ}C$. L'écrouissage provoque une grande augmentation de la fragilité et dans certains cas, il est impossible de continuer le travail de l'acier (tréfilage par exemple).[8]

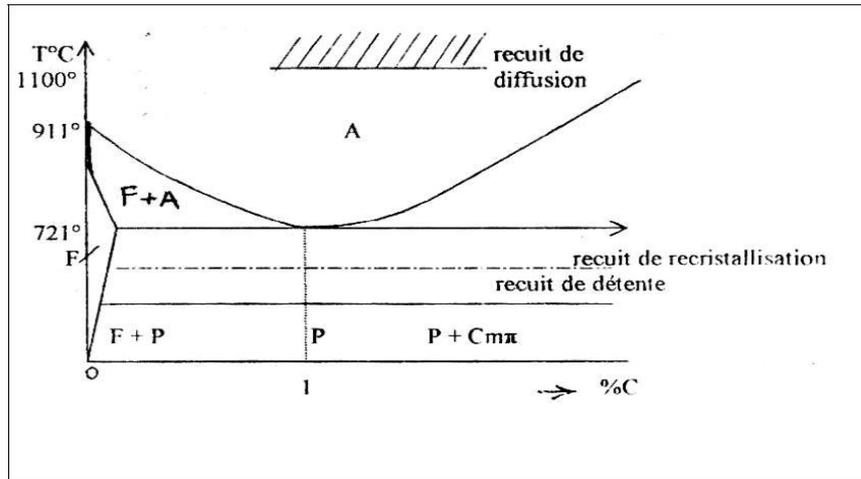


Figure. II.8 .Cycles thermiques des différents recuits [8]

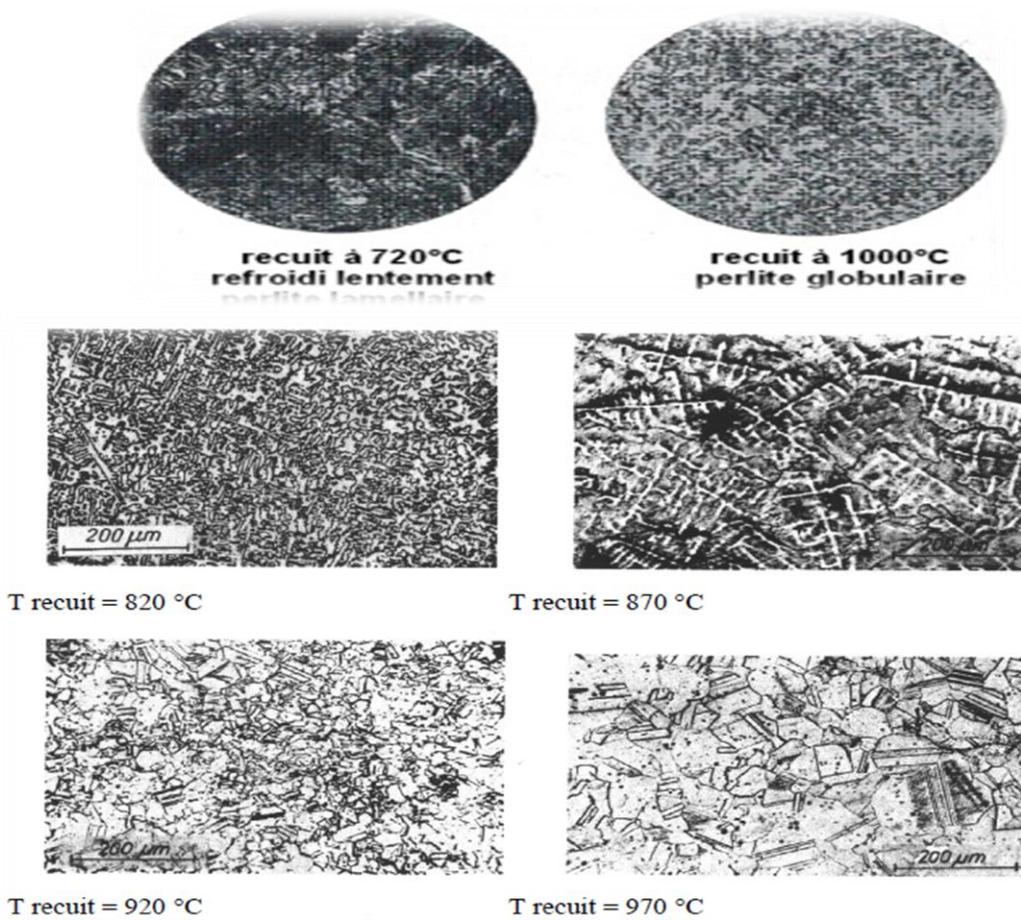


Figure. II.9. Microstructure de Le Recuit. [8]

Chapitre III
matériaux et
méthodes
Expérimentales

III.1. Matériau étudié

Le matériau étudié est l'acier micro allié de norme API 5L X60 destinée pour la fabrication des tubes. La composition chimique (massique) de l'acier grade API 5L X60 est illustre dans le tableau suivant :

Tableau III.1. Composition chimique de l'acier X60 étudié.

Elément	C%	Si%	Mn%	P%	Cr%	Mo%	Ni%	S%	Co%
X60	0.095	0.190	1.390	0.013	0.029	0.038	0.005	0.005	0.004
Elément	Al%	B%	Cu%	Nb%	Ti%	V%	W%	N%	Fe%
X60	0.048	0.000	0.026	0.042	0.016	0.046	0.010	0.004	98.093

III.2. Méthodes expérimentales

III.2.1 Traitements thermiques

Pour mettre en évidence les différentes transformations de phases à l'état solide, dans notre acier, nous avons opté les traitements thermiques suivants : Une trempe à l'eau à 950 °C puis de revenu à (300) °C pour aux différents temps de maintien [30min-60min-120min et 180min] suivi d'un refroidissement à l'air libre. Pour ces traitements thermiques nous avons utilisé un four électrique à température maximale $T_{\max} = 1400$ °C (Figure. III.1).



Figure III.1 : Four électrique

Dans notre expériences, et suivant le but visé, et à l'aide d'un four à moufle, nous avons utilisé le régime de traitement thermique comme suit :

La trempe Tableau N°1

Echantillons	Température °C	Temps de maintien (min)	Refroidissement
1	950°C	60min	Eau
2			
3			
4			
5			

Le revenu Tableau N°2

Echantillons	Température °C	Temps de maintien (min)	Refroidissement
1	300°C	30min	L'air calme
2		60min	
3		120min	
4		180min	

III.3.Préparation métallographique

Pour obtenir une image de la structure métallographique par microscope optique, il faut d'abord préparer l'échantillon (figure.III.2) par le polissage sur une polisseuse mécanique, avec papiers abrasifs de différentes granulométries du (120,240, 320, 400, 600, 800, 1000et1200) en suite sur tissus feutré avec addition du alumine.

Après chaque polissage l'échantillon est nettoyé à l'eau distillée, séché puis attaqué chimiquement par le réactif approprié (nital 4%), durée d'attaque 10s secondes.

Composition :

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



Figure. III.2. L'échantillon préparé pour le microscope optique



Figure .III.3 . Instruments de type FORCIPOL 2V Metkon

III.3.1. Microscopie optique (MO)

Le microscope optique nous a permis de suivre l'évolution de la microstructure des échantillons durant les différents traitements thermiques. Pour notre étude, nous avons utilisé une microscopie optique de type Hund équipé (X 40) avec appareil téléphonie pour prendre les photos (Figure II.4).



Figure.4. Microscopie optique de type Hund

III.2.3. Microduremètre

La micro-dureté Vickers est une caractéristique mécanique des alliages suivie durant les traitements thermomécaniques. En général la dureté d'un matériau caractérise sa résistance à la déformation, sa mesure est basée sur la détermination des dimensions d'empreintes produites dans le matériau par enfoncement d'un pénétrateur, sous l'action d'une charge appliquée. Le rapport de la force appliquée F à la surface en cours S de l'empreinte donne la dureté. [1]

$$H = F/S \quad (\text{III.1})$$

Nous avons utilisé un micro-duremètre Vickers de type 402MVD

Équipé d'un oculaire pour permettre de positionner l'empreinte, qui est nécessaire pour déterminer HV à partir d'un double clic sur le bouton de HV de l'appareil (Figure. II.5), où bien à l'aide de la formule suivante :

$$HV = 1854.4 p/d^2 \quad (\text{III.2})$$

Où :

p : charge appliquée.

d : longueur moyenne des diagonales de l'empreinte (μm).

Les mesures de dureté ont été effectuées par la méthode de Vickers et sous une charge de 500 g. Chaque mesure correspond à une moyenne de 3 points

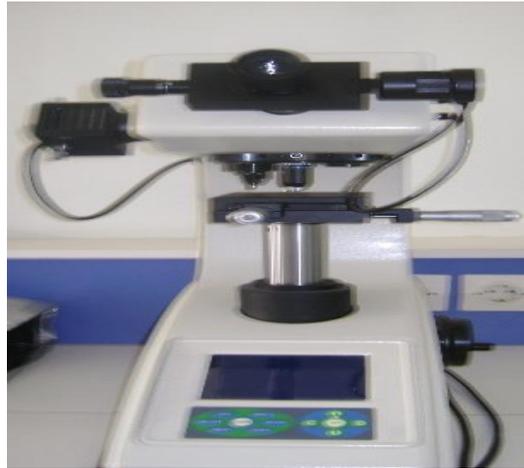


Figure .III.5 . Microduremètre Vickers de 402MVD Z

III.3.3.La diffraction des rayons 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.

$$n \lambda = 2 d_{hkl} \sin (\theta) \quad (\text{III.3})$$

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. II.6).



Figure .III.6. Diffractomètre PanalyticalX'pert (D8 ADVANCE) BRUKER

III.3.4. Mesures électrochimiques

Les essais électrochimiques ont été réalisés à l'aide d'un potentiostat Radiometer PGP201 avec un logiciel Volta Master 4, dans une cellule classique (en verre pyrex d'une contenance de 200 ml) à trois électrodes, une électrode de travail (**acier API 5L X60**), une électrode de référence au calomel saturé (ECS) couplée à un capillaire fin (capillaire de Luggin) dont l'extrémité est placée près de l'électrode de travail afin de minimiser la contribution ohmique, et une contre-électrode inerte chimiquement (en platine). Avant chaque expérience, la cellule a été nettoyée à l'eau distille, rincée à l'eau distillée et séchée avec du papier absorbant. Le système a été connecté à un ordinateur. Avant la mesure, l'électrode de travail est plongée dans la solution d'essai au potentiel en circuit ouvert pendant 30 minutes pour atteindre un état stable (Figure III.7). Pour tracer les courbes, traiter et analyser les mesures électrochimiques, tous les résultats sont transférés du **logiciel Volta Master 4 à ORIGINE 9.0** (logiciel de traitement et d'analyse de données scientifiques).

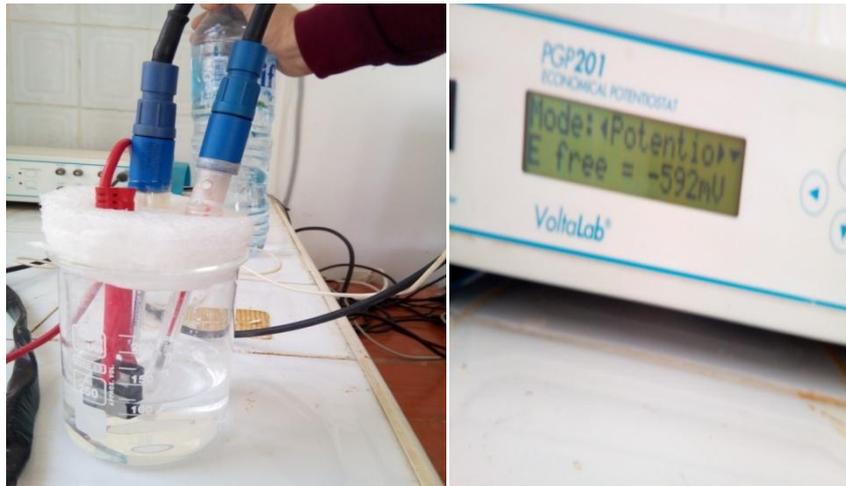


Figure III.7. Photographie du dispositif de mesures électrochimiques

Chapitre IV
résultats
expérimentales
et
interprétations

IV.1. Introduction

Dans cette partie nous présenterons les résultats des (microstructures et microduretés et corrosion) de l'acier à l'état brut, trempé et après les traitements thermiques de revenu pendant différents temps des maintiens (30min, 60min, 120min et 180min). Ainsi les mesures de la dureté de l'acier trempé et après chaque maintien à température de revenu à (300) °C.

IV.2. Métallographie

L'observation de la structure de l'acier à l'état brut montre que nous avons une structure ferrite perlitique (figure. IV .1).

La (figure .IV.2.) représente la microstructure l'échantillon à l'état trempé après homogénéisation à température 950°C et le temps de maintien 60min ; nous avons remarqué que le nombre des grains de ferrite diminue et le nombre des grains de perlite augmente par rapport à l'état brut et nous observons des aiguilles qui illustrent la phase martensite.

Les figures (IV.3, IV.6) illustrent l'effet de revenu à température 300°C aux différents temps (30min ,60min, 120min et 180min) pour les deux premiers temps (30min ,60min) nous pouvons remarquer la structure ferrite localisée aux joints de grains et la perlite. Dans le cas de revenu à (120min) nous remarquons l'apparition de quelques phases de cémentite. Dans la dernière durée, nous observons la diminution de ces phases de cémentite, donc nous avons une structure ferrite perlitique avec quelques agrégats de cémentite.

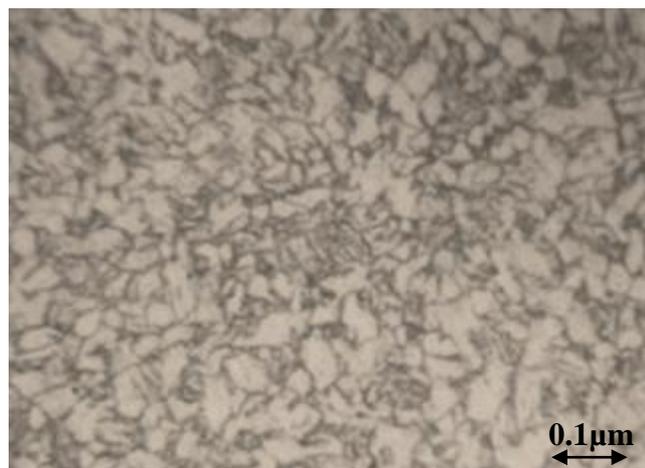


Figure .IV .1 .L'observation microscopique de l'acier (état brut)

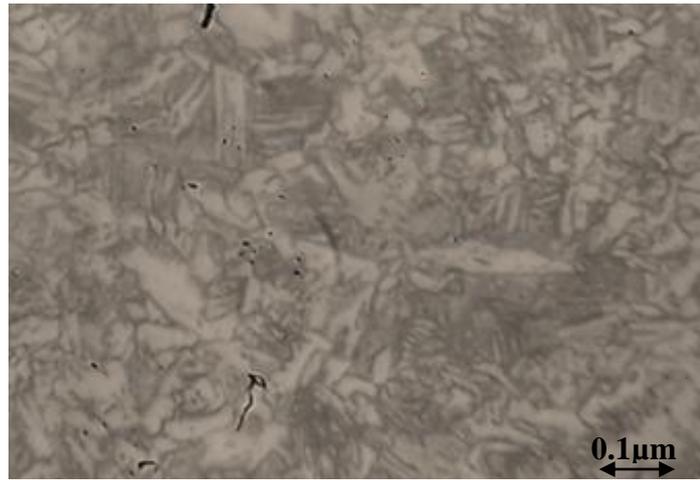


Figure .IV .2 .L'observation microscopique de l'acier (état trempé)

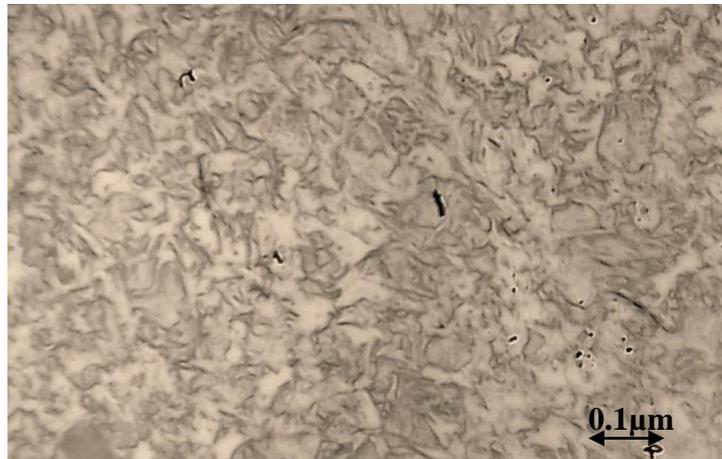


Figure. IV .3 . L'observation microscopique de l'acier (revenu à 300°C pendant 30min)



Figure IV .4 . L'observation microscopique de l'acier (revenu à 300°C pendant 60min)



Figure IV .5 . L'observation microscopique de l'acier (revenu à 300°C pendant 120min)

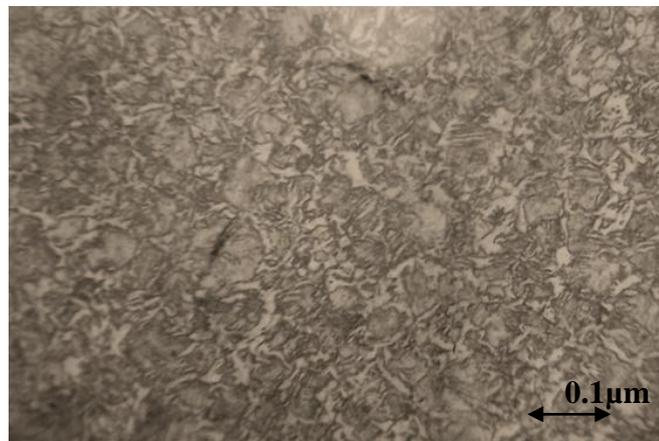


Figure .IV .6 . L'observation microscopique de l'acier (revenu à 300°C pendant 180min)

IV.3 L'analyses par la diffraction des rayon-x

Le spectre de diffraction des rayons X de l'acier à l'état brut est représenté dans la (figure IV.7.) ; selon le ICDD les pics présentes correspondant à les structure ferrite (CC) et austénite (CFC). Nous à donner des résultats montrent que le pic le plus intense est celui (110) de la phase ferrite avec différent intensité (Tableau .IV.1).

D'après la diffraction des rayons X de l'acier à l'état trempé (figure .IV.7) ; nous avons remarques l'apparition de nouveau pic à $2\theta = (10.27^\circ)$ avec une faible intensité ce pic montre que la présence **d'oxyde de Fe**

- Le première pic (110) de position $2\theta = (45.08^\circ)$ nous avons remarqué un décalage vers le petit angle $2\theta = (44.99^\circ)$
- Le deuxième pic (200) γ de position $2\theta = (65.29^\circ)$ nous avons remarquons un décalage vers le petit angle $2\theta = (65.18^\circ)$.

- Le troisième pic (211) de position $2\theta = (82.57^\circ)$ nous avons remarqué un décalage vers le grand angle $2\theta = (82.58^\circ)$.

Nous avons remarqué un petit décalage vers le petit angle de pics (110), (200), (211) par rapport à l'état brut ce résultat montre que nous avons un gonflement de maille cristalline.

Nous avons observé un petit décalage vers le petit angle de pics (110), (200), (211) par rapport à l'état trempé. Cette remarque indique que nous avons un petit gonflement des mailles cristallines ; donc le revenu pendant 60 min c'est pas insuffisant pour le relâchement des mailles.

Tableau. IV.1. les caractéristiques des pics de l'échantillon brut

No.	Pos [2θ]	(hkl)	L'intensité intégrale
1	45,08	(110)	100
2	65,29	(200)	25.91
3	82,57	(211)	28.57

Tableau. IV.2. les caractéristiques des pics de l'échantillon trempé

No.	Pos [2θ]	(hkl)	L'intensité intégrale
1	10,27	(110)	5.13
2	44.99	(110)	100
3	65.18	(200)	12.12
4	82.58	(2 11)	21.9

Tableau. IV.3. les caractéristiques des pics de l'échantillon traité à 300°C pendant 60 mn.

No.	Pos. [2θ .]	(hkl)	L'intensité intégrale
1	44.90	(110)	100
2	65.17	(200)	12.72
3	82,54	(211)	23.66

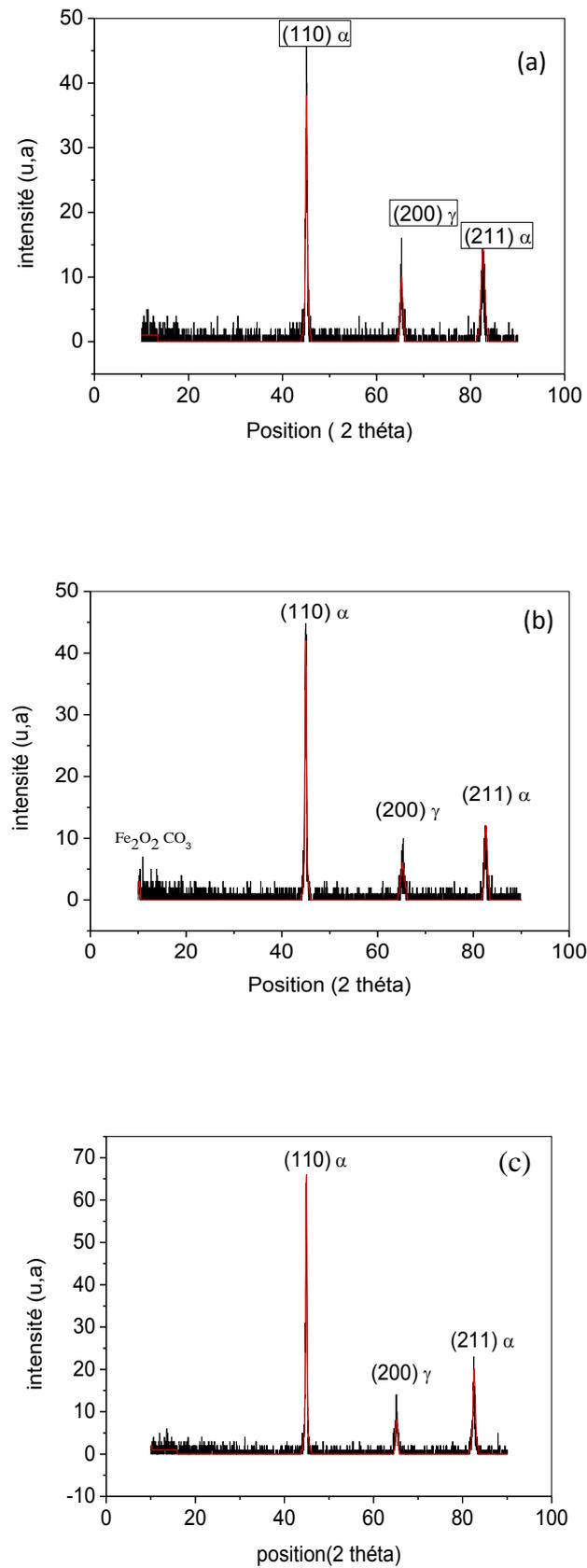


Figure IV .7 . Les spectres de diffraction des rayons X : [(a) état brut, (b) trempe, (c) revenu]

IV.4. Les mesures de la microdureté

Cette technique nous a permis de déterminer la variation de la microdureté en fonction de temps de maintien lors des traitements thermiques. Les mesures de la microdureté avant et après traitements thermiques sont présentées dans la (Figure IV.8) .

Tableau .IV.4. Mesure de la dureté

Etat de traitement	Microdureté HV
Etat brut	210.9
Etat revenu à 300°C pendant 30min	260.95
Etat revenu à 300°C pendant 60min	229.25
Etat revenu à 300 pendant 120min	399.83
Etat revenu à 300 pendant 180min	231.7

La variation de la microdureté en fonction de temps de revenu (tableau .IV.4) nous remarquons un durcissement au début temps de maintien 30min

-Dans le temps 60 min nous avons une diminution liée à la disparition des contraintes de trempe et la présence de la phase bainite.

-Dans le temps de 120min nous avons le meilleur durcissement, cette augmentation liée à la présence de la phase cémentite qui est le responsable de durcissement.

-Après ce temps la microdureté est diminuée à (231.7HV), cette diminution est due à la disparition des contraintes de trempe et la diminution des quantités de cémentite.

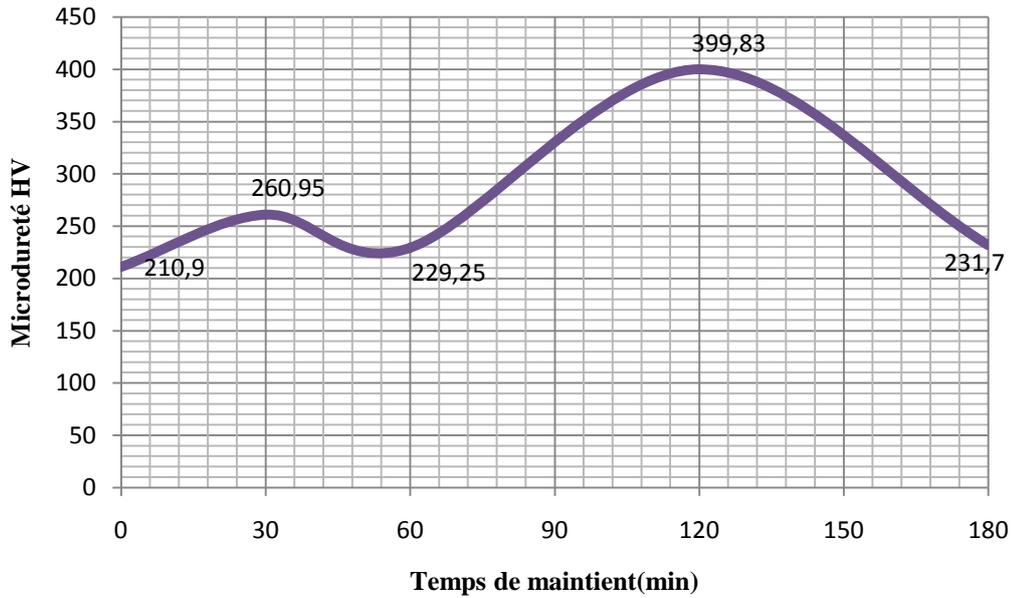


Figure. IV .8. Les variations de la dureté en fonction des temps des maintiens à 300°C

IV.5. Les courbes de polarisation

La vitesse de balayage utilisée pour la méthode de voltamétrie cyclique est rapide (1 mv/s). Donc pour déterminer les domaines de potentiel minutieusement il faut appliquer une vitesse de balayage lente. (La figure IV.9) est la courbe de polarisation linéaire et logarithmique de l’acier API 5 L X42 en milieu HCl. (Le tableau IV.5) regroupe les valeurs des paramètres électrochimiques déterminées à partir des courbes de polarisation précédemment obtenues.

Tableau .IV.5 . La valeur de paramètre électrochimique de l’acier API 5 L X42 en milieu Hcl à 30°C. (État brut).

Milieu	Ecorr (mV)	Icorr (µA/cm ²)
HCL	-525.7	1778

L’acier API 5L X60 en milieu HCl

La courbe de polarisation anodique de l’acier API 5L X60 comporte donc un seule domaine de potentiel. Le domaine actif: situé après Ecorr, dans ce domaine il y a une dissolution active de l’acier selon l’équation (Equ IV-1) Les électrons libérés par la dissolution active sont repris par les protons du milieu pour former des molécules de gaz

hydrogène selon l'équation (Equ IV-2.) La cinétique de corrosion est entièrement fixée par les réactions de transfert de charge.

a) La réaction anodique (oxydation)



Equ .IV-1

b) La réaction cathodique (réduction)



Equ .IV-2

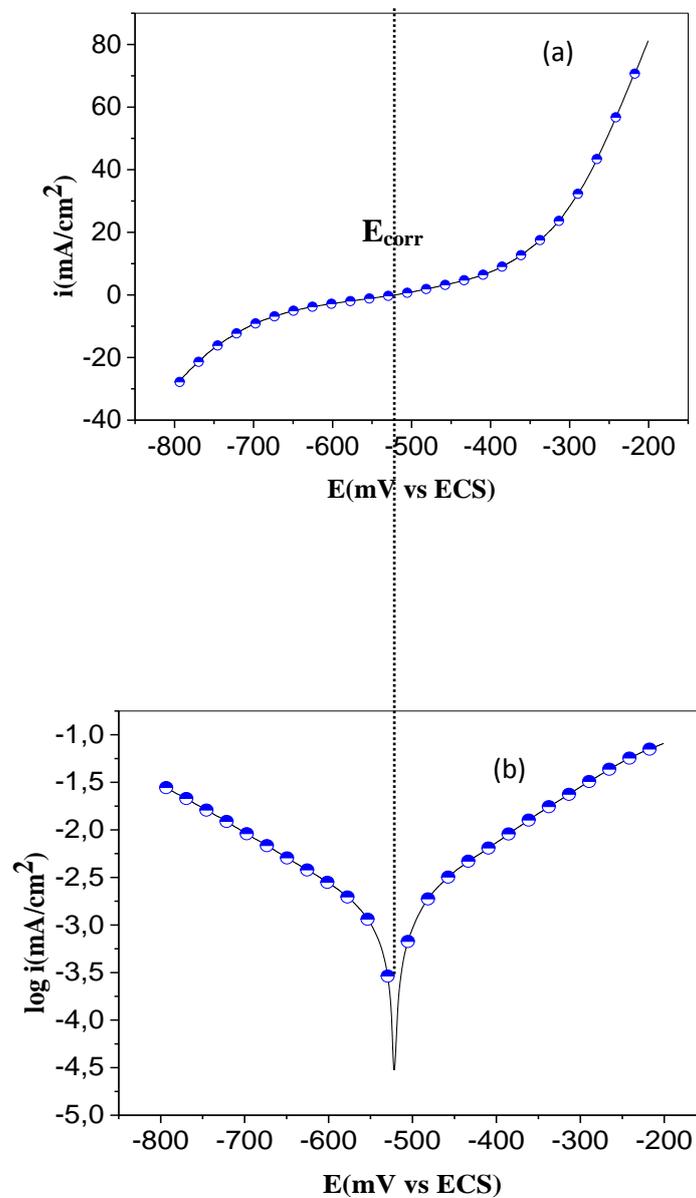


Figure.IV.9. Courbes de polarisation de l'acier API 5 L X60 en milieu HCl à 30°C, (a) courbe linéaire, (b) courbe logarithmique. (État brut)

Conclusion générale

Dans le cadre de ce travail nous avons étudié l'effet de traitements thermiques sur les propriétés microstructurales et mécaniques de l'acier AP X60 utilisé dans l'industrie du pipeline au COSIDER

Pour cela nous avons utilisé plusieurs techniques expérimentales essentielles, la microscopie optique, la diffraction des rayons X, la microdureté et test de corrosion

Il s'est avéré que cette étude a nécessité une connaissance approfondie des différentes transformations de phases se produisant au cours trempe et revenu à température 300°C aux différents temps de notre acier.

Les principaux résultats de notre travail peuvent se résumer de la manière suivante :

- Le microscope optique indique que la structure de l'acier API51- X60 à l'état brut est ferrito-perlitique.
- L'acier subit une transformation des phases au revenu
- La micro dureté change avec le temps de revenu à 300 °C.
- La phase Cémentite est apparue au temps 120 min
- Les meilleures propriétés microstructurales et mécaniques sont obtenues au temps 60 min
- Le meilleur durcissement est obtenu au temps de revenu 120 min

Analyses de diffraction des rayons-x

- L'analyse de l'acier à l'état brut par la diffraction des rayons X a mis en évidence la présence des pics correspondant à la structure C.F.C et CC de la matrice ferrite α et austénite γ respectivement.
- L'analyse de diffraction des rayons X à l'état trempé montre que le décalage des pics vers le petit 2θ est lié à la dilatation des mailles cristallines.
- L'analyse de diffraction des rayons X à l'état revenu 300°C pendant 60 min indique qu'il y a un relâchement des mailles cristallines.

Annexe

Name and formula

Reference code: 01-071-1174

Compound name: Iron Carbide

ICSD name: Iron Carbide

Empirical formula: $C_{0.63}Fe_4$

Chemical formula: $Fe_4C_{.63}$

Crystallographic parameters

Crystal system: Orthorhombic

Space group: Pmna

Space group number: 53

a (Å): 4,0090

b (Å): 4,0090

c (Å): 36,6720

Alpha (°): 90,0000

Beta (°): 90,0000

Gamma (°): 90,0000

Calculated density (g/cm³): 7,80

Volume of cell (10⁶ pm³): 589,40

Z: 12,00

RIR: 6,89

Status, subfiles and quality

Status: Diffraction data collected at non ambient temperature

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic

Corrosion

ICSD Pattern

Inorganic

Quality: Calculated (C)

Comments

ICSD collection code: 009860

Creation Date: 01/01/1970

Modification Date: 01/01/1970

ICSD Collection Code: 009860

Temperature of Data Collection: REM TEM 70 C

Calculated Pattern Original Remarks: REM B Lattice parameters from Q 9860 2 by taking a = b = 1.4

Calculated Pattern Original Remarks: REM c= 12c*, where a* and c* are the lattice parameter

Calculated Pattern Original Remarks: REM martensite

Test from ICSD: No R value given
 Test from ICSD: At least one TF missing. Crystal Structure and Morphology of the Ordered Phase in Iron-Carbon Martensite. h24 (PMNA)
 Analysis: FE4 C. NO6.

References

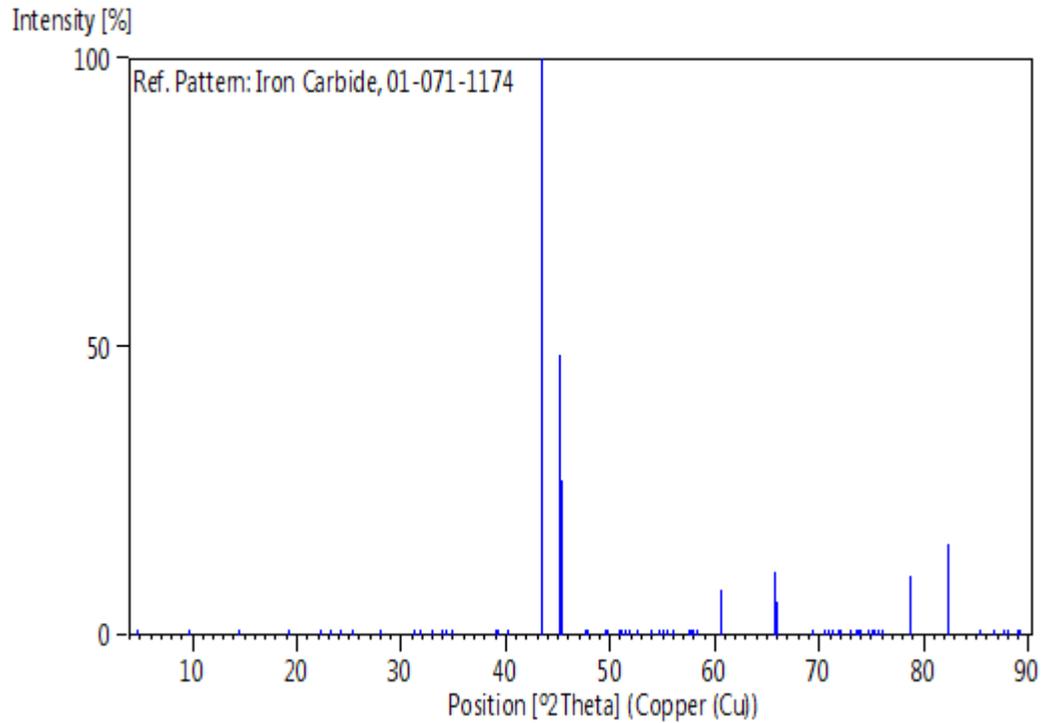
Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-12++*, (1997)
 Structure: Nagakura, S., Toyoshima, M., *Trans. Jpn. Inst. Met.*, **20**, 100, (1979)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	0	2	18,33600	4,815	0,1
2	0	0	4	9,16800	9,639	0,1
3	0	0	6	6,11200	14,481	0,1
4	0	0	8	4,58400	19,348	0,1
5	1	0	1	3,98526	22,289	0,1
6	0	1	3	3,80937	23,333	0,1
7	0	1	4	3,66720	24,251	0,1
8	1	0	5	3,51778	25,297	0,1
9	0	1	7	3,18375	28,003	0,1
10	1	0	9	2,85772	31,275	0,1
11	1	1	2	2,80151	31,919	0,1
12	1	1	4	2,70828	33,049	0,1
13	1	1	5	2,64416	33,874	0,1
14	0	0	14	2,61943	34,204	0,1
15	0	1	11	2,56331	34,976	0,1
16	0	1	13	2,30703	39,010	0,1
17	0	0	16	2,29200	39,277	0,1
18	1	1	10	2,24282	40,175	0,1
19	1	1	12	2,07831	43,510	100,0
20	2	0	0	2,00450	45,199	48,5
21	1	1	13	1,99958	45,316	26,7
22	2	0	6	1,90468	47,710	0,1
23	0	1	17	1,89963	47,845	0,1
24	0	2	8	1,83658	49,596	0,1
25	0	0	20	1,83360	49,682	0,1
26	1	2	1	1,79074	50,955	0,1
27	1	2	2	1,78437	51,150	0,1
28	2	1	3	1,77390	51,474	0,1
29	0	2	10	1,75889	51,946	0,1
30	1	2	5	1,74160	52,501	0,1
31	1	0	19	1,73905	52,584	0,1
32	2	1	7	1,69629	54,015	0,1
33	0	2	12	1,67611	54,720	0,1
34	0	1	20	1,66691	55,047	0,1
35	1	1	18	1,65439	55,499	0,1
36	1	2	9	1,64105	55,990	0,1
37	0	1	21	1,60099	57,520	0,1
38	1	1	19	1,59541	57,740	0,1
39	2	0	14	1,59188	57,880	0,1
40	2	1	11	1,57902	58,397	0,1
41	0	0	24	1,52800	60,546	7,7

42	2	2	0	1,41740	65,839	10,9
43	2	2	2	1,41318	66,061	5,8
44	2	2	8	1,35414	69,340	0,1
45	3	0	1	1,33545	70,453	0,1
46	0	3	2	1,33280	70,614	0,1
47	0	3	3	1,32842	70,882	0,1
48	0	3	4	1,32208	71,273	0,1
49	1	2	19	1,31359	71,805	0,1
50	0	0	28	1,30971	72,051	0,1
51	0	3	7	1,29487	73,009	0,1
52	0	1	27	1,28640	73,568	0,1
53	0	3	8	1,28293	73,800	0,1
54	2	0	22	1,28166	73,886	0,1
55	3	0	9	1,26979	74,693	0,1
56	3	1	2	1,26474	75,043	0,1
57	1	1	26	1,26279	75,179	0,1
58	3	1	3	1,26099	75,305	0,1
59	1	3	4	1,25581	75,670	0,1
60	2	1	21	1,25096	76,015	0,1
61	0	2	24	1,21520	78,675	10,4
62	3	1	12	1,17099	82,268	15,9
63	1	2	25	1,13531	85,452	0,1
64	1	1	30	1,12249	86,667	0,1
65	3	2	1	1,11139	87,751	0,1
66	1	2	26	1,10854	88,035	0,1
67	2	3	3	1,10732	88,157	0,1
68	3	2	5	1,09934	88,965	0,1
69	0	2	28	1,09642	89,265	0,1

Stick Pattern



Name and formula

Reference code: 00-033-0665
Compound name: Iron Oxide Carbonate
PDF index name: Iron Oxide Carbonate
Empirical formula: CFe_2O_5
Chemical formula: $\text{Fe}_2\text{O}_2\text{CO}_3$

Crystallographic parameters

Crystal system: Orthorhombic
a (Å): 9,2300
b (Å): 12,1800
c (Å): 5,9400
Alpha (°): 90,0000
Beta (°): 90,0000
Gamma (°): 90,0000
Volume of cell (10^6 pm^3): 667,78
RIR: -

Subfiles and quality

Subfiles: Corrosion
Inorganic
Quality: Indexed (I)

Comments

Creation Date: 01/01/1970
Modification Date: 01/01/1970

References

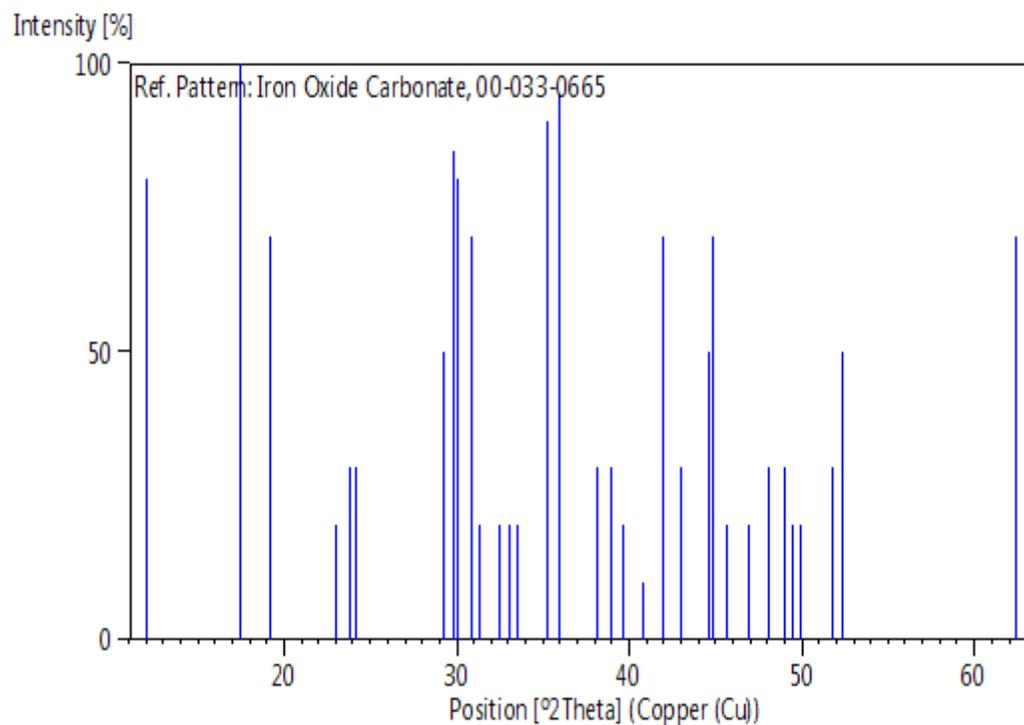
Primary reference: Erdos, V., Altorfer., *Werkstoffe und Korrosion*, **27**, 304, (1976)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	0	7,37000	11,999	80,0
2	1	2	0	5,09000	17,409	100,0
3	1	1	1	4,61000	19,238	70,0
4	1	2	1	3,86000	23,022	20,0
5	1	3	0	3,73000	23,836	30,0
6	2	2	0	3,68000	24,165	30,0
7	2	3	0	3,05000	29,258	50,0

8	3	1	0	2,98700	29,889	85,0
9	0	0	2	2,97000	30,064	80,0
10	1	4	0	2,89300	30,884	70,0
11	1	0	2	2,85000	31,362	20,0
12	1	1	2	2,75000	32,533	20,0
13	2	3	1	2,71000	33,027	20,0
14	0	2	2	2,67000	33,537	20,0
15	2	4	0	2,54200	35,279	90,0
16	2	0	2	2,50000	35,892	95,0
17	1	5	0	2,35500	38,185	30,0
18	2	2	2	2,31000	38,958	30,0
19	4	1	0	2,27000	39,673	20,0
20	1	5	1	2,21000	40,798	10,0
21	4	2	0	2,15300	41,928	70,0
22	3	1	2	2,10300	42,974	30,0
23	0	6	0	2,03100	44,577	50,0
24	3	2	2	2,01800	44,880	70,0
25	1	6	0	1,98300	45,716	20,0
26	1	0	3	1,93600	46,892	20,0
27	3	3	2	1,89200	48,050	30,0
28	2	6	0	1,85800	48,986	30,0
29	4	4	0	1,84100	49,469	20,0
30	5	1	0	1,82500	49,932	20,0
31	5	2	0	1,76500	51,753	30,0
32	1	3	3	1,74700	52,326	50,0
33	6	0	1	1,48700	62,399	70,0

Stick Pattern



Référence bibliographique

[1] **H.LITEM**, Caractérisation avec Rayonnement X des Revêtements Durs Sur des Substrats en Acier, Mémoire de Master, Spécialité : Rayonnement, Spectroscopie et Optoélectronique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2012.

[2] **B. MAROUF**, Caractérisation structurale et mécanique du joint soudé de la liaison bimétallique Acier Ordinaire ES6/Acier anti-usure NAXTRA 70 utilisé par l'Unité Grue de Bejaïa dans l'assemblage de la pelle cliargeuse et godet d'excavation, Mémoire de Master, Option : Sciences des Matériaux, Université Monlond Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.

[3] **R. VLLEGAS**, Genèse de la ferrite aciculaire dans les aciers à moyen carbone microalliés au vanadium. Morphologie fractale en relation avec les propriétés mécaniques, Thèse de Doctorat, Discipline Science et Ingénierie des Matériaux, Institut National Polytechnique De Lorraine, 2007.

[4] **C-E. DERFOUF**, effet de la soudure sur la structure de l'acier, Thèse de Doctorat, Spécialité Génie Mécanique, Université Mohamed Khieder – Biskra, 2011.

[5] **M. JOSSIC 1), M. CONFENTE 2), M. LEMOINE 3), Mme MARGOT-MARETTE** Étude d'aciers faiblement alliés résistant à la corrosion marine COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES Direction générale Télécommunications, Industries de l'Information et Innovation L-2920 Luxembourg Convention n° 7210-KB/305 (1.4.1983 - 31.3.1986) .

[6] disponible sur le site: <http://cte.univ-setif.dz/coursenligne/hamidouche1/metaux.html>, 16/05/2016.

[7] **R. VLLEGAS**, Genèse de la ferrite aciculaire dans les aciers à moyen carbone microalliés au vanadium. Morphologie fractale en relation avec les propriétés mécaniques, Thèse de Doctorat, Discipline Science et Ingénierie des Matériaux, Institut National Polytechnique De Lorraine, 2007.

[8] **D. TOUALBIA**, Cours De Sciences Des Matériaux, Destiné Aux Étudiants De La Deuxième Année Licence Sciences Et Technique, Option Génie Mécanique, Université Mohamed Cherif Massaada Souk Ahras.

[9] **H. MAROUF**, Caractérisation Structurale Et Mécanique Du Joint Soudé De La Liaison Bimétallique Acier Ordinaire ES6/Acier Anti-Usure NAXTRA 70 Utilisé Par t'Unité Grue De Bejaïa Dans L'assemblage De La Pelle Cliargeuse Et Godet D'excavation, Mémoire de

Magister, Option Sciences des Matériaux, Université Motihtid Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.

[10] Métallographie et traitements thermiques des métaux, I.Lakhtine, édition Mir Moscou, 1978.

[11] Disponible sur le site :<http://ptetoile.free.fr/> Traitements thermiques des aciers

[12] *Enseignants:*, Arfaoui Ali, Chaker Med Amir Année 2009/2010 Matériaux métalliques iset kasserine .

[13] M.Kadouma ,K.Taibi , N.Souami ,A.Alghem , B.Mokadem-comportement de transition ductile –fragile de l’acier X60-centre de recherche nucléaire d’alger ,csc,Anaaab,9-11Nouembre 2014.

[14] soudage des canalisation et installation conneses ,segment canalisation Norme API 1104 ,deuxième édition , septembre 1999.

[15]disponible sur le site: [http://www.lmm.epfl.ch/webdav/site/.../F%20Traitement Thermiques.pdf](http://www.lmm.epfl.ch/webdav/site/.../F%20Traitement%20Thermiques.pdf), 22/05/2016.

[16] S. LUBIN, étude des mécanismes de la transformation de phase bainitique dans les aciers bas carbone, Thèse de Doctorat, Spécialité Sciences et gène des Matériaux, L’école Nationale Supérieure Des Mines De Paris, 2009.

[17] A. BOUDIAF, Relation microstructure – comportement macroscopique dans les aciers : Effet de la taille de grain austenitique sur la plasticité de transformation, Thèse de Doctorat, Specialite Mecanique des Matériaux, Ecole Militaire Polytechnique et Institut National des Sciences Appliquées de Rouen, 2011.

[18] S. BENZAADA, Traitements Thermiques, Classification Et Designation Des Aciers Et Fontes.

ملخص

الهدف من هذه المذكرة هو دراسة تأثير الوقت في المعالجة الحرارية (السقاية) في درجة حرارة 300°م على الخصائص البنيوية والميكانيكية لسبيكة الحديد APIX60 التي تستعمل في نقل وتوزيع البترول و لمتابعة هذه الدراسة استعملنا الميكروسكوب و التحليل بالاشعة السينية و جهاز قياس الصلادة وتحصلنا على تحسين لخصائص البنيوية و الميكانيكية للسبيكة بعد السقاية لمدة ساعة.

Résumé

L'objectif de cette mémoire est l'étudier des effets de temps des traitements thermiques sur les caractérisations microstructurales et mécaniques de l'acier API X60 utilisé pour la fabrication des pipelines. nous avons utilisé plusieurs techniques expérimentales: l'analyse de diffraction des rayons X, le microscope et la microduremètre. L'ensemble des résultats expérimentaux obtenus a montré que le meilleur résultat durant 1h.