

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche
scientifique
Université de M'sila
Faculté de Technologie

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



Département de Génie Mécanique
MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Génie des matériaux

Présenté :

Senadla taqieddine & Hamidi Fares

Thème :

Etude des traitements thermochimiques des aciers

Devant le jury composé de :

| NOM et Prénom | Grade | Qualité |
|---------------|------------|-----------|
| ZAMMAMOUCHE.R | MTB | Président |
| BENARIOUA.Y | Professeur | Encadreur |
| BEDA.A | MAA | Examineur |

Année Universitaire : 2020 / 2021

N° d'ordre : GM/...../2021

بِسْمِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

En premier lieu, je remercie Dieu de m'avoir donné la force, le courage et la volonté pour achever ce modeste travail.

*Je remercie Mon encadreur **Dr. Benarioua .Y** de m'avoir proposé ce sujet de mémoire, de l'attention qu'il a portée à mon travail et des moments de discussion précieuse qu'il m'a réservés. Je le remercie infiniment pour sa confiance, ses précieux conseils, sa disponibilité et sa courtoisie.*

Mes sincères remerciements et gratitude à tous mes enseignants, du primaire aux études supérieures.

Mes remerciements et ma reconnaissance sont adressés envers mes collègues pour un temps précieux passé ensemble. Mes plus vifs remerciements vont également à tous mes amis avec qui j'ai partagé des moments inoubliables pendant mes études

Enfin, toute ma gratitude, ma reconnaissance et mes très vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail et en particulier l'ensemble des enseignants du département de génie mécanique de M'sila



Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

La personne la plus chère dans le monde, la lumière de ma vie, la source de tendresse, celle qui a sacrifiée et souffert les plus belles années de sa vie pour me voir un jour réussir :

♥♥ Ma chère mère ♥♥

*A tous mes amis
A toutes la famille*

| | |
|---|----|
| Résumé | 10 |
| Introduction | 14 |
| Chapitre I Généralités Sur Les Aciers | |
| I.1. Introduction..... | 15 |
| I.2. CLASSIFICATION DES ACIERS ET DES FONTES..... | 15 |
| I.2.1. Les aciers à outils non alliés pour travail à froid..... | 16 |
| I.2.2. Les aciers à outils alliés pour travail à froid..... | 16 |
| I.2.3. Les aciers à outils alliés pour travail à chaud..... | 17 |
| I.2.4. Les aciers rapides..... | 18 |
| I.3. Diagramme d'équilibre fer-carbone | 19 |
| I.4. Cémentation..... | 20 |
| I.4.1. Cémentation solide | 21 |
| I.4.2. Cémentation liquide | 21 |
| I.4.3. Cémentation gazeuse | 21 |
| I.5. TRAITEMENTS THERMIQUES CLASSIQUES | 22 |
| I.5.1. Introduction..... | 22 |
| I.5.2. Recuits..... | 23 |
| I.5.2.1. Recuit de normalisation | 24 |
| I.5.2.2. Recuit complet | 24 |
| I.5.2.3. Recuit de coalescence | 25 |
| I.5.2.4. Recuit de recristallisation | 25 |
| I.5.2.5. Recuit de détente | 25 |
| I.5.3. Trempe..... | 25 |
| I.5.4. Revenue | 27 |
| I.6. Traitements thermiques superficielles | 28 |
| I.6.1. Introduction..... | 28 |

| | |
|---|----|
| I.6.2. Traitements thermochimiques..... | 29 |
| Chapitre II les traitements thermochimiques | |
| II.1. Introduction..... | 31 |
| II.2. Cémentation | 31 |
| II.3. Techniques de cémentations | 32 |
| II.3.1. Cémentation solide..... | 32 |
| II.3.2. Cémentation liquide..... | 32 |
| II.3.2.1. Chimie des bains..... | 33 |
| II.3.3. Cémentation gazeuse..... | 34 |
| II.3.4. Cémentation ionique..... | 35 |
| II.4. Nitruration..... | 36 |
| II.5. Procédé de Nitruration..... | 37 |
| II.5.1. La nitruration liquide..... | 38 |
| II.5.2. La nitruration gazeuse..... | 39 |
| II.5.3. La nitruration ionique..... | 39 |
| II.6. Diagramme de phase Fe-N | 39 |
| Chapitre III Matériaux, Techniques Expérimentales, Résultats et Discussion | |
| III.1. PROCEDURES EXPERIMENTALES..... | 43 |
| III.1.1. Introduction..... | 43 |
| III.1.2. Matériaux étudiés..... | 43 |
| III.1.3. Préparation des échantillons..... | 44 |
| III.1.4. Traitement de cémentation..... | 45 |
| III.1.5. Traitement de nitruration | 45 |
| III.1.6. Préparation des échantillons..... | 45 |
| III.1.6.1. Polissage | 46 |
| III.1.6.2. Attaque chimique | 47 |
| III.1.7. Analyse par microscopie optique | 48 |

| | |
|---|----|
| III.2. RESULTATS ET DISCUSSIONS..... | 49 |
| III.2.1. Microstructure | 50 |
| III.2.2. Cémentation de l'acier XC38 | 51 |
| III.2.3. Cémentation de l'acier 22MC6..... | 53 |
| III.2.4 Nituration de l'acier 42CD4 | 55 |
| III.3. Epaisseurs des couches de traitements..... | 56 |
| III.4. Conclusion..... | 56 |
| Conclusion générale..... | 58 |
| Références bibliographiques..... | 59 |

Figure (I.1). Diagramme de phase fer-carbone, permettant de visualiser les conditions d'existence des phases d'acier.

Figure (I.2). Cycle des traitements thermiques classiques.

Figure (I.3). Cycle thermique du Recuit complet.

Figure (I.4). Thermique de la trempe et revenu.

Figure (II.1). Austénite résiduelle dans une couche cémentée et durcie par trempe.

Figure (II.2). Diagramme de phase Fe-N.

Figure (III.1). Machine de cisailage des métaux.

Figure (III.1). Les échantillons cémentés et niturés.

Figure (III.3). La machine de polissage.

Figure III.4. Microscopie optique utilisé.

Figure III.5. (a et b) : Microstructure de l'acier XC38 cémentée pour les temps de maintien (a) 2h et (b) 6h.

Figure III.6. (a et b) : Microstructure de l'acier 22MC6 cémenté pour temps de maintien (a) 2h et (b) 4h.

Figure III.7. Microstructure de l'acier 42CD4 nituré pour temps de maintien 4h

RESUME

Résumé

L'objectif de mon travail de mémoire a d'étudier les propriétés physiques et mécaniques des surfaces cémentées de quatre types d'aciers traités. Ce travail traite l'étude des propriétés tant de point de vue physico-chimique que mécanique des surfaces des aciers produits de ces traitements. Le moyen de caractérisation utilisé lors de cette étude c'est : l'analyse métallographique. Les échantillons ont été examinés par la microscopie optique.

Les résultats de cette étude ont montré que quel que soit la nuance d'acier, faiblement allié utilisé, le traitement de cémentation qui se suit par des traitement de trempe et de revenu, produit des changements structuraux et mécaniques importants dans le matériau traité, il permet d'avoir une pièce composée de deux aciers très différents : l'âme de pièce demeure un acier extra-doux permet d'absorber les déformations et les chocs, tandis que la couche superficielle est un acier très carburé de dureté plus élevée s'étend sur quelques millimètres de profondeur qui dépend de conditions de traitement et de la nuance de l'acier utilisé.

INTRODUCTION
GENERAL

Introduction

Le durcissement superficiel des matériaux métalliques peut être obtenu par des procédés mécaniques comme l'écrouissage, thermiques comme la trempe, ou thermo-chimiques comme le cas de cémentation et nitruration. Les buts essentiels ces différents processus sont principalement d'améliorer de la résistance à l'usure et à l'oxydation à basse ou à haute température.

Parmi les différents traitements thermo-chimiques, la cémentation et la nitruration tendent actuellement à remplacer les procédés les plus couramment utilisés comme l'implantation des couches minces ou revêtements. Ces techniques présentent certains avantages par rapport aux autres. Elles offrent un traitement simple et efficace pour les outils contre l'usure et la corrosion.

De manière générale, les deux traitements de cémentation et de nitruration consistent à plonger les pièces dans un milieu susceptible de céder du carbone et de l'azote à leurs surfaces, à des températures propices à la diffusion des atomes des deux éléments non métalliques vers le cœur des pièces.

Plusieurs études portent sur la cinétique de diffusion soit du carbone ou de l'azote dans la ferrite, sur la formation de nitrures dans les zones de combinaison et de diffusion.

L'objet de cette étude est et de caractériser au point de vue microstructural les couches obtenues à partir de la cémentation et de la nitruration des différents aciers. Ce travail c'est la suite de l'étude menée l'année précédente par un binôme A. Daoud et M. Harzouz de Master en Génie des Matériaux qui ont préparé et élaboré les échantillons et n'ont pas pu de faire la caractérisation à cause de la pandémie Covid-19.

D'une manière générale, le travail de cette étude est agencé en deux parties théorique et expérimentale regroupées en trois chapitres :

- ✓ Le premier chapitre s'articule sur des généralités sur les aciers.
- ✓ Le deuxième chapitre est une bibliographie générale sur le traitement thermochimique.
- ✓ Pour le troisième chapitre, il sera réservé à la caractérisation microstructurale des échantillons cités auparavant et qui représentent des aciers cémentés et nitrurés par différents temps de traitement.

Le manuscrit de cette étude est terminé par une conclusion générale et liste de références bibliographiques.

Chapitre I

Généralités Sur Les Acier

I.1. Introduction

La Conception de la structure porteuse d'une halle ou d'un bâtiment est basé sur son utilisation prévue, soit essentiellement ses caractéristiques de résistance (pour assurer une sécurité structurale suffisante) et de déformabilité (pour garantir une bonne aptitude au service). Elle est donc fortement influencée par les propriétés des matériaux qui la composent. Un projet de charpente métallique doit en conséquence être conçu et élaboré de façon à ce que les propriétés du matériau acier soient utilisées au mieux, soit sa haute résistance mécanique, sa grande ductilité et sa soudabilité. L'ensemble des critères de conception d'une ossature fait appel à la connaissance approfondie du matériau acier, comprenant son mode d'élaboration, les propriétés fondamentales et les modes de fabrication des produits. Le métal Fer existe partout à l'état d'oxyde, c'est le métal le plus dur, le plus courant et le plus répondu comparativement à d'autres métaux. Le Fer a été utilisé par les premières civilisations dans tous les domaines (Outils de guerres, en agriculture, ...etc). Et enfin dans le domaine qui nous intéresse La Construction Civile et Industrielle.

I.2. CLASSIFICATION DES ACIERS ET DES FONTES

La propriété essentielle d'un acier à outil est la dureté qui exprime la résistance Du matériau à l'enfoncement ou à la déformation. Cette propriété doit être atteint soit à la température ambiante, soit le plus souvent à chaud avec des maintiens sous charge souvent prolongés. Suivant la composition chimique de l'acier, des niveaux de duretés compris entre 40 et 70 HRC peuvent être obtenus après un traitement thermique de trempe et un revenu.

Dans la mesure où les phénomènes de contact avec les matériaux mis en forme Par déformation à froid ou à chaud ou par usinage peuvent entraîner des Échauffements importants, il est nécessaire l'acier constituant l'outillage ait en plus une résistance à chaud suffisante pour éviter un adoucissement trop important en service.

C'est cette dernière propriété qui permet de classer les aciers à outils en quatre Groupes conformément à la norme ISO/DIS 4957 qui a remplacé la norme NF A 35590. Cette norme s'applique à toutes les normes de produits laminés à chaud ou à froid, forgés ou étirés, et ne prend en compte que les aciers ont acquis une certaine renommée internationale. Elle désigne les aciers à outils suivent quatre groupes.

I.2.1. Les aciers à outils non alliés pour travail à froid

C'est les plus simple puisqu'ils ne contiennent que du fer et du carbone (0,45 à 1,2 %), les autres éléments y étant présents en teneuses résiduelles variables selon les matières premières et le mode d'élaboration utilisés.

A teneur en carbone égales, ces aciers acquièrent après trempe des duretés Aussi élevées que celles des aciers alliés. Ils diffèrent cependant de ces derniers, par une trempabilité plus faible, ce qui limite leur emploi à des pièces de sections Relativement étroites. Leur trempabilité limitée conduit également à l'emploi de Moyens de trempe énergiques : eau pure ou salée, et plus rarement pour des pièces de faible section, l'huile. En contrepartie, les aciers au carbone sont moins durs à L'état recuit et présente de ce fait, une usinabilité et une aptitude de formage à froid bien meilleure .

I.2.2. Les aciers à outils alliés pour travail à froid

Ces aciers dont la dureté à la température ambiante est supérieure à 50 HRC, Mais avec un abaissement sensible au-dessus de 300 °C, peuvent être divisés en quatre groupes, selon les propriétés d'emploi requis :

- ✓ **Les aciers résistants aux chocs mécaniques**, caractérisés par des Teneurs en carbone compris entre 0,35 et 0,6 % et des additions de chrome, de Silicium, de nickel ou de tungstène (50WCrV8, 45NiCrMo16, 35CrMo7) ;
- ✓ **Les aciers résistants à l'usure**, caractérisés par des teneurs en carbone Supérieurs à 0,9 %, avec des additions de manganèse, de chrome et de vanadium

(105V, 99Cr6, 90MnCrV8, 95MnWCr5).

✓ **Les aciers à très haute résistance à l'usure**, caractérisés par des Teneurs en carbone supérieurs à 0,9 % et des teneurs importantes en chrome, en molybdène et en vanadium (X100CrMoV8, X153CrMoV12, X210Cr12, X210CrW12).

✓ **Les aciers résistant à la corrosion**, caractérisés par des additions Importantes de chrome et des teneurs en carbone voisines de 0,4 % (X40Cr14, X38CrMo16).

I.2.3. Les aciers à outils alliés pour travail à chaud

Ils sont caractérisés par une dureté à la température ambiante relativement Élevée, comprise entre 40 et 56 HRC, et par une bonne dureté à chaud.

Ces aciers sont répartis en trois groupes :

✓ **Les aciers résistants aux chocs mécaniques**

Ils sont analogues aux aciers de construction à hautes caractéristiques, mais Avec une teneur en carbone plus élevée et une addition de vanadium pour Augmenter la résistance au revenu (55NiCrMoV7, 50CrMoV13-15).

✓ **Les aciers résistants aux chocs thermiques**

Ils sont centrés sur les compositions chimiques à 3 et 5 % de chrome, avec Addition de molybdène, de tungstène, de vanadium, éventuellement de cobalt pour Augmenter les propriétés mécaniques à chaud (32CrMoV12-28, X37CrMov5-3, X38CrMoV5-1, X35CrWmoV5).

✓ **Les aciers résistants à l'usure aux températures élevées**

Ils comportent des nuances a forte addition de tungstène, de chrome, de Molybdène et de cobalt afin d'augmenter la pénétration de trempe et le niveau de caractéristiques mécaniques. La présence de ces éléments en teneurs élevées contribue à un meilleur comportement à chaud de ces aciers, qui conservent ainsi aux températures de service des valeurs élevées de dureté et de résistance a l'usure ainsi qu'au fluage. La résistance à l'adoucissement au revenu s'en trouve également améliorée. Ces avantages comportent, en

contrepartie, une moins bonne tenue aux chocs mécaniques ou thermiques. La nécessité d'appliquer des températures de trempe élevées implique la prise en considération de grandes précautions quant au réchauffage de trempe, et au non refroidissement à l'eau des outillages ainsi chauffés (x30wcrv9-3, 38crcowv18-17-17).

I.2.4. Les aciers rapides

Ces aciers sont caractérisés par une très grande dureté supérieure à 60 HRC à la température ambiante et par une très bonne dureté à chaud. Leur composition chimique comporte plus de 0,7 % de carbone et des éléments susceptibles de former des carbures : 4 % de chrome dans tous les cas, du tungstène, du molybdène et de vanadium en proportion variables, éventuellement du cobalt pour améliorer les propriétés à chaud. Ces aciers peuvent être classés suivant l'élément de l'alliage dominant en quatre groupes :

✓ **Les aciers rapides de base**, caractérisés par une teneur en carbone comprise entre 0,8 et 1 % et une teneur en vanadium centrée sur 1 ou 2 % (HS 1-4-1, 2-9-2).

✓ **Les aciers rapides sur carburés**, caractérisés par rapport aux précédents par une augmentation de la teneur en carbone et en vanadium dans la proportion décarbure de vanadium (HS 6-6-2, 6-5-3).

✓ **Les aciers rapides au cobalt**, caractérisés par une addition de 5 % de Cobalt pour améliorer les propriétés de dureté à chaud (HS 6-5-2-5).

✓ **Les aciers sur carburés au cobalt**, caractérisés par de hautes teneurs en Carbone et en vanadium, avec des additions de cobalt pouvant atteindre 10 % (HS 6-5-3-8).

I.3. Diagramme d'équilibre fer-carbone

Le diagramme fer-carbone figure (I.1) décrit les différents états du mélange fer et carbone selon la proportion de fer et de carbone dans le mélange. Au-dessus de 2,11% de carbone on parle de fontes, en dessous de cette concentration on parle d'acier. Ce diagramme permet de visualiser les phases d'acier que l'on a selon la température et la teneur en carbone.

Toutefois, ce diagramme n'est valable que pour des aciers non alliés, c'est-à-dire ne contenant que du fer et du carbone. Certains éléments d'alliage favorisent l'élargissement de la phase γ (Éléments gammagènes) et certains autres favorisent le cas inverse (éléments alphagènes). Il existe deux diagrammes fer-carbone, car il existe du carbone à l'état libre (graphite), et du carbone en combinaison chimique (cémentite). Il y a donc un diagramme fer-graphite (dit diagramme stable) et un diagramme fer-cémentite (dit diagramme métastable).

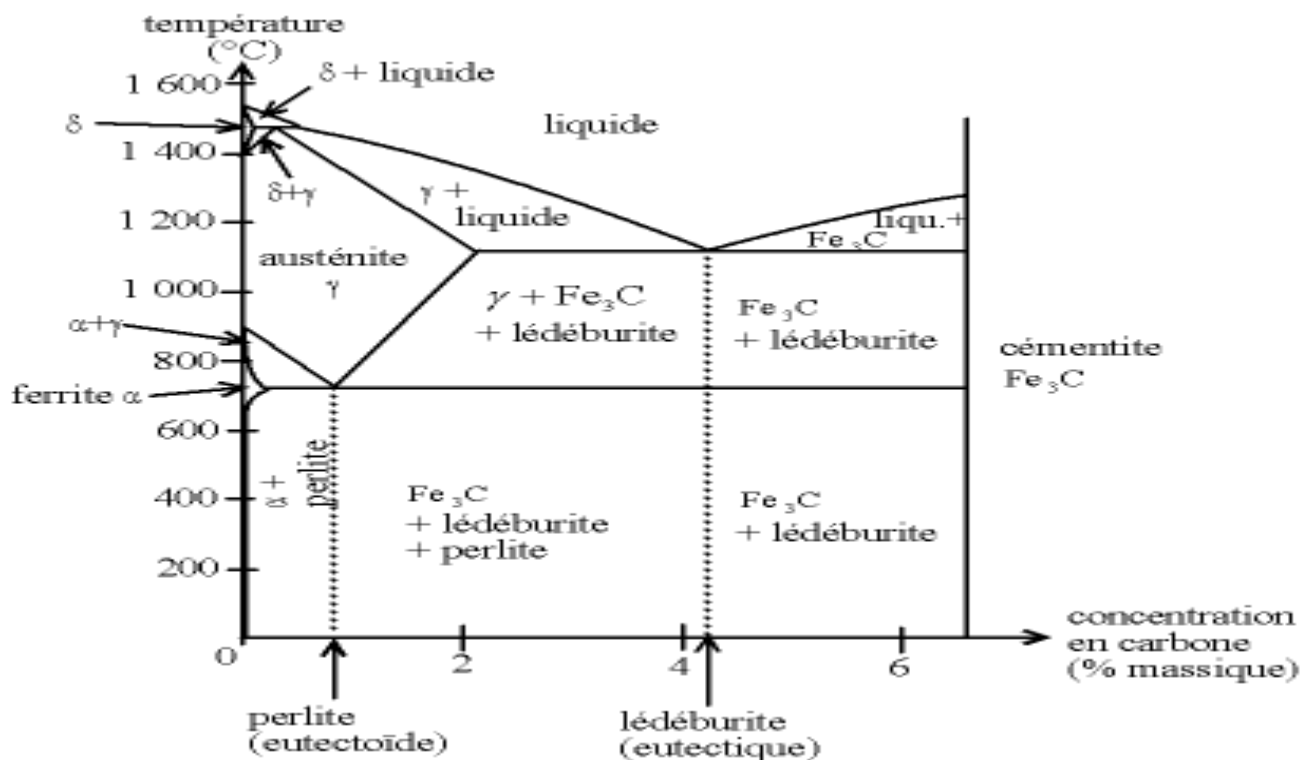


Figure (I.1) . Diagramme de phase fer-carbone, permettant de visualiser les conditions d'existence des phases d'acier.

La détermination des phases et des constituants d'un acier à une température donnée est fournie par la lecture du diagramme. La structure du fer pur dépend de la température. Donc en dessous de 721°C et au-dessus de 1394°C, le fer (fer α) a une structure cristalline cubique centrée (structure cristalline à température ambiante). Il ne dissout pratiquement pas le carbone, il est doux, très malléable. Entre 721°C et [910°C et 1394°C], le fer α a une structure cristalline cubique à faces centrées. Il dissout facilement le carbone.

On distingue plusieurs types d'aciers selon le pourcentage de carbone qu'ils contiennent les aciers hypoeutectoïdes (de 0,008 à 0,8 % de carbone) qui sont les plus doux, ils sont composés de ferrite et de perlite et les aciers eutectoïde (0,8 % de carbone), ils sont composés de perlite (structure lamellaire); les aciers hypereutectoïdes (de 0,8 à 2,11 % de carbone) qui sont les plus durs, ils sont composés de perlite et de cémentite.

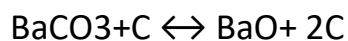
I.4. Cémentation

La cémentation est un processus de saturation en carbone de la couche superficielle de l'acier et ayant pour but principal, l'obtention d'une surface dure et résistance à l'usure pas enrichissement de la couche superficielle en carbone jusqu' à une concentration de 0,8 à 1,2 % C et par trempe ultérieure suivie d'un revenu à basse température. Ce procédé accroît également la limite de fatigue. Généralement la profondeur maximum de pénétration est de 2 mm, donc il est exigé que les différentes opérations d'usinage doivent être réalisées avant le traitement de cémentation, c'est à dire, les pièces à cémenter sont fournies après l'usinage qui doit prévoir alors une surépaisseur de rectification de 0,05 à 0,1 mm, ou après finition. La cémentation est appliquée aux aciers à faible teneur en carbone (0,5 à 0,02 % C) pour les grosses pièces jusqu'à 0,3 % C. Le choix de la nuance d'acier est nécessaire pour que le cœur de la pièce garde sa ductilité. Il existe trois modes essentiels de cémentation Soit par agents solides contenant une concentration forte en carbone (cémentation en caisse), par gaz ou par agents liquides.

I.4.1. Cémentation solide

L'agent de saturation dans cette opération est un ciment solide, le plus souvent le charbon de bois. Pour accélérer la cémentation, on ajoute au charbon des activateurs dont le carbonate de baryum $BaCO_3$ et le carbonate de sodium Na_2CO_3 à raison de 10 à 40 % du poids du charbon. Le ciment solide largement utilisé se compose de charbon de bois, de 20 à 25% de $BaCO_3$ et jusqu'à 3.5% de $CaCO_3$.

Les pièces sont placées dans des caisses soudées en acier, ou plus rarement, en fonte. La température de cémentation varie de 900 à 940 °C. Après cémentation, les caisses ne sont ouvertes qu'après leur refroidissement à l'air jusqu'à 400 ou 500°C. Le carbone atomique est obtenu de la manière suivante : $2CO \leftrightarrow CO_2 + C$ et l'addition du carbonate rend le ciment beaucoup plus actif et enrichit l'atmosphère carburante en oxyde de carbone :



I.4.2. Cémentation liquide

Les pièces sont plongées dans un bain de sel fondu à base de cyanure de Baryum et de sodium vers 980°C. Cette technique relativement simple de mise en œuvre permet un chauffage homogène et une action chimique régulière.

I.4.3. Cémentation gazeuse

La cémentation gazeuse est la plus employée. Elle se fait industriellement à partir d'atmosphères obtenues par installation et décomposition à chaud (combustion) d'hydrocarbures, atmosphères qui sont caractérisées par leur potentiel carbone. Le potentiel carbone d'une atmosphère est défini comme étant « la teneur en carbone à la surface d'un échantillon de fer pur en équilibre avec le milieu de cémentation considérée dans les conditions retenues ». Il y a carburation si, initialement l'activité du carbone dans le métal est inférieure au potentiel carbone de l'atmosphère. Dans le cas inverse, il y a

décarburation du métal. Quand ces deux variables sont égales le système est à l'équilibre et n'évolue pas. Les gaz tels que l'oxyde de carbone et le méthane réagissent à chaud à la surface de l'acier, de telle sorte que le carbone libéré s'insère dans le réseau cubique à face centrée du fer.



Au cours de la cémentation, il peut y avoir dans la partie superficielle de la couche enrichie, une oxydation des éléments manganèse, chrome et silicium présents dans l'acier. Par suite de la diminution de la trempabilité qui en résulte, il peut y avoir au cours de la trempe formation de constituants autres que.

I.5. TRAITEMENTS THERMIQUES CLASSIQUES

I.5.1. Introduction

Les traitements thermiques se définissent comme étant « l'ensemble des Opérations de chauffage et de refroidissement contrôlé » appliqués à des Métaux et alliages. De manière générale, les traitements thermiques agissent au niveau microstructural des métaux (matrice, précipités, distribution). 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). Généralement, 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).

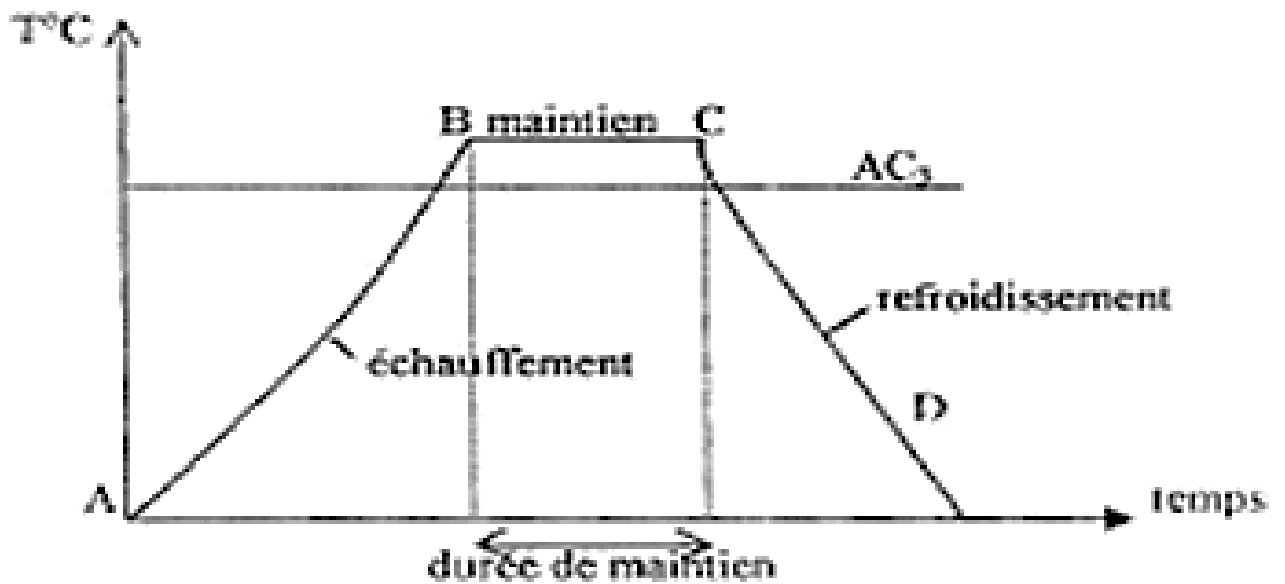


Figure (I.2). Cycle des traitements thermiques classiques.

I.5.2. Recuits

Les recuits ont pour but d'adoucir les aciers en éliminant les effets des étapes antérieures de leur fabrication (écrouissage ou trempe), ainsi que les hétérogénéités de structure imputables à leur élaboration (forgeage, laminage, soudage). Les recuits permettent en outre de retrouver les structures d'équilibre des aciers. Selon les buts visés et les modifications structurales obtenues, on distingue plusieurs types de recuits : le recuit de normalisation, le recuit complet, le recuit de coalescence, le recuit de recristallisation et le recuit de détente.

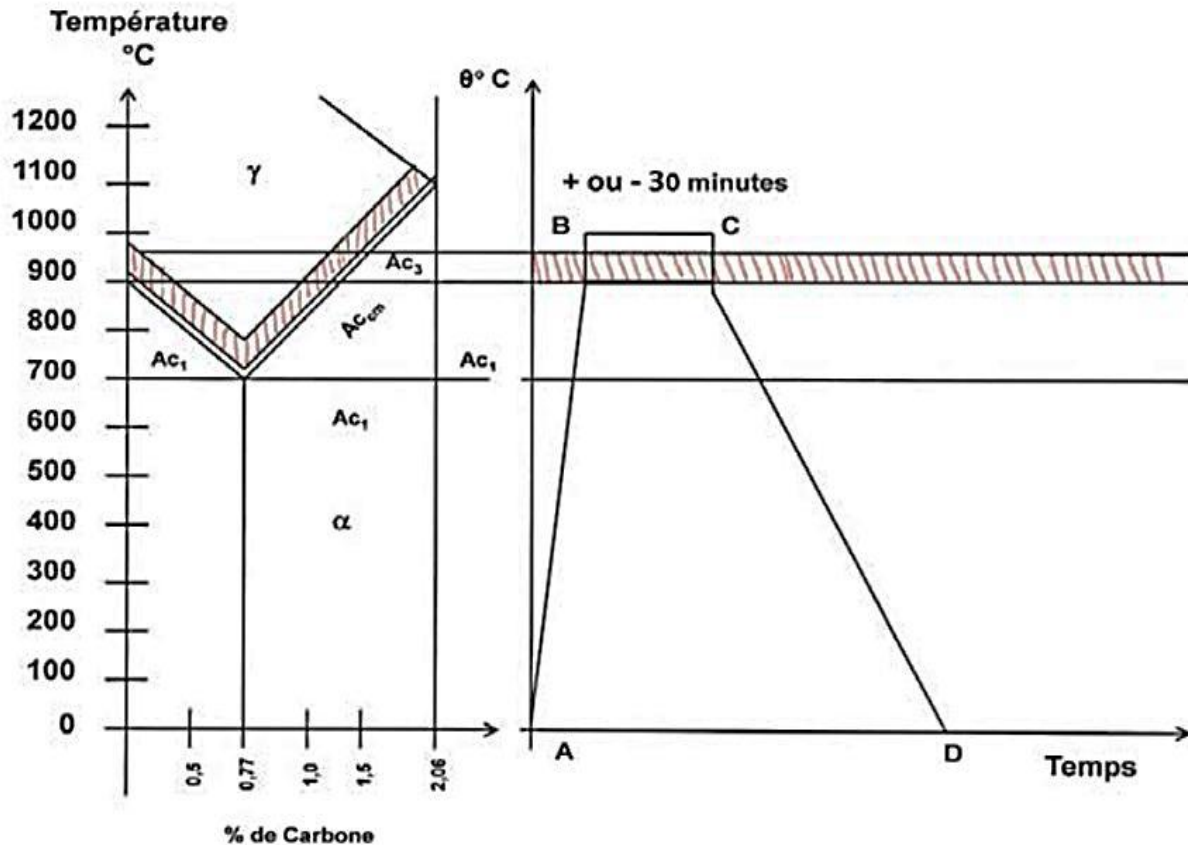


Figure (I.3) . Cycle thermique du Recuit complet.

I.5.2.1. Recuit de normalisation

On procède au chauffage dans le domaine austénitique (50 °C au-dessus de la température d'austénitisation, a_3 , et au maintien pendant environ une heure. Après quoi, on laisse l'acier refroidir à l'air. La structure obtenue est un mélange de ferrite et de perlite fine. On cherche ici à obtenir une microstructure uniforme (affinement de la taille des grains) et à améliorer les propriétés de l'acier, après une déformation à chaud.

I.5.2.2. Recuit complet

Ce recuit est techniquement semblable à la normalisation ; toutefois, pour

Obtenir une perlite plus grossière et un adoucissement plus marqué des propriétés, on laisse l'acier refroidir au four.

I.5.2.3. Recuit de coalescence

On procède au chauffage et au maintien prolongé à une température légèrement inférieure à la température de début de transformation, AC1. On cherche ainsi à obtenir une perlite globularisée, afin de rendre les aciers durs plus facilement usinables. La structure obtenue est moins dure que celle d'une Perlite lamellaire.

I.5.2.4. Recuit de recristallisation

On procède au chauffage dans le domaine de ferrite (entre 500 et 700 °C) Et en contrôlant le refroidissement. On applique ce traitement aux produits Déformés à froid (tôles minces laminées à froid, par exemple) pour faire disparaître les structures d'écroutissage et faciliter ainsi une mise en forme ultérieure (emboutissage, pliage, etc.).

I.5.2.5. Recuit de détente

On procède au chauffage dans le domaine Ferritique (entre 500 et 650 °C) Et on veille à ce que le refroidissement soit lent. Ce traitement permet de Réduire, voire d'éliminer, les contraintes internes engendrées au cours de la Fabrication (assemblages soudés, pièces moulées et forgées, etc.).

I.5.3. Trempe

On veille ici à ce que le refroidissement soit suffisamment rapide, afin d'éviter La transformation de l'austénite en produits d'équilibre (ferrite et perlite) et D'obtenir plutôt une transformation martensitique. La vitesse critique de trempe est la vitesse de trempe minimale qui permet d'éviter tout début de

Transformation perlitique ou bain tique et d'obtenir ainsi une structure entièrement martensitique. Cette vitesse critique de trompe, qui est fonction de la composition chimique de l'acier et de son histoire antérieure (taille des grains austénitiques, conditions d'austénitisation, etc.), permet de définir la trempabilité de l'acier. La trempabilité est la capacité d'un acier de se transformer en martensite dans des conditions de refroidissement données.

Un rond d'acier ordinaire (contenant 0,60 % de C) de 100 mm de diamètre, lorsqu'il est trempé à l'eau, ne subit une transformation martensitique complète que sur quelques millimètres de profondeur, par contre, ce même rond peut être trempé à cœur s'il contient en plus des éléments d'alliage. L'acier du second rond est par conséquent plus tremble que celui du premier.

La trempabilité d'un acier est déterminée par le diamètre critique. On appelle Diamètre critique le diamètre d'une barre (tournée dans des conditions données), dont la structure, au centre, se compose de 50 % de martensite et de 50 % de perlite. Puisque ce diamètre est fonction de la sévérité du milieu de trompe, le diamètre critique idéal est celui qu'on obtiendrait dans un milieu de trempe de sévérité infinie. Dans un tel milieu, la surface de la pièce tournée atteindrait instantanément la température du bain de trempe, et la vitesse de refroidissement, en un point quelconque de la pièce, ne dépendrait que des propriétés thermiques du métal et non de la résistance de l'interface métal-bain de trempe à l'écoulement de la chaleur.

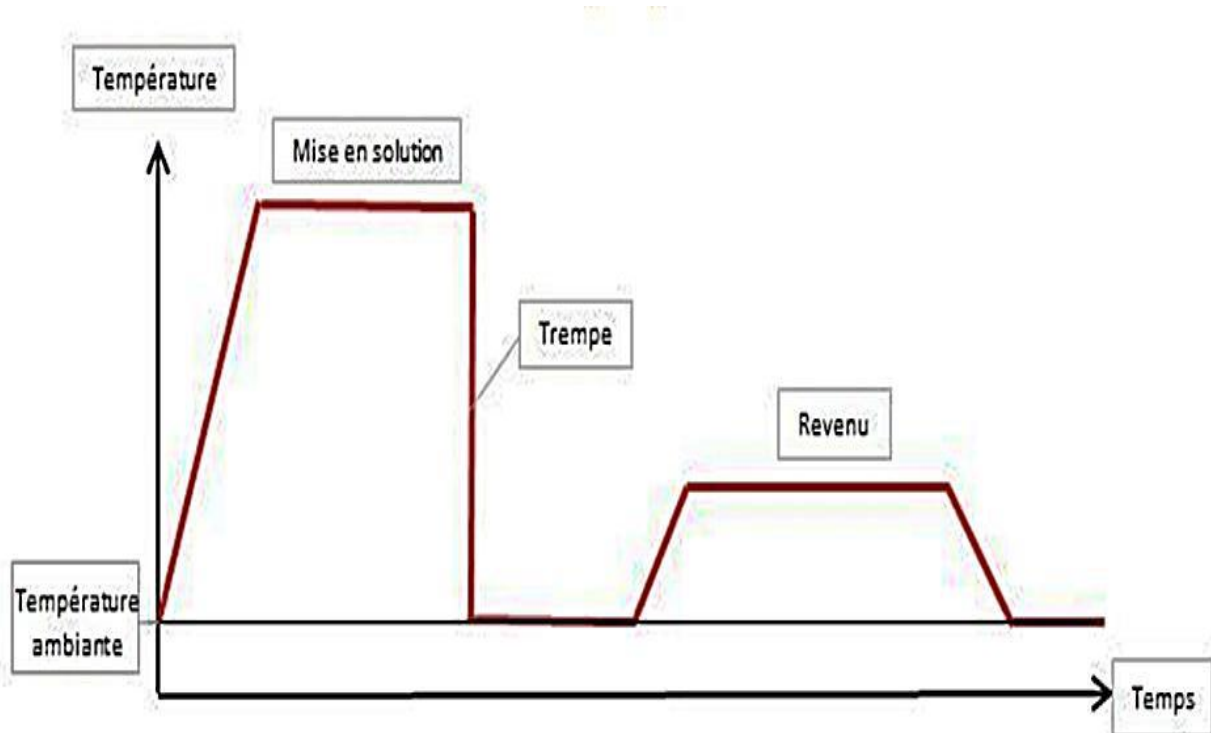


Figure (I.4). Thermique de la trempe et revenu.

I.5.4. Revenu

Après la trempe, on chauffe l'acier entre 150 et 650 °C pendant environ une heure. Nous avons déjà vu que, au cours du revenu, il y avait décomposition de la martensite et retour partiel à une structure comportant les constituants d'équilibre ferrite et carbures. Si le revenu diminue les propriétés mécaniques de l'acier (limite d'élasticité, résistance et dureté), il améliore par contre sa ductilité et sa ténacité. Toutefois, dans certains domaines de température, le revenu peut s'accompagner d'une diminution de la ténacité. Cette sensibilité à la fragilisation au cours du revenu - fragilité au bleu - se manifeste pour des températures de revenu allant de 250 à 350 °C, températures auxquelles la cémentite commence à se former ; cette sensibilité est par ailleurs liée à la présence d'impuretés (N, P ou S). Une autre forme de fragilisation au cours du revenu apparaît dans les aciers alliés entre 400 et 575 °C ; dans ce cas, ce sont des traces de Sn, Sb ou P qui entraînent, par ségrégation inter granulaire, une fragilisation des anciens joints de grains austénitiques.

I.6. Traitements thermiques superficiels

I.6.1. Introduction

Les traitements thermiques dans la masse améliorent les propriétés mécaniques des aciers, mais ils s'accompagnent d'une diminution de leur ténacité. Or, pour de nombreuses utilisations, ce sont surtout les propriétés des surfaces qui sont importantes (dureté superficielle et résistance à l'usure, par exemple). Dans ces cas, il est donc préférable de ne traiter que la surface de la pièce, afin que son cœur, de résistance moyenne, conserve une bonne ténacité. Les pièces pour lesquelles on effectue de tels traitements sont

Aussi nombreuses que variées : arbres de torsion, dents d'engrenages et de pignons, arbres à came, surfaces de glissement, etc. ; Pour effectuer les traitements de surface, puisqu'il n'est plus nécessaire que l'acier ait une forte trempabilité, on utilise en général des aciers au carbone ordinaires, ou des aciers peu chargés en éléments d'addition et qui sont sujets à une faible pénétration de trempe. Les surfaces traitées, à cause des transformations

Qui accompagnent le traitement, sont le siège d'importantes contraintes de compression résiduelles. Cet état de contrainte exerce un effet bénéfique sur la résistance à la fatigue et sur l'endurance des pièces ainsi traitées, puisque les microfissures auront plus de difficulté à se former dans les zones superficielles mises en compression. On distingue deux types de traitements de surface : La trempe superficielle et les traitements thermo-chimiques. La trempe superficielle consiste à chauffer localement la surface d'une pièce en acier jusqu'à la température d'austénitisation, à la refroidir ensuite à une vitesse suffisante pour obtenir un constituant de trempe énergétique. Le refroidissement s'effectue le plus souvent par un jet d'eau sous pression, a pour but l'obtention d'une dureté élevée en surface jointe à une ténacité et une ductilité importante à cœur, on peut obtenir ce résultat par une modification de la zone superficielle de la pièce. Durant ce procédé, la première opération qui est le chauffage pourra être effectuée par processus d'induction ou de flamme.

I.6.2. Traitements thermochimiques

Les traitements thermochimiques consistent à traiter superficiellement des matériaux métalliques notamment les aciers par l'ajout des éléments légers non métallique à titre Individuel comme le cas de cémentation, nitruration ou boruration ou à titre groupe comme le Cas carbonituration, nitrocarburation, cyanuration. Les éléments lourds peuvent être ajoutés à titre seul ou ensemble comme dépôts en surface des matériaux à traiter, le procédé appelé métallisation (métal ou alliage). Lorsque les dépôts forment des composés métalliques, les éléments additionnés en surface au cours de traitement ceux sont les éléments lourds (métalliques) et légers (non métalliques).

Chapitre II

Les traitements thermochimiques

II.1. Introduction

Les traitements thermochimiques des aciers sont employés dans le but d'améliorer leurs propriétés surfaciques. Le mécanisme essentiel est la diffusion d'une ou plusieurs espèces chimiques dans l'acier à une température généralement élevée. Dans certains cas, le processus est suivi d'une trempe et d'un revenu alors qu'il exige seulement un refroidissement à l'air dans d'autres cas. L'espèce diffusant peut être le carbone, l'azote ou le bore, ainsi les processus sont nommés cémentation, carbonituration, nitruration, nitrocarburation ou boruration. Ces traitements de surfaces ont une grande importance industrielle parce que les propriétés mécaniques et chimiques des couches extérieures des pièces traitées peuvent être améliorées. Selon le processus choisi, la surface traitée présentera une résistance à l'usure et à la corrosion améliorée avec une dureté élevée.

II.2. Cémentation

La cémentation est le procédé le plus ancien de la saturation de la superficie de l'acier par le carbone. Elle est utilisée afin d'obtenir une dureté et une résistance à l'usure élevées des couches superficielles tout en conservant un cœur doux et tenace. L'opération est réalisée dans un milieu susceptible de céder du carbone à l'acier porté à une température supérieure à AC_3 , le plus souvent entre 850 °C et 1000 °C . Le durcissement est accompli lorsque la couche enrichie en carbone est trempée pour former de la martensite conduisant à une bonne résistance à l'usure et à la fatigue. La trempe est réalisée soit directement après cémentation (trempe directe) soit après refroidissement du métal et réchauffage ultérieur. La couche cémentée atteint le maximum de dureté (environ 800 à 900 HV) après la trempe martensitique pour des tenures en carbone voisines de l'eutectoïde. Un éventuel revenu de détente (entre 180 °C et 200 °C) après trempe ramènerait la dureté aux environs de 600 HV à 760 HV . La profondeur de cémentation est fonction du temps, de la température et du potentiel de carbone en surface. La profondeur

de cémentation est plus grande après un long temps de maintien et un potentiel élevé de carbone produit une quantité élevée de carbone en surface. Le choix de l'atmosphère a également une grande influence sur le processus de cémentation. Les différentes atmosphères employées dans l'industrie de cémentation impliquent la dissociation des composants de l'atmosphère en surface de l'acier, ainsi le carbone libéré est aisément dissous par la phase d'austénite et peut diffuser dans la pièce. En outre, certains éléments d'alliage peuvent agir d'une manière sensible sur la vitesse de diffusion du carbone au cours de la cémentation.

II.3. Techniques de cémentations

II.3.1. Cémentation solide

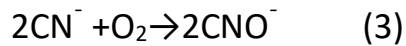
L'agent de saturation dans cette opération est un ciment solide, le plus souvent le charbon de bois. Pour accélérer la cémentation, on ajoute au charbon comme activant dont le carbonate de baryum $BaCO_3$ et le carbonate de sodium Na_2CO_3 à raison de 10 à 40 % du poids du charbon. Le ciment solide largement utilisé se compose de charbon de bois, de 20 à 25% de $BaCO_3$ et jusqu'à 3.5% de $CaCO_3$. Les pièces sont placées dans des caisses soudées en acier, ou plus rarement, en fonte. La température de cémentation varie de 900 à 940°C. Après cémentation, les caisses ne sont ouvertes qu'après leur refroidissement à l'air jusqu'à 400 ou 500°C. Le carbone atomique est obtenu directement à partir du ciment qui est considéré comme source de carbone. L'addition du carbonate rend le ciment beaucoup plus actif et enrichit l'atmosphère carburante en oxyde de carbone.

II.3.2. Cémentation liquide

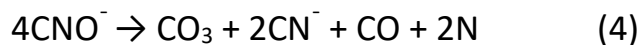
Les pièces sont plongées dans un bain de sel fondu à base de cyanure de baryum et de sodium vers 980°C. Cette technique relativement simple de mise en œuvre permet un chauffage homogène et une action chimique régulière.

II.3.2.1. Chimie des bains

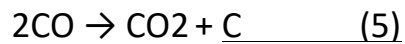
Au contact de l'air le cyanure de sodium s'oxyde en formant du cyanate NaCNO ($\text{Na}^+ \text{CNO}^-$) :



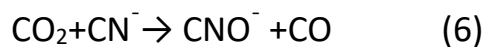
À la température de traitement le cyanate se décompose en carbonate et en Cyanure et libère du monoxyde de carbone et de l'azote actif :



L'azote diffuse dans le fer alors que le CO se décompose en surface des pièces.



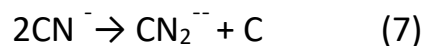
Le dioxyde de carbone formé est immédiatement réduit en oxyde de carbone par le cyanure, avec transformation en cyanate qui est de fait le véritable agent actif du bain :



Le carbonate produit dans la réaction (4) est stable à la température d'emploi du bain, c'est un produit de fin de réaction dans lequel se décomposera tout le cyanure.

Une partie du (CO) formé lors de la réaction (4) vient brûler en surface et ne conduit pas à la réaction (5) de cémentation.

Si le bain est insuffisamment aéré, le cyanure se décompose en cyanamide avec Formation de carbone.



Cette réaction exclut la diffusion d'azote, elle devrait être recherchée si on Cherche à privilégier la cémentation par rapport à la carbonituration.

Toutefois, elle est plus rapide que la réaction d'absorption et diffusion du carbone par l'acier et conduit à un épaissement du bain et à la formation d'une croûte importante en surface due aux remontées de carbone.

Lors de la sortie des pièces du bain, les particules de carbone se collent sur leur

Surface, gênent la trempe et sont souvent la cause de plages douces.

Pour éviter ces inconvénients, on emploie des diluants et des activateurs. Les Diluants n'interviennent pas sur la réaction de carburation, ils agissent seulement sur la température de fusion et sur la viscosité du bain. Ce sont des chlorures alcalins (NaCl, KCl). Les activateurs ont pour effet de favoriser et contrôler la réaction de décomposition du cyanure en cyanamide (réaction 7). C'est le plus souvent du chlorure de baryum (BaCl₂) additionné d'un peu de chlorure de strontium (SrCl₂). Le baryum complexe le radical cyanamide et la réaction devient [1] :



II.3.3. Cémentation gazeuse

La cémentation gazeuse est la plus employée. Elle se fait industriellement à partir d'atmosphères obtenues par installation et décomposition à chaud (combustion) d'hydrocarbures, ces atmosphères sont caractérisées par leurs potentiels de carbone. Le potentiel carbone est défini comme étant la teneur en carbone à la surface d'un échantillon de fer pur en équilibre avec le milieu de cémentation considérée dans les conditions retenues. Il y a carburation si, initialement l'affinité du carbone dans le métal est inférieure au potentiel carbone de l'atmosphère. Dans le cas inverse, il y a décarburation du métal. Quand ces deux variables sont égales le système est à l'équilibre et n'évolue pas. Les gaz tels que l'oxyde de carbone et le méthane réagissent à chaud à la surface de l'acier, de telle sorte que le carbone libre s'insère dans le réseau cubique à face centrée du fer. Au cours de la cémentation, il peut y avoir dans la partie superficielle de la couche enrichie, une oxydation des éléments manganèse, chrome et silicium présents dans l'acier. Par suite de la diminution de la trempabilité qui en résulte, il peut y avoir au cours de la trempe formation de constituants autres que la martensite qui auront pour effet d'abaisser notablement la résistance à la fatigue. La formation des oxydes internes est un phénomène typique dans la cémentation gazeuse la quantité des oxydes internes formés et leurs profondeurs dépend des conditions de la cémentation

(température, temps.), plus la profondeur de la couche cémentée est grande, plus la profondeur des oxydes internes est importante. Les oxydes peuvent être formés soit au niveau des joints de grains soit à l'intérieure des grains. Ceci peut influencer sur la résistance à la fatigue des outils.

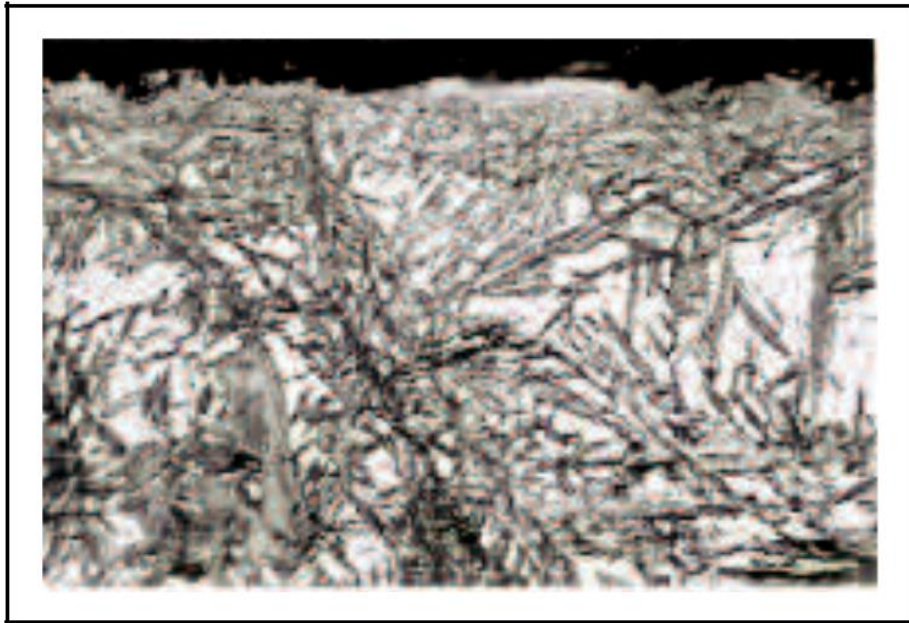
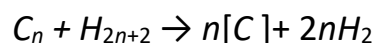


Figure (II.1). Austénite résiduelle dans une couche cémentée et durcie par trempe.

II.3.4. Cémentation ionique

Les pièces à cémenter sont placées en position de cathode à l'intérieur d'une enceinte contenant un hydrocarbure sous pression réduite. L'application d'une différence de potentiel électrique entre une anode et une cathode (la pièce) conduit à la formation d'une décharge électrique dans l'enceinte et d'une couche luminescente qui entoure la pièce, dont le chauffage est assuré par le plasma. De façon très simplifiée, les gaz carburants sont dissociés pour fournir du C libre selon l'expression :



Par rapport aux autres techniques de cémentation, la cémentation par plasma présente les avantages suivants :

- ✓ Possibilité d'effectuer un décapage ionique préalable de la surface à cémenter afin de la nettoyer
- ✓ Transfert plus rapide de carbone dans l'acier
- ✓ Meilleur contrôle des paramètres de traitement
- ✓ Plus basse consommation de gaz et d'énergie
- ✓ Absence de pollution de l'environnement
- ✓ Plus grande propreté et absence d'oxydation superficielle des pièces traitées
- ✓ Possibilité de réaliser des zones cémentées très précisément délimitées

II.4. Nitruration

La nitruration consiste à faire diffuser à l'état solide de l'azote généralement depuis un milieu nitrurant gazeux (ammoniac) ou ionique (azote diatomique avec ou sans hydrogène). Les milieux nitrurant gazeux sont les plus utilisés industriellement sous ammoniac NH_3 avec ou sans dilution à l'azote. Le potentiel de nitruration est réglé par la pression partielle d'ammoniac qui se dissocie à la surface de l'acier pour donner de l'azote monoatomique qui diffusera dans la matrice. Dans le cas des aciers faiblement alliés, cette diffusion s'accompagne également d'une diffusion (ou rétrodiffusion) du carbone. Durant le processus de diffusion se produisent des transformations de phases (dissolution des carbures de revenu, formation de nitrures et de carbures) générant ainsi des gradients de propriétés mécaniques (augmentation de la dureté, génération de contraintes résiduelles) en surface des pièces traitées. L'épaisseur de la couche de nitrure ou couche blanche et la couche de diffusion vont dépendre de différents paramètres dont les plus importants sont le temps, la température et la composition de l'acier. Cette couche blanche peut varier entre 0 et 20 μm et la couche de diffusion jusqu'à 0,8 mm, selon les exigences de l'application.

On peut dire que si l'exécution du traitement thermique a perdu son caractère empirique, si l'on est arrivé à une technique approfondie en ce qui concerne les transformations que subissent les aciers à l'échauffement et au refroidissement, malgré tout, le choix du meilleur traitement à appliquer reste souvent une question d'expérience.

II.5. Procédé de Nitruration

Lorsqu'il est chauffé en présence d'acier à des températures comprises entre 520 °C et 580 °C, l'ammoniac se décompose relativement lentement en ammoniac craqué, composé d'un mélange de deux gaz, l'hydrogène (H₂) et l'azote (N₂); ce dernier réagit simultanément avec le fer en diffusant sur les couches superficielles du métal traité. Il provoque la formation d'un film superficiel de nitrures de fer, appelé couche de combinaison, à partir duquel les atomes d'azote diffusent en direction du cœur de la pièce. Ce traitement, appelé nitruration, peut, selon la composition de l'acier, entraîner un accroissement très important de la dureté superficielle.

Il existe 3 procédés :

- ✓ La nitruration en phase liquide : bains de sels à base de cyanures
- ✓ La nitruration gazeuse : dissociation de l'ammoniac et décomposition au contact de l'acier
- ✓ La nitruration ionique

Le traitement de nitruration est un traitement superficiel qui consiste à plonger des pièces en alliages ferreux spéciaux (aciers au chrome-aluminium) dans un milieu susceptible de céder de l'azote en surface, à une température comprise entre 300 °C et 580 °C où l'azote peut diffuser de la surface vers le cœur de la pièce. Une fois le traitement effectué on peut observer deux couches :

- ✓ La couche de combinaison, en surface, d'une épaisseur approximative de 20 μm, elle est composée de nitrures ϵ et γ'

- ✓ La couche de diffusion plus épaisse (100 à 1000 μm), si le métal contient des éléments d'alliage il se forme des précipités de nitrures finement dispersés dans la zone de diffusion. Ces précipitations conduisent à un durcissement important, les niveaux de dureté obtenus sont compris entre 400 et 1300 HV et cette dureté peut être conservée jusqu'à des températures de l'ordre de 500 °C. La couche de diffusion est donc plus dure que la couche de combinaison.

L'augmentation de la dureté en surface apporte des avantages certains : l'usure des pièces va être limitée, mais les pièces vont tout de même garder à cœur leurs caractéristiques mécaniques propres, en ce qui concerne la nitruration, la couche de combinaison a de bonnes propriétés de glissement ce qui peut être appréciable pour les roulements et les engrenages, cette couche pouvant être retirée si nécessaire. On utilise aussi ce procédé pour les tubes de canon de moyen calibre, dans la construction des machines-outils et des vérificateurs. Autres avantages, le durcissement est direct et ne comporte pas de trempe, les déformations sont très faibles et presque toujours faciles à prévoir (quelques microns). Par contre la nitruration présente les inconvénients suivants :

- ✓ La durée de l'opération est très longue 100 heures pour atteindre une pénétration maximum de 1 mm
- ✓ La couche nitrurée ne peut supporter aucune déformation plastique.

II.5.1. La nitruration liquide

On utilise un bain de sels à base de cyanure dont on considérablement limité la concentration. Cependant les conditions environnementales et de sécurité tendent à faire disparaître ce procédé. On a une réaction du type :



II.5.2. La nitruration gazeuse

La nitruration gazeuse fait partie des procédés de diffusion thermochimique. A des températures de traitement de 480 à 580 °C, la surface est soumise à un traitement thermochimique en présence d'azote et éventuellement de carbone. Grâce aux derniers développements des techniques de nitruration gazeuse contrôlées et de régulation en continu du quotient de nitruration, il est possible de superviser l'ensemble du traitement et de moduler de manière ciblée la constitution et la composition de la couche de combinaison et de diffusion ainsi que la dureté. Dans ce mémoire, nous sommes intéressés uniquement au procédé de nitruration gazeuse.

II.5.3. La nitruration ionique

Schématiquement, elle s'effectue par décharges électriques entre une anode et les pièces qui forment la cathode. La tension est comprise entre 300 et 1000 V. L'atmosphère est à basse pression (10 à 100 Pa) et constituée d'azote et d'hydrogène. L'azote se dissocie et s'ionise. Les ions N^+ sont ainsi attirés par la cathode, leur énergie cinétique permet de chauffer les pièces, les décaper et pénétrer dans la couche superficielle. Les traitements sont ainsi plus précis et plus rapides

II.6. Diagramme de phase Fe-N

D'après le diagramme des phases ci-dessous (figure II.2) nous voyons qu'il existe trois domaines monophasés : Une solution d'azote dans le fer α - Le nitruure Fe_4N -Le nitruure Fe_2-3N Etant donné le taux d'azote décroissant de la surface vers le coeur de la pièce, on obtiendra en partant de la surface les différentes couches suivantes Le nitruure - Un mélange nitruure / nitruure -Un mélange solution solide α dans le fer nitruure - Une solution solide α d'azote dans le fer

Nitruure Les aciers utilisés en nituration peuvent être trempés et revenus ce qui donne de meilleurs résultats en nituration dû à une structure sorbitique avant traitement. L'introduction de l'ammoniaque directement dans le four donne le gaz porteur. L'azote (N₂) est ajouté pour réguler l'atmosphère Pendant la nituration le passage de l'azote dans le fer se fait à partir d'un mélange de gaz constitué de NH₃, N₂ et H₂. Dans le but de réduire ou de supprimer la couche blanche qui présente des caractères non souhaités. Cette technique pourra être remplacée par celle de la nitrocarburation, dans ce cas l'injection du propane ou d'un gaz d'hydrocarbure dans le four sera également injecté.

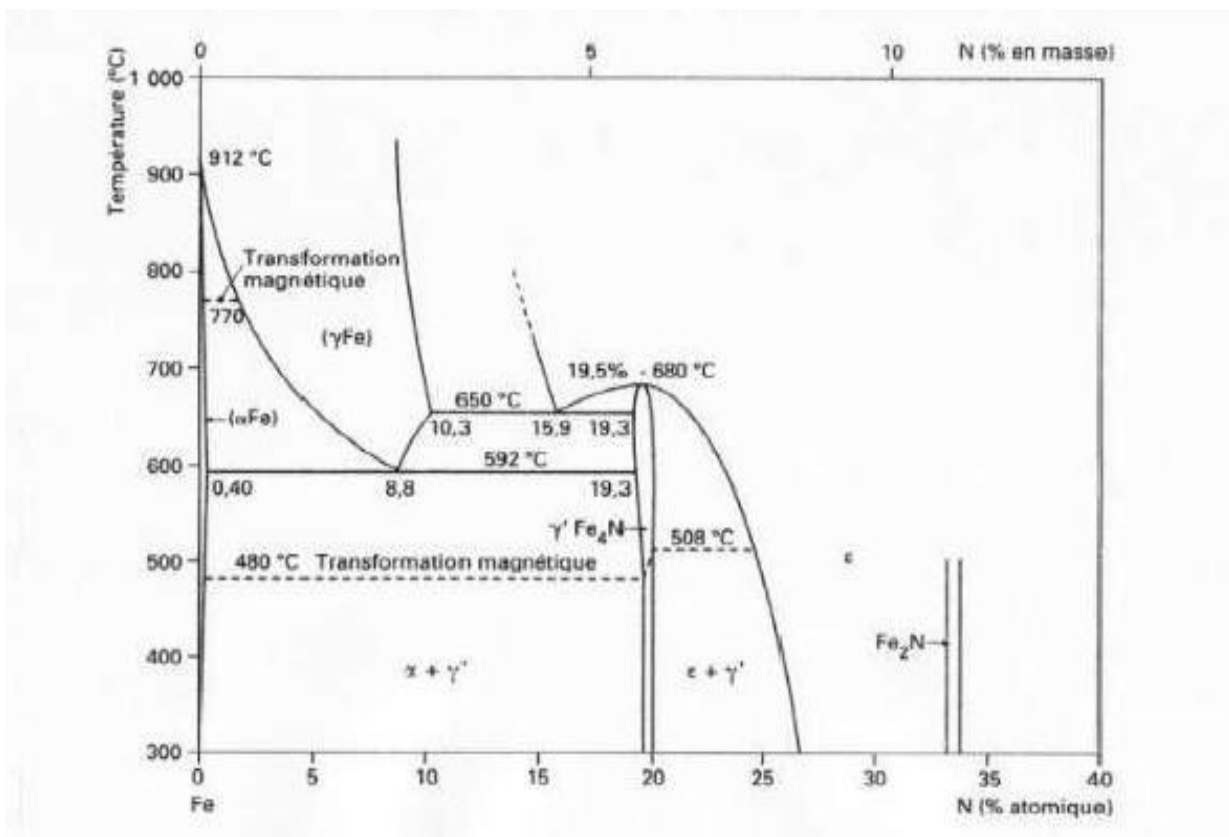


Figure (II.2). Diagramme de phase Fe-N.

Au cours du traitement de nituration plusieurs paramètres peuvent figurer et jouent des rôles importants sur revêtement parmi lesquels, la température si la température est trop basse c'ad inférieur à 500°C la dissociation de l'ammoniaque sera trop faible si la température est supérieure à 500°C la

dissociation de l'ammoniaque devient trop rapide et l'azote naissant résultant de la décomposition de l'ammoniaque se recombine très rapidement sous forme de N₂ inerte. C'est pourquoi il est nécessaire de mesurer et de réguler le taux de dissociation du gaz d'ammoniaque en gaz d'azote et d'hydrogène.

Chapitre III

*Matériaux, Techniques Expérimentales,
Résultats et Discussion*

III.1. PROCEDURES EXPERIMENTALES

III.1.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter comme cité auparavant une étude de caractérisation microstructurale de certains échantillons élaborés l'année passée à l'unité d'algal + par un binôme de Master A. Daoud et M. Harzouz. Ce travail est considéré la suite de l'étude de mémoire de master des deux nommés.

Avant d'entamer la partie de l'étude proposée, il est intéressé de rappeler la procédure effectuée à propos de la préparation des substrats des aciers ainsi les traitements thermochimiques de cémentation et de nitruration qu'ils subissent.

Les matériaux étudiés, le mode de préparation des échantillons, les investigations expérimentales utilisées pour l'élaboration des aciers étudiés, les techniques et les équipements utilisés seront présentés. On décrira les différentes conditions des expérimentations réalisées et la méthodologie concernant l'obtention de caractérisation des couches cémentées et nitrurées. L'étude de caractérisation structurale des échantillons sont réalisée à l'aide d'un microscope optique.

III.1.2. Matériaux étudiés

Quatre types d'aciers faiblement alliés de nuances XC38, 22MC6, 40CD4 et qui appartiennent à la classe des aciers de cémentation ont été utilisés lors de cette étude. Ces aciers ont un rôle important dans le domaine de mécanique comme éléments : roues coniques, couronnes de différentiels, pignons, arbres vilebrequins, roues dentées, arbres de réducteurs, broches, pièces automobiles et engrenages fortement sollicités ayant une ténacité élevée. La plupart de ses

aciers contiennent des éléments d'addition comme chrome, manganèse, molybdène et d'autres éléments en traces négligeables.

III.1.3. Préparation des échantillons

La préparation des aciers destinés au traitement de surface ont subi des coupes à froid et à l'aide d'une tronçonneuse comme le montre la figure. Les substrats ont subi par la suite des polissages mécaniques afin d'éliminer toutes rugosités de surface.



Figure (III-1). Machine de cisailage des métaux.

III.1.4. Traitement de cémentation

Trois types d'acier ont subi un traitement de cémentation gazeuse. Les aciers sont chauffés à la température austénitique de 950°C dans un four électrique sous atmosphère de gaz carbonique qui est le méthane. Les atomes de carbon diffusent dans les aciers en formant des couches de carbures de fer. Par refroidissement rapide (trempe à l'huile), la structure de cet acier passe d'austénitique à martensitique, structure contenant des carbures de fer durs et cassants. Afin de réduire la fragilité de la martensite, on procède à une opération de revenu des pièces trempées. Les paramètres de ce traitement sont identiques, seulement la nature des aciers qui ont été changés

III.1.5. Traitement de nitruration

Pour le traitement de nitruration qui est effectué dans un four électrique industrielle sous une source d'azote qui de l'ammoniaque sous la température de 530°C. Dans ce traitement le paramètre du temps de traitement et la nature de l'acier qui sont variés (2h ,4h, 6h et 8h) pour chaque type du matériau traité. Les détails à propos, la description du four et les paramètres de la technique de nitruration utilisés ont été indiqué dans la mémoire de Daoud et Harzouz

III.1.6. Préparation des échantillons

La figure III-2 représente les quatre différents échantillons d'acier découpés, cémentés et nitrurés. Les éprouvettes destinées à l'étude microscopique ont subi deux principales opérations qui sont le polissage et l'attaque chimique :



Figure (III.1). Les échantillons cémentés et niturés.

III.1.6.1. Polissage

La première consiste en un polissage grossier de la surface. Les échantillons sont polis à l'eau (pour éviter tout échauffement du matériau) avec du papier abrasif en passant vers des grains de plus en plus fins (80, 100, 220, 320, 500, 1000, 1200). Entre chaque papier, il faut, croiser la direction de polissage : pour un papier donné, on polit toujours dans le même sens, et on croise les sens d'un papier à l'autre, ce qui permet de faire ressortir les rayures résiduelles de l'étape précédente.

La seconde, appelé polissage fin, est effectuée en présence de la pâte diamant de trois granulométries 6, 3 et 1 micromètre. Le polissage de finition est réalisé sur un drap contenant ces pâtes et réactif chimique qui permet d'aider le polissage. D'une part l'éliminer les rayures (des lignes (stries) sont observées sur la surface de l'échantillon) produites par des arrêtes tranchantes ou (et) des

particules abrasifs et d'autre part de conserver une planéité optimale sur tous types d'échantillon.



Figure (III.3). La machine de polissage .

Pour ces deux stades, le rinçage de l'échantillon, voir ce passage dans un bain à l'eau, est requis à chaque changement de papiers abrasifs et de drap afin d'éviter que des particules de grand diamètre ne polluent le stade de polissage à plus faible granulométrie.

III.1.6.2. Attaque chimique

L'attaque des échantillons met en évidence la morphologie des grains, les défauts ou irrégularités de la surface, les sous-structures, les précipités, les inclusions, etc. La méthode d'attaque utilisée est l'attaque chimique qui provoque une dissolution différentielle des cristaux suivant leur orientation, des phases suivant leur nature ou une attaque spécifique aux joints de grains.

Pour révéler la structure des couches intérieures des pièces d'aciers cémentés, dans ce travail, on a utilisé le Nital, de composition chimique (HNO_3 (4%) + alcool éthylique), comme réactif. La durée de l'attaque est de 2 à 3 secondes.

III.1.7. Analyse par microscopie optique

Le microscope optique est un instrument d'optique muni d'un objectif et d'un oculaire qui permet de grossir l'image d'un objet de petites dimensions (grossissement) et de séparer les détails de cette image afin qu'il soit observable. Il est utilisé en métallurgie et en métallographie pour examiner la structure d'un métal ou d'un alliage.

L'avantage de la microscopie optique, outre sa grande facilité d'utilisation, est de permettre l'observation de grandes surfaces et de collecter ainsi une information globale sur l'aspect de la surface observée. Mais compte tenu de sa faible résolution, il n'est pas possible de l'utiliser pour une observation fine d'objets rugueux de petite taille.

L'analyse métallographique des faciès des échantillons est effectuée à l'aide du microscope type Toupview indiqué dans la figure III-4 ce type d'appareil permet l'observation des échantillons, avec un grandissement qui varie de 5 à 1000. Les micrographies ont été acquises numériquement à l'aide d'une caméra CDD. Les images sont observées et enregistrées aussi à l'aide d'un PC connecté



Figure (III.4). Microscopie optique utilisé.

III.2. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Le traitement de cémentation et de nitruration conduit à l'établissement d'une couche durcie dans la zone superficielle des pièces les rendant ainsi plus aptes à résister à l'usure et à la corrosion. Comparée aux autres traitements thermochimiques de durcissement, la nitruration présente l'avantage de ne pas modifier que très faiblement les géométries et l'état de surface des matériaux [1- 3].

De manière générale, quel que soit le procédé utilisé, le traitement de cémentation et de nitruration se caractérisent par la diffusion respectivement du carbone et de l'azote des deux milieux ou l'enceintes des deux fours à partir de la surface vers le cœur des matériaux qui sont des différents types d'acier et par la formation des couches de carbure et de nitrures de fer dans les régions superficielles des aciers.

Les couches superficielles se forment après une période d'incubation et des températures appropriées. Pour le cas de cémentation, la température moyenne du traitement prend une moyenne de 950°C alors pour le cas de nitruration la température moyenne devient à peu près 570°C.

La température du chauffage pour les deux traitements dépend aussi de la concentration des éléments secondaires du carbone et de l'azote. Pour ceci, le choix du paramètre de température pourra être déterminé par les diagrammes binaires fer-carbone et fer-azote sans tenir compte le paramètre du temps de chauffage qui en relation avec l'épaisseur des aciers transformés en carbure ou en nitrure.

Dans ce chapitre, les résultats obtenus des deux traitements seront présentés. Dans un premier temps, nous discuterons les résultats apportés par l'analyse métallographique. Nous examinerons ensuite les résultats obtenus concernant l'épaisseur des couches de cémentation obtenues par l'appareil de mesure utilisée au niveau de l'unité d'algal et confirmé par analyse métallographique.

Notre travail focalise sur l'effet de la nature de l'acier sur la diffusion du carbone et l'azote ainsi la précipitation de carbures et de nitrures de fer formés au cours de cémentation et de nitruration. Pour rappeler que les types d'aciers utilisés au cours de ce travail ont des compositions chimiques différentes

III.2.1. Microstructure

Les traitements de cémentation, de trempe modifient la structure globale des pièces d'aciers traités. Donc, nous allons analyser les changements structuraux provoqués par ces traitements en utilisant le microscope optique comme moyen d'analyse.

III.2.2. Cémentation de l'acier XC38

Les micrographies de la figure III-5 a et b obtenues par microscopie optique sous un grossissement de X10 représente la coupe transversale de l'acier XC38 cémenté à 930°C pendant 2 et 6 heures, elle montre dans les deux photos, la formation d'une zone superficielle avec des concentrations en carbone très élevés à cause de processus d'enrichissement et de diffusion qui transfert le carbone du ciment à la surface de la pièce.

Puis une zone contient du carbone à cause de processus de diffusion de carbone de la surface vers les couches intérieures, qui se trouve avec des concentrations diminue à mesure que la distance entre l'extrémité et le noyau décroît, c'est la zone de diffusion.

Enfin une zone qui représente le substrat non touché vraiment par l'effet de traitement où il n'y a pas de diffusion du carbone dans cette zone. Pour identifier clairement les types des carbures de fer formés dans la couche de cémentation, l'échantillon doit subir une analyse par diffraction des rayons X, mais d'après l'expérience acquise la zone surfacique a deux régions de combinaison et de diffusion.

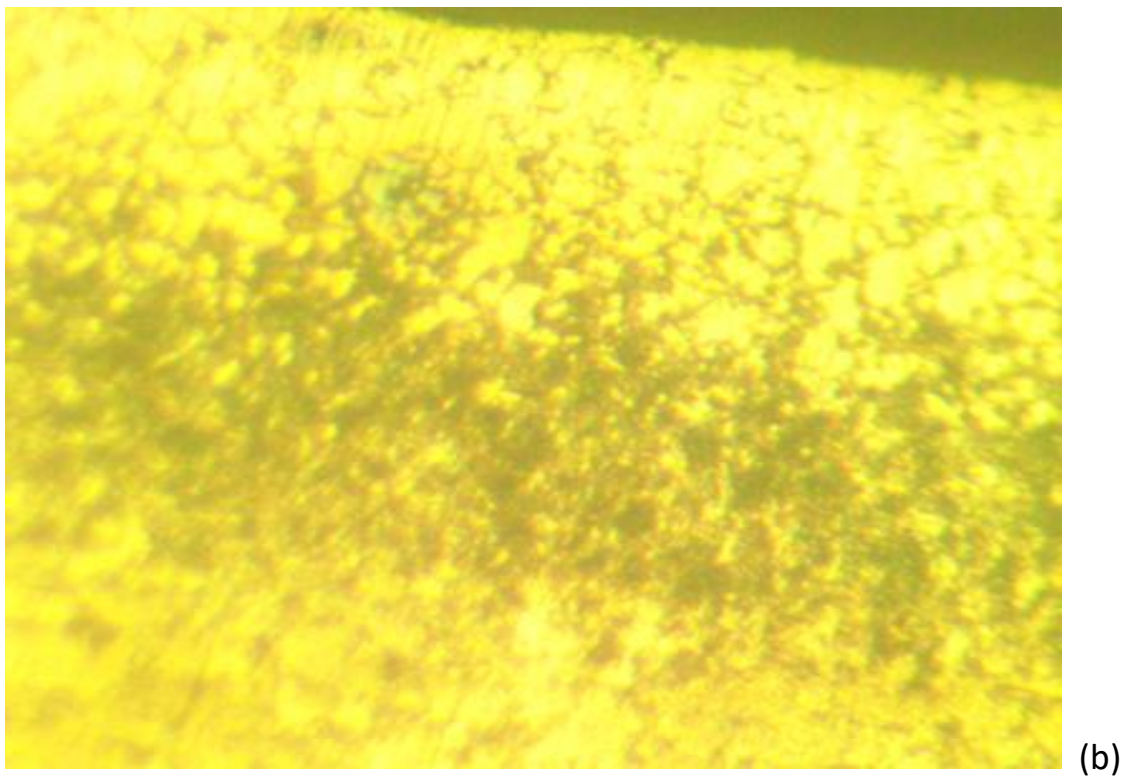
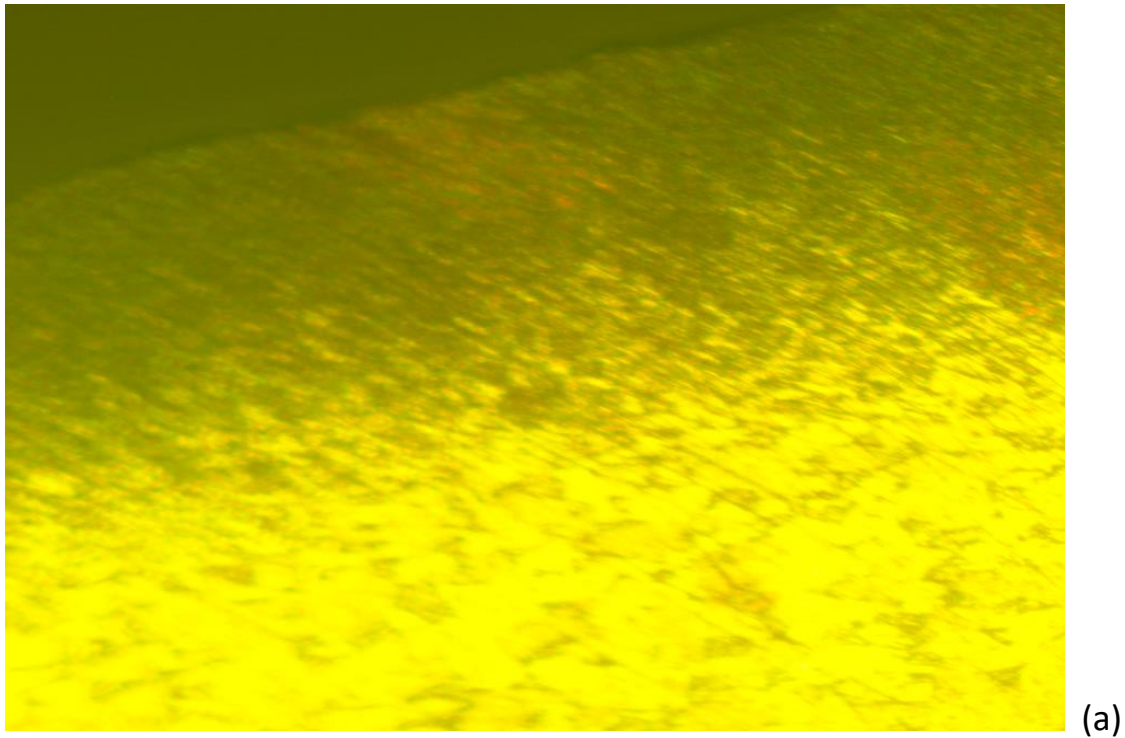


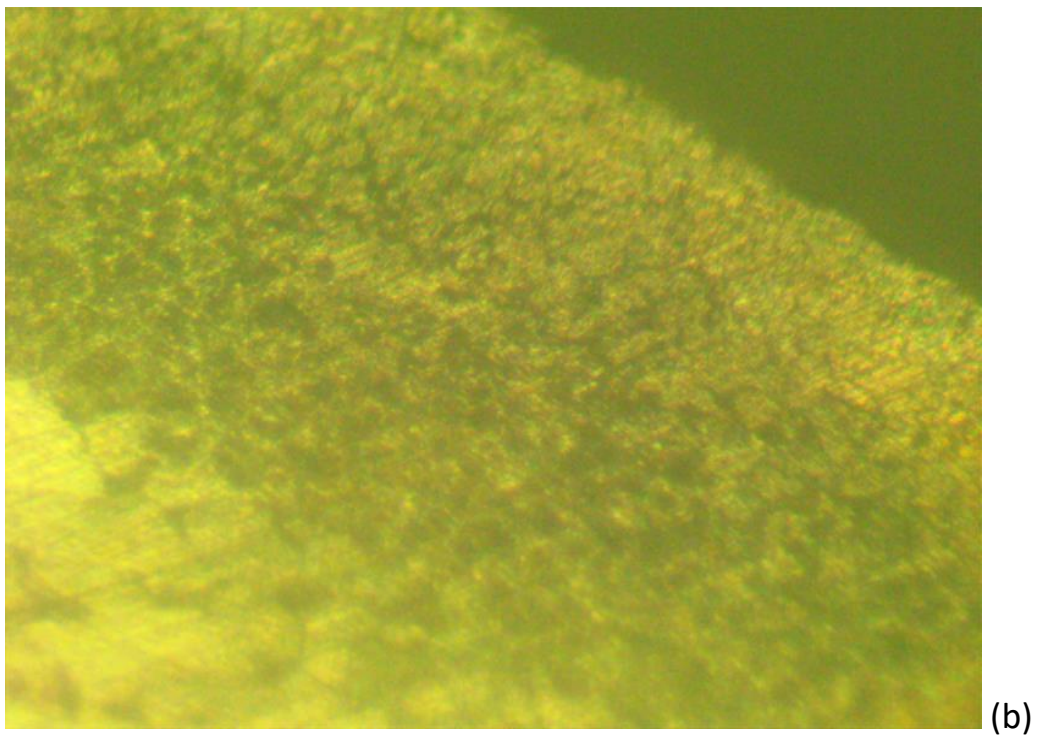
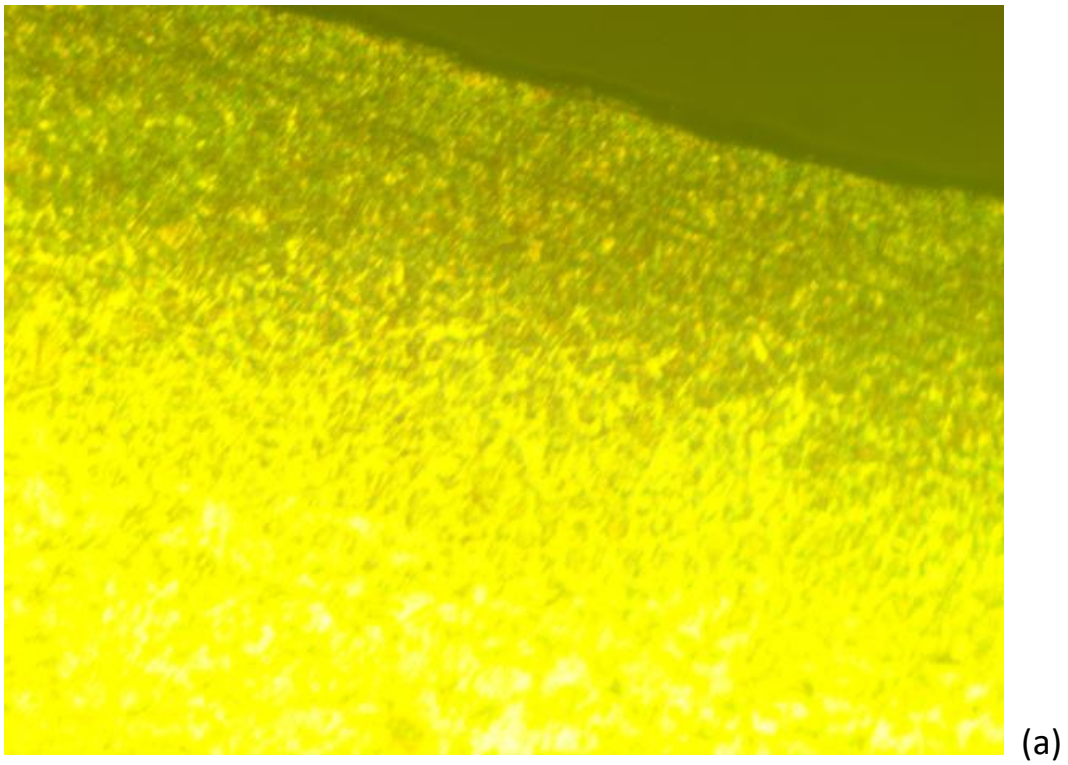
Figure III.5 (a et b) : Microstructure de l'acier XC38 cémentée pour les temps de maintien (a) 2h et (b) 6h.

III.2.3. Cémentation de l'acier 22MC6

La figure III.6 (a et b) présente la microstructure de l'acier 22MC6 cémenté pour temps de maintien de 2 et 4h dans un four électrique à gaz chauffé à la température 950°C. Dans les deux images structurales, elles figurent deux zones distinctes dont l'une correspond à la zone cémentation et l'autre correspond au substrat.

La formation des carbures de fer étant liée à la diffusion du carbone de l'atmosphère environnant dans la matrice de l'acier de base qui mise en solution solide interstitielle dans l'austénite qui par un refroidissement rapide grâce à la trempe effectuée à l'huile puis à l'aire, se transforme à la martensite. Cette dernière initiale riche en carbone (α') qui a une structure quadratique se décompose, dans la première étape, en donnant un epsilon-carbure et la martensite à faible teneur de carbone (α'').

Au point de vue comparative, la microstructure de cet acier présente pour deux de traitement 2 et 4 heures une seule couche sombre dans sa zone de surface par rapport l'acier cémenté XC38 qui présente deux régions blanche et sombre. Nous pouvons dire pour ceci que ce type d'acier cémenté présente une seule zone de diffusion ou la concentration d'azote n'atteint pas vraiment la quantité de carbone qu'elle absorbe par l'autre type d'acier.



La figure III.6 (a et b): Microstructure de l'acier 22MC6 cémenté pour temps de maintien (a) 2h et (b) 4h.

III.2.4. Nitruration de l'acier 42CD4

La figure (III-7) présente la micrographie de la coupe transversale de l'acier 42CD4 nitruré selon les conditions opératoires. La micrographie montre la formation d'une zone superficielle avec des concentrations en azote moyennement élevés à cause de l'aptitude de diffusion de l'élément de l'azote à la surface de la pièce ainsi la précipitation des nitrures de fer formés. A ce propos nous n'avons procéder une analyse structurale à l'aide de DRX pour identifier la nature des phases formées à la surface de l'acier au cours du traitement de nitruration mais probablement et d'après la microstructure la zone superficielle ne présente pas une lisière blanche qui indique la forte concentration d'azote menant à la formation de la phase $Fe_{2,3}N$. Dans ce cas on peut conclure que la couche de nitruration n'a pas eu de forte concentration d'azote et la phase formée dans la couche est de Fe_4N

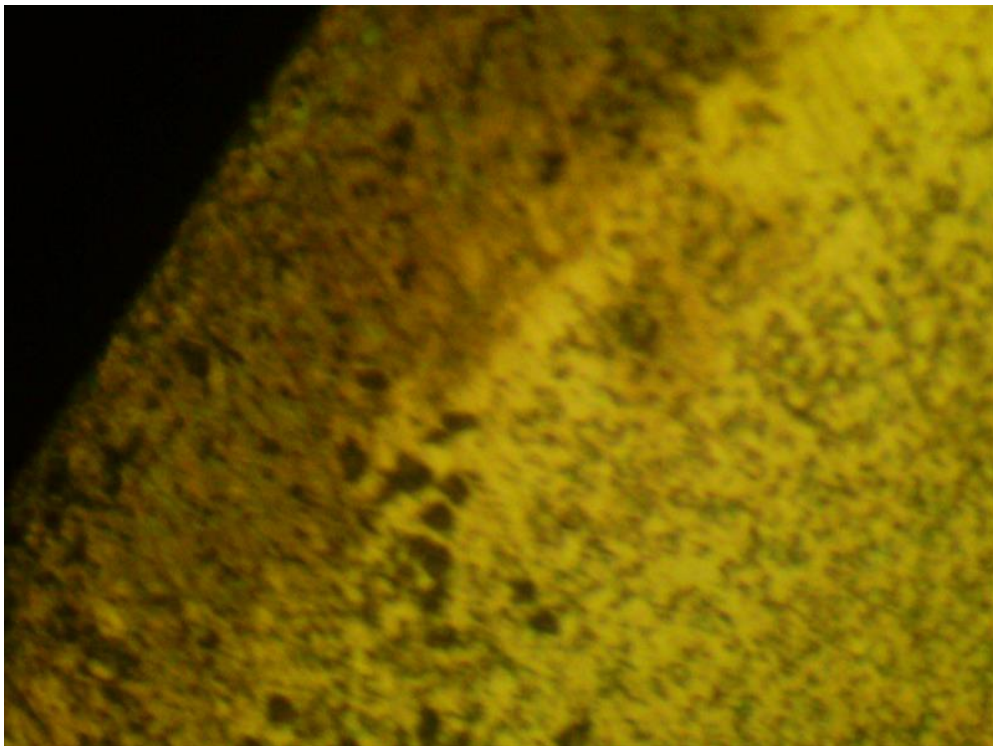


Figure III.7: Microstructure de l'acier 42CD4 nitruré pour temps de maintien 4h.

III.3. Epaisseurs des couches de traitements

Nous examinerons à partir de la microstructure des échantillons, les couches de cémentation et de nitruration obtenus au cours de ces deux traitements thermochimiques. La mesure des profondeurs des couches ou sous couches de cémentation ou de nitruration par observation micrographique permet d'évaluer aussi la quantité diffusante des deux éléments métalliques dans les aciers des substrats. Pour l'acier XC38 cémenté pour un temps de 6h présentant trois zones distinctes a au totale une épaisseur des deux sous couches beaucoup plus élevé à celle de l'échantillon cémenté pour une période de 2h. Presque la même chose au point de vue de l'épaisseur pour l'acier 22MC6 qui présente une seule couche de cémentation pour les deux temps de traitement. La couche de cémentation de ce type d'acier pour un temps de 4 est plus élevée qu'à ce traité pour une période de 4h. Nous remarquons au point de vue général que la couche de cémentation ou de nitruration augmente proportionnellement avec le temps de traitement.

III.4. Conclusion

Nous avons présenté, dans ce troisième chapitre, les diverses techniques utilisées pour réaliser le traitement de cémentation et décrire les moyens de caractérisation pour faire l'étude des propriétés des dépôts correspondants. Ce chapitre décrit aussi la présentation des résultats ainsi la description de ces analyses qui touche dans cette étude l'analyse métallographique des sections transversales des échantillons des aciers traités par cémentation et nitruration.

Conclusion

générale

Conclusion générale

L'objectif des traitements thermochimiques est d'augmenter les propriétés mécaniques et chimiques des zones superficielles des matériaux notamment les aciers contre l'usure et la corrosion. Cette famille de traitement est caractérisée par l'incorporation des éléments légers non métalliques tel que le carbone et l'azote dans la zone des matériaux à traiter pour des temps et températures de chauffages généralement élevées.

La cémentation et la nitruration des aciers ont pour conséquence la formation d'une couche de combinaison en surface reposant sur une couche de diffusion. Les propriétés d'usage de l'acier traité dépendent fortement de la microstructure de la zone constituée de deux couches précédentes. La microstructure des aciers traités est caractérisée généralement par des examens micrographiques, par diffraction des rayons X et par des tests d'indentation notamment la dureté.

Pour ce travail, on procède une étude de caractérisation microstructurale sur des aciers qui ont été cémentés et nitrurés auparavant. A partir de ce type de caractérisation préliminaire, les couches de cémentation et de nitruration ont été clairement observés. Comme conclusion, le temps de traitement influe sur la structure et l'épaisseur des obtenues par ces traitement. L'épaisseur de la couche de carbures ou de nitrures de fer augmente avec l'augmentation du temps de traitement

Références bibliographiques

- 1/ Mémoire AZOUZ AHMED / [Effet De La Nature De L'acier Sur Un Traitement De Cémentation] / Master / Génie Mécanique/ Option : Productique/ Université De M'sila/2015 / 2016.

- 2/ Mémoire SAHRAOUI NABIL [Etude d'élaboration et Caractérisation des Composés métalliques revêtant Les acier] / Master/GENIE MECANIQUE / OPTION : PRODUCTIQUE / Université De M'sila/2016 / 2017.

- 3/ SAID BENSAADA / [Traitements Thermiques, Classification Et Désignation Des Aciers Et Fontes].

- 4/ Mémoire HIRECHE AHMED / [étude de la cinétique des couches borurées par poudre et étude de leur résistance à l'usure] / mémoire de magister/ spécialité : construction mécanique/ université SAAD DAHLEB de blida 2004/2005.

- 5/ MEMOIRE ATHMANI Moussa [Amélioration Des Propriétés De Surface D'un Acier A Outils De Travail A Chaud Par Des Traitements Thermiques Et Thermochimiques (Cémentation)] / MAGISTER / Département De Métallurgie Et Génie Des Matériaux / UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA / 2010/2011