

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département génie mécanique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : génie mécanique

Spécialité : génie des matériaux

Par :

- **Djebrani Adel**
- **Hadjou Tayeb**

Intitulé

Caractérisation des couches de cémentation déposées sur l'acier XC 38

Soutenu le :

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>Dr. Raouache Elhadj</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Dr. Djendel Mokhtar</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Dr. Boubaaya Rabah</i>	<i>MCB</i>	<i>Co-encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Pr. Daoud Salah</i>	<i>Prof</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence de traitement thermochimique par cémentation en caisse sur les propriétés mécaniques et microstructurales de l'acier XC38. Les moyens de caractérisation utilisés lors de cette étude est : l'analyse métallographique où l'échantillon ont été examinés par la microscopie optique et interférométrie microdureté Vickers pour les mesures de micro-dureté pour caractériser la couche de cémentation formées sur le substrat de l'échantillon et la comparé avec les propriétés avant la cémentation. Les résultats obtenus ont montrés que la couche superficielle est un acier très carburé de dureté plus élevée que la dureté du substrat s'étend sur quelques millimètres de profondeur dépend de conditions de traitement et de la nuance de l'acier utilisé.

Mots clés : Traitement thermochimique, Cémentation, micro-dureté, Observations microscopiques

ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير المعالجة الحرارية الكيميائية عن طريق الكربنة على الخواص الميكانيكية والهيكليّة الدقيقة لصلب XC38. وسائل التوصيف المستخدمة خلال هذه الدراسة هي: التحليل المعدني حيث تم فحص العينات بالمجهر الضوئي وجهاز قياس الصلابة لتوصيف طبقة التدعيم المتكونة على ركيزة العينة ومقارنتها بالخصائص قبل الكربنة. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن الطبقة السطحية من الفولاذ تحتوي على نسبة عالية من الكربون وذات صلابة أعلى من صلابة الركيزة وتمتد على عمق بضعة ملليمترات وتعتمد على ظروف المعالجة ونوع الفولاذ المستخدم.

الكلمات المفتاحية: المعالجة الحرارية الكيميائية، الكربنة، الصلابة الدقيقة، الملاحظات الميكروسكوبية.

Abstract

The objective of this work is to study the influence of thermochemical treatment by case carburizing on the mechanical and microstructural properties of XC38 steel. The means of characterization used during this study is: metallographic analysis where the sample were examined by optical microscopy and Vickers microhardness interferometric for micro-hardness measurements to characterize the cementation layer formed on the substrate of the sample and compared it with the properties before carburizing. The results obtained showed that the surface layer is a much-carburized steel of higher hardness than the hardness of the substrate extends over a few millimeters in depth depends on the treatment conditions and the grade of the steel used.

Keywords: Thermochemical treatment, Cementation, micro-hardness, Microscopic observations.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, nous saisissons cette occasion pour exprimerons nos vifs remerciements à toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail

Nous remerciant tout d'abord le bon dieu de m'avoir donné la force, la volonté et la patience pour l'élaboration de notre travail

Nous remerciant également notre encadreur Monsieur Djendel.M et monsieur BOUBAAYA.R qui nous a encadrées avec patience durant la réalisation de ce travail de fin d'études. Ces conseils, ces encouragements et sa disponibilité nous ont été bien utile, notamment pour la rédaction de ce projet.

Nous remercîments s'adressent aussi en particulier aux personnels de laboratoire de RDM et SDM au niveau de département de génie mécanique de Laghouat qui nous aussi aidé en nous donnant des informations cruciales

Nous exprimons également notre gratitude aux membres du jury, qui nous ont honorés en acceptant de juger ce travail.

Enfin nous tenons à remercier sincèrement l'ensemble du corps enseignant de l'université de BBA - département de génie mécanique.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail:

A Mon Père ET ma Mère

Sans qui je ne serais jamais arrivée à ce stade là.

*Pour leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse ET leur
présence dans Les moments les plus difficiles.*

*Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant
qu'ils seront toujours fiers de moi*

A mes sœurs, A toute ma famille chacun à son nom.

A tous mes amis.

A mon cher encadreur, Dr. Djendel. M

et à mon cher co-encadreur Dr. Boubaaya .R

*A Tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite
de ce travail.*

Liste des Tableaux

Chapitre I

Tableau	Titre	page
Tableau I.1	Classification des aciers suivant la composition chimique	08
Tableau I.2	Classification des aciers alliés suivant la composition chimique	08
Tableau I.3	Les éléments d'alliages des aciers alliés	08
Tableau I.4	Les éléments d'alliages des aciers non alliés	9
Tableau I.5	Les classes d'aciers à outils	10

Chapitre II

Tableau	Titre	page
Tableau .II.1	Épaisseur de la couche de cémentation en fonction de temps	20
Tableau .II.2	Types aciers de cémentation	23

Chapitre III

Tableau	Titre	page
Tableau .III.1	Compositions chimiques en % de l'acier XC 38	27
Tableau .III.2	Caractéristiques mécanique de l'acier XC38	28

Chapitre IV

Tableau	Titre	page
Tableau IV.1	Résultats des essais de micro-dureté avant et après la Cémentation	40

Listes des figures

Chapitre I

Figures	Titre	page
Figure I.1.	Méthodes d'élaboration de l'acier	02
Figure I.2	Structure cristalline cubique centrée	04
Figure I.3.	Structure cristalline cubique à face centrée	04
Figure I.4	Diagramme de phase fer-carbone	05

Chapitre II

Figures	Titre	page
Figure II.1.	Cycle des traitements thermiques classiques	12
Figure II.2	Cycle thermique de trempe	13
Figure II.3.	Cycle thermique de revenu	14
Figure II.4	Cycle thermique du recuit	15
Figure II.5	Variation de la teneur en carbone, microstructure après refroidissement lent et dureté (après trempe) en profondeur de la couche cémentée	17

Chapitre III

Figures	Titre	page
Figure III.1.	Les échantillons de l'acier XC38	28
Figure III.2	Micrographie optique de la surface non traitée de l'acier XC 38	29
Figure III.3.	Fours électrique réglé à température 1200 °C	29
Figure III.4	Schéma du dispositif (échantillon, ciment, creuset)	30
Figure III.5	Poudre de ciment dans le creuset	30
Figure III.6	Recouvrement le creuset avec l'argile	31
Figure III.7	Echantillon dans la résine thermodurcissable	32
Figure III.8	Polisseuse électrique	33
Figure III.9	Microscope Métallographique Optique	34
Figure III.10	a) Pénétrateur, (b) Empreinte laissée par le pénétrateur	35
Figure III.11	Duromètre DM2D	36

Chapitre IV

Figures	Titre	page
Figure IV.1	Micrographie de L'échantillon de l'acier XC38 à l'état brut	38
Figure IV.2	Micrographie de l'échantillon après le traitement de cémentation	39
Figure IV.3	Courbe comparative de dureté à l'état brute et après traitement de cémentation	41

Introduction Générale	01
Chapitre I : Synthèse bibliographique sur les aciers	02
I.1. Introduction	02
I.2. Méthodes d'élaboration de L'acier	02
I.3. Propriétés physiques et technologiques de l'acier	03
I.4. Structure cristalline de l'acier	03
I.5. Diagramme d'équilibre Fer-Carbone	04
I.6. Les différentes phases dans les aciers	05
I.6.1. Transformations en conditions d'équilibre	05
I.6.2. Transformations en conditions hors d'équilibre	06
I.7. Les différentes phases du système Fer-Carbone	07
I.8. Classification de L'aciers	07
I.8.1. Classification selon leur composition chimique	08
I.8.2. Classification par le mode d'emploi	09
Chapitre II : Traitements thermique & Traitements thermochimique des aciers	11
II.1. Traitements thermiques classiques des aciers	11
II.1.1. Introduction	11
II.1.2. Procédés des traitements thermiques	11
II.1.2.1. La trempe	12
II.1.2.2. Le revenu	13
II.1.2.3. Le recuit	14
II.2. Traitements thermochimiques des aciers	15
II.2.1 La cémentation	16
II.2.1.1. Mécanisme de la formation et structure de la couche cémentée	16
II.2.1.2. Techniques de cémentation	19
II.2.1.2.a. Cémentation par ciment solide (en caisse)	19

II.2.1.2.b. Cémentation gazeuse	20
II.2.1.2.c. Cémentation par ciment liquide	22
II.2.1.3. Traitement thermique de l'acier après cémentation	23
II.2.1.4. Aciers de cémentation	24
II.2.2. La Nitruration	25
II.2.3. Carbonitruration	25
Chapitre III : Matériaux et procédures expérimentales	27
III.1. Introduction	27
III.2. Matériaux utilisé	27
III.2.1. Composition chimique de l'acier XC 38	27
III.2.2. Domaine d'application	28
III.3. Procédure expérimentale	28
III.3.1. Préparation des échantillons pour la cémentation	28
III.3.2. Technique de cémentation	29
III.3.3. Préparation métallographiques	32
III.3.3.1. Découpage	32
III.3.3.2. Enrobage	32
III.3.3.3. Polissage	32
III.3.3.4. Attaque chimique	33
III.4. Techniques de caractérisation	33
III.4.1. Observations microscopiques	34
III.4.2. Essais de micro-dureté	34
Chapitre IV : Résultats et discussions	37
IV.1. Introduction	37
IV.2. Observations microscopiques Morphologie	37
IV.3. Mesures de micro-dureté	39
Conclusion	42
Références Bibliographique	43

Introduction générale

Introduction générale

Les traitements thermochimiques ou de surface concernent une vaste famille de procédés dont l'objectif est d'augmenter les performances mécaniques des pièces traitées. Ces procédés conduisent à une transformation chimique par diffusion de la zone superficielle des pièces traitées, où la masse est modifiée, mais les dimensions sont inchangées.

Parmi les différents traitements thermochimiques, la cémentation tend actuellement à remplacer les procédés les plus couramment utilisés comme l'implantation des couches minces ou revêtements. Cette technique présente certains avantages par rapport aux autres. Elle offre un traitement simple et efficace pour les outils contre l'usure et la corrosion et consiste à plonger les pièces dans un milieu susceptible de céder du carbone à leurs surfaces, à des températures propices à la diffusion des atomes de carbone vers le cœur des pièces.

Le but de notre travail consiste à l'étude de l'influence de traitement de surface par la cémentation sur :

- La micro-dureté (essai Vickers) à la surface et au cœur de la pièce.
- La microstructure des échantillons visualisés par microscope optique ou par MEB.

Le travail de cette étude se divise en deux parties théorique et expérimentale regroupées en quatre chapitres :

- Le premier chapitre concerne la recherche bibliographique sur les aciers.
- Le deuxième chapitre est une bibliographie générale sur les traitements thermique et traitements thermochimique.
- Le troisième chapitre, il est réservé pour le matériau utilisé et les moyens de caractérisations microstructural et mécanique des échantillons.
- Pour le quatrième chapitre traite les résultats obtenus. Ainsi que les interprétations.

Enfin. Une conclusion générale récapitule l'ensemble du travail et liste de références bibliographiques

Chapitre I

Synthèse bibliographique sur les aciers

I.1. Introduction

L'acier est un alliage de fer et de carbone, dans des proportions comprises entre 0,02 % et 2 % en masse pour le carbone. Les alliages fer-carbone contenant plus de 2% de carbone constituent les fontes. De plus, la composition de l'acier comprend également d'autres métaux, éléments ou inclusions non métalliques qui peuvent affecter ses propriétés. On peut également y ajouter des quantités plus importantes d'éléments d'alliage ; il est considéré alors comme un acier allié [1].

I.2. Méthodes d'élaboration de L'acier

Deux méthodes sont généralement utilisées pour produire l'alliage – un haut fourneau et un four à arc électrique. Dans la première méthode, on utilise du minerai de fer, de coke avec réduction du carbone dans un convertisseur. La fonte est ensuite soumise à l'affinage, c'est-à-dire à une oxydation sélective éliminant les composants indésirables, y compris le laitier. Le mélange est coulé et, par exemple, laminé pour obtenir des produits en acier tels que des barres, des tôles ou des tuyaux. Par contre, dans un four à arc électrique l'acier produit est appelé l'acier de recyclage ou l'acier électrique. Il est fondu à l'aide de l'électricité circulant entre le matériau chargé et les électrodes. En raison de la durabilité élevée de l'acier, la quantité de ferraille pouvant être traitée dans les fours à arc est relativement faible. Cela se traduit par une utilisation plus fréquente de la méthode des hauts fourneaux.

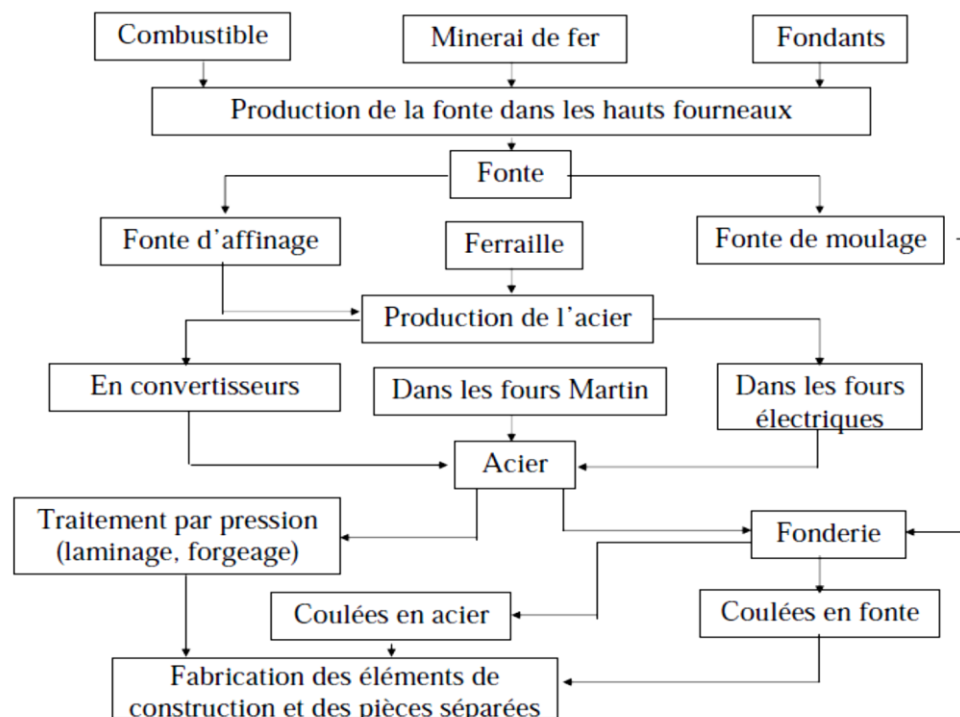


Figure I.1. Méthodes d'élaboration de l'acier

I.3. Propriétés physiques et technologiques de l'acier

Comme tout matériau, l'acier se caractérise par ses divers paramètres, importants pour une industrie spécifique. Dans ce chapitre, nous nous concentrerons sur les caractéristiques pertinentes à la construction, car elles contiennent les points les plus importants. Les voici :

- **Élasticité** : capacité d'un matériau à retrouver sa forme d'origine après qu'il n'est plus soumis à la force provoquant la déformation. La valeur limite d'élasticité est également souvent donnée. Après l'avoir dépassée, le matériau se déforme définitivement et ne reprend pas sa forme antérieure.
- **Résistance à la traction** : traduit la notion de résistance à la déformation (limite élastique) et la notion de résistance à la rupture en traction.
- **Plasticité** : préservation d'une forme déformée résultant de l'action d'un étirement. Cette caractéristique représente le point – la notion de limite d'élasticité – à partir duquel la pièce est déformée de manière permanente.
- **Ténacité** : la capacité d'acier à résister et garder ses propriétés pendant l'emboutissage, le pliage, le redressage et d'autres types de traitement.
- **Résistance aux chocs** : résistance aux charges dynamiques
- **Dureté** : la force à laquelle l'acier s'oppose lorsqu'il subit la force des matériaux plus durs que lui.
- **Soudabilité** : la capacité de créer des connexions permanentes par soudage. Selon la nuance d'alliage, les méthodes MAG, MIG, MIG / MAG et TIG peuvent être utilisées.

I.4. Structure cristalline de l'acier

Le fer, principal constituant de l'acier, a comme caractéristique de posséder deux structures cristallines différentes : le fer α (ferrite) et le fer γ (austénite). Ces changements de structure successifs en fonction de la température constituent les transformations allotropiques du fer [2]. Tous les atomes de fer sont sphériques et jointifs. Ils se présentent sous forme d'empilements réguliers dont le motif de base est la maille. Ces empilements prennent le nom de réseau.

a) Le réseau Cubique Centré (C.C)

En dessous de 906 °C, le fer possède une structure cristalline cubique centrée comme le montre la figure I.1, où les atomes sont disposés dans des couches identiques superposés. La maille de cet empilement est le cube centré. Le fer porte le nom de fer α et correspond à la phase α .

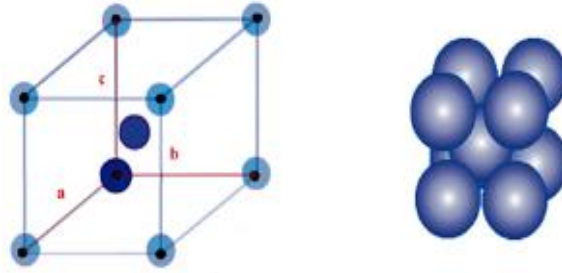


Figure I.2. Structure cristalline cubique centrée

b) Le réseau Cubique à Faces Centrées (C.F.C)

Dans l'intervalle de températures comprises entre 1392°C et 1539°C, le fer possède une structure à maille cubique à faces centrées comme le montre la figure I.2, où l'arrangement des atomes de fer consiste également en couches identiques superposés. Dans ce cas, la maille est un cube à faces centrées. Le fer porte alors le nom de fer γ et correspond à la phase γ .

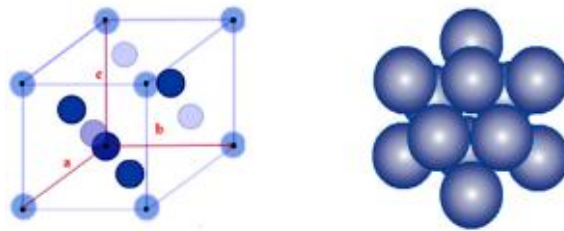


Figure I.3. Structure cristalline cubique à face centrée [6].

I.5. Diagramme d'équilibre Fer-Carbone

Le diagramme fer-carbone représenté sur la figure 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 fonte, en dessous de cette concentration on parle d'acier. Ce diagramme permet de visualiser la forme 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) [3].

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 :

En dessous de 721°C et au-dessus de 1394°C, le fer (fer α) à une structure cristalline cubique à corps centré (structure cristalline à température ambiante). Il ne dissout pratiquement pas le carbone, il est doux, très malléable.

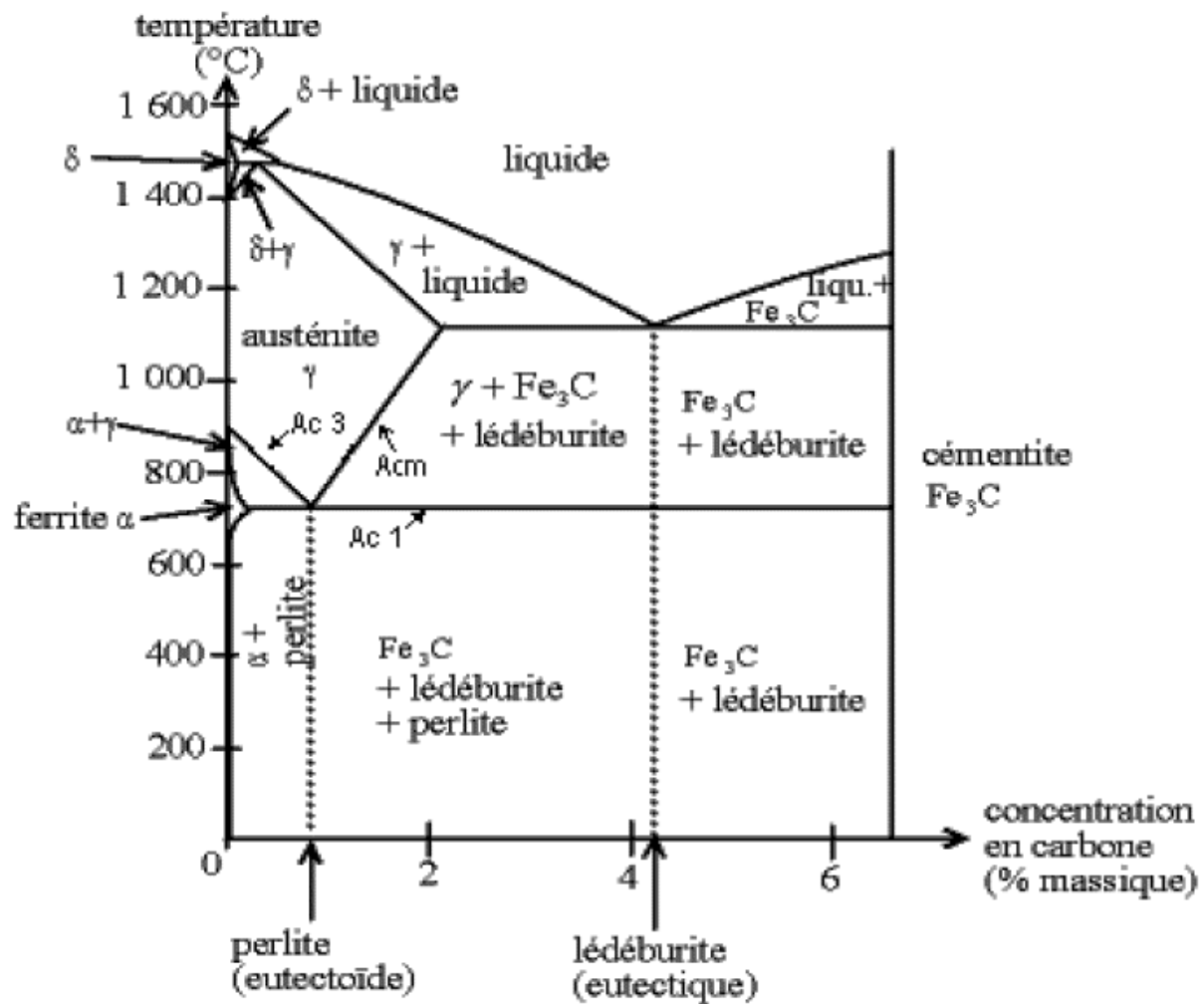


Figure I.4. Diagramme de phase fer-carbone

I.6. Les différentes phases dans les aciers

I.6.1. Transformations en conditions d'équilibre

Ce sont les transformations décrites par le diagramme d'équilibre fer-carbone (Figure I-1), ce diagramme décrit les différents états du mélange fer + carbone selon la proportion du fer et du carbone dans le mélange.

Dans la partie qui concerne les aciers on constate ce qui suit :

- A haute température, le réseau cristallin du fer est cubique à faces centrées (fer γ) et la solubilité du carbone peut alors atteindre environ 2 % en poids ;
- A basse température, le réseau cristallin du fer est cubique centré (fer α) et la solubilité du carbone est alors très faible (elle ne dépasse pas 0.02 %). > Le carbone change d'état avec les transformations allotropiques ; en solution solide dans le fer à haute température, il précipite à l'état d'équilibre à la température ambiante sous forme de perlite. On appelle hypoeutectoïde un acier avec une teneur en carbone inférieure à 0.77 % qui, transformé dans des conditions proches des conditions d'équilibre, constitué de grains de ferite et de perlite. On appelle hypereutectoïde un acier avec une teneur en carbone supérieure à 0.77 % qui transformé dans des conditions proches des conditions d'équilibre, est constitué de cémentite (Fe_3C) et de perlite. On désigne par Ac1 et Ac3 les limites, respectivement inférieure et supérieure, de l'intervalle de température dans lequel, au cours d'un chauffage lent (150 à 300 °C / heure), se fait la transformation des aciers hypoeutectoïdes et par Ac1 et AcM ces même limites pour un acier hypereutectoïde.

I.6.2. Transformations en conditions hors d'équilibre

Le diagramme d'équilibre donne les transformations, uniquement, dans des conditions de chauffage ou de refroidissement très lents (conditions d'équilibres). Les conditions pratiques dans lesquels s'effectuent ces transformations sont des conditions industrielles. Ces transformations sont décrites par des diagrammes dits de transformation au chauffage et au refroidissement.

Une accélération de la vitesse de refroidissement modifie largement le processus de la transformation $\gamma \rightarrow \alpha$:

- Les points de transformation A3 et A1 sont abaissés ;
- Le point eutectoïde est déplacé vers de plus basses concentrations en carbone ; pour une même teneur en carbone la quantité de perlite augmente ;
- La morphologie, la répartition et, dans certaines conditions, la nature des produits de transformation de l'austénite sont modifiées.

Au fur et à mesure que la vitesse de refroidissement croît, les constituantes ferrites et perlite qui se forment à des températures de plus en plus basses, deviennent de plus en plus fines. A la limite, pour des vitesses de refroidissement encore plus élevées, on obtient un agrégat ferrite-carbure, dont la morphologie est très différente de celle de la perlite, que l'on appelle bainite. Lorsque l'acier est refroidi encore plus rapidement, à une vitesse supérieure à une

certaine vitesse critique dite « vitesse critique de trempe », l'austénite se transforme en martensite, phase à structure cubique centrée dans laquelle le carbone reste en solution, et qui est appelée martensite. La transformation martensitique se produit à partir d'une température M_s (Martensite Start) et jusqu'à une température M_f (Martensite finish) le tracé des diagrammes de transformations en conditions isothermes (TTT) et en refroidissement continu (TRC), permet d'étudier plus précisément la cinétique des transformations de l'austénite.

I.7. Les différentes phases du système Fer-Carbone

a. La ferrite α : Solution solide d'insertion de carbone dans le Fer α , à structure cubique centrée. Elle est relativement tendre ($HB \approx 80$), peu tenace ($R \approx 300$ MPa), mais très ductile ($A \approx 35\%$).

b. La ferrite δ : Solution d'insertion de quelques atomes de carbone dans le fer δ . Sa structure est cubique centrée CC. Il se forme à la marge 1394-1538 °C et renferme 0.11% de carbone.

c. L'austénite γ : Solution solide d'insertion d'atome de carbone dans le Fer γ , à structure cubique à face centrée, la quantité de carbone atteint $\approx 2\%$ C à 1145 °C. Il est stable qu'à haute température. L'austénite est très ductile.

d. La cémentite : (Carbone de fer Fe_3C) : La cémentite est un composé chimiquement défini CCD . Sa décomposition égale à 6,67% en masse de carbone, en état métastable. La cémentite se présente sous forme de lamelles ou de globules dans la perlite ou d'aiguilles dans les fontes blanche. Elle est très dure et très fragile.

e. La perlite : Agrégat eutectoïde ayant une structure de lamelles alternées de ferrite et de cémentite. Ce constituant contient 0.8 % de carbone, La perlite est dure ($HB \approx 200$), résistante ($R_m \approx 850$ MPa) et assez ductile ($A\% \approx 10$) [4].

I.8. Classification de L'aciers

La classification de l'acier est due à de nombreux facteurs. L'un des plus importants est la composition chimique. À cet égard, deux principaux types sont distingués : les aciers non alliés et les aciers alliés. Ce qui les différencie, c'est la teneur en adjuvants utilisés pour améliorer ou obtenir de nouvelles propriétés. Une autre division couramment utilisée est l'emploi de l'acier. Ici on distingue, entre autres, aciers de construction, aciers à outils ou aciers spéciaux, y compris résistant à la corrosion. On s'intéresse à quelques classifications :

I.8.1. Classification selon leur composition chimique

D'après la composition chimique, les aciers sont divisés en aciers alliés et aciers non alliés.

Tableau I.1. Classification des aciers suivant la composition chimique.

Classification par dureté et emploi	Acier non allié							Acier allié			
	S185	E295	E360	C22	C40	C60	C100	X30Cr13	X6CrNi18-09	25CrMo4	35NiCrMo16
Acier extra dur											
Acier dur											
Acier mi-dur											
Acier doux											
Pliage à froid											
Soudage											
Choc											
Inoxydable											

a- Aciers alliés

Les aciers alliés sont un mélange de différents métaux, tels que le nickel, le cuivre et l'aluminium. Ceux-ci ont tendance à être moins chers, plus résistants à la corrosion et sont préférés pour certaines pièces automobiles, pipelines, coques de navires et projets mécaniques. Les caractéristiques mécaniques des aciers alliés dépendent donc de la concentration des éléments qu'ils contiennent. La composition est variable suivant l'emploi, les éléments alliés sont en proportion variant généralement entre 0 et 5% [10].

Tableau I.2. Classification des aciers alliés suivant la composition chimique.

Eléments alliés	Ration (%)	Observations
Carbone	0.2 - 0.7	
Silicium	0.1 – 0.7 2 – 4 (aciers spéciaux)	Ressorts Tôles de transfo.
Magnésium	0.3 - 0.8 12 – 14 (aciers très durs)	Voie ferrées
S, P, Cu, Ni, Cr, V, Molybdène	< 0.1	-----

Tableau I.3. Les éléments d'alliages des aciers alliés

Eléments d'alliage	Facteur	Eléments d'alliage	Facteur
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4	Ce	100

b- Aciers non alliés

Les aciers non alliés sont également appelés aciers au carbone. Ils se caractérisent par une valeur minimale de teneur en éléments d'addition. Dans l'ensemble, on en distingue trois sous-types : acier à faible, moyenne et forte teneur en carbone, avec une faible teneur d'environ 0.3 % en carbone, moyenne 0.3 à 0,60 % et élevée jusqu'à 0,6% affecte la résistance à la coupe et à la flexion de cet alliage. Par conséquent, il est idéal pour la production de ressorts par exemple. Le nom lui-même dérive du fait que les aciers contiennent une très petite quantité d'autres éléments d'alliage. Les aciers au carbone représentent environ 90 % de toute la production d'acier. Dans le tableau I.4 vous trouverez les éléments d'alliages des aciers non alliés.

Tableau I.4. Les éléments d'alliages des aciers non alliés

Eléments d'alliage	Symbole chimique	Symbole AFNOR	Eléments d'alliage	Symbole chimique	Symbole AFNOR	Eléments d'alliage	Symbole chimique	Symbole AFNOR
Aluminium	Al	A	Cobalt	Co	K	Nickel	Ni	N
Antimoine	Sb	R	Cuivre	Cu	U	Niobium	Nb	Nb
Argent	Ag		Etain	Sn	E	Plomb	Pb	Pb
Béryllium	Be	Be	Fer	Fe	Fe	Silicium	Si	S
Bismuth	Bi	Bi	Gallium	Ga	Ga	Strontium	Sr	
Bore	B	B	Lithium	Li	Li	Titane	Ti	T
Cadmium	Cd	Cd	Magnésium	Mg	G	Vanadium	V	V
Cérium	Ce		Manganèse	Mn	M	Zinc	Zn	Zn
Chrome	Cr	C	Molybdène	Mo	D	Zirconium	Zr	Zr

I.8.2. Classification par le mode d'emploi

On distingue les types suivant :

a- Les aciers de construction

Il est utilisé pour réaliser des structures, mais aussi des pièces d'usinage ou pour renforcer d'autres alliages. Il existe plusieurs types d'acier de construction :

- acier de construction à usage général
- acier de construction de qualité
- acier de construction faiblement alliés
- acier de construction de cémentation
- acier de construction pour nitruration
- acier de construction de traitement thermique
- acier de construction à ressort

- acier de construction de décolletage
- acier à roulements
- acier de construction pour tôles de transformateurs

b- Les aciers inoxydables

Les aciers inoxydables sont probablement le type le plus connu sur le marché. Ces aciers sont polis et contiennent au maximum 1,2 % de carbone et généralement environ 10-20 % de chrome, qui est leur principal élément d'alliage. Cette combinaison permet à l'acier d'être résistant à la corrosion et facilement mouillable en différentes formes. Grâce à leur manipulation facile, leur flexibilité et leur qualité, les aciers inoxydables peuvent être utilisés dans les équipements chirurgicaux, domestiques, l'argenterie et même comme revêtement externe pour les bâtiments commerciaux/industriels.

c- Les aciers à outils

L'acier pour outils est connu pour être dur et résistant à la chaleur et aux rayures. Son nom vient du fait qu'ils sont très couramment utilisés pour fabriquer des outils métalliques. Ils sont utilisés dans la fabrication d'instruments (permettant de façonner les matériaux). Les nuances d'aciers à outils sont rangées selon le mode de travail de l'outil, en quatre classes comme le montre le tableau I.4.

Tableau I.5. Les classes d'aciers à outils [11].

Classes	Caractères communs
Aciers à outils au carbone	Aciers d'usage général
Aciers à outils alliés pour travail à froid	Aciers à haut résistance
Aciers à outils pour travail à chaud	Aciers résistant aux chocs thermiques
Aciers rapides	Aciers sur carburés

Chapitre II

Traitements thermique & Traitements thermochimique des aciers

II.1. Traitements thermiques classiques des aciers

II.1.1. Introduction

Le terme "Traitement thermique" désigne des opérations de chauffage et de refroidissement, contrôlés dans le temps, afin de donner à cet acier les caractéristiques mécaniques convenables pour son emploi. Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but :

- A. 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.
- B. De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage.
- C. De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant subit une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage).

II.1.2. 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) :

- AB : L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation (par exemple : AC_3).
- BC : Maintient à une température définie.
- CD : Refroidissement avec une vitesse donnée :
 - lente (dans le four, à l'air).
 - rapide (dans l'huile).
 - Très rapide (dans l'eau).

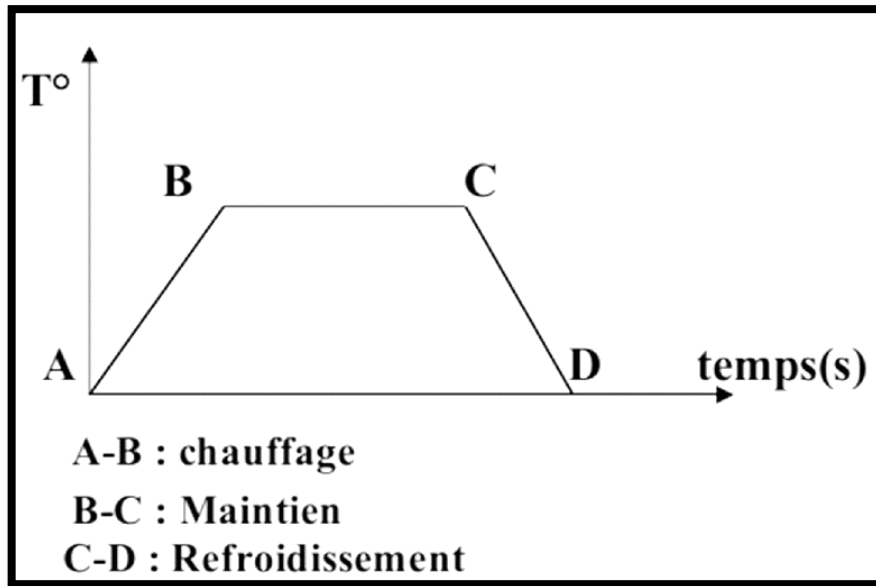


Figure II.1. Cycle des traitements thermiques classiques

Les principaux traitements thermiques sont :

- La Trempe
- Le Revenu
- Le Recuit

II.1.2.1. La trempe

La trempe est un traitement thermique qui donne à l'acier une grande dureté par transformation de l'austénite en martensite, Une trempe se compose de trois phases principales :

(a) Chauffage : Le chauffage se fera à vitesse modérée. La température de Trempe (TT sur le graphe) est spécifique à chaque acier. Elle doit être fournie par le fabricant.

(b) Palier : La température de trempe sera maintenue pendant un court moment, aux alentours d'une minute et un peu plus pour les pièces massives. Le critère majeur est d'avoir une température homogène. Pour les aciers hypereutectoïdes, les carbures ne seront pas forcément dissous, mais cela ne nuit pas à la qualité du résultat. Les carbures non-dissous (logés dans les joints de grain) pourraient même éviter temporairement le grossissement du grain (informations à vérifier). Pour les aciers alliés, il convient de se reporter à la fiche descriptive du fournisseur pour connaître les températures appropriées.

(b) Refroidissement : Le refroidissement devra être rapide et adapté à l'acier. Si le refroidissement est un peu trop lent, on créera de la Bainite. Si le refroidissement est trop lent, l'acier repassera sous forme Ferrite / Perlite / Cémentite.

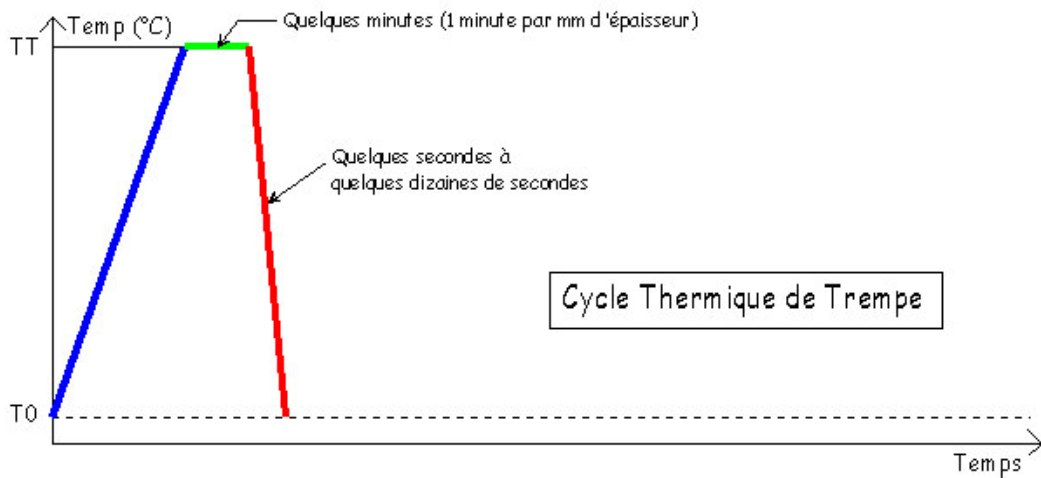


Figure II.2. Cycle thermique de trempe

II.1.2.2. Le revenu

Le revenu est un traitement thermique s'applique aux aciers trempés, il a pour but de rendre l'acier moins fragile. Le revenu est un cycle thermique que subit la pièce, se compose de trois phases principales :

(a) Chauffage : Le chauffage se fera à vitesse modérée. La vitesse n'a pas d'impact sur les résultats. La température de revenu (TR sur le graphe) est spécifique à chaque acier et est choisie en fonction de la dureté finale souhaitée. En général, ces températures sont de l'ordre de 200°C à 250°C.

(b) Palier : La température de revenu sera maintenue pendant un long moment, avec un minimum d'une heure.

(c) Refroidissement : Le refroidissement n'est pas un facteur critique. Il faut toutefois revenir à température ambiante avant de faire le second cycle.

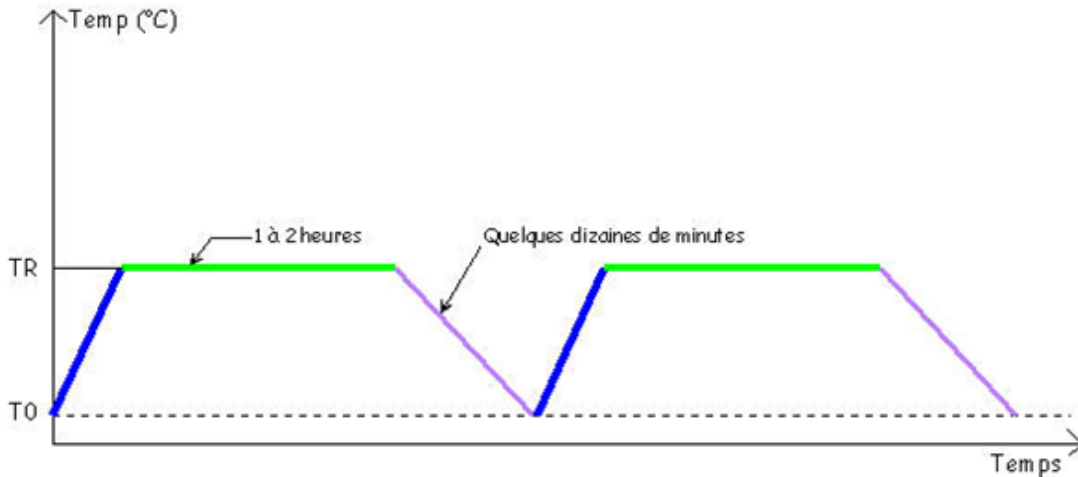


Figure II.3. Cycle thermique de revenu

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

- Revenu de relaxation ou de détente,
- Revenu de structure ou classique,
- Revenu de durcissement.

II.1.2.3. Le recuit

Le recuit annule les effets de la trempe. Le but est de mettre l'acier dans une certaine structure pour permettre l'usinage ou la mise en forme par déformation plastique ou de régénérer la structure. Le cycle thermique que subit la pièce, consistant en un chauffage entre 700°C et 1000°C, puis d'un maintien à température suivi d'un refroidissement lent.

(a) Chauffage : Le chauffage se fera à vitesse modérée. Certains aciers "difficiles" demanderont des paliers intermédiaires ou des vitesses de montée en température précises. En général, cette température est de l'ordre de :

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

(b) Palier : 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.

(c) 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 œuvre, découle de l'expérience acquise avec un acier.

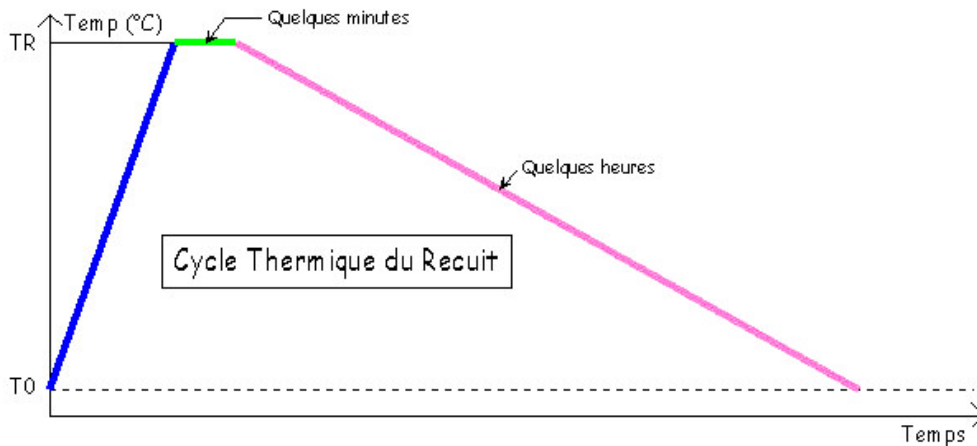


Figure II.4. Cycle thermique du recuit

En pratique, on distingue quatre types élémentaires de recuits :

- Le recuit d'adoucissement
- Le recuit de normalisation
- Le recuit de détente
- Le recuit de diffusion.

II.2. Traitements thermochimiques des aciers

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. 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.2.1. la Cémentation

On appelle cémentation le processus de saturation en carbone de la couche superficielle de l'acier. Le but principal de la cémentation est l'obtention d'une surface dure et résistante à l'usure par enrichissement de la couche superficielle en carbone jusqu'à la concentration de 0.8 à 1.2 % et par trempe ultérieure suivie d'un revenu à basse température. Ce procédé accroît également la limite de fatigue.

La cémentation est appliquée aux aciers à faible teneur en carbone, titrant de 0.1 à 0.18 % C. Pour de grosses pièces on emploie des aciers à une teneur en carbone plus grande variant de 0.2 à 0.3 %. Le choix des aciers est nécessaire pour que le cœur de la pièce non saturé en carbone par cémentation garde une ductilité élevée après trempe.

Les pièces à cémenter sont fournies après usinage qui doit prévoir alors une surépaisseur de rectification de 0.05 à 0.10 mm, ou après finition. Dans de nombreux cas, la cémentation ne porte que sur une partie de la pièce, les parties ne devant pas subir de durcissement étant protégées par un dépôt électrolytique de cuivre (0.02 à 0.04 mm d'épaisseur) ou par des enrobages spéciaux, composés d'un mélange d'argile réfractaire, de sable d'amianté pétris avec du verre soluble, etc. [6].

II.2.1.1. Mécanisme de la formation et structure de la couche cémentée :

La diffusion du carbone dans l'acier n'est possible que lorsque le carbone se trouve à l'état atomique, obtenu, par exemple, par dissociation des gaz contenant du carbone (CO, CH₄, ...). Le carbone atomique absorbé par la surface de l'acier diffuse vers l'intérieur du métal. L'énergie d'activation de la diffusion du carbone dans le fer α atteint 17 à 20 kcal/g. atome, et dans le fer γ , 31 à 32 kcal/g. atome. C'est pourquoi dans la ferrite, la diffusion progresse plus facilement que dans l'austénite. Pourtant, aux températures de l'existence de la ferrite (au-dessous du point A₁), la cémentation ne se fait pas par suite d'une faible solubilité du carbone dans le fer α . La cémentation est réalisée généralement aux températures supérieures au point Ac₃ (920 à 950°C), qui rendent stable l'austénite, dissolvant en quantité le carbone. Pendant la cémentation, les atomes de carbone diffusent dans le réseau du fer γ . Lorsque la limite de saturation de l'austénite en carbone, déterminée par la ligne SE du diagramme Fe-Fe₃C (figure I.8-a), est atteinte, les conditions favorisent la formation à la surface d'une couche de cémentite continue [7].

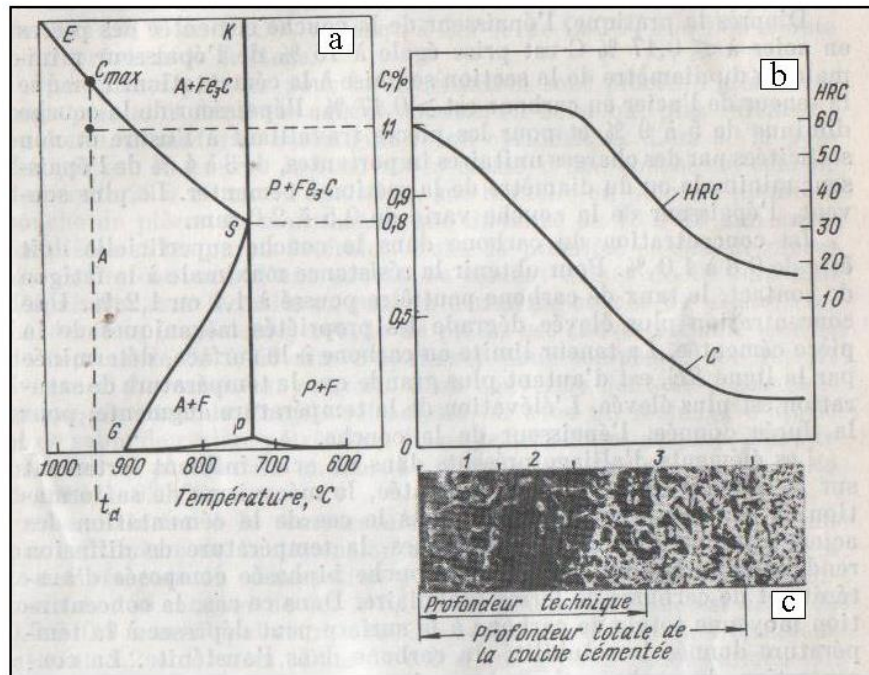


Figure II.5. Variation de la teneur en carbone, microstructure après refroidissement lent et dureté (après trempe) en profondeur de la couche cémentée [6].

Dans les conditions réelles, il est rare qu'on observe la formation d'une couche de cémentite continue à la surface. Dans les conditions courantes la cémentation au-dessus du point Ac_3 ne forme que l'austénite qui se décompose après refroidissement lent en précipitant la ferrite et la cémentite.

La concentration du carbone suivant la profondeur de cémentation (figure I.8-b) varie en diminuant depuis la surface dans le sens du cœur de la pièce. Un refroidissement lent produit dans ces conditions trois zones dans la structure de la couche cémentée (figure I.8-c) :

- 1- Hypereutectoïde constituée de perlite et de cémentite secondaire, formant un réseau suivant l'ancien grain d'austénite ;
- 2- Eutectoïde composée de perlite lamellaire ;
- 3- Hypoeutectoïde constituée de perlite et de ferrite. La quantité de ferrite dans cette dernière zone augmente sans cesse à mesure qu'on s'approche du cœur.

On considère que l'épaisseur de la couche cémentée est égale à la somme des épaisseurs des zones hypereutectoïde, eutectoïde et de la moitié de la zone de transition (hypoeutectoïde) (figure I.8-c). Parfois on admet que l'épaisseur technique de la couche

est celle dont la structure après trempe se compose de martensite (95%) + austénite résiduelle.

D'après la pratique, l'épaisseur de la couche cémentée des pièces en acier ($\% C \leq 0.17$ %) est prise égale à 15 % de l'épaisseur minimale ou du diamètre de la section soumise à la cémentation. Lorsque la teneur de l'acier en carbone est > 0.17 %, l'épaisseur de la couche diminue de 5 à 9 %. Pour les pièces travaillant à l'usure et non sollicitées par des charges unitaires importantes, de 3 à 4 % de l'épaisseur de la couche varie de 0.5 à 2.0mm.

La concentration du carbone dans la couche superficielle doit être de 0.8 à 1.0 %. Pour obtenir la résistance maximale à la fatigue de contact, le taux de carbone peut être poussé à 1.1 ou 1.2 %. Une concentration plus élevée dégrade les propriétés mécaniques de la pièce cémentée. La teneur limite en carbone à la surface, déterminée par la ligne SE du diagramme, est d'autant plus grande que la température de saturation est plus élevée. L'élévation de la température augmente, pour une durée donnée, l'épaisseur de la couche.

Les éléments d'alliage présents dans un acier influent fortement sur la structure de la couche cémentée, le mécanisme de sa formation et la vitesse de diffusion. Dans le cas de la cémentation des aciers alliés en éléments carburigènes, la température de diffusion rend possible la formation d'une couche biphasée composée d'austénite et de carbures de forme globulaire. Dans ce cas, la concentration moyenne totale de carbone à la surface peut dépasser à la température donnée, la solubilité du carbone dans l'austénite. La concentration du carbone dans les aciers contenant les éléments : Cr, Mn, W, Mo ou V peut atteindre 1.8 à 2.0 %.

La majorité des éléments d'alliage exercent une action différente sur le coefficient de diffusion et la concentration du carbone dans la couche périphérique. C'est pourquoi leur influence sur la profondeur de cémentation dépend du facteur qui est dominant. Le chrome et le tungstène diminuent le coefficient de diffusion du carbone dans l'austénite D_γ , car ils augmentent l'énergie d'activation Q . Mais en renforçant la concentration du carbone à la surface, ils augmentent quelque peu la profondeur de cémentation. Le nickel, au contraire, accroît la vitesse de diffusion mais diminue la concentration du carbone à la surface et, donc, la profondeur de cémentation. Le manganèse n'exerce presque aucune action sur le coefficient de diffusion, accroît la concentration du carbone à la surface et augmente donc quelque peu la profondeur de cémentation [6].

II.2.1.2. Techniques de cémentation

Les agents de cémentation peuvent être solides, liquides ou gazeux [6,7].

II.2.1.2.a. Cémentation par ciment solide (en caisse)

L'agent de saturation dans cette opération est un ciment solide, le plus souvent le charbon de bois activé (de bouleau ou de chêne) en grains de 3.5 à 10 mm de diamètre, ainsi que le semi-coke de houille et le coke de tourbe.

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 $CaCO_3$ que l'on ajoute pour prévenir le frittage.

Les pièces prévues pour la cémentation sont placées après décapage préalable dans des caisses soudées en acier ou, plus rarement, en fonte, d'une forme rectangulaire ou cylindrique. Lors de la pose des pièces, on couvre le fond de la caisse d'une couche de ciment damée de 20 à 30 mm d'épaisseur, sur laquelle on place la première couche de pièces en maintenant une distance de 10 à 15 mm entre les pièces et les parois latérales. Puis, la première couche de pièces est encore couverte d'une couche de ciment damée de 10 à 15 mm d'épaisseur, sur laquelle on pose la deuxième couche de pièces, etc. La dernière (supérieure) couche de pièces est couverte d'une couche de ciment de 35 à 40 mm d'épaisseur pour compenser son retrait éventuel. La caisse est couverte d'un couvercle dont les bords sont mastiqués avec de l'argile réfractaire ou avec un mélange d'argile et de sable de rivière pétris dans l'eau jusqu'à l'état de pâte. Ensuite la caisse est placée dans un four. La température de cémentation varie de 910 à 930 °C.

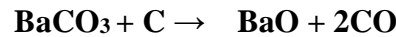
Le maintien à la température de cémentation est de 7 à 9 min par centimètre de la dimension maximale de la caisse. Le séjour à la température de cémentation pour une caisse de dimension minimale de 150 mm est de 5.5 à 6.5 h ; la couche obtenue est alors de 0.7 à 0.9 mm d'épaisseur. Avec un séjour de 9 à 11 h, l'épaisseur atteint 1.2 à 1.5 mm. Dans le cas d'une grande caisse (dimension minimale 250 mm), pour obtenir une couche cimentée de 0.7 à 0.9 mm d'épaisseur, le séjour doit être de 7.5 à 8.5 h, et pour une épaisseur de 1.2 à 1.5 mm, de 11 à 14 h. Après cémentation, les caisses ne sont ouvertes qu'après leur refroidissement à l'air jusqu'à 400 ou 500 °C. Généralement l'épaisseur de la couche à cimenter est choisie selon la température et durée de cémentation comme le montre le tableau ci-dessous (Tableau .II.1.).

Tableau .II.1. Épaisseur de la couche de cémentation en fonction de temps

Durée en heures		Épaisseurs de la couche de cémentation en mm				
		1 h	2 h	10 h	30 h	60 h
T en °C	850 °C	0,4 mm	0,8 mm	1,2 mm	1,5 mm	2,5 mm
	900 °C	0,6 mm	1,2 mm	1,5 mm	2,5 mm	4,5 mm

Nous avons déjà indiqué que la cémentation de l'acier s'effectue avec du carbone atomique. Dans le ciment solide, le carbone atomique est obtenu de la manière suivante. La caisse de cémentation contient de l'air dont l'oxygène qui réagit à une température élevée avec le carbone de ciment pour produire de l'oxyde de carbone. En présence de fer, l'oxyde de carbone se dissocie : $2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}_{\text{at}}$.

Le carbone ainsi obtenu est atomique au moment de sa formation, il diffuse dans l'austénite. L'addition des carbonates rend le ciment beaucoup plus actif et enrichit l'atmosphère carburante en oxyde de carbone [6] :



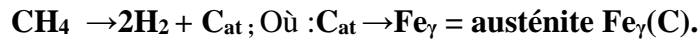
II.2.1.2.b. Cémentation gazeuse

La cémentation gazeuse se fait en chauffant les pièces dans un milieu de gaz contenant du carbone. Elle présente plusieurs avantages par rapport à la cémentation dans un milieu solide, ce qui détermine sa large extension dans les usines de fabrication en grandes séries.

- Cette forme de traitement permet d'obtenir une concentration exacte du carbone dans la couche ;
- Diminue la durée du processus en rendant inutile le chauffage préalable des caisses remplies de ciment à faible conductibilité thermique ;
- Rend possible la mécanisation et l'automatisation totales de la gamme de fabrication en simplifiant sensiblement le traitement thermique ultérieur des pièces ;
- La tempe pouvant être réalisée directement à la sortie du four.

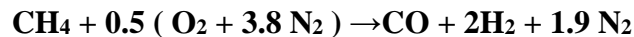
La meilleure couche cémentée s'obtient en employant comme agent de cémentation le gaz naturel (CH_4) composé complètement de méthane, ainsi que les mélanges de propane et de butane soumise à un traitement spécial. Pour la cémentation, on utilise souvent les hydrocarbures liquides (benzène, kérosène, synthol).

La réaction principale qui assure la carburation est la dissociation du méthane et de l'oxyde de carbone :



La cémentation gazeuse s'opère le plus souvent dans des fours à moufle et sans moufle, à marche continue, ainsi que dans des fours à cuve à marche discontinue. Dans le cas des fours à cuve, on emploie pour la cémentation le kérosène, le synthol, les alcools, etc., amenés dans le four sous forme de gouttes. La stabilité thermique élevée et une bonne vaporisation des hydrocarbures liquides (kérosène, synthol, etc.) permettent de cumuler dans le même espace utile l'obtention du gaz et le processus de cémentation.

Dans les fours à marche continue on emploie essentiellement les gaz naturels. Pour obtenir la concentration nécessaire en carbone (ordinairement, 0.8%), on utilise le plus souvent une atmosphère contrôlée endothermique composée de 92 à 95 % d'endogaz et de 5 à 8 % de gaz naturel. Une atmosphère endothermique (20% CO, 40% H₂ et 40 % N₂) s'obtient par combustion partielle à 1000 ou 1200 °C du gaz naturel ou d'un autre hydrocarbure dans un générateur endothermique spécial en présence d'un catalyseur. La réaction s'écrit :



Pour diminuer la durée du processus, on recourt généralement dans l'industrie à la cémentation gazeuse dans laquelle le potentiel de carbone de l'atmosphère endothermique (par potentiel de carbone de l'atmosphère on entend son pouvoir de cémentation qui assure une concentration définie de carbone à la surface de la couche cémentée) est d'abord maintenu à un niveau élevé pour assurer dans la zone superficielle de l'acier 1.3 à 1.4 % C, puis ce potentiel est réduit à 0.8 % C. Le potentiel de carbone de l'atmosphère s'établit d'après le point de rosée (le point de rosée est la température à laquelle s'amorce la condensation des vapeurs d'eau contenues dans l'atmosphère. Sa mesure est donnée par des appareils spéciaux) ou d'après sa teneur en CO₂, puisque les concentrations des vapeurs d'eau et de CO₂ sont liées entre-elle. Pour réaliser une concentration de 0.8 % C à la surface de l'acier, le point de rosée doit être de 8 à 10 °C, et pour 1.3 à 1.4 % C, de 12 à 16 °C (à 930°C)[8].

Les fours à marche continue comportent deux zones dans le sens de la longueur du four. Dans la première zone, qui couvre à peu près les ²/₃ de cette longueur, on amène du gaz qui se compose de gaz naturel (10 à 15 %) et de gaz endothermique (90 à 85 %) (Potentiel de carbone de l'atmosphère : 1.3 à 1.4 % C) ; la deuxième zone ne reçoit que le gaz endothermique en équilibre avec la concentration de carbone à obtenir à la surface (ordinairement, 0.8 %). En appliquant cette modalité de cémentation, il faut

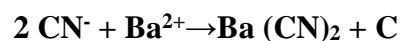
tenir compte que la diminution de la teneur en carbone de la couche de 1.3 ou 1.4 à 0.8 % s'obtient seulement aux dépens du carbone dissous dans l'austénite.

L'azote, en se dissolvant dans l'austénite, compense partiellement les pertes en chrome et en manganèse, en augmentation ainsi sa stabilité. Toutefois, il faut tenir compte qu'avec une teneur élevée de l'atmosphère en ammoniac il peut se former dans la couche de diffusion ce qu'on appelle « un composant sombre » (probablement, des pores) qui altère les propriétés mécaniques de l'acier (la nature et le mécanisme de la constitution du « composant sombre » sont à établir par une étude ultérieure). Pour éliminer l'oxydation interne il est recommandé d'utiliser les aciers à addition supplémentaire de nickel et de molybdène.

La cémentation s'effectue à la température de 930 à 950 °C, la durée de l'opération assurant l'obtention d'une couche de 0.7 à 1.5 mm d'épaisseur à 930 °C dans des fours à moufle (ou sans moufle) à marche continue est de 6 à 12 h, et dans fours à cuve, de 3 à 10h. Pour accélérer l'opération, on fait circuler les gaz et, parfois, la température de la cémentation gazeuse est portée à (1000 – 1050) °C à condition que les aciers employés soient à grains fins par hérédité. La cémentation est accélérée également si les pièces sont fabriquées par des méthodes de déformation plastique à froid [6].

II.2.1.2.c. Cémentation par ciment liquide

Les bains de cémentation sont formés de cyanure de sodium NaCN, de chlorure de baryum BaCl₂ (activateur) et de chlorures alcalins (modérateurs), permettant de réaliser une fluidité convenable. Du graphite en poudre surnage à la surface du bain et empêche l'action de l'air. La réaction prépondérante de cémentation peut se formuler par :



On distingue deux types de bains :

- L'un contient 20% NaCN et peut être porté à (870-900)°C,
- L'autre contient 8% NaCN et peut être chauffé jusqu'à 950°C, ce qui permet une cémentation plus rapide.

On plonge les pièces dans un bain de sel contenant essentiellement le cyanure de sodium NaCN (contient C, N et Na).

Le bain est porté à une température allant de 850° C à 950 ° C. Les pièces, suspendues par un fil en acier doux (vers 500 °C) (cyanuration), sur une profondeur qui atteint 0.5 mm après une heure de traitement.

On constate que la couche cyanurée est, après trempe, beaucoup plus dure que celle à laquelle donne naissance la cémentation solide. Mais elle est très fragile à cause du nitrure de fer. La teneur en carbone de la couche cémentée atteint 0.7 % et la trempe de durcissement doit être faite à 775 °C. Comme l'opération est rapide (1 heure), le métal n'est pas surchauffé par conséquent on ne procède à aucun traitement de régénération. La trempe à l'eau pour les aciers au Cr – Ni est suivie d'un revenu à 175°C pour augmenter la résilience. L'emploi de la cyanuration est limité aux pièces de petites dimensions qui ne sont soumises ni au choc, ni à des efforts importants (pièces de machine à coudre, à écrire, axes, engrenages...etc.) [7].

II.2.1.3. Traitement thermique de l'acier après cémentation

Pour donner aux pièces des propriétés définitives, on les soumet après cémentation à un traitement thermique dont le but est :

- De corriger la structure et d'affiner le grain au cœur et dans la couche cémentée qui augmente pendant le long séjour à une température de cémentation élevée ;
- D'obtenir une bonne dureté de la couche cémentée et de bonnes propriétés du cœur
- D'éliminer le réseau de carbure dans la couche cémentée, qui peut apparaître par suite de la sursaturation en carbone.

Dans la grande majorité des cas, surtout lors du traitement des aciers à grains fins par hérédité, on recourt à la trempe à partir du domaine au-dessus du point A_{c1} (depuis 820 ou 850 °C). On arrive ainsi à affiner le grain de la couche cémentée et partiellement à recristalliser et à affiner le grain au cœur. Il est fréquent que la cémentation gazeuse est suivie directement à la sortie du four de cémentation d'une trempe après refroidissement jusqu'à 840 ou 860 °C.

Un tel traitement ne permet pas de corriger la structure de la couche cémentée et du cœur, c'est pour cette raison que ce mode de trempe n'est utilisé que pour des pièces en aciers à grains fins par hérédité.

Pour diminuer la déformation des pièces cémentées, on emploie également la trempe dans l'huile chaude portée à 160 ou 180 °C. Quels que soient les cas, l'opération terminale des pièces ayant subi la cémentation est un revenu à basse température à 160 ou 180°C, qui transforme la martensite de trempe de la couche superficielle en martensite de revenu supprimant les contraintes.

La dureté de la couche superficielle dans le cas de l'acier au carbone est HRC 60 à 64, et dans celui de l'acier allié, HRC58 à 61 ; la diminution de la dureté est due à la formation d'une quantité élevée d'austénite résiduelle.

La cémentation suivie d'un traitement thermique élève la limite de fatigue des pièces en acier par suite de la formation dans la couche superficielle des contraintes de compression résiduelles importantes (jusqu'à 40 ou 50 kgf/ mm²) et diminue sensiblement l'aptitude aux concentrateurs de contraintes à condition que la couche consolidée soit continue suivant toute la surface de la pièce. Par exemple, après cémentation, trempe et revenu d'un acier au chrome- nickel (0.12 % C ; 1.3 % Cr ; 3.5 % Ni), la limite de fatigue des éprouvettes sans concentrateurs de contraintes s'accroît de 56 à 75 kgf/ mm², et en présence d'une entaille, de 22 à 56 kgf/ mm². La limite de fatigue peut être encore élevée par écrouissage réalisé par grenailage.

Ce traitement conduit à la transformation de l'austénite résiduelle en martensite, au renforcement des contraintes de compression à la surface, et comme conséquence, à l'augmentation supplémentaire de la limite de fatigue. Dans certains cas, la cémentation est suivie de trempe avec chauffage par induction, qui rend le grain beaucoup plus fin en améliorant sensiblement la limite de fatigue. Un acier cémenté possède une résistance à l'usure et une résistance de contact élevées [6-7].

II.2.1.4. Aciers de cémentation

Ce sont des aciers à grains fins et à basse teneur en carbone. Ils sont définis par la norme NF A 35-551 : Aciers de construction non alliés et alliés spéciaux pour cémentation. Ils se classent en six familles indiquées au tableau .II.2 ci – dessous [6].

Tableau .II.2. Types aciers de cémentation

Types d'aciers	Nuances
Aciers au carbone	C10 - C12 - C18
Aciers au manganèse – chrome	16MnCr5 - 20MnCr5
Aciers au chrome molybdène	18CrMo4
Aciers au Nickel-chrome	10NiCr6 - 16NiCr6 - 20NiCr6 - 14
Aciers au Nickel-chrome-molybdène	NiCr11
Aciers au Bore	20NiCrMo2 - 18NiCrMo6 21B3 - 20MoB5 - 19NiCrMoB2

II.2.2. La Nitruration

D'après la norme NF A 02-010, La nitruration est un traitement thermochimique auquel est soumis un produit ferreux pour obtenir un enrichissement superficiel en azote.

Il consiste à fixer l'azote à la surface du métal par réaction chimique et à le faire diffuser en phase ferritique, afin qu'il forme avec le fer et les éléments d'alliage de l'acier des zones de nitrures très fins capables de produire un durcissement de la couche enrichie.

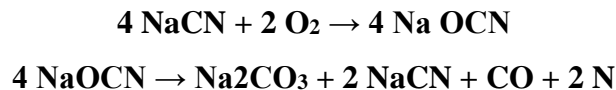
Applications : Elle est pratiquée pour les axes de pistons, les soupapes, les vilebrequins, les arbres de machines-outils, les arbres de pompes à eau...

II.2.2.1. Techniques de nitruration

La nitruration des aciers se fait sur un métal ayant subi au préalable un traitement thermique de trempe et de revenu et présentant de ce fait une structure de martensite revenue offrant un ensemble de caractéristiques mécaniques élevées. Elle s'effectue généralement à une température comprise entre 450 et 580 °C, inférieure à la température de revenu de l'acier.

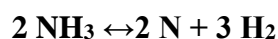
II.2.2.2. La nitruration en bains de sels

Elle s'effectue dans des mélanges de cyanures, cyanates et carbonates. L'apport d'azote est dû à la décomposition des cyanates formés par oxydation de cyanures :



II.2.2.3. La nitruration gazeuse :

L'agent de nitruration le plus couramment utilisé est un mélange de gaz ammoniac et d'azote ou de gaz ammoniac et de gaz endothermique. Au contact des pièces, à la température de traitement, l'ammoniac est craqué suivant la réaction :



II.2.3. Carbonitruration

La carbonitruration est un traitement thermochimique similaire à celui de la cémentation. Le produit ferreux est porté à l'état austénitique afin de réaliser un enrichissement superficiel en carbone et en azote [53,54]. Généralement cette opération est suivie immédiatement d'un durcissement par trempe. L'opération chimique se fait en atmosphère gazeuse $\text{CO} + \text{H}_2 + \text{N}_2$ additionnée de petites quantités d'ammoniac (5%)

et de propane (2%), vers 840 °C, pendant quelques heures. On opère sur des aciers au carbone ou des aciers de cémentation [9].

L'azote a deux effets :

- Il accélère l'enrichissement en carbone.
- Il modifie les propriétés de la couche enrichie. En effet, l'azote a une action fortement Gama-gène, il augmente la stabilité de l'austénite et abaisse donc la vitesse critique de refroidissement pour la formation de la martensite.

III.8.1. Carbonituration à basse température (600-700 °C)

Théoriquement, elle peut être réalisée entre 590 °C, température du palier de l'eutectoïde Fe-N, et la température Ac1 de l'acier, c'est-à-dire en pratique entre 600 et 710 °C. Aux températures inférieures à Ac1, le cœur de la pièce ne subit pas la transformation $\gamma \rightarrow \alpha$ tandis que, sous une couche de combinaison d'une dizaine de nm, la couche enrichie en carbone et en azote se transforme en austénite grâce à l'azote.

Le durcissement est obtenu par trempe à l'huile et, depuis la surface vers le cœur la structure comprend donc une couche de combinaison une couche déstructure martensitique avec de l'austénite résiduelle et la structure initiale de la pièce modifiée par l'effet de revenu correspondant aux conditions (T° et durée) dans lesquelles a été réalisé la carbonituration. Celle-ci peut être effectuée en bain de sel ou en phase gazeuse. En raison de la basse température du traitement, la cinétique de formation de la couche superficielle est lente et le procédé est peu employé industriellement, bien qu'il semble faire l'objet d'un certain regain d'intérêt [10].

III.8.2. Carbonituration (750- 880 °C)

Les agents de carbonituration sont liquides ou gazeux les éléments liquides sont des sels à base de cyanure, cyanate alcalins, carbonates et chlorures alcalins ; les carbonates et les chlorures permettent d'abaisser le point de fusion et les chlorures activent le bain ; les réactions qui se produisent peuvent se résumer ainsi :



Les céments gazeux sont des mélanges de gaz contenant du carbone (hydrocarbure..) et de gaz contenant de l'azote (ammoniac), par réaction mutuelle ces gaz forment du CN et du CNH qui sont les agents à la fois carburants et

Chapitre III

Procédures Expérimentales

III.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation du matériau utilisé, le mode de préparation des échantillons, les investigations expérimentales utilisées pour l'élaboration des aciers étudiés et les techniques et les équipements utilisés pour la caractérisation des couches de cémentations formées sur le substrat de l'acier traité. Les couches formées lors de ce traitement seront identifiées par l'analyse métallographique à l'aide d'un microscope optique et à l'aide de la d'uromètre pour la mesure de dureté des échantillons avant et après le traitement de cémentation. Pour étudier les effets de cémentation sur l'acier traité en faisant varier les paramètres du traitement qui sont : La température et le temps.

Nous sommes intéressés tout d'abord à définir

- le matériau de notre échantillon acier XC38.
- préparation d'échantillon pour la cémentation
- préparation d'échantillon pour l'étape suivante (caractérisation)
- matérielle utilise pour le traitement thermochimique (cémentation).
- en explique le déroulement et étape traitement thermochimique (cémentation)

III.2. Matériaux utilisé

Dans notre étude, on a utilisé un acier au carbone fournir par l'unité de SONATRACH (Laghouat). C'est un acier doux ferrito-perlitique de nuance XC38 suivant la norme AFNOR et il a pour équivalent en nouvelle norme européenne le code C35. C'est un acier de type Hypoeutectoïde, constitué à l'ambiante de ferrite et de perlite.

III.2.1. Composition chimique de l'acier XC 38

Le tableau II.1 représente la composition chimique de l'acier XC 38 :

Tableau III.1. Compositions chimiques en % de l'acier XC 38

C	S	Mn	P	Si
0,32 à 0,39	≤ 0,035	0.5 à 0,8	≤ 0,035	0,4 max

D'après le tableau III.1, on constate que l'acier XC 38 contient des taux très faible des éléments d'addition, il est classé dans la famille des aciers faiblement alliés avec un taux de carbone qui n'accède pas 0.39% en masse.

III.2.2. Domaine d'application

L'acier choisi pour cette étude, est un acier à moyenne teneur en carbone apte aux traitements thermiques très souvent utilisé en mécanique générale pour des applications nécessitant une bonne usinabilité et ses caractéristiques mécaniques, aptitude au polissage et une usinabilité excellente, une grande résistance à l'usure, utilisé largement comme éléments : roues coniques, pignons, arbres vilebrequins, roues dentées, arbres de réducteurs, broches, pièces automobiles, engrenages, axes, et boulonnerie.

Tableau III.2. Caractéristiques mécanique de l'acier XC38

RM N/mm ²	Re N/mm ²	A %
500 / 550	245 / 300	18 / 19

III.3. Procédure expérimentale

III.3.1. Préparation des échantillons pour la cémentation

La préparation de l'acier destiné au traitement de cémentation subi un découpage à froid à l'aide d'une scie électrique, suivit par une opération de fraisage pour obtenir la forme finale de l'échantillon. Les échantillons découpés à une forme hexagonal avec les dimensions ($a = 65$ mm, $h = 75$ mm) qui trouve cette forme suite à des opérations de découpages et de Fraisage pour d'obtention la forme finale de l'échantillon comme le montre la figure III.1. Les substrats subi par la suite des polissages mécaniques afin d'éliminer toutes rugosités de surface.

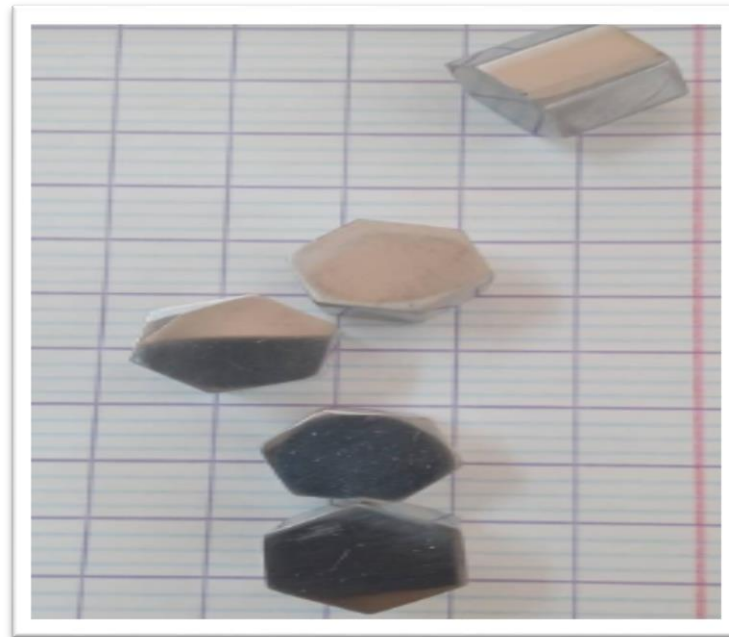


Figure III.1. Les échantillons de l'acier XC38

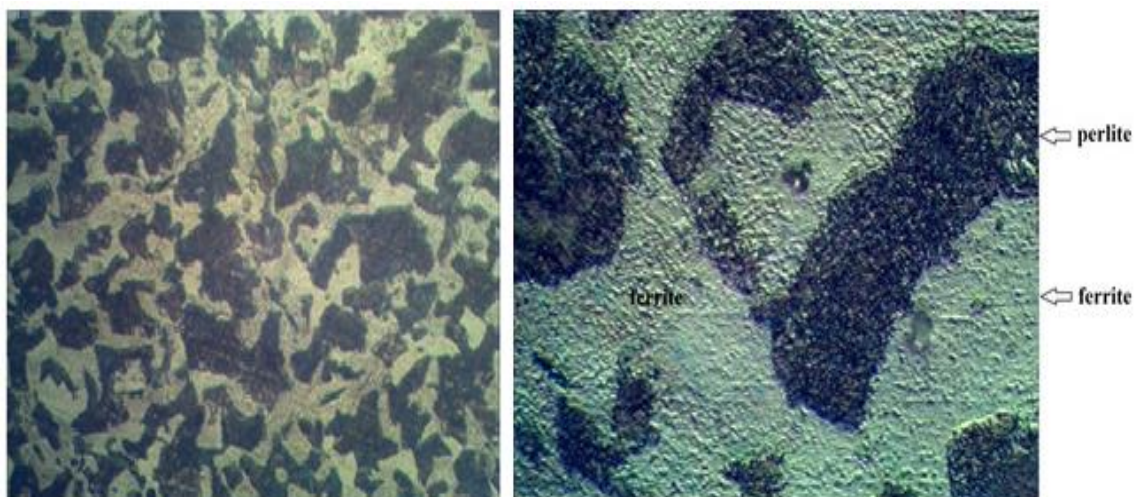


Figure III.2. Micrographie optique de la surface non traitée de l'acier XC 38

III.3.2. Technique de cémentation

Il faut tout d'abord amener la température de four à la température d'austénitisation 1200°C. Elle correspond à $AC3+50$ °C. $AC3$ étant la température de fin de transformation ferrite austénite. Ici elle est pour notre acier XC38 est plus de 900 °C.



Figure III.3. Four électrique réglé à température 950 °C

En raison de sa simplicité et la propreté des pièces obtenues, la cémentation solide en poudres est la plus utilisée dans le domaine industriel. Ce procédé consiste à emballer les pièces à traiter dans des creusets en acier contenant le mélange de poudres (carbone), puis chauffer dans le four.

La mise en œuvre de traitement de cémentation été réalisés par voie solide dans un four électrique à température 950 °C (figure III.3).

La figure III.4 représente le dispositif utilisé pour ce traitement. Il contient le ciment en poudre consiste de carbone, la pièce à traité, et un récipient en acier inoxydable.

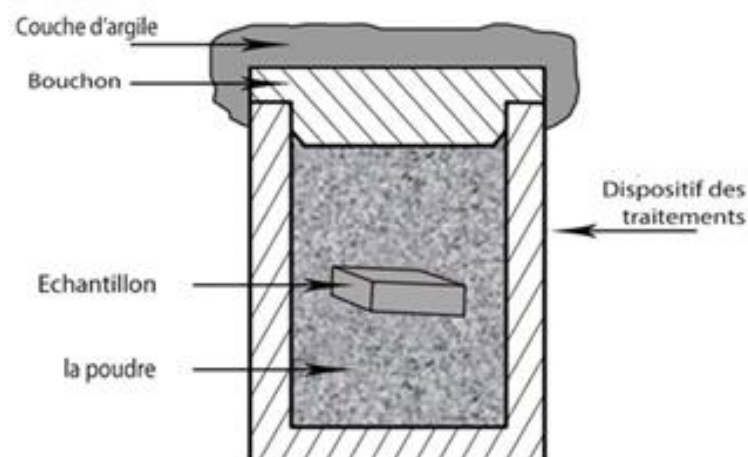


Figure III.4. Schéma du dispositif (échantillon, ciment, creuset)



Figure III.5. Poudre de ciment dans le creuset

Le processus de cémentation de l'acier XC38 s'est déroulé en quatre étapes :

1. Introduire l'échantillon dans un creuset qui contient de poudre de ciment
2. Nous avons disposé au-dessus du bouchon une couche d'argile, afin de limiter l'oxydation par pénétration d'oxygène comme le montre la figure III.6.
3. Maitre le tous dans le four à une température 1200 °C.
4. Après quatre heures en fait sortir le creuset est en laisse refroidir dans l'aire (refroidissement lent)



Figure III.6. Recouvrement le creuset avec l'argile

III.3.3. Préparation métallographiques

Le but de cette préparation est de faire étudier l'épaisseur de la couche créée sur la surface après le traitement et la structure interne du matériau, et pour nous visualiser la microstructure à l'aide d'un microscope optique.

Toutes ces étapes de la Préparation métallographiques ont été réalisées au niveau du laboratoire de département génie mécanique, de l'université de Laghouat. Elle est composée de ces étapes (découpage, enrobage, polissage et attaque chimique)

III.3.3.1. Découpage

En coupant les échantillons transversalement, de cette manière on peut examiner l'échantillon à travers la couche cimentée et le cœur de l'échantillon

III.3.3.2. Enrobage

Pour protéger la couche de cémentation durant le polissage on effectue un enrobage à froid dans une résine thermodurcissable comme le montre la figure III.7.



Figure III.7. Echantillon dans la résine thermodurcissable

III.3.3.3. Polissage

L'opération de polissage était réalisée à l'aide d'une polisseuse de marque STRUERS ayant un disque tournant à 150 ou 300 tr/mn sur lequel est collé le papier abrasif comme le montre la figure III.8.

Le polissage se fait comme suit en deux étapes :

- La première étape consiste à rendre la surface des échantillons brillante et dénuée de toute rayure. Pour cela, la surface à polir est mise en contact avec du

papier abrasif de granulométrie décroissante en passant vers des grains de plus en plus fins 600, 800 et 1200. L'opération est effectuée sous courant d'eau évitant ainsi l'échauffement des échantillons, où la durée du polissage est d'environ 5 minutes pour chaque papier.

- La seconde étape, appelé polissage fin, est effectuée à l'aide de la pâte diamantée de 3 μ m suivi par rinçage avec l'eau et séchage pour chaque échantillon pendant un temps adéquat jusqu'à l'obtention d'une surface brillante ayant l'aspect d'un miroir pour faciliter les mesures des épaisseurs de couches de carbures après traitement.



Figure III.8. Polisseuse électrique

III.3.3.4. Attaque chimique

Enfin, afin de permettre une observation plus facile des carbures et des joints de grains, des attaques métallographiques peuvent être pratiquées à la suite du polissage.

Le réactif utilisé dans ce travail est constitué d'une solution 4 % d'acide nitrique dans l'alcool éthylique, suivi par un rinçage des échantillons avec l'eau pour arrêter la réaction et séchage par l'air chaud.

III.4. Techniques de caractérisation

Les échantillons élaborés ont fait l'objet de caractérisation par deux techniques. La caractérisation des microstructures est assurée par la microscopie optique (MO), ou par

la microscopie électronique à balayage (MEB). La mesure de microdureté est effectuée en utilisant un duromètre.

III.4.1. Observations microscopiques :

L'appareillage utilisé est un microscope métallographique optique universel de type LEICA(DMLM) qui permet l'observation des échantillons, avec un agrandissement qui varie de 50 à 1000. Ce microscope est équipé d'une caméra, d'un micro-ordinateur et d'une imprimante. 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.



Figure III.9. Microscope Métallographique Optique

III.4.2. Essais de micro-dureté :

Les essais de micro dureté Vickers consistent à estimer la valeur de la microdureté HV, à partir de la longueur de la diagonale d'une empreinte laissée par le pénétrateur sur la surface de l'échantillon, comme le montre la figure III.10 (a) et (b). Le pénétrateur s'enfonce dans l'échantillon sous une charge constante P, la pénétration se fait de manière monotone à vitesse constante pendant une durée de 15 sec à 20 secs réglables à volonté.

Cette analyse est nécessaire pour estimer et suivre l'évolution de l'une des propriétés mécaniques après avoir réalisé l'opération de métallisation. Pour réaliser les essais de dureté de nos échantillons, nous avons utilisé un micro-duromètre de type DM2D (voir

la figure III.11), équipé d'un oculaire ($\times 15$) et des objectifs ($10\times, 40\times$) pour permettre de positionner l'empreinte et régler les lignes de mire afin de mesurer la valeur de la diagonale d (Fig.III.10(b)). La gamme de charge utilisée par cet appareil est : 25gf, 50 gf, 100 gf, 200 gf,.....,1000gf .

Lorsque les lignes sont réglées, une valeur apparaît sur l'afficheur pour désigner la longueur de la diagonale agrandie de 40 fois, et en poussant sur la touche 1/40, l'afficheur montre alors la diagonale réelle en micron. Le calcul de la micro durezza HV, se fait automatiquement par un double clic sur le bouton "HARDNESS" se trouvant sur le cadran de l'appareil de mesure.

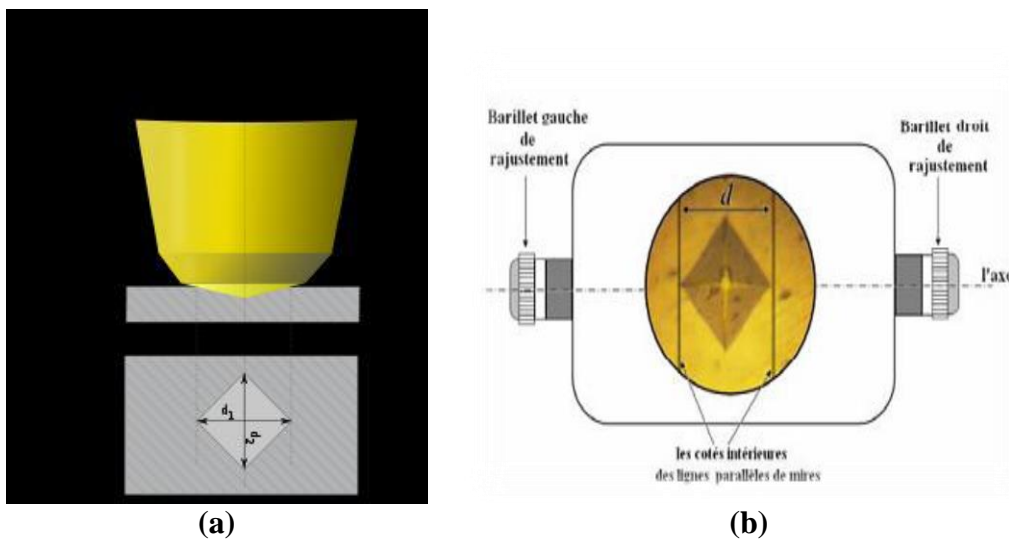


Figure III.10. (a) Pénétrateur, (b) Empreinte laissée par le pénétrateur



Figure III.11. Duromètre DM2D

On peut aussi calculer la micro-dureté HV manuellement, par l'application de la formule suivante :

$$Hv = 1854.4 \times \frac{P}{d^2}$$

P : charge en gramme force (gf).

D : diagonale en (μm).

HV : micro dureté en (Kg/mm^2).

Les mesures de dureté ont été effectuées par la méthode Vickers avec :

- une charge 100 gf avec une incertitude de $\pm 1\%$.
- un objectif (40 \times).

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV. Résultats et discussions

IV.1. Introduction

Le traitement de cémentation conduit à créer d'une couche durcie dans la zone superficielle des pièces les rendant ainsi plus aptes à résister à la corrosion et à l'usure.

Le traitement de cémentation se caractérise par la diffusion du carbone à partir de la surface vers le cœur de matériau d'acier et par la formation d'une couche de carbure de fer dans la région superficielle de l'acier. Pour la cémentation, la couche superficielle se forme après une période d'incubation et de température appropriée. La température moyenne du traitement prend une moyenne de 1200°C.

Dans ce chapitre, les résultats obtenus après le traitement de cémentation sera présenté. Dans un premier temps, nous discuterons les résultats apportés par l'analyse métallographique. Ensuite nous examinerons les résultats obtenus concernant la dureté des couches de cémentation obtenues par l'appareil de mesure utilisée au niveau de laboratoire de génie mécanique – université de Laghouat.

IV.2. Observations microscopiques

L'observation microscopique nécessite un polissage fin de la surface ou de la coupe du dépôt à observer. Le polissage mécanique vise à rendre les surfaces uniformes. Il consiste à abraser la surface, sous une charge constante, à l'aide de papiers revêtus de carbure de silicium (SiC) de grade progressif, la diminution de la taille des grains d'abrasif d'un papier à l'autre permet d'affiner progressivement l'état de polissage et de diminuer la rugosité moyenne. Un nettoyage à l'acétone et un séchage par flux d'air chaud terminent le polissage mécanique.

La deuxième phase consiste en une attaque chimique à l'aide du produit nital, dont la composition et les proportions en volume sont :

- Acide nitrique (05ml) ;
- Ethanol (95ml).

L'attaque chimique permet de révéler les différentes phases présentes que l'on observe au microscope optique.

L'appareillage utilisé est un microscope métallographique optique universel de type ZEISS permet l'observation des échantillons, avec un agrandissement qui varie de 50 à 1000. Ce microscope s'accompagne d'une caméra, micro-ordinateur et d'une imprimante. 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.

L'acier XC38, est un acier hypoeutectoïde qui a une structure à forte quantité de ferrite et quelques cellules de perlite de structure lamellaire. La micrographie de la figure IV.1 montre l'échantillon utilisé de l'acier XC38 à l'état brut.

Le traitement de cémentation modifie la structure globale des pièces d'aciers traités. Donc, nous allons analyser les changements structuraux produites par ces traitements en utilisant le microscope optique comme moyen d'analyse. La micrographie de la figure IV.2, obtenues par microscopie optique sous un grossissement de X10 représente la coupe transversale de l'acier XC38 cémenté à 1200°C pendant 2 heures, elle montre la formation d'une zone superficielle avec des concentrations en carbone très élevés à cause de processus d'enrichissement et de diffusion qui transfère 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 diminuées à mesure que la distance entre l'extrémité et le cœur décroît, c'est la zone de diffusion.

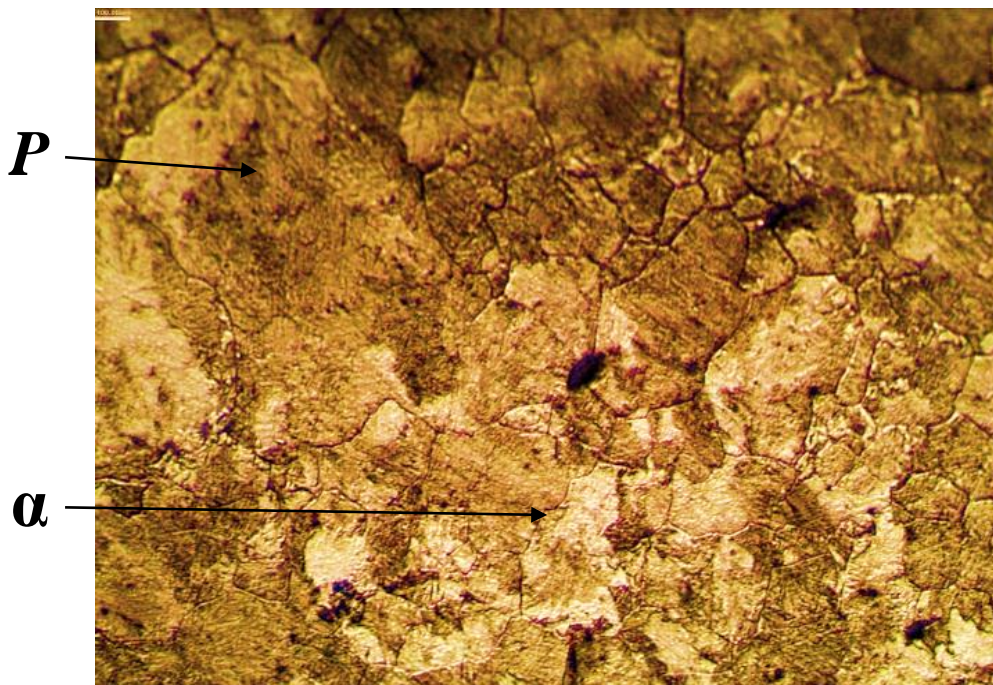


Figure IV.1. Micrographie de L'échantillon de l'acier XC38 à l'état brut.

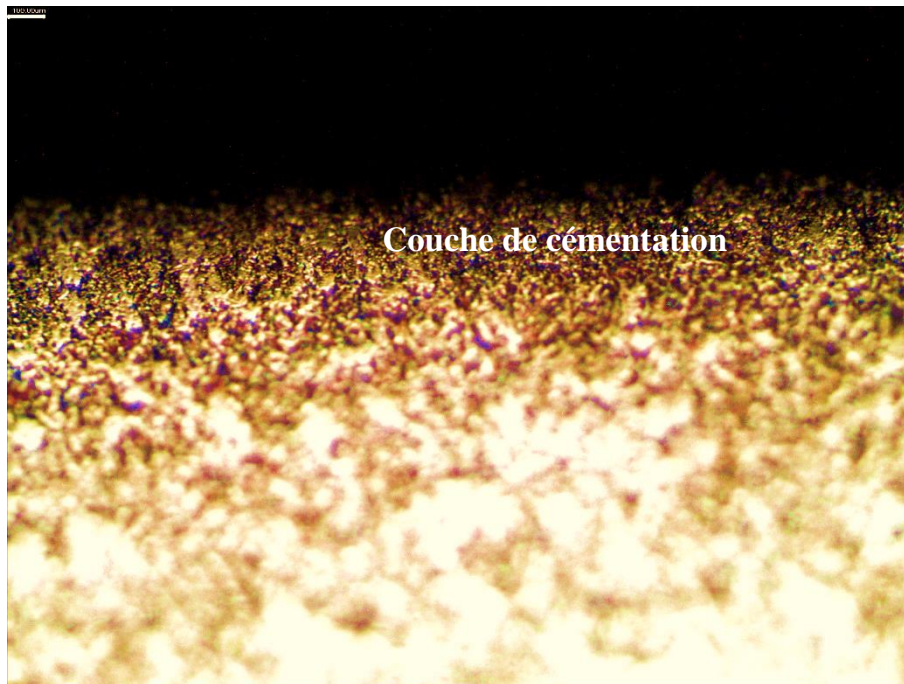


Figure IV.2. Micrographie de l'échantillon après le traitement de cémentation.

IV.3. Mesure de micro-dureté

La dureté caractérise la résistance de matériau à la pénétration d'un corps dur. L'essai de dureté consiste à créer et exploiter l'empreinte laissée sur une pièce par un pénétrateur soumis à un effort f .

L'essai de micro dureté Vickers consiste à mesurer la taille de l'empreinte réalisée sur le dépôt. Les mesures de la micro dureté des dépôts ont été effectuées sur des surfaces ou des coupes polies.

Dans cette manipulation on a utilisé :

- a) **Echantillons** : on utilise deux échantillons d'acier XC38, pour le premier échantillon on a fait le traitement thermochimique et on laisse l'autre sans traitement pour pouvoir faire une comparaison entre les résultats.
- b) **Polisseuse** : pour rendre la surface de l'échantillon propre et plane pour le pouvoir utiliser sur le duromètre.
- c) **Duromètre** : Les indentations sous une charge de 10 grammes ont été faites grâce à un micro-duromètre de type BUEHLER MICROMET (HARDNESS TESTER) qui est équipé d'un pénétrateur diamant Vickers.

La mesure de la dureté par duromètre se déroule par les étapes suivantes :

- Placé la pièce correctement sur l'enclume la plus appropriée (l'enclume doivent être très propre car les mesures peuvent non correctes a causes des impuretés de l'état de surface)
- Appliqué la pré-charge en amenant lentement et sans choc la pièce en contact avec le pénétrateur jusqu'à ce que signal rouge s'allume sur l'appareil
- Appliqué la charge f après en tourne le levier jusqu'à la butée
- Après 5 seconde enlever la charge et ramenant le levier a la position initial
- lire directement la valeur de la dureté affichée sur l'écran digitale

Par cette méthode on mesure la dureté dans quatre zones sur la surface de substrat de l'échantillon avant le traitement et deux fois dans l'échantillon après la cémentation est nous regrouper les résultats dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1 résultats des essais de micro-dureté avant et après la Cémentation

Echantillon avant le traitement de cémentation				
Zone	1	2	3	4
Valeur de dureté Hv	195	250	226	227
La valeur moyenne	$(195+250+226+227) / 4 = 224.5$			
Echantillon après traitement de cémentation				
Charge g	10 g		20 g	
Valeur de dureté Hv	318		379	
La valeur moyenne	$318+379 / 2 = 348.5$			

On remarque une importante augmentation de la dureté après le traitement de cémentation par rapport à l'échantillon à l'état brute à cause du changement de la microstructure par création de la martensite et des obstacles sous forme des précipités. Ce dernier gêne le mouvement de la dislocation qui provoque cette augmentation de dureté comme le montre la courbe comparative de la figure IV.3 si dessous où la série 1 représente la courbe de dureté d'échantillon avant le traitement de cémentation (l'échantillon à l'état brute), et la série 2 représente la courbe de dureté d'échantillon après le traitement de cémentation.

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.

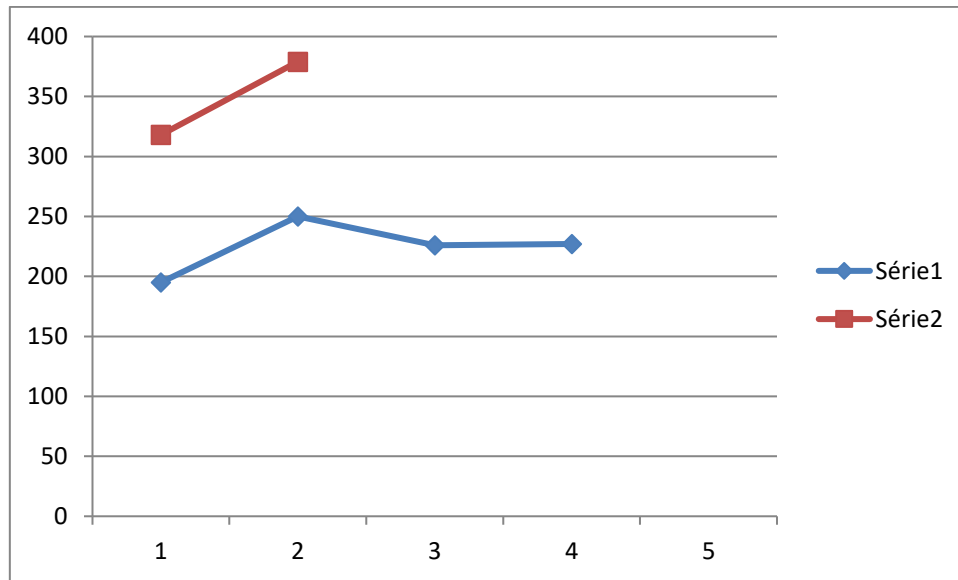


Figure IV.3. Courbe comparative de dureté à l'état brut et après traitement de cémentation

Conclusion

Conclusion

Le travail présenté dans ce mémoire est principalement de nature expérimentale, il a permis de donner des réponses sur l'amélioration de l'état de surface de l'acier XC38 pour les différentes exigences industrielle.

Le traitement de cémentation appliqué aux aciers est un traitement thermochimique superficiel d'enrichissement en carbone réalisé en phase austénitique. Il est destiné à obtenir après refroidissement un durcissement superficiel par trempe.

La cémentation est le moyen de durcissement superficiel qui permettant d'assurer une forte mise en précontrainte de compression de la surface grâce à l'obtention d'une couche à haute teneur en carbone, Le matériau non traite, présente des caractéristiques dés base généralement équilibré pour lui conférer une bonne résistance mécanique (la dureté).

Dans notre travaille après le traitement thermochimique on a utilisé la dureté de Vickers pour évaluer la profondeur de la cémentation des aciers traités en surface. La progression de la dureté est affichée sur le graphique et la distance entre la surface et la limite de dureté (HV) est calculée. Nous constatons qu'après avoir traite l'échantillon avec la cémentation la couche cimenté révélant l'acier à une micro-dureté plus grande que celle du substrat qui améliora la dureté et la caractéristique mécanique de l'acier bien souvent on recourt aux traitements thermochimiques (cémentation) pour améliorer les caractéristiques mécaniques du matériau considéré.

Nous pensons finalement que l'objectif visé par ce travail a été atteint. Il faut par ailleurs souligner que la méthode de traitement utilisée est efficace pour la formation d'une couche de carbure de fer dans la région superficielle de l'acier, nous proposons à cet effet d'envisager l'utilisation de même méthode suivi par un traitement thermique par trempe pour augmenter la dureté.

Références bibliographiques

- [1] Madeleine Durand-Charre : La microstructure des aciers et des fontes, Genèse et Interprétation, SIRPE éditeur, Paris(2003).
- [2] S. Jegou, L. Barrallier, R. Kubler, M. AMJ Somers - Evolution of residual stress in the diffusion zone of a model Fe-Cr-C alloy during nitriding. HTM Journal of Heat Treatment and Materials: Vol. 66, No. 3, pp. 135- 142 (2010).
- [3] J. Barralis, L. Castex, J.-C. Chaize. Influence des conditions de traitement
- [4] J.P. Bailon, JU-M-Dorlot, Des Matériaux, presses internationales polytechniques, 2007.
- [5] C. CHAUSSIN et Hilly « Métallurgie, alliages métalliques » Tome 1, édition DUNOD, Montréal, 1976.
- [6] I. Lakhtine, Métallographie et traitements thermiques des métaux, Mir. Moscou, 1978, p413.
- [7] B. Stauder, O. Rey, M. Buvron, P. Jacquot et G. Prunel, Influence de la cémentation à basse température sur la résistance au grippage et à l'usure des aciers inoxydables austénitiques, Acta Metallurgica, 2000.
- [8] THÈSE DE DOCTORAT EN SCIENCES, BOUBAAYA Rabah, Elaboration de couches minces de carbure et de borure de chrome par procédé de traitement de conversion : Caractérisation physico-chimique et mécanique
- [9] Dominique GHIGLIONE, Claude LEROUX, Christian TOURNIER, Cémentation. Carbonituration, 10 juil. 1994
- [10] Said Bensaada, Traitements Thermiques, Classification Et Designation Des Aciers Et Fontes, Univ De Biskra