



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE «Abbès LAGHROUR» DE KHENCHELA
FACULTE DES SCIENCES ET DE TECHNOLOGIE



Département de Génie Mécanique

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Génie Mécanique Productive Spécialisé

Etude expérimental sur effet du temps de maintien de traitement thermochimique sur l'essai de traction

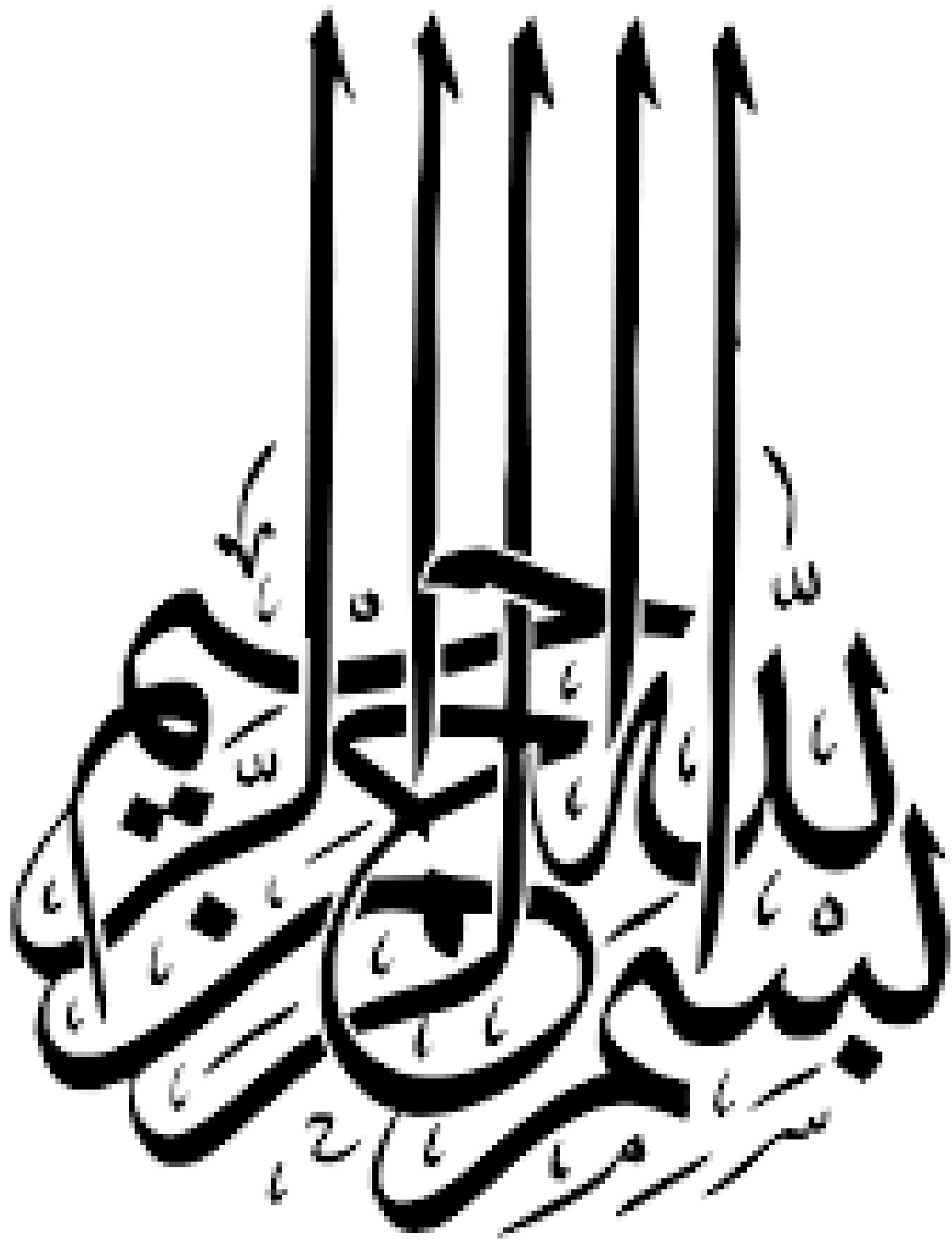
Réalisé par :

- ARROUF Abd el djalil
- SAFSAF Salim

Devant le jury :

- Dr. Touati Sofiane (Encadrant)
- Dr. Laala Ghelani (Président)
- Pr. Fellah Mamoun (Examineur)

Année universitaire : 2021-2022



Résumé

Ce travail expérimentale vise a présenté les résultats des expériences qui ont été faites, et savoir l'influence du temps de maintien après traitement thermochimique par cémentation de l'acier XC20 pendant 08 heures, et fixer les deux autres paramètres tel que ; la température à 920 °C et le débit de carbone a 1.2 %, sur les réponses tel que ; la micro-dureté, l'épaisseur de la couche durcie, le teneur en carbone. Une Analyse microscopique des micrographies des structures des échantillons pour étape (état brut, 'état initial du traitement par cémentation et 'état final du traitement).enfin nous avons montré la relation entre le temps de maintien et la Contrainte nominale σ , la force de traction F et l'allongement Δl lors des essais de traction.

Abstract

This experimental work aims to present the results of the experiments that have been carried out, namely the influence of the holding time after carburizing of XC20 steel for 08 hours, and to set the other two parameters such as; the temperature at 920°C and the carbon flow rate at 1.2 %, on the responses such as; the micro-hardness, the thickness of the hardened layer, the carbon content. Microscopic analysis of the micrographs of the specimen structures for each stage (raw state, initial case hardening state and final case hardening state). Finally, we showed the relationship between the holding time and the nominal stress σ , tensile strength F and elongation Δl in the tensile tests.

المخلص

يهدف هذا العمل التجريبي إلى تقديم نتائج التجارب التي تم إجراؤها، أي تأثير زمن الانتظار بعد كربنة فولاذ XC20 لمدة 08 ساعة، وتعيين المعلمتين الأخرين مثل؛ درجة الحرارة عند 920 درجة مئوية ومعدل تدفق الكربون عند 1.2٪ ، على الاستجابات مثل ؛ الصلابة الدقيقة ، سمك الطبقة المتصلبة ، محتوى الكربون. التحليل المجهرى للصور المجهرية لهياكل العينة لكل مرحلة (الحالة الخام، حالة تصلب الحالة الأولية وحالة تصلب الحالة النهائية). أخيرًا، أظهرنا العلاقة بين زمن الانتظار والإجهاد الاسمي σ وقوة الشد F والاستطالة Δl في اختبارات الشد.

REMERCIEMENTS

C'est un grand plaisir d'exprimer nos gratitudees à notre encadreur, **Dr. TOUATI Sofiane maître** de conférences, à l'université de khenchela, de nous 'avoir fait confiance de mener à terme cette recherche sous sa direction. C'est grâce à lui, que nous avons pu, en effet, découvrir le monde de la recherche et vivres cette expérience très riche sur le plan scientifique et humain. Nous sommes très reconnaissant de sa méthode attentive et de ses qualités qui m'ont été d'un grand soutien ;

Aux membres de jury qui ont accepté de faire partie de ce jury de soutenance ;

Nous adressons aussi toute nos gratitudees au chef département de génie mécanique **Mr : BERKIA Abd el lhak** pour son aide et ses conseils judicieux ;

À tous les enseignants du département de génie mécanique, Particulièrement Aux Enseignants : *fellah M, Khadraoui F, chhehat A. Mensouri K, Chiteur, Messaoudi A, Himer N.*

Nos remerciements s'adressent particulièrement à Mr : **ABOUDI Abdelaziz** doyen de la faculté des sciences et de technologie ;

À tous les enseignements et cadres qui ont contribué à notre formation de près ou de loin ; sans oublier nos amis et collègues de la promotion 2021/2022.

Dédicace

*À mes chers parents qui ont soutenu mon existence et ma
scolarité.*

À mes frères et mes sœurs

*Notre encadrant : Mr *Touati sofiane * pour son aide qui
nous a fait aimer notre travail.*

Et Tout mes amis

A tous les familles ARROUF

À tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin...

À toute la promotion 2021/2022.

ARROUF ABD EL DJALIL

Dédicace

*À mes chers parents qui ont soutenu mon existence et ma
scolarité.*

À mes frères

*Notre encadrant : Mr *Touati sofiane * pour son aide qui nous a fait
aimer notre travail.*

Et Tout mes amis

A tous les familles SAFSAF

À tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin...

À toute la promotion 2021/2022.

SAFSAF SALIM

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Liste des figures	i
Liste des tableaux	a
Introduction général	1
CHAPITRE I : NATURE ET PROPRIÉTÉS DES ACIERS	
I.1. Introduction	2
I. 2. Les aciers	2
I. 2. 1. Le réseau cubique centré (c.c.)	2
I. 2. 2. Le réseau cubique à faces centrées (c.f.c.)	2
I. 3. Les propriétés Mécanique des aciers	3
I. 4. Propriétés mécaniques des métaux	4
I.4 .1. Elasticité et plasticité	4
I.4. 2. Résistance mécanique	5
I. 4. 3. Rigidité	5
I. 4 .4. Ductilité	5
I.5. Essais mécaniques	5
I. 5. 1. Essais duresté	6
I. 5. 2. Type d'essai de duresté	6
I. 5. 2. 1. Essai de duresté Brinell	7
I. 5. 2. 2. Essai de duresté Rockwell	8
I. 5. 2. 3. Essai de duresté Vickers	8
I. 5. 3. Essai de traction	9
I. 5. 3. 1. Intérêt et déroulement de l'essai	9
I. 5. 3. 2. Courbes conventionnelle et rationnelle.de traction	11
I.6. Conclusion	11

Références bibliographiques	I
-----------------------------------	---

CHAPITRE II : LES TRAITEMENTS THERMOCHIMIQUES

II. 1. Introduction	12
II. 2. Cémentation	12
II. 3. Techniques de cémentation	13
II. 3. 1. Cémentation solide	14
II. 3. 2. Cémentation liquide	14
II. 3. 3. Cémentation gazeuse	14
II. 3. 4. Cémentation ionique	16
II. 4. Profondeur cémentée	17
II. 5. Traitements thermiques après la cémentation	17
II. 6. Aciers pour cémentation	18
II. 7. Le diagramme d'équilibre fer-carbone	19
II. 8. Les alliages fer-carbone	20
II. 9. La constitution des aciers au carbone	20
II. 9. 1. La ferrite	20
II. 9. 2. L'austénite	21
II. 9. 3. Cémentite (ou carbure de fer)	21
II. 10. Conclusion	22
Références bibliographiques	II

CHAPITRE III : PRESENTASSIONS D'EQUIPMENT

III. 1. Introduction	23
III. 2. Objectifs	23
III. 3. Matériau d'étude	23
III. 4. Préparation des échantillons	24

III. 4. 1. Les échantillons destinés à la microstructure et la micro dureté	24
III. 4. 1. 1. La phase de Découpage	24
III. 4. 1. 2. La phase de Rectification	24
III. 4. 2. Les éprouvettes de traction	25
III. 4. 2. 1. Epreuve de machine classique	25
III. 4. 2. 2. Epreuve de machine numérique	27
III. 5. Technique de traitement thermochimique et thermique	28
III. 5. 1. La phase de Cémentation	29
III. 5. 2. La phase de la Trempe	29
III. 5. 3. La phase du revenu	30
III. 6. Préparation d échantillons après le traitement thermique et thermochimique	30
III. 6. 1. La phase de découpage	30
III. 6. 2. La phase d'enrobage	30
III. 6. 3. La phase de Polissage	31
III. 6. 4. La phase d'Attaque chimique	32
III. 7. Analyse et mesurage des couches cémentées par microscope optique	32
III. 8. L'essai de la dureté	33
III. 9. La machine de traction	33
III. 9. 1. Machine de traction classique	33
III. 9. 2. Machine de traction numérique	34
III. 10. Conclusion	35
 CHAPITRE IV : RESULTATS DES EXPERIENCES TRAITEMENT ET ANALYSE	
IV. 1. Introduction	36
IV. 2. Mesure de la dureté des échantillons à l'état brut	36
IV. 3. Mesure de la dureté des échantillons après traitement thermochimique par cémentation	36

IV. 3. 1. Mesure de la de dureté des échantillons après traitement thermochimique par cémentation pendant 4 heures	36
IV. 3. 2. Mesure de la de dureté des échantillons après traitement thermochimique par cémentation pendant 6 heures	37
IV. 3. 3. Mesure de la de dureté des échantillons après traitement thermochimique par cémentation pendant 8 heures	37
IV.4. Influence du temps de maintien TM sur la dureté des aciers	37
IV. 5. Mesure du pourcentage de carbone des échantillons à l'état brut	38
IV. 6. Mesure du pourcentage de carbone des échantillons après traitement thermochimique par cémentation	38
IV. 6. 1. Mesure du pourcentage de carbone des échantillons après traitement thermochimique par cémentation pendant 4 heures	38
IV. 6. 2. Mesure du pourcentage de carbone des échantillons après traitement thermochimique par cémentation pendant 6 heures	39
IV. 6. 3. Mesure du pourcentage de carbone des échantillons après traitement thermochimique par cémentation pendant 8 heures	39
IV.7. Influence du temps de maintien TM sur pourcentage de carbone des aciers	40
IV. 8. Mesure de la couche superficielle durcie des échantillons après traitement thermochimique par cémentation	40
IV. 8. 1. Mesure de la couche superficielle durcie des échantillons après traitement thermochimique par cémentation pendant 4 heures	40
IV. 8. 2. Mesure de la couche superficielle durcie des échantillons après traitement thermochimique par cémentation pendant 6 heures	41
IV. 8. 3. Mesure de la couche superficielle durcie des échantillons après traitement thermochimique par cémentation pendant 8 heures	41
IV. 8. 4. Influence du temps de maintien TM sur la couche superficielle durcie (CSD) des aciers	41
IV. 9. Analyse microscopique des micrographies des structures des échantillons	42
IV. 9. 1. Analyse microscopique des micrographies des structures des échantillons à l'état brut	42
IV. 9. 2. Analyse microscopique des micrographies des structures des échantillons à l'état initial du traitement par cémentation (traitement initial)	43

IV. 9. 3. Analyse microscopique des micrographies des structures des échantillons à l'état final du traitement par cémentation (traitement final)	44
IV. 10. Evolution de la Contrainte nominale σ en fonction du temps de maintien lors d'un essai de traction	46
IV. 11. Evolution de la force de traction F en fonction du temps de maintien lors d'un essai de traction	46
IV. 12. Evolution de l'allongement Δl en fonction du temps de maintien lors d'un essai de traction....	47
IV. 13. Conclusion	48
Conclusions générales et perspectives	49

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Figure I.2 : Définition des différents domaines de dureté	6
Figure I.3 : Principe de dureté brinell	7
Figure I.4 : Principe de mesure de la dureté Rockwell : a) échelle HRC, b) échelle HRB	8
Figure I.5 : Principe de dureté Vickers	9
Figure I.6 : Eprouvette de traction : a) cylindrique, b) prismatique	10
Figure I.7 : Courbes rationnelles de traction de l'acier 35NC6	11
Figure II.1 : Austénite résiduelle dans une couche cémentée et durcie par trempe	15
Figure II.2 : Micrographie d'une couche cémentée par plasma pendant 2 h d'un acier SUS 316 L ..	16
Figure II.3 : profondeur conventionnelle de cémentation	16
Figure II.4 : Le diagramme de phase fer-carbone	19
Figure II.5 : La solution solide d'insertion	20
Figure II.6 : Micrographie représentant de la ferrite	21
Figure II.7 : Micrographie représentant de l'austénite	21
Figure II.8 : La molécule de cémentite (ou carbure de fer)	22
Figure II.9 : Micrographie représentant de la cémentite globulaire après un traitement de sphéroïdisation	22
Figure III.1 : spectromètre Type de SPECTROMAX	23
Figure III.2 : Tour parallèle	24
Figure III.3 : Exemple sur la rectifieuse plane	25

Figure III.4 : Dessin définition de l'éprouvette de la machine classique	25
Figure III.5 : l'éprouvette réelle de la machine classique	26
Figure III.6 : Dessin définition de l'éprouvette de la machine numérique	27
Figure III.7 : l'éprouvette réelle de la machine numérique	28
Figure III. 8 : chaine de traitement thermique SOLO	28
Figure III.9 : Machine de découpage	30
Figure III.10 : Enrobeuse type de micapress 3	31
Figure III.11 : Polisseuse numérique type de Micapersi	31
Figure III.12 : Equipement de microscope optique Leica	32
Figure III.13 : Appareil de mesure de la micro-dureté type de Zwick Roell, ZHV10	33
Figure III.14 : Machine de traction classique type de WE-30	34
Figure III.15 : Machine de traction numérique	34
Figure IV.1 : Influence du temps de maintien TM sur la dureté des aciers	38
Figure IV.2 : Influence du temps de maintien TM sur %C des aciers	40
Figure IV.3 : Influence du temps de maintien TM sur la couche superficielle durcie des aciers	42
Figure IV.4 : Micrographies des structures des échantillons à l'état brut	43
Figure IV.5 : La microstructure du Cœur de l'acier traité par la cémentation (traitement initial)	43
Figure IV.6 : La microstructure la couche superficielle durcie de l'acier traité par la cémentation (traitement initial)	44
Figure IV.7 : La microstructure du Cœur de l'acier traité par la cémentation (traitement final)	45

Figure IV.8 : La microstructure la couche superficielle durcie de l'acier traité par la cémentation (traitement final)45

Figure IV.9 : Evolution de la Contrainte nominale σ en fonction du TM46

Figure IV.10 : Evolution de la force de traction F en fonction du TM47

Figure IV.11 : Evolution de l'allongement Δl en fonction du TM48

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Les propriétés mécaniques de l'acier selon le taux de carbone	3
Tableau III.1 : composition chimique de l'acier XC20	24
Tableau III.2 : Procédé d'usinage d'éprouvette de la machine classique	26
Tableau III.3 : Procédé d'usinage d'éprouvette de la machine numérique	27
Tableau III.4 : Paramètres de traitement	28
Tableau IV.1 : Mesure de la de dureté des échantillons à l'état brut	36
Tableau IV.2 : Mesure de la de dureté des échantillons après traitement par cémentation pendant 04 heures	36
Tableau IV.3 : Mesure de la de dureté des échantillons après traitement par cémentation pendant 06 heures	37
Tableau IV.4 : Mesure de la de dureté des échantillons après traitement par cémentation pendant 08 heures	37
Tableau IV.5 : Mesure de %C des échantillons à l'état brut	38
Tableau IV.6 : Mesure % C des échantillons après traitement par cémentation pendant 04 heures ..	39
Tableau IV.7 : Mesure de % C des échantillons après traitement par cémentation pendant 06 heures	39
Tableau IV.8 : Mesure de % C des échantillons après traitement par cémentation pendant 08 heures	39
Tableau IV.9 : Mesure CSD pendant 04 heures	41
Tableau IV.10 : Mesure CSD pendant 06 heures	41

Tableau IV.11 : Mesure CSD pendant 08 heures41

INTRODUCTION

GENERAL

Introduction général

Les aciers sont des matériaux ferreux qui se distinguent à la fois du fer et de la fonte, c'est un alliage métallique dont l'élément chimique principal est le fer et dont l'autre élément essentiel est le carbone, les caractéristiques mécaniques de l'acier qui font l'objet de garanties dans les normes de produit ou qui attestent la conformité d'une fabrication sont déterminées suivant des processus normalisés : les essais.

Les traitements thermochimiques change non seulement la structure de l'acier, mais aussi la composition chimique des couches superficielles, ces traitements superficiels ont une grande importance industrielle parce que les propriétés mécaniques peuvent être améliorées.

L'objectif de cette étude est d'examiner nos échantillons avant et après les traitements par cémentation gazeuse, on appliquant une force de Traction suivant son axe jusqu'à la rupture de l'éprouvette, pour voir La rigidité et La résistance de notre matériau.

Le mémoire est composé de quatre chapitres principaux :

- ✓ Le premier chapitre rappelle les notions de base sur les aciers, leurs nature et propriétés mécanique.
- ✓ Le deuxième chapitre nous présentons les définitions des traitements thermochimiques, et essentiellement le traitement par la cémentation.
- ✓ Le troisième chapitre nous avons présenté les données expérimentales les équipements de notre travail.
- ✓ Le quatrième chapitre, une application sur l'acier XC20 est illustrée. Une étude expérimentale a conduit à déterminer l'effet du temps de maintien sur la Dureté, l'épaisseur de de la couche superficielle, le pourcentage de carbone, la microstructure et voir la résistance de l'acier sur l'essai de traction.

Enfin, nous terminerons par une conclusion générale et les perspectives à donner à ce travail.

CHAPITRE I :
NATURE ET PROPRIÉTÉS DES
ACIERS

I.1. Introduction

Les matériaux métalliques constituent la base du développement technologique, ceci est également valable pour la construction des outils, des machines, des installations et des automobiles que pour l'aéronautique et l'aérospatial et la médecine, les alliages à base de fer, aciers et fontes, constituent en masse près de 90 % de la production mondiale de matériaux métalliques.

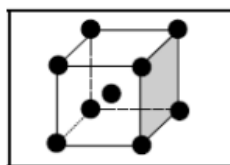
Les aciers sont des matériaux contenant en masse plus de fer que tout autre élément et dont la teneur en carbone est inférieure à 2 % (ou 2,1 %), limite courante les séparant des fontes, la normalisation (NF EN 10020) retient trois familles principales d'aciers, les aciers non alliés (aucun élément d'alliage ne dépasse 0,6 % ; sauf 1,65 % pour Mn), les aciers inoxydables (10,5% de chrome minimum et 1,2 % de carbone maxi) et les autres aciers alliés.

I. 2. Les aciers

On appelle acier, l'alliage ferreux contenant moins de 2,06 % C sous forme de cémentite, le fer, principal constituant de l'acier, a comme caractéristique de posséder deux structures cristallines différentes, 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. [1]

I. 2. 1. Le réseau cubique centré (c.c.)

En dessous de 906 °C, le fer possède une structure cristalline cubique centrée, 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 . [1]

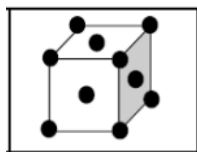


I. 2. 2. Le réseau cubique à faces centrées (c.f.c.)

De 906 à 1 401 °C, le fer possède une structure à maille cubique à faces centrées 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 . Au-delà de 1 401

°C et jusqu'à la température de fusion, le fer retrouve sa structure cristalline cubique centrée (c.c.).

[1]



I. 3. Les propriétés Mécanique des aciers

L'acier constitue l'un des deux principaux métaux que les opérateurs en traitement thermique sont appelés à traiter dans le cadre de leur travail quotidien, l'autre étant l'aluminium, l'acier est un alliage de fer et de carbone, les propriétés mécaniques sont en relation directe avec le contenu en carbone, selon sa teneur en carbone, ses propriétés en seront passablement modifiées. [1]

Tableau I.1 : Les propriétés mécaniques de l'acier selon le taux de carbone. [1]

Taux de carbone	Composition	Propriétés	Utilisations typiques	Remarques
Bas carbone (ferrite)	0,10 à 0,25 % C	60 000 psi	Produits en feuilles, Clous, tuyaux, Pièces forgées, vis, Tôles, profilés structuraux	Ductilité
Moyen carbone (ferrite et perlite)	0,30 à 0,60 % C	40 HRC	vilebrequins forgés, engrenage ; rails, matrices de forgeage, lames de ressorts, burins, Marteaux, scies à ruban	Compromis en la ductilité et la résistance à l'usure
Haut Carbone (perlite et cémentite)	0,80 à 1,20 % C	170 HB	acier à outils (ressorts à boudins, poinçons, matrices, mèches, outils de tour, lames, billes de roulement.	Résistance à l'usure

L'augmentation du taux de carbone dans un acier aura pour effet : [1]

- ✓ D'augmenter la dureté ;
- ✓ D'augmenter la résistance en traction ;
- ✓ D'augmenter la limite d'élasticité ;
- ✓ De réduire la résistance à l'impact ;
- ✓ De réduire la ductilité (% d'allongement).

I. 4. Propriétés mécaniques des métaux

Les propriétés mécaniques courantes des métaux sont liées aux concepts usuels d'élasticité et de plasticité, elles résultent des différentes orientations des cristaux et de la présence des joints.

I.4 .1. Elasticité et plasticité

L'une des propriétés principales de l'état métallique est l'aptitude à la déformation sous l'effet d'une contrainte, la déformation résultante peut être élastique, c'est-à-dire qu'elle se résorbe si la contrainte cesse d'être appliquée (la zone OA) voir (Figure I.1), ou plastique, dans le cas où le solide conserve une déformation permanente après que la sollicitation mécanique est été supprimée (la zone AB) voir (Figure I.1), [2]

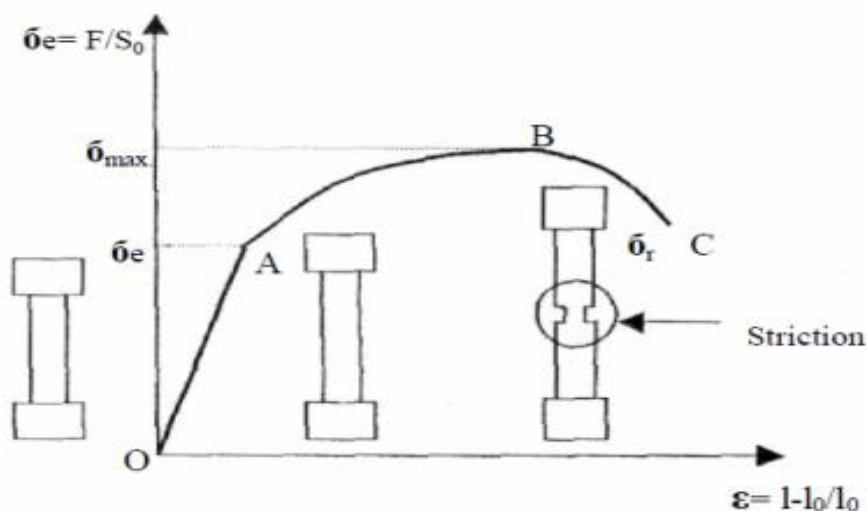


Figure I.1 : Courbe contrainte-déformation. [2]

L'élasticité est la faculté que possède le métal de pouvoir subir une déformation qui cesse après suppression de l'effort qui la provoque, quand un échantillon de métal est soumis à un effort

relativement faible, il ne subit que des déformations élastiques, la position moyenne des atomes n'est que légèrement modifiée.

La plasticité du métal revêt deux aspects principaux :

- ✓ **Malléabilité** : possibilité de réduire le métal en feuille plus ou moins mince ;
- ✓ **Ductilité** : faculté de pouvoir étirer le métal en fils sans le rompre ;

I.4. 2. Résistance mécanique

C'est la capacité d'une structure de résister aux efforts mécaniques extérieurs, le plus souvent cette grandeur est caractérisée par la résistance à la rupture « σ_r » mesurée à la suite d'un essai de traction, c'est la grandeur la plus utilisée pour la majorité des pièces soumises à un chargement statique. [3-4].

I. 4. 3. Rigidité

Intervalle de la déformation élastique réversible d'une structure atomique, cette propriété est liée aux forces inter atomiques dues à la variation de distance entre les atomes, elle est caractérisée par le module longitudinal de Young où la loi de HOOK est valable, elle est mesurée suite à un essai de traction. [5-6].

I. 4 .4. Ductilité

C'est le domaine de déformation permanente irréversible d'une structure, souvent désigné sous le nom de domaine plastique, cette plasticité est due au glissement irréversible entre les plans cristallographiques du matériau, un matériau ductile peut être étiré ou allongé sans se rompre. [5]

I.5. Essais mécaniques

Nous définissons dans le cadre de ce travail, deux essais fondamentaux (dureté, traction,) qui intéressent d'une voie directe ou indirecte la résistance à la rupture du matériau et caractérisent sa consolidation.

I. 5. 1. Essais duresté

La détermination des propriétés mécaniques des couches mince et de la surface des matériaux est très importante, l'essai de duresté consiste à mesurer l'effet occasionné par le contact, sous une pression donnée, d'un matériau de géométrie définie sur la surface d'un échantillon. [7]

Plusieurs domaines de duresté peuvent être définis en fonction de la charge appliquée (Figure I.2) *Büchle* [8] a introduit en 1965 la notion de la macro-duresté pour des charges supérieures à 3÷5 kgf et celle de micro-duresté pour des charges inférieures à 100÷200 gf, le domaine intermédiaire étant celui de la duresté sous charge réduite.

Dans les années 80, est apparu le domaine de nano duresté qui correspond à des charges appliquées inférieures à 1gf.

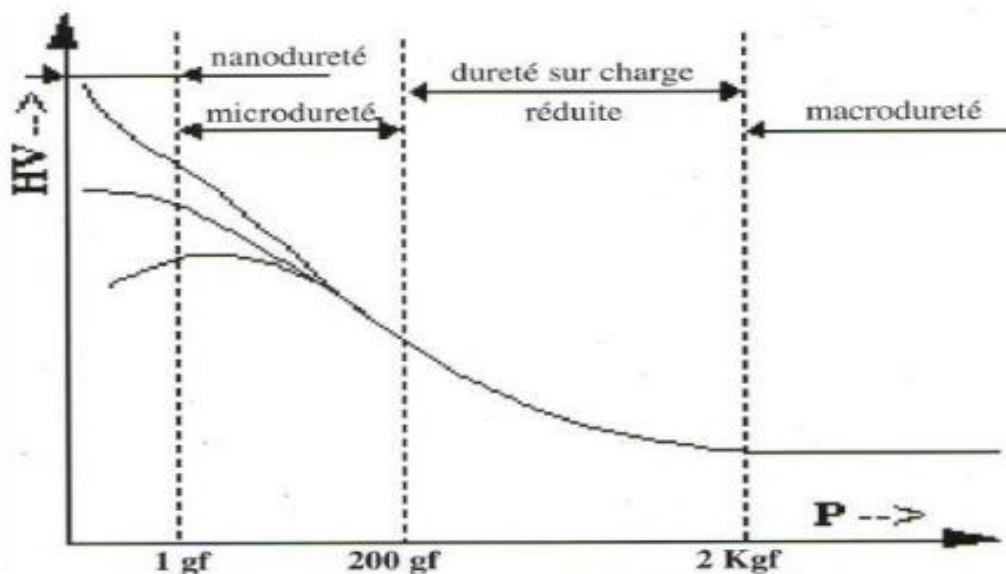


Figure I.2 : Définition des différents domaines de duresté.

I. 5. 2. Type d'essai de duresté

Il s'agit des essais les plus couramment pratiqués, le principe est toujours le même : un pénétrateur indéformable de forme géométrique précise, pénètre dans le métal sous l'action d'une charge constante et laisse une empreinte dans le matériau à tester, on mesure les dimensions de l'empreinte et on en déduit la duresté.

Dans une première approche, on peut relier de manière assez simple la limite d'élasticité R_e avec la surface de l'empreinte : plus l'objet pénétrant s'enfonce, plus la surface S de pressions s'agrandit, donc la force F étant constante, plus la contrainte diminue, lorsque la contrainte n'est pas suffisante pour déformer plastiquement le solide à tester, l'objet pénétrant s'arrête et la dureté est calculée à partir du rapport de la force appliquée sur la surface indentée ([Relation I.1](#)). [9]

$$R_E = F/S \quad \text{I.1}$$

I. 5. 2. 1. Essai de dureté Brinell

L'essai a été édité dès 1924, il consiste à faire pénétrer dans le métal à tester, une bille polie de forme sphérique en acier trempé ou en carbure de tungstène ([Fig. I.3](#)), le diamètre D utilisé peut valoir 1 mm, 2,5 mm, 5 mm et 10 mm, la charge appliquée sur le métal est maintenue pendant 15 à 30 s selon le solide après l'annulation de la charge, la bille laisse dans le métal une empreinte circulaire permanente dont on mesure le diamètre d .

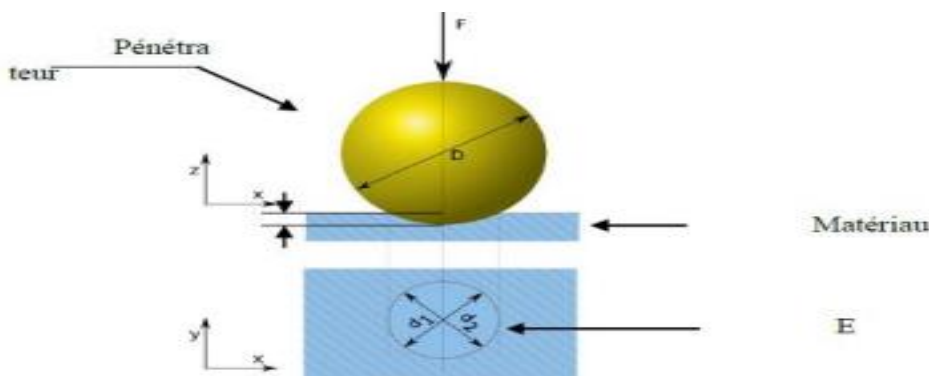


Figure I.3 : Principe de dureté brinell.

La force F étant exprimée en kgf, le diamètre de l'empreinte d en mm et la dureté Brinell HB exprimée en kgf/mm² selon la relation suivante ([I.2](#)).

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad \text{I.2}$$

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

I. 5. 2. 2. Essai de dureté Rockwell

L'essai consiste à mesurer la profondeur rémanente de l'empreinte indentée, le pénétrateur de forme géométrique conique pour le critère HRC (Figure. I.4a), ou bien sphérique pour le critère HRB (Figure.I.4b) est appuyé sous faible charge, sur la surface à essayer et dans des conditions bien précises. le pénétrateur conique est en diamant de section circulaire et d'angle au sommet 120° à pointe arrondie sphérique de rayon de 0,2 mm, le pénétrateur sphérique est une bille d'acier trempée polie de diamètre 1,588 mm ou 3,175 mm. [9]

L'essai se déroule en trois phases.

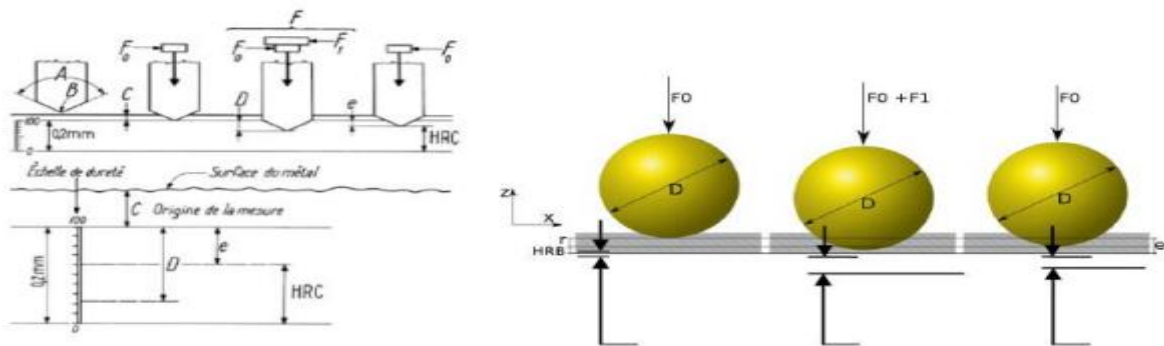


Figure I.4 : Principe de mesure de la dureté Rockwell : a) échelle HRC, b) échelle HRB.

- ✓ Une phase I de pénétration initiale avant charge additionnelle : après application d'une charge initiale $F_0 = 98\text{N}$ (10 kgf). La profondeur de pénétration étant l'origine qui sera utilisée pour la mesure de la dureté ;
- ✓ Une phase P de pénétration avec charge additionnelle : Sous la charge supplémentaire F_1 , le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur P ;
- ✓ Une phase R de pénétration rémanente sans la charge additionnelle : La force F_1 est relaxée et on lit les indications de l'enfoncement.

I. 5. 2. 3. Essai de dureté Vickers

Il consiste à imprimer dans le métal testé une empreinte avec un pénétrateur en diamant de forme géométrique pyramidale à base carrée et d'angle au sommet entre deux faces opposées de 136° , sous l'action d'une force connue, on mesure la diagonale Del 'empreinte carrée laissée par le pénétrateur (Figure I.5).

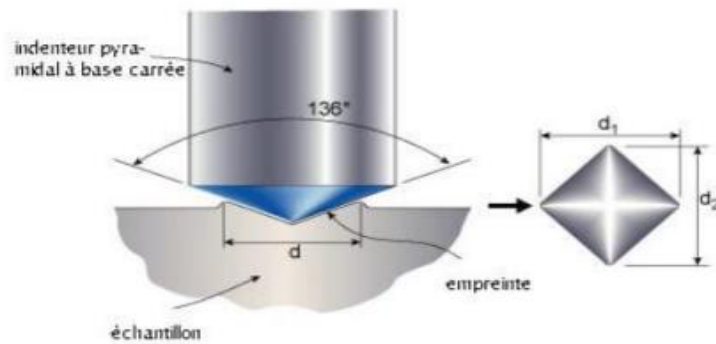


Figure I.5 : Principe de dureté Vickers.

Généralement la gamme des forces utilisables (5 à 100 kgf) permet d'appliquer cette méthode avec toutes les dimensions d'échantillons+, pour des raisons de fiabilité de l'essai, la force est choisie de telle manière à donner une empreinte ayant la diagonale moyenne inférieure aux deux tiers de l'épaisseur, d'autre sources préconisent que la profondeur de pénétration ne dépasse pas le huitième de l'épaisseur de la pièce à tester. [10]

La force F étant exprimée en kgf, le diamètre de l'empreinte d en mm et la dureté Vickers est exprimée en kgf/mm² selon la relation suivante (I.3).

$$HV = \frac{1,8454p}{d^2} \quad \text{I.3}$$

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

I. 5. 3. Essai de traction

I. 5. 3. 1. Intérêt et déroulement de l'essai

L'essai de traction est l'essai mécanique le plus fréquemment utilisé, il consiste à soumettre une éprouvette du matériau à étudier à deux efforts F de tension de sens opposés et de même valeurs absolues, la ligne d'action étant confondue avec l'axe de symétrie ou de rotation de l'éprouvette, on mesure instantanément l'allongement Δl , correspondant. [6]

Afin de pouvoir utiliser les courbes brutes de traction, on doit les modifier pour que les résultats obtenus ne soient fonction que du matériau étudié et non de la géométrie de l'éprouvette, pour ce

faire, on rapporte la charge F à la section initiale S_0 de l'éprouvette en vue d'obtenir la contrainte nominale σ :

$$\sigma = F / S \quad \text{I.4}$$

Et on apporte l'allongement Δl à la longueur initiale entre repères l_0 , pour obtenir la déformation nominale ε .

$$\varepsilon = \Delta l / l_0 \quad \text{I.5}$$

L'essai est le plus souvent normalisé, la forme de l'éprouvette est soit cylindrique, soit prismatique (fig. I.6).

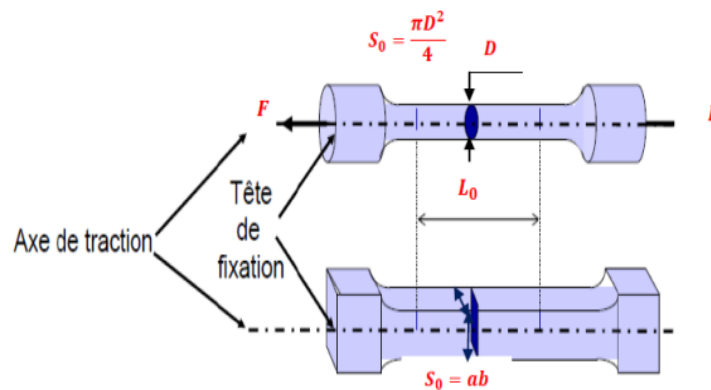


Figure I.6 : Eprouvette de traction : a) cylindrique, b) prismatique.

Les extrémités, ou têtes, de l'éprouvette ont une section supérieure à S_0 , ce qui permet de les fixer sur la machine d'essai, la géométrie des têtes dépend du mode de fixation utilisé (serrage sur têtes lisses, filetage ou épaulement), le raccordement entre la partie centrale et les têtes doit toujours être progressif afin de minimiser l'effet de concentration des contraintes.

L'éprouvette comprend toujours, entre deux repères séparés par une distance l_0 , une section constante S_0 , comme la charge de traction est appliquée selon l'axe de l'éprouvette, on comprend que dans la zone centrale, entre les repères, la contrainte soit uniforme tant que la section demeure constante.

I. 5. 3. 2. Courbes conventionnelle et rationnelle.de traction

L'essai de traction nous permet d'obtenir la réponse du matériau sous forme d'une courbe dite courbe de traction du matériau, dans le cas général, les machines d'essai fournissent une courbe dite conventionnelle (Figure I.7) puisqu'on l'on rapporte les efforts F à la valeur initiale S_0 de la section. Cela peut être accepté dans le domaine des petites déformations ($\varepsilon \leq 20\%$). Cependant lorsque les déformations deviennent importantes ($\varepsilon \rightarrow \infty$), la réduction de la section le devient aussi à cause de l'instabilité plastique à tel point que la contrainte réelle ou vraie σ_v soit représentée par le rapport de la force à la section instantanée S , une courbe rationnelle de traction est donc la représentation graphique de la contrainte vraie σ_v en fonction de la déformation relative ε_v .

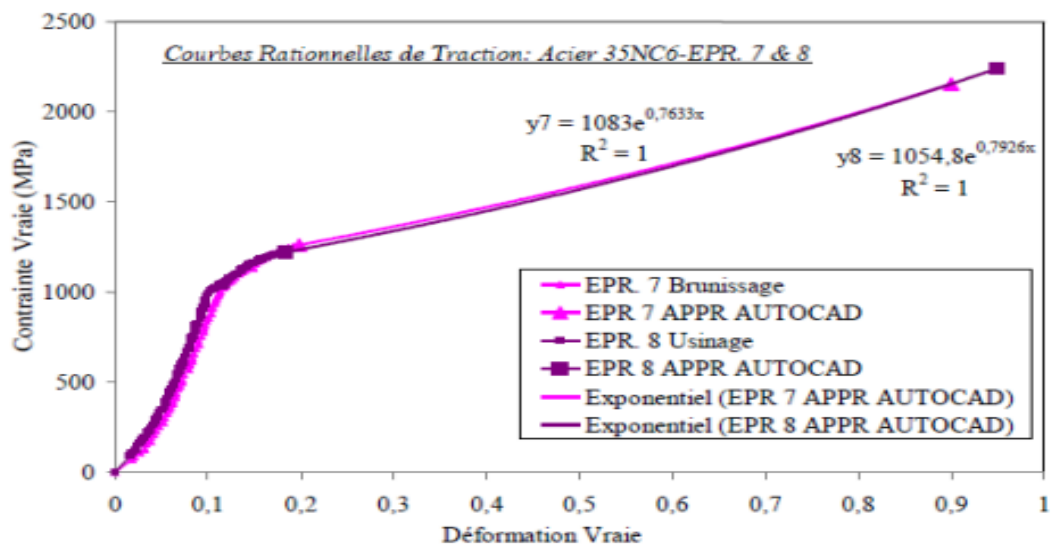


Figure I.7 : Courbes rationnelles de traction de l'acier 35NC6. [10]

La courbe de traction rationnelle (Figure I.7) délivre donc des informations plus importantes que l'essai classique, l'intérêt est d'en déduire des lois permettant de modéliser le comportement du matériau, cependant les propriétés de traction sont souvent définies à partir d'une courbe conventionnelle de traction.

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une définition pour l'ensemble des aciers, présenté leurs propriétés mécaniques et enfin cité les différents essais mécaniques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] R. DESGAGNES, R. LANGEVIN, « guide d'auto-apprentissage pour les opérateurs en traitement thermique », Le Comité sectoriel de la main-d'œuvre dans la fabrication métallique industrielle (PERFORM), Bibliothèque et Archives Canada, 2015.
- [2] L.Laouar, Traitement mécanique de surface par brunissage des aciers XC48 et XC18 – Optimisation et caractérisation, Thèse doctorat d'état ; Université de Annaba, 2007
- [3] L.SEDOV, mécanique des milieux continus, IZDATELVSTVO « Hayka » 1973, Traduction française, Editions Mir 1975.
- [4] L. KATCHANOV, Eléments de la théorie de la plasticité, traduction française, Éditions Mir 1975.
- [5] G FRADE ; Métallographie essais mécaniques ; 1970.
- [6] J-P Baillon, J-M Dorlot, DES MATERIAUX, Presses Internationales polytechnique, Ecole polytechnique de Montréal, 2000.
- [7] O. Taâmallah, Effet des traitements mécaniques de surface (TMS) sur l'érouissage et La ténacité d'un acier, Thèse de Magister ; Université de Annaba, 2012
- [8] H. Bückle la machine-outil française, 206,125-147,1965.
- [9] A. Iost, R. Bigot, L. Boudreau, matériaux et techniques, l'essai de dureté Vickers : Applications et influence de la charge.77-79, 1995.
- [10] Mécanique de la rupture les essais et leurs significations, Ecole des mines, Nancy, Édito.

CHAPITRE II :
LES TRAITEMENTS
THERMOCHIMIQUES

II. 1. Introduction

On peut définir les traitements thermochimique comme suit : « traitement consistant à chauffer une pièce jusqu'à la température donnée dans un milieu solide, liquide ou gazeux, qui dégage facilement l'élément de diffusion à l'état atomique, à la maintenir à cette température, puis à la refroidir, donc à la différence entre un traitement thermique et un traitement thermochimique, changement non seulement la structure de l'acier, mais aussi la composition chimique des couches superficielles, ce qui permet de modifier dans de plus larges limites ses propriétés. ». [2]

En clair, lorsqu'on a besoin d'une dureté superficielle plus élevée et une ductilité encore plus grande, on utilise les traitements thermochimiques, cette modification se fait par l'insertion de divers gaz en fonction des types de traitements désirés : carbone, azote, ammoniac, oxyde de carbone, méthane, etc.

Un traitement thermochimique compte trois stades élémentaires :

- ✓ Un processus dont le siège est le milieu extérieur et qui assure le dégagement de l'élément diffusant à l'état atomique ;
- ✓ Un contact des atomes d'élément diffusant avec la surface de la pièce en acier et formation des liaisons chimiques avec les atomes de fer (absorption) ;
- ✓ Une pénétration de l'élément saturant en profondeur dans le métal de base, c'est à dire, le stade de diffusion.

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. [3-4]

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 AC3, le plus souvent entre 850 °C et 1000 °C. [5]

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. [6-7]

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 teneurs 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. [8]

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 [9] en outre certains éléments d'alliage peuvent agir d'une manière sensible sur la vitesse de diffusion du carbone au cours de la cémentation. [10]

Quelques précautions particulières sont à retenir lors d'un traitement thermochimique de cémentation, tout d'abord, un nettoyage insuffisant peut entraîner des déformations après trempe pour les raisons qui suivent, les déformations seront d'autant plus réduites que la profondeur de cémentation et la teneur en carbone seront homogènes, des résidus d'huile de coupe peuvent constituer un obstacle local à la diffusion du carbone, créant ainsi des points à trempabilité différente.

Le soufre contenu dans ces huiles peut modifier l'équilibre thermochimique en abaissant le potentiel carbone, la rouille est aussi un élément qui tend à abaisser ce potentiel carbone, ensuite, dans certains cas, lors de la préparation des pièces, il faudra appliquer une peinture (Stop-off / No-Carb) pour éviter la déformation à certains endroits. [1]

II. 3. Techniques de cémentation

Les agents de carburation peuvent être solides, liquides ou gazeux.

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 des activants 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 : [11]



L'addition du carbonate rend le ciment beaucoup plus actif et enrichit l'atmosphère carburante en oxyde de carbone : [11]



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. [11]

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, atmosphère 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 libère s'insère dans le réseau cubique à face centrée du fer. [11]



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. [12]

La formation des oxydes internes est un phénomène typique dans la cémentation gazeuse [13-14], la quantité des oxydes internes formés et leur profondeur 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 austénitiques soit à l'intérieur des grains, ceci peut influencer sur la résistance à la fatigue des outils, la Figure II.2 représente la structure d'une couche cémentée à 980°C pendant 2h (33% H₂, 28%CO, 0.8% CH₄, enrichi avec propane C₃H₈), indiquant la présence d'une oxydation interne. [15]

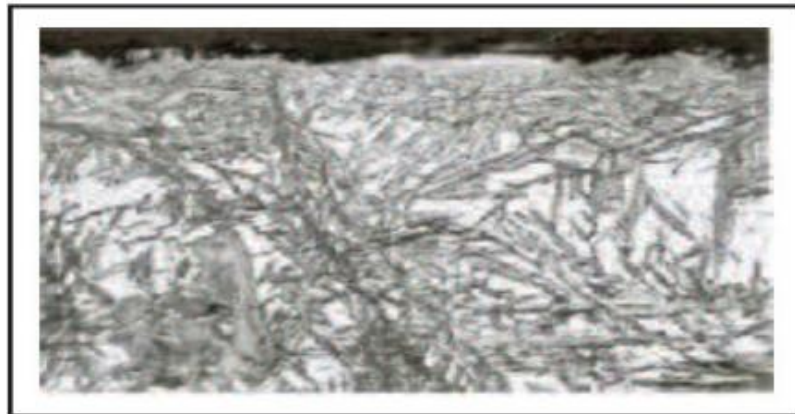


Figure II.1 : Austénite résiduelle dans une couche cémentée et durcie par trempe. [15]

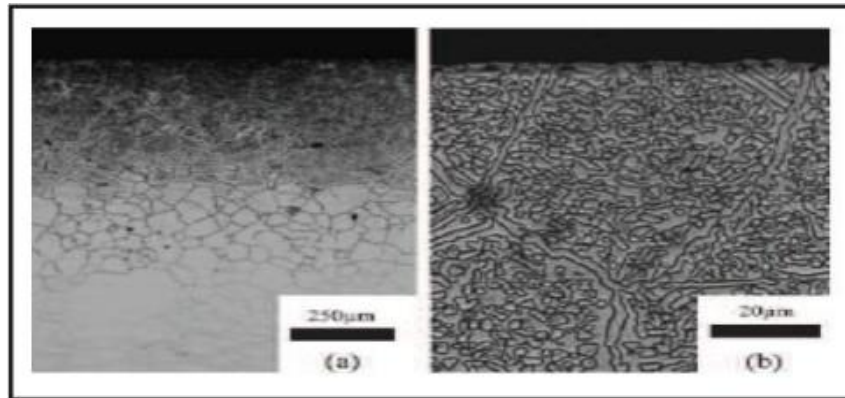


Figure II.2 : Micrographie d'une couche cémentée par plasma pendant 2 h d'un acier SUS 316 L. [16]

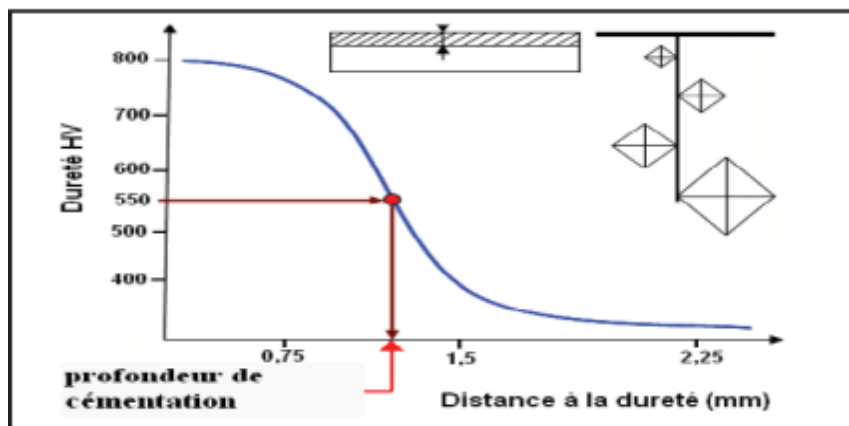


Figure II.3 : profondeur conventionnelle de cémentation. [17]

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 et de la productibilité ;
- ✓ 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. [18]

La (Figure II.2) représente une couche cémentée par plasma d'un acier SUS 316L.

II. 4. Profondeur cémentée

La couche traitée peut être caractérisée par le profil de micro-dureté qui permet de mesurer l'épaisseur efficace de la couche, appelée "profondeur conventionnelle de cémentation", elle est définie par la distance à la surface du point pour lequel la dureté a une valeur égale à 550 HV, (Figure II.3). [17], la profondeur de durcissement par cémentation dépend partiellement de la trempabilité des aciers, mais surtout des conditions du traitement, l'épaisseur visée pour la couche cémentée varie selon la destination et le volume de la pièce, les épaisseurs importantes (0.8mm à 1.8 mm ou plus) sont réservées à des pièces devant résister à l'usure et des pièces de forte section. Pour les pièces moyennes de faibles sections, tels que les engrenages d'automobile, des épaisseurs de 0.2 mm à 0.8 mm peuvent être suffisantes. [14]

K. Olga [16] a montré que les aciers ayant des concentrations élevées en éléments gammagène (Si, Ni) augmentent la diffusivité du carbone dans l'austénite mais réduisent la cinétique de transfert du carbone à partir de l'atmosphère vers la surface de l'acier, par contre, les aciers avec des éléments carburigène (Cr, Mo) augmentent le coefficient de transfert de masse dans l'atmosphère en améliorant l'évolution du profil de carbone.

II. 5. Traitements thermiques après la cémentation

Pour donner aux pièces leurs propriétés finales, on les soumet après cémentation à des traitements thermiques dont le but est :

- ✓ De corriger la structure et d'affiner le grain au cœur et dans la couche cémentée.
- ✓ D'obtenir une dureté élevée de la couche cémentée et de bonnes propriétés mécaniques de cœur.
- ✓ D'éliminer le réseau de carbure dans la couche cémentée, qui peut apparaître par suite de la sursaturation en C. [12]

Le traitement thermique conduit dans la couche cémentée à une structure composée de martensite d'une certaine quantité d'austénite résiduelle et des carbures, 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 assurant ainsi un adoucissement.

Dans le cas d'une trempe d'aciers fortement alliés, la structure de la couche cémentée garde en quantité (jusqu'à 50%) de l'austénite résiduelle qui altère la propriété de dureté, après trempe, ces aciers sont traités à froid contribuant à la transformation de la plus grande partie de cette austénite en martensite.

La quantité d'austénite résiduelle peut être diminuée en réduisant la quantité de carbone dans la couche ou en ajoutant dans le four, avant l'achèvement du processus, de l'ammoniac pour former des nitrures des éléments d'alliages.

La cémentation suivie d'un traitement thermique élève la limite de fatigue des pièces par suite de la formation dans la couche cémentée de contrainte de compression résiduelles importantes, la limite à la fatigue peut être encore élevée par écrouissage réalisé par grenailage. [19]

II. 6. Aciers pour cémentation

Ce sont des aciers à grains fins et à basse teneur en carbone (0.10% et 0.20 %), les éléments d'alliage sont choisis en fonction de la massivité des pièces et des caractéristiques à cœur visées, ce sont :

- ✓ Aciers de construction non alliés et alliés spéciaux pour cémentation.
- ✓ Acier au carbone XC10-XC12-XC18.
- ✓ Acier au manganèse chrome 16MC5-20MC5 ;
- ✓ Acier au chrome – molybdène 18 CD4 ;
- ✓ Acier au nickel – chrome 10NC6-16NC6-20NC6-14NC11 ;
- ✓ Acier au nickel – chrome – molybdène 20NCD2-18NCD6 ;
- ✓ Acier au bore 21B3-20MB5-19NCDB2 ;
- ✓ Aciers de cémentation pour organes mécaniques massifs hautement sollicités ;
- ✓ Aciers au nickel – chrome 16NC6-18NC8 ;
- ✓ Aciers au nickel – chrome – molybdène 16NCD13. [20]

II. 7. Le diagramme d'équilibre fer-carbone

Le diagramme d'équilibre est fabriqué à partir des courbes de refroidissement des différents alliages de fer et de carbone, dans la courbe de refroidissement, chaque changement d'état de structures cristallines ou de solubilités apparaissent comme une discontinuité, lorsqu'on définit les traitements thermiques, particulièrement les températures de traitement, il est important de connaître les températures de transformations.

La ligne HJK, correspond à la transformation eutectoïde, lorsque l'alliage refroidit, il traverse cette ligne. À ce moment, la solution solide de fer gamma, austénite (CFC), se transforme en solution solide de fer alpha, ferrite (CC), puisque la solubilité maximum du carbone passe de 2 % dans le fer gamma à 0,025 % dans le fer alpha, il y a rejet de carbone sous forme de cémentite, donc lors du passage de la ligne HJK, l'austénite se transforme en perlite (agrégat de ferrite et de cémentite). Si on désire modifier la microstructure (et ainsi les propriétés mécaniques) de l'alliage, on doit modifier les transformations qui surviennent normalement dans l'alliage. [1]

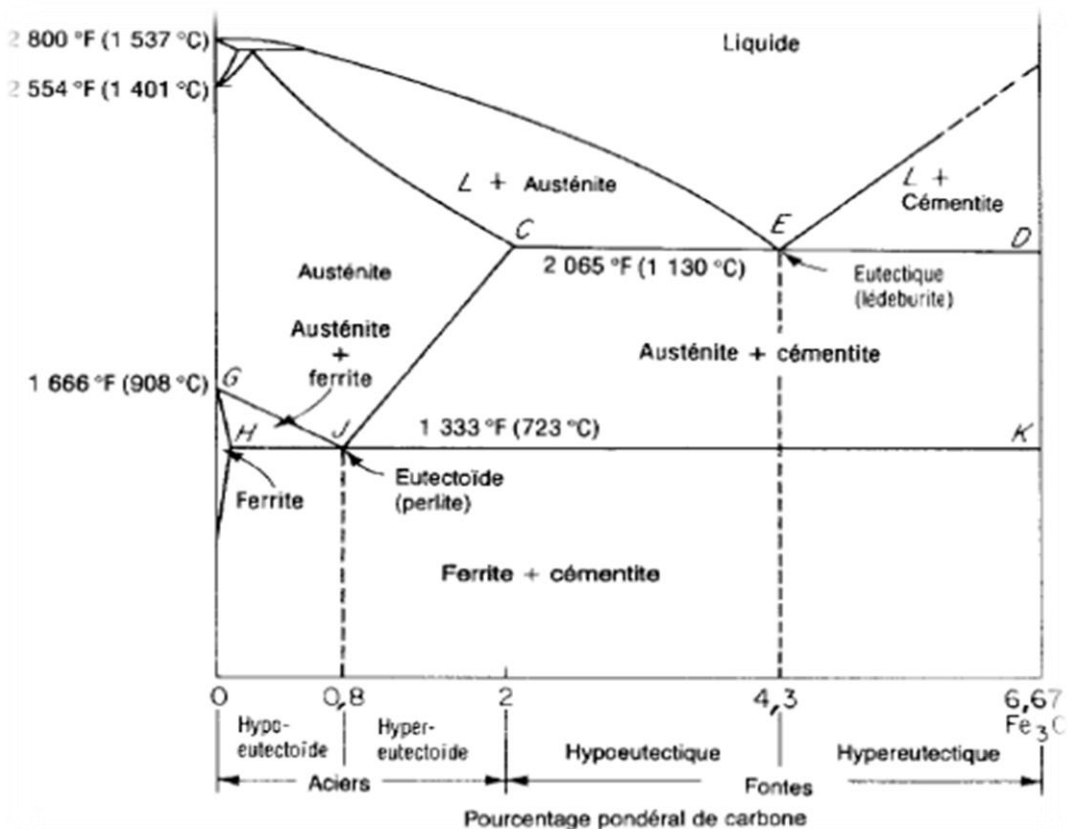


Figure II.4 : Le diagramme de phase fer-carbone. [1]

II. 8. Les alliages fer-carbone

On rencontre deux types d'alliages fer-carbone :

- ✓ Ceux qui contiennent du carbone à l'état libre sous forme de graphite (fonte) ;
- ✓ Ceux où l'on trouve le carbone dissous dans un composé intermétallique appelé carbure de fer ou cémentite, Fe_3C (acier).

Dans l'acier ou la fonte blanche, on trouve le carbone sous forme de cémentite, dans la fonte grise, il y a cohabitation des deux formes de carbone (graphite et cémentite). [1]

II. 9. La constitution des aciers au carbone

Trois solutions solides de base constituent les aciers au carbone.

II. 9. 1. La ferrite

La ferrite est une solution solide de carbone dans le fer α , les atomes de carbone s'insèrent au hasard dans les espaces interatomiques du réseau cristallin (c.c.), dans la matière, elle se présente sous forme de grains, on parle d'une structure tendre et souple et sa dureté est de l'ordre 10 à 15 HRC. [1]

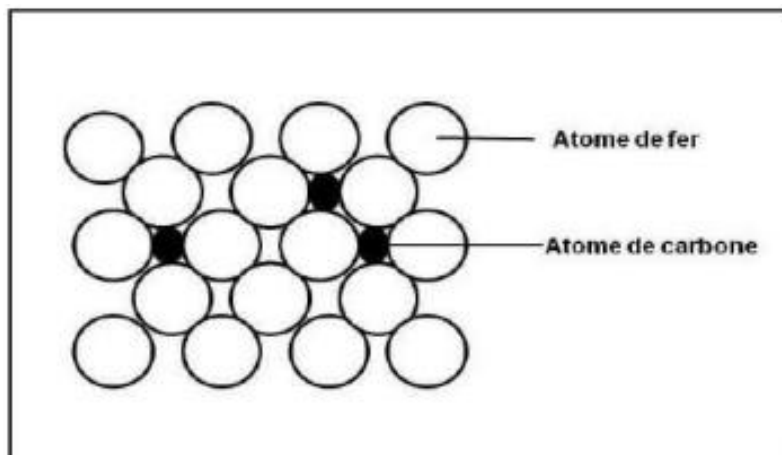


Figure II.5 : La solution solide d'insertion.

Les dimensions réduites de ces espaces limitent de façon très importante le nombre d'atomes de carbone insérés, le pourcentage maximal de carbone dissous dans la ferrite est de :

- ✓ 0,006 % à 20 °C ;
- ✓ 0,020 % à 723 °C.

Comme sa teneur de carbone est négligeable, on peut considérer la ferrite comme du fer α .

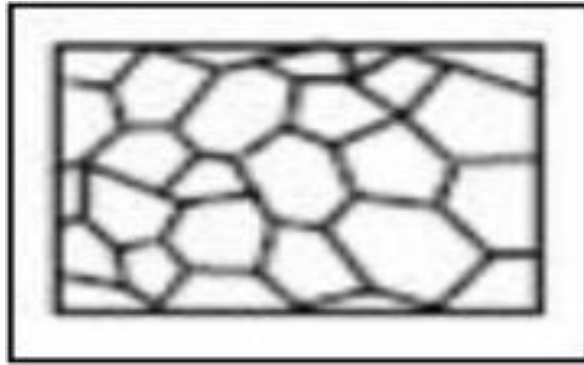


Figure II.6 : Micrographie représentant de la ferrite.

II. 9. 2. L'austénite

L'austénite est une solution solide de carbone dans le fer γ , les dimensions plus importantes des espaces interatomiques du réseau cristallin (c.f.c.) permettent à l'austénite de dissoudre jusqu'à 2,06 % de carbone à 1 145 °C, l'austénite est aussi une solution solide d'insertion, l'austénite est paramagnétique. [1]

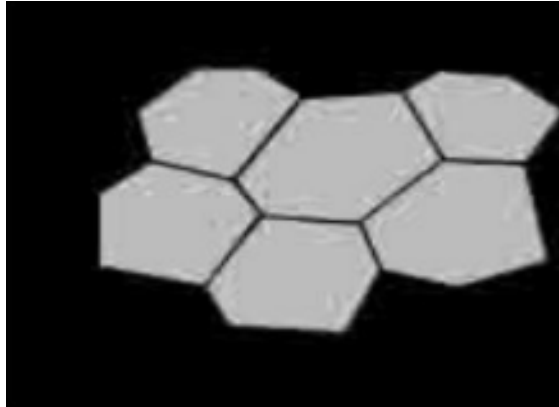


Figure II.7 : Micrographie représentant de l'austénite.

II. 9. 3. Cémentite (ou carbure de fer)

La cémentite est constituée de molécules composées d'atome de fer et d'atomes de carbone, trois atomes de fer pour un atome de carbone, Fe_3C . Elle contient 6,67 % de carbone (en masse), la cémentite ne forme pas de grain à l'échelle macroscopique, et elle peut se retrouver sous diverses formes : fines aiguilles, plaquettes, dans les joints de grain des aciers hypereutectoïdes, etc. [1]

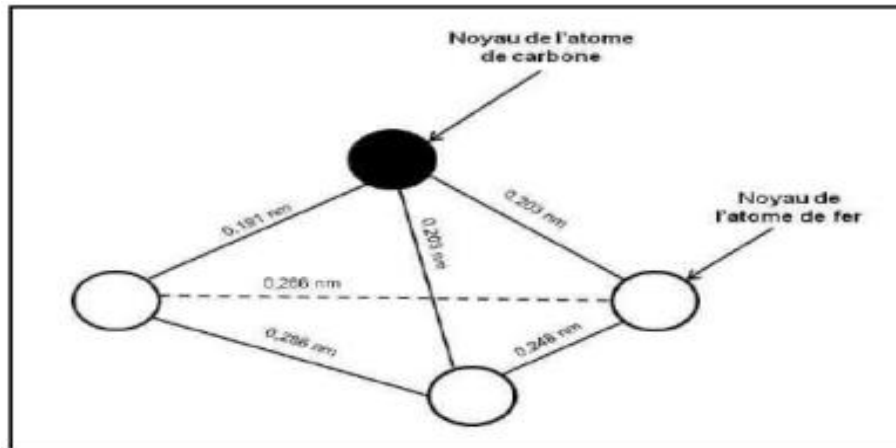


Figure II.8 : La molécule de cémentite (ou carbure de fer).

Ce composé intermétallique à une concentration de carbone de 6,67 % (en masse), il possède la caractéristique d'être très dure et très fragile.

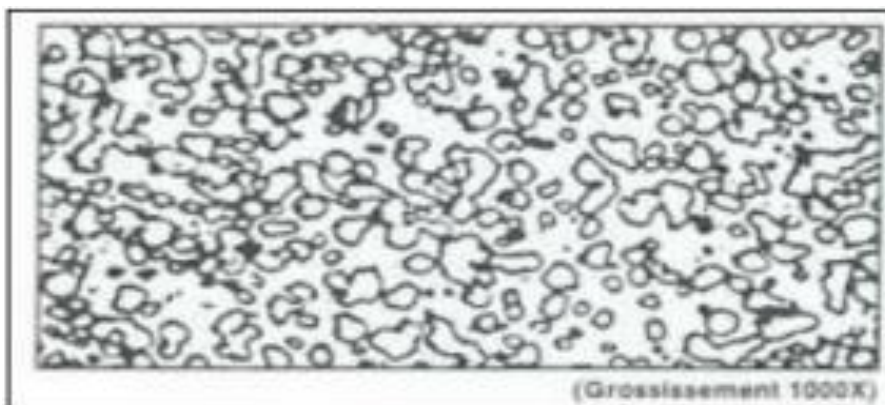


Figure II.9 : Micrographie représentant de la cémentite globulaire après un traitement de sphéroïdisation.

II. 10. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons défini ce qu'est un traitement thermochimique, et nous avons intéressé essentiellement par la cémentation qui est une méthode de durcissement superficiel permettant d'assurer une forte mise en précontrainte de compression de la surface et une bonne résistance à l'usure grâce à l'obtention d'une couche à haute teneur en carbone.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] R. DESGAGNES, R. LANGEVIN, « guide d'auto-apprentissage pour les opérateurs en traitement thermique », Le Comité sectoriel de la main-d'œuvre dans la fabrication métallique industrielle (PERFORM), Bibliothèque et Archives Canada, 2015.
- [2] S. BENZAADA, « Traitements thermiques, classification et désignation des aciers et fontes », p.80 « en ligne » www.univ-biskra.dz/enseignant/bensaada/Traitement%20thermique.pdf
- [3] E.J MITTEMEIJER, J.T SLYCKE, « Chemical potentials and activities of nitrogen and carbon imposed by gaseous nitriding and carburizing atmospheres », Surf. Eng, 12(2), 1996.
- [4] J.R. DAVIS: « Surface Hardening of Steels- Understanding the Basics'; ASM International, 2002.
- [5] M.M.BCHAUPINIL, L.SERAPLIR, R.TRIWT, « Analogies et différence entre les traitements de carbonituration et de cémentation », Aciers speciaux №13, 1975.
- [6] R. LEVEQUE, « Traitement superficiels des aciers à outils », Techniques de l'Ingénieur, 1993, M1135, Paris, France.
- [7] H. HERNS, H. FR. HINZ AND I. M. HUCKLENBROICH, « Progress in tool steel », Proceeding of the 4th international Conference on tooling, 1996, University Bochum. *
- [8] V.YAKUB, A.TIJANI, « Modeling and Simulation of Thermochemical Heat Treatment Processes: A Phase Field Calculation of Nitriding in Steel », PHD thesis, university of Bremen 2008.
- [9] D.GHIGLIONE, C.LEROUX, « Pratique des traitements thermochimiques, cémentation, carbonituration » ; Technique de l'ingenieur M1226, page 2-20.
- [10] X. AN, J. CAWLEY, W.M. RAINFORTH AND L. CHEN, « Spectrochemica Acta-Part B», 58, 689-698, 2003,
- [11] A. MOUUSA, « Amélioration des propriétés de surface d'un acier à outils de travail à chaud par des traitements thermiques et thermochimiques (Cémentation) », Mémoire de Magister, Université Badji-Mokhtar Annaba, 2011.
- [12] G. KRAUSS, « Microstructure and properties of carburized steel', in: Metals handbook. Heat treating, vol. 4. Materials Park, OH: ASM International; p. 363–75, 1991.

[13] G. PARRISH, «Carburizing: microstructures and properties», Materials Park, OH: ASM International; 1999.

[14] J.P.PEYRE, TOURNIER, «Choix des traitements thermiques superficiels », RPM CETIM Senlis 1985.

[15] Y. UEDA, N. KANAYAMA, K. ICHII, T. OISHI, « Surface and Coatings Technology »; p50, 193, 2005.

[16] K. OLGA, ROWAN AND RICHARD D, JR. Sisson, « Effect of Alloy Composition on Carburizing Performance of Steel », Journal of Phase Equilibria and Diffusion, JPEDAV, ASM International, 2009.

[17] J.BANALIS, G.MEADER, « Précis de métallurgie-Elaboration, structure, propriétés, normalisée» ; Edition Nathau 1997.

[18] A.CONSTANT, G.HENRY ET J.C.CHRBONNIER, « Principes de base des traitements thermiques, thermomécaniques, et thermochimiques des aciers », Edition 1992.

[19] P. MICHAUD, « Compréhension du rôle des éléments carburigènes dans la performance de nuances d'aciers destinées aux outillages pour l'injection d'alliages légers », aciers spéciaux N°35,1986.

[20] J. BLOUET, R. GRAS, « Traitement et revêtement de surface pour application tribologique », P34, CETIM, 1994.

**CHAPITRE III :
PRESENTASSIONS
D'EQUIPMENT**

III. 1. Introduction

Dans les deux chapitres précédents une synthèse bibliographique a montré que les traitements thermiques et thermo-chimiques sont par définition un moyen de durcissement opérationnel surfacique en premier ordre, influençant sur la surface des aciers et ses caractéristiques mécanique (essai de traction, la dureté) et la micro structure et les caractéristiques physico-chimiques.

Dans cette étude, nous étudierons l'effet de le tempe de maintien sur la caractérisation a suscité notre intérêt. À l'aide de méthodes expérimentales appropriées, nous avons réalisé le développement de cette partie du mémoire qui va décrire nos méthodes expérimentales et acheminer vers le résultat de notre étude.

III. 2. Objectifs

L'objectif de cette étude est étudier les effets de le temps de maintien sur la micro dureté, le pourcentage du carbone dans la couche superficiel et l'épaisseur de la couche cémenté et la microstructure, et l'essai de traction (l'allongement, la limite de élasticité).

III. 3. Matériau d'étude

Le matériau faisant l'objet de cette étude est un acier de faible teneur en carbone (XC20) dont la composition chimique est reportée dans le [Tableau III.1](#) qui a été réalisée à l'aide d'un spectromètre de type **SPECTROMAX** ([Figure III.1](#)), au niveau du laboratoire des analyses physico-chimiques.



Figure III.1 : spectromètre Type de **SPECTROMAX**.

Tableau III.1 : composition chimique de l'acier XC20.

Composition chimique													
%C	%Fe	%N	%P	%S	%Cu	%AL	%Ti	%Ni	%Cr	%Mo	%V	%Pb	%W
0.23	98.552	0.0024	0.0087	0.0128	0.0979	0.0056	0.0074	0.129	0.0925	0.0316	0.0037	0.0050	0.0549

III. 4. Préparation des échantillons

Dans cette étude, nous aurons besoin de beaucoup d'échantillons de formes différentes, et nous discuterons de leur préparation séparément :

III. 4. 1. Les échantillons destinés à la microstructure et la micro dureté

III. 4. 1. 1. La phase de Découpage

L'obtention de nos échantillons a été par un découpage lubrifié d'un bâton de diamètre 28 mm en cylindres de longueur de 40 mm, à l'aide d'un tour parallèle.

**Figure III.2** : Tour parallèle.

III. 4. 1. 2. La phase de Rectification

En utilisant une rectifieuse plane comme montre la (Figure III.3) on a mis les surfaces de base des cylindres obtenus par découpage dans les mêmes conditions (rectification similaire).



Figure III.3 : Exemple sur la rectifieuse plane.

III. 4. 2. Les éprouvettes de traction

Premièrement dans notre étude nous utiliserons deux types de machines de traction (classique et numérique), donc nous avons deux types d'éprouvettes de traction (éprouvette pour la machine de traction classique et autre éprouvette pour la machine de traction numérique).

III. 4. 2. 1. Eprouvette de machine classique

Avant de réaliser nos échantillons, nous avons dessiné et simulé l'éprouvette de traction ([Figure III.4](#)) à l'aide du logiciel « SOLIDWORKS » afin de les réaliser selon la norme de notre machine classique. Nous avons suivi la procédure d'usinage montré dans le [Tableau III.2](#).

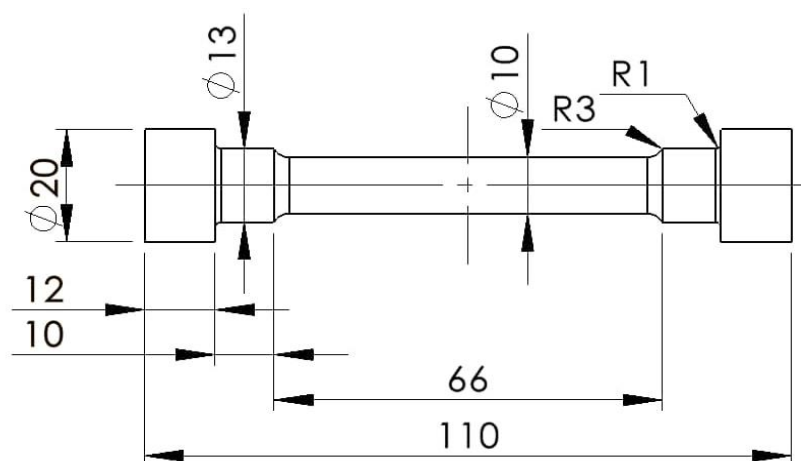

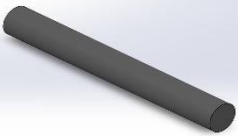
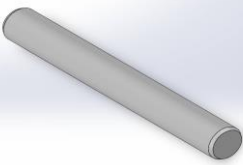
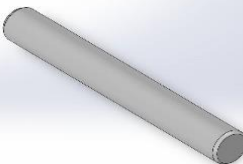
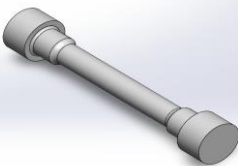
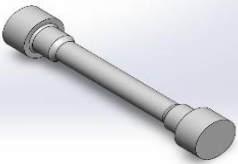


Figure III.4 : Dessin définition de l'éprouvette de la machine classique.

Tableau III.2 : Procédé d'usinage d'éprouvette de la machine classique.

Pièce	Machines	Désignation de l'étape	Description
	machine découpe à scie	Débitage	- Découpe de la pièce brute de dimension $\varnothing 28 \times 120$ à partir d'une barre longue.
	Etabli	Redressage	- Redresser la pièce par un marteau de redressage.
	Tour parallèle	Tournage 1	- Dressage des deux coté et mise à longueur 110mm
	Tour parallèle	Tournage 2	- Chariotage de $\varnothing 10$ - Chanfreinage de $1 \times 30^\circ$
	Tour parallèle	Tournage du contour	- Chariotage de $\varnothing 20$ et R2 - Tournage $\varnothing 13$ et R3 et $\varnothing 10$
	Rectifieuse cylindrique	Rectification cylindrique	- Rectifier $\varnothing 13$ et assurer l'état de la surface $\Delta 5$ - Rectifier $\varnothing 10$ et assurer l'état de la surface $\Delta 8$

**Figure III.5 :** l'éprouvette réelle de la machine classique.

III. 4. 2. 2. Eprouvette de machine numérique

Avant de réaliser nos échantillons, nous avons dessiné et simuler l'éprouvette de traction (Figure III.6) à l'aide du logiciel « SOLIDWORKS » afin de les réaliser selon la norme de notre machine classique. Nous avons suivi la procédure d'usinage montré dans le Tableau III.3.

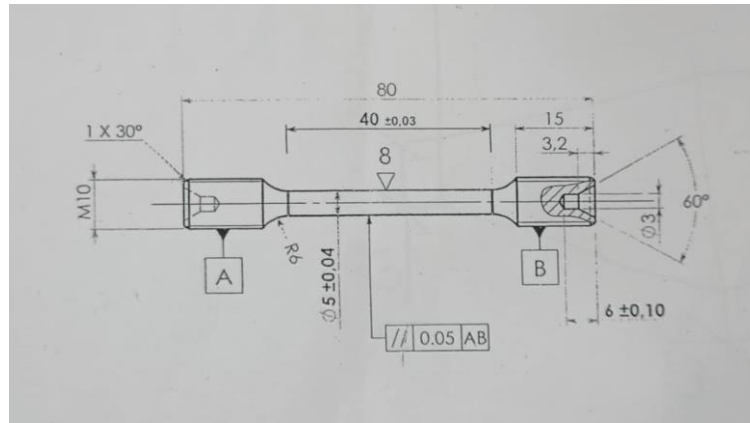


Figure III.6 : Dessin définition de l'éprouvette de la machine numérique.

Tableau III.3 : Procédé d'usinage d'éprouvette de la machine numérique.


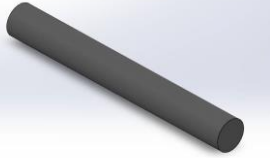


Pièce	Machines	Désignation de l'étape	Description
	Machine découpe à scie	Débitage	- Découpe de la pièce brute de dimension $\phi 12 \times 85$ à partir d'une barre longue.
	Etabli	Redressage	- Redresser la pièce par un marteau de redressage.
	Tour à commande numérique.	Tournage	- Dressage des deux coté et mise à longueur 80mm - Chariotage de $\phi 10$ - Chanfreinage de $1 \times 30^\circ$ - Chariotage de contour (R6 et $\phi 5$). - Filetage de M10 par un outil à fileté.
	Rectifieuse cylindrique	Rectification cylindrique	- Rectifier $\phi 5$ et assurer l'état de la surface $\Delta 8$



Figure III.7 : l'éprouvette réelle de la machine numérique.

III. 5. Technique de traitement thermochimique et thermique

Le traitement de cémentation et après cémentation que nos échantillons ont subi, a été expérimenté à l'échelle industrielle dans un atelier de traitement thermique équipé d'une ligne automatique de traitements thermiques fournie par la société **SOLO Switzer land** spécialisée dans la conception et la fabrication des fours industriels. Cette ligne de traitement comporte comme éléments sept machines essentielles comme la (Figure III.8). Illustre.



Figure III. 8 : chaine de traitement thermique SOLO.

Ces fours mis à notre procurer une atmosphère de traitement isotherme configurable de l'ordre de 950 °C au maximum. Nos échantillons rectifiés et numérotés ont chauffés à de température fixée à des temps de maintien de 4, 6 et 8 heures, et débit de Carbone fixée.

Tableau III.4 : Paramètres de traitement.

Température (°C)	Temps de maintien (heures)	Débit de Carbone %
920	4/6/8	1.2

III. 5. 1. La phase de Cémentation

On utilise un mélange d'azote et de méthanol. Lors du craquage le méthanol donnera le CO et le CO₂. Le CO apportera le carbone naissant, cette phase d'enrichissement est généralement suivie d'une trempe à l'huile et d'un revenu basse température.

Une cémentation gazeuse a été adoptée lors de notre expérience comme processus thermochimique conféré à notre acier (XC20), permettant l'obtention des surfaces dures, riches en carbone et résistantes à l'usure. L'atmosphère du four est constituée par un gaz porteur de composition 39.36 % H₂, 0.23 % CO₂, 19.83 % CO, 0.76 % H₂O, enrichie par du propane C₃H₈.

On commence par préparer notre four de cémentation qui est celui de la trempe mené d'une source de ciment sous forme de gaz de propane, cela consiste à faire chauffer le four jusqu'à la température d'austénisation préconisée, et le maintenir à cette température-là afin d'assurer une atmosphère isotherme.

Le robot s'oriente automatiquement avec la charge (constituée de l'échantillon déterminée) vers le four commandé, le four s'ouvre, se charge et s'enferme et la température est abaissée, la température remonte et stagnant comme s'étée opérée dans chaque essai et le potentiel carbonique de l'atmosphère isotherme commence à s'élever jusqu'au débit conditionnée 1.2 % de carbone.

Le traitement est maintenu pendant les heures opératoire de l'essai pour que les surfaces des échantillons s'enrichissent du carbone, après enrichissement, une étape de diffusion de carbone est nécessaire en diminuant le débit du gaz pendant des durées indiquées sur les graphes des cycles thermiques fournies par le logiciel de la partie de commande, cela est pour laisser le carbone propage d'une façon équilibrée à la superficie de la pièce à traiter.

III. 5. 2. La phase de la Trempe

Après avoir parvenu à l'achèvement du chauffage complet jusqu'à la transformation des phases (de l'austénitique à la martensitique), ce présent processus thermochimique a pour but de réaliser le cycle de refroidissement rapide afin de maximiser la dureté des pièces, à cette étape il est préalable de mettre notre bac d'huile de trempe (température de la trempe a huile 830°), l'échantillon reste trempé dans l'huile avec agitation pendant 8 minutes dans une atmosphère isotherme grâce à un système de refroidissement équipé au bac de trempe , la charge sort automatiquement du bac de trempe à l'air.

Enfin faire égoutter les échantillons de la solution de trempe pendant 10 min, et grâce à la ligne automatique l'échantillon va être nettoyé pour enlever le reste d'huile et des impuretés.

III. 5. 3. La phase du revenu

Cette opération consiste en fait à engendrer une évolution structurale d'un état métastable à un état proche de l'équilibre physico-chimique pour objet de provoquer une précipitation du carbone afin d'optimiser le durcissement des pièces, le revenu de détente réduit les tensions internes de trempe mais n'affecte pas la dureté superficielle des pièces, et dans notre cas nous avons déjà opéré ce traitement automatiquement dans la gamme par configurer le four de revenu à une température de 180°C et le tout se traite sous cette atmosphère isotherme maintenue durant 2 heures.

III. 6. Préparation d'enchantions après le traitement thermique et thermo-chimique

III. 6. 1. La phase de découpage

Cette toute première étape permet l'obtention des nouveaux échantillons (Figure III.9) facilitant la manipulation de la suite du travail, et ils sont obtenus facilement par découpage à l'aide d'un fil coupant sur machine d'électroérosion de marque **ONA filière A25-35**.



Figure III.9 : Machine de découpage.

III. 6. 2. La phase d'enrobage

Est une opération de délivrer la chaleur et la pression permettant la polymérisation de la résine autour de l'échantillon, cette technique procure une excellente protection des bords des échantillons qui sont ainsi préservés lors du processus de préparation, l'enrobage à chaud est la méthode à

privilégier pour traiter des volumes importants d'échantillons non sensibles à la chaleur ou la pression. ge à chaud.



Figure III.10 : Enrobeuse type de micapress 3.

III. 6. 3. La phase de Polissage

Après le découpage des échantillons, une opération de polissage à l'aide d'une polisseuse numérique avec des papiers abrasifs de différentes granulométrie (P180, P320, P400, P600, P800 et P1200), en présence d'une lubrification afin d'éviter la surchauffe des pièces, sur chaque papier, on maintient en contact l'échantillon pendant 2 à 5 minutes, pour éviter le problème de la corrosion, tout de suite après avoir poli l'échantillon avec le papier abrasif P1200, à l'aide d'une pâte en diamant et un rinçage courant, on doit passer au le polissage fin avec le papier feutre jusqu'à l'obtention d'une surface bien miroir.



Figure III.11 : Polisseuse numérique type de Micapersi.

III. 6. 4. La phase d'Attaque chimique

L'attaque chimique dépend des détails microstructuraux recherchés, nous avons opté comme réactif d'attaque chimique une solution qui a la composition suivante : 96 % d'alcool éthanol C_2H_5OH + 4 % de nitrate HNO_3 , la procédure s'est effectuée comme suit : Une fois on termine du polissage fin avec de l'eau distillée et le coton on lave la surface polie pour recevoir quelque goutte d'alcool éthanol (C_2H_5OH) pour éviter l'oxydation d'eau, puis un séchage est recommandé.

Ensuite, on plonge l'échantillon pendant 25 à 30 secondes dans la solution d'attaque et enfin un autre lavage puis quelques gouttes de l'alcool d'éthanol et une prise à la main sans plus toucher à la surface attaquée.

III. 7. Analyse et mesurage des couches cémentées par microscope optique

Le microscope est lié d'un objectif et d'un oculaire qui permet de grossir l'image d'un objet de petites dimensions, le but de l'examen métallographique des métaux et des alliages est de définir leur structure avec précision.

Pour pouvoir mesurer et mettre en évidence les microstructures des couches cémentées des échantillons traités et préparés comme au préalable pour l'analyse microscopique, ce procédé a été réalisé sur un microscope **Leica** (Figure III.12) équipé d'une caméra numérique avec logiciel (**AXIO Cam Mrc**) permettant l'acquisition, traitement et la sauvegarde des différentes images en utilisant 5 objectifs ($\times 5$, $\times 10$, $\times 20$, $\times 50$, $\times 100$) et grandissement totale oculaire ($\times 10000$).

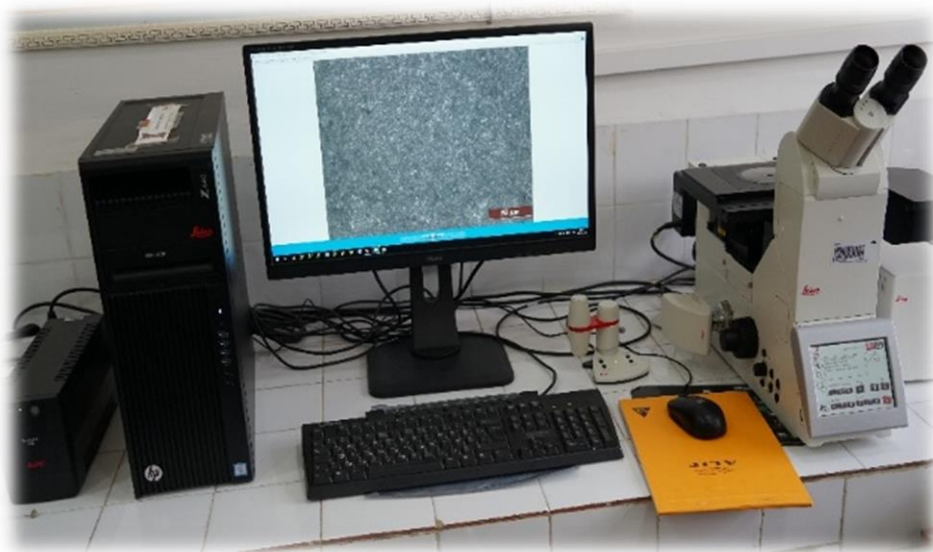


Figure III.12 : Equipement de microscope optique Leica.

III. 8. L'essai de la dureté

Les mesures de micro-dureté Vickers ont été effectuées sous une charge d'essai de **0,5 Kgf** et un temps d'arrêt de 10s, à l'aide d'un appareil de Zwick Roell, modèle : **ZHV10-A**, l'essai a été effectué à température ambiante et les mesures de dureté ont été prises à cinq endroits différents sur chaque échantillon pour obtenir une valeur de dureté moyenne.



Figure III.13 : Appareil de mesure de la micro-dureté type de Zwick Roell, ZHV10.

III. 9. La machine de traction

On a utilisé deux types de machine de traction :

III. 9. 1. Machine de traction classique

Une machine de traction classique type de WE-30 est équipée d'un capteur de force interchangeable, fixé sur la traverse mobile ou sur la traverse basse, d'un capteur de déplacement, de deux attaches (mors) mobiles idéalement auto-serrantes pour réaliser un essai de traction et d'un enregistreur graphique la force maximal de notre machine utiliser est 300 kN.



Figure III.14 : Machine de traction classique type de WE-30.

III. 9. 2. Machine de traction numérique

La machine d'essais de traction numérique de modèle **labTest 5.100SP1** sont utilisées pour la réalisation des essais de traction, les résultats sont représentés dans un diagramme de force-course ou dans un diagramme de contrainte-allongement, des valeurs caractéristiques telles que la résistance à la traction ou la limite d'élasticité sont déterminée, cette machine est équipée de force maximale **100 kN**.



Figure III.15 : Machine de traction numérique.

III. 10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le matériel expérimentale, afin de mesurer la micro-dureté, l'épaisseur de la couche superficielle, le pourcentage de carbone et on termine par la réalisation des essais de traction sur nos échantillons.

CHAPITRE IV :
RESULTATS DES EXPERIENCES
TRAITEMENT ET ANALYSE

IV. 1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les résultats des expériences qui ont été faites et savoir l'influence du traitement thermochimique (la cémentation gazeuse) sur la dureté, le pourcentage de carbone, la structure de ces aciers (avant et après le traitement) et complété par des essais mécanique en traction.

IV. 2. Mesure de la de dureté des échantillons à l'état brut

Dans le [tableau IV.1](#) Nous avons présenté les mesures de dureté Brinell de nos échantillons à l'état brut, nous avons obtenu les résultats suivants :

Tableau IV.1 : Mesure de la de dureté des échantillons à l'état brut.

Essais Brinell	TEST1	TEST2	TEST3	TEST Moy
Dureté	135 HB	133 HB	135 HB	134 HB

IV. 3. Mesure de la de dureté des échantillons après traitement thermochimique par cémentation

IV. 3. 1. Mesure de la de dureté des échantillons après traitement thermochimique par cémentation pendant 4 heures

Dans le [tableau IV.2](#) Nous avons présenté les mesures de dureté Vickers de nos échantillons après traitement thermochimique par cémentation pendant 04 heures, et fixer les deux autres paramètres tel que ; la température à 920 °C et le débit de carbone a 1.2 %, nous avons obtenu les résultats suivants :

Tableau IV.2 : Mesure de la de dureté des échantillons après traitement par cémentation pendant 04 heures.

Essais Vickers	TEST1	TEST2	TEST3	TEST Moy
Dureté	748 HV	748 HV	759 HV	752 HV

IV. 3. 2. Mesure de la de dureté des échantillons après traitement thermochimique par cémentation pendant 6 heures

Dans le [tableau IV.3](#) Nous avons présenté les mesures de dureté Vickers de nos échantillons après traitement thermochimique par cémentation pendant 06 heures, et fixer les deux autres paramètres tel que ; la température à 920 °C et le débit de carbone a 1.2 %, nous avons obtenu les résultats suivants :

Tableau IV.3 : Mesure de la de dureté des échantillons après traitement par cémentation pendant 06 heures.

Essais Vickers	TEST1	TEST2	TEST3	TEST Moy
Dureté	775 HV	775 HV	789 HV	780 HV

IV. 3. 3. Mesure de la de dureté des échantillons après traitement thermochimique par cémentation pendant 8 heures

Dans le [tableau IV.4](#) Nous avons présenté les mesures de dureté Vickers de nos échantillons après traitement thermochimique par cémentation pendant 08 heures, et fixer les deux autres paramètres tel que ; la température à 920 °C et le débit de carbone a 1.2 %, nous avons obtenu les résultats suivants :

Tableau IV.4 : Mesure de la de dureté des échantillons après traitement par cémentation pendant 08 heures.

Essais Vickers	TEST1	TEST2	TEST3	TEST Moy
Dureté	819 HV	804 HV	819 HV	814 HV

IV.4. Influence du temps de maintien TM sur la dureté des aciers

Le traitement thermochimique par cémentation gazeuse réalisée sur les échantillons en Acier XC20, pendant 04,06 et 08 heures de temps de maintien a donné une augmentation de la dureté selon Vickers de 134 HV (état brut) ,752 HV (état cémenté pendant 04 heures) ,780 HV (état cémenté pendant 06 heures) et 814 HV (état cémenté pendant 08 heures). Nous avons clarifié ces résultats par la ([Figure IV.1](#)).

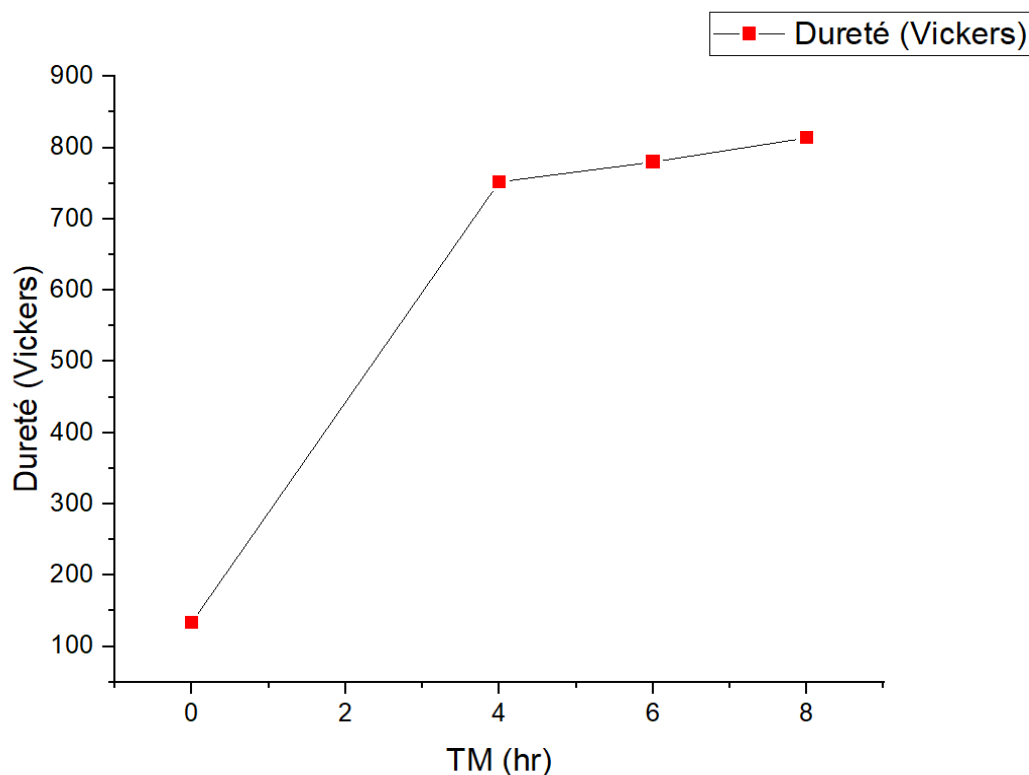


Figure IV.1 : Influence du temps de maintien TM sur la dureté des aciers.

IV. 5. Mesure du pourcentage de carbone des échantillons à l'état brut

Dans le [tableau IV.5](#) Nous avons présenté les mesures du pourcentage de carbone de nos échantillons à l'état brut, nous avons obtenu les résultats suivants :

Tableau IV.5 : Mesure de %C des échantillons à l'état brut.

Essais %C	TEST1	TEST2	TEST3	TEST Moy
% C	0.23%	0.24%	0.22%	0.23%

IV. 6. Mesure du pourcentage de carbone des échantillons après traitement thermochimique par cémentation

IV. 6. 1. Mesure du pourcentage de carbone des échantillons après traitement thermochimique par cémentation pendant 4 heures

Dans le [tableau IV.6](#) Nous avons présenté les mesures du pourcentage de carbone de nos échantillons après traitement thermochimique par cémentation pendant 04 heures, et fixer les deux

autres paramètres tel que ; la température à 920 °C et le débit de carbone a 1.2 %, nous avons obtenu les résultats suivants :

Tableau IV.6 : Mesure % C des échantillons après traitement par cémentation pendant 04 heures.

Essais %C	TEST1	TEST2	TEST3	TEST Moy
% C	0.83%	0.85%	0.83%	0.836%

IV. 6. 2. Mesure du pourcentage de carbone des échantillons après traitement thermochimique par cémentation pendant 6 heures

Dans le [tableau IV.7](#) Nous avons présenté les mesures du pourcentage de carbone de nos échantillons après traitement thermochimique par cémentation pendant 06 heures, et fixer les deux autres paramètres tel que ; la température à 920 °C et le débit de carbone a 1.2 %, nous avons obtenu les résultats suivants :

Tableau IV.7 : Mesure de % C des échantillons après traitement par cémentation pendant 06 heures.

Essais %C	TEST1	TEST2	TEST3	TEST Moy
% C	0.86%	0.88%	0.868%	0.87%

IV. 6. 3. Mesure du pourcentage de carbone des échantillons après traitement thermochimique par cémentation pendant 8 heures

Dans le [tableau IV.8](#) Nous avons présenté les mesures du pourcentage de carbone de nos échantillons après traitement thermochimique par cémentation pendant 08 heures, et fixer les deux autres paramètres tel que ; la température à 920 °C et le débit de carbone a 1.2 %, nous avons obtenu les résultats suivants :

Tableau IV.8 : Mesure de % C des échantillons après traitement par cémentation pendant 08 heures.

Essais %C	TEST1	TEST2	TEST3	TEST Moy
% C	0.943%	0.932%	0.905%	0.93%

IV. 7. Influence du temps de maintien TM sur pourcentage de carbone des aciers

Le traitement thermochimique par cémentation gazeuse réalisée sur les échantillons en Acier XC20, pendant 04,06 et 08 heures de temps de maintien a donné une augmentation du pourcentage de carbone de 0.23 % (état brut) ,0.836 % (état cémenté pendant 04 heures) ,0.87 % (état cémenté pendant 06 heures) et 0.93 % (état cémenté pendant 08 heures). Nous avons clarifié ces résultats par la (Figure IV.2).

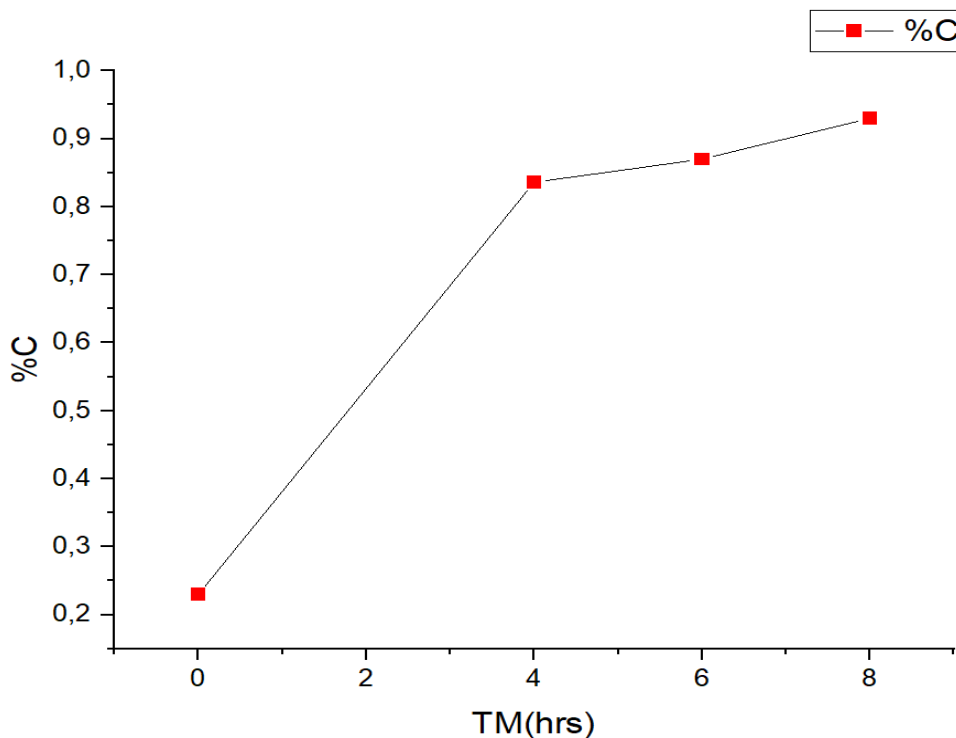


Figure IV.2 : Influence du temps de maintien TM sur %C des aciers.

IV. 8. Mesure de la couche superficielle durcie des échantillons après traitement thermochimique par cémentation

IV. 8. 1. Mesure de la couche superficielle durcie des échantillons après traitement thermochimique par cémentation pendant 4 heures

Dans le [tableau IV.9](#) Nous avons présenté les mesures de la couche superficielle durcie de nos échantillons après traitement thermochimique par cémentation pendant 04 heures, et fixer les deux autres paramètres tel que ; la température à 920 °C et le débit de carbone a 1.2 %, nous avons obtenu les résultats suivants :

Tableau IV.9 : Mesure CSD pendant 04 heures.

Mesure CSD	TEST1	TEST2	TEST3	TEST Moy
CSD	1166.50µm	1179.22 µm	1214.42µm	1186.62µm

IV. 8. 2. Mesure de la couche superficielle durcie des échantillons après traitement thermochimique par cémentation pendant 6 heures

Dans le [tableau IV.10](#) Nous avons présenté les mesures de la couche superficielle durcie de nos échantillons après traitement thermochimique par cémentation pendant 06 heures, et fixer les deux autres paramètres tel que ; la température à 920 °C et le débit de carbone a 1.2 %, nous avons obtenu les résultats suivants :

Tableau IV.10 : Mesure CSD pendant 06 heures.

Mesure CSD	TEST1	TEST2	TEST3	TEST Moy
CSD	1415.81µm	1427.48µm	1398.56µm	1413.95µm

IV. 8. 3. Mesure de la couche superficielle durcie des échantillons après traitement thermochimique par cémentation pendant 8 heures

Dans le [tableau IV.11](#) Nous avons présenté les mesures de la couche superficielle durcie de nos échantillons après traitement thermochimique par cémentation pendant 08 heures, et fixer les deux autres paramètres tel que ; la température à 920 °C et le débit de carbone a 1.2 %, nous avons obtenu les résultats suivants :

Tableau IV.11 : Mesure CSD pendant 08 heures.

Mesure CSD	TEST1	TEST2	TEST3	TEST Moy
CSD	1525.91µm	1576.41µm	1541.81µm	1548.04µm

IV. 8. 4. Influence du temps de maintien TM sur la couche superficielle durcie (CSD) des aciers

Le traitement thermochimique par cémentation gazeuse réalisée sur les échantillons en Acier XC20, pendant 04,06 et 08 heures de temps de maintien a donné une augmentation de la couche superficielle durcie de 1186.82 µm (état cémenté pendant 04 heures), 1413.95µm (état cémenté

pendant 06 heures) et 1548.04 μm (état cémenté pendant 08 heures). Nous avons clarifié ces résultats par la (Figure IV.3)

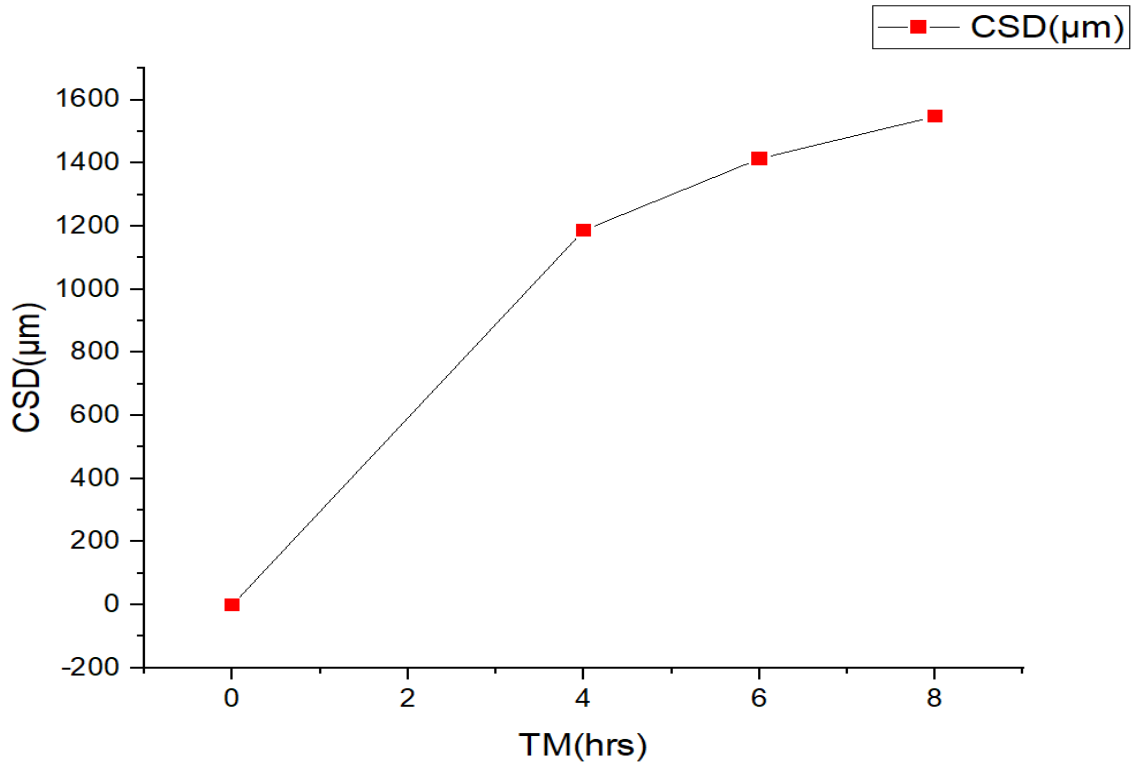


Figure IV.3 : Influence du temps de maintien TM sur la couche superficielle durcie des aciers.

IV. 9. Analyse microscopique des micrographies des structures des échantillons

IV. 9. 1. Analyse microscopique des micrographies des structures des échantillons a l'état brut

D'après (Figure IV.4), les microstructures obtenues avant le traitement thermo-chimique par la cémentation gazeuse, les échantillons à l'état brut ont une structure homogène avec des grains uniformes de ferrite et de perlite, que se soit un niveau du cœur ou dans la couche superficielle durcie.

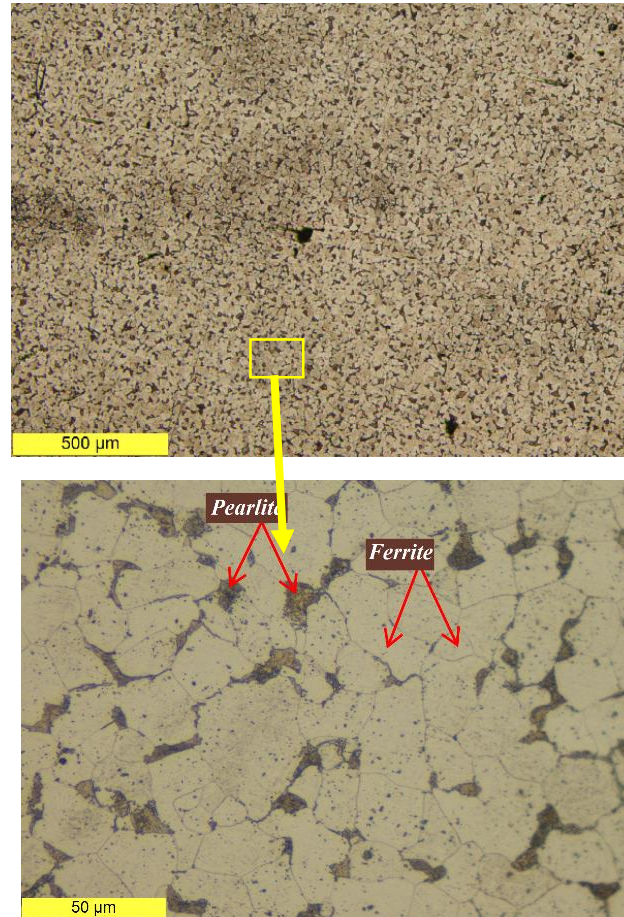


Figure IV.4 : Micrographies des structures des échantillons à l'état brut

IV. 9. 2. Analyse microscopique des micrographies des structures des échantillons à l'état initial du traitement par cémentation (traitement initial)

D'après (Figure IV.5), les microstructures obtenues après le traitement thermochimique par la cémentation gazeuse, les échantillons à l'état initial du traitement ont une transformation dans le cœur, la ferrite et la perlite (état brut) sont transformées en austénite et bainite retenues (après la phase initial du traitement).

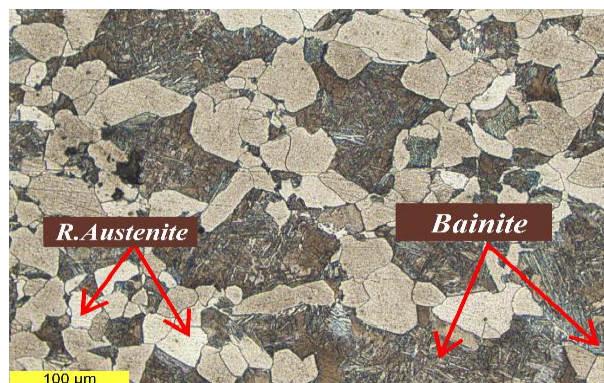


Figure IV.5 : La microstructure du Cœur de l'acier traité par la cémentation (traitement initial).

La (Figure IV.6), montre qu'après le traitement de cémentation de l'acier XC20 (traitement initial), l'épaisseur de la couche de surface augmente avec l'augmentation du temps de maintien (une couche superficielle durcie jusqu'à 1186.82 μm). Les résultats de l'enrichissement de la couche superficielle en carbone montrent une transformation de l'austénite en martensite et finalement une formation de cémentite (Fe_3C).

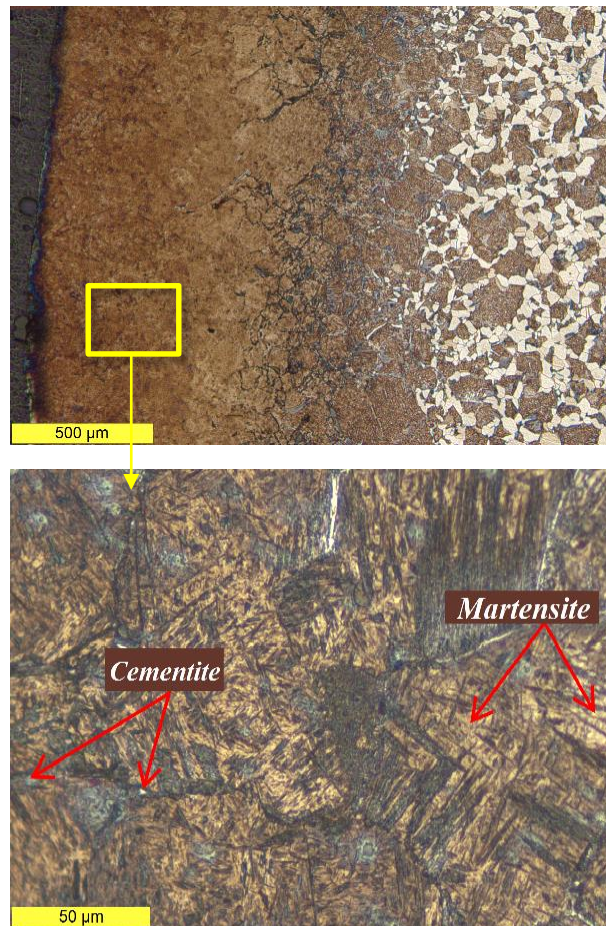


Figure IV.6 : La microstructure la couche superficielle durcie de l'acier traité par la cémentation (traitement initial).

IV. 9. 3. Analyse microscopique des micrographies des structures des échantillons à l'état final du traitement par cémentation (traitement final)

D'après (Figure IV.7), les microstructures obtenues après le traitement thermochimique par la cémentation gazeuse, les échantillons à l'état final du traitement ont une transformation dans le cœur, la ferrite et la perlite (état brut) sont transformées en austénite et bainite retenues (après la phase finale du traitement), et aussi la taille des grains augmentent.

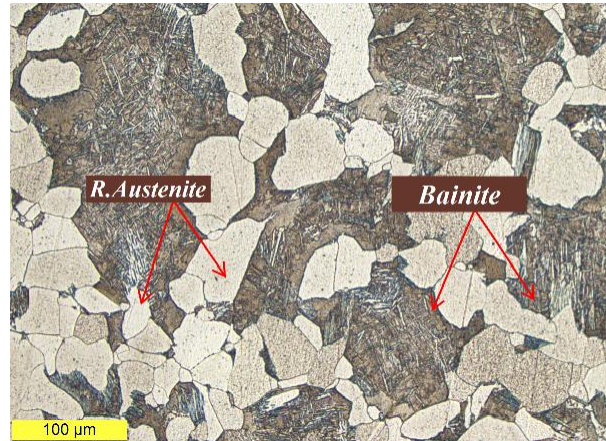


Figure IV.7 : La microstructure du Cœur de l'acier traité par la cémentation (traitement final).

La (Figure IV.8), montre qu'après le traitement de cémentation de l'acier XC20 (traitement final), l'épaisseur de la couche de surface augmente avec l'augmentation du temps de maintien (une couche superficielle durcie jusqu'à 1548.04 µm). Les résultats de l'enrichissement de la couche superficielle en carbone montrent une transformation de l'austénite en martensite et finalement une formation de cémentite (Fe_3C), avec l'augmentation la taille des grains.

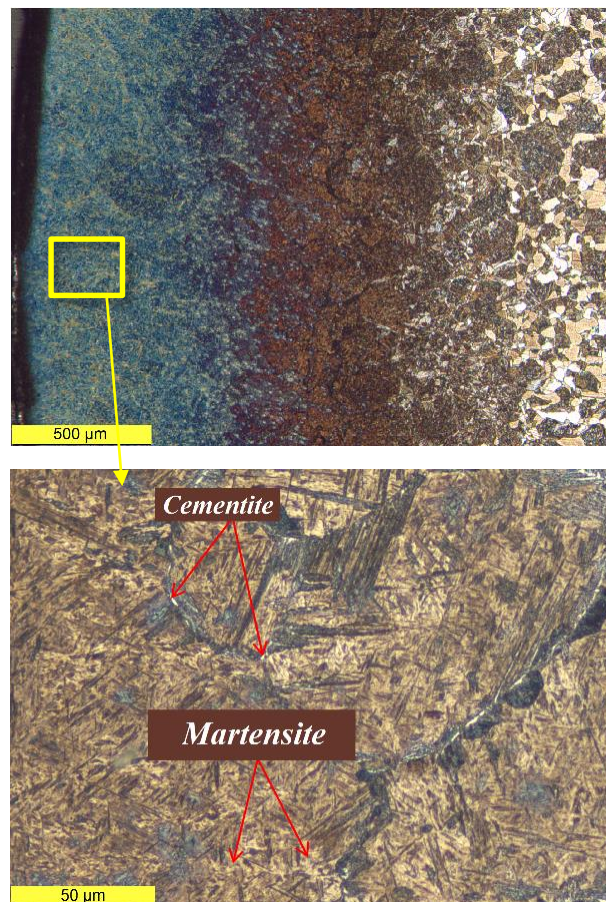


Figure IV.8 : La microstructure la couche superficielle durcie de l'acier traité par la cémentation (traitement final).

IV. 10. Evolution de la Contrainte nominale σ en fonction du temps de maintien lors d'un essai de traction

Après des essais mécaniques en traction sur nos échantillons, Nous avons remarqué que la Contrainte nominale σ est proportionnelle avec le temps de maintien TM, lors d'un traitement thermochimique par cémentation gazeuse réalisée sur un acier XC20. Pendant 04,06 et 08 heures de temps de maintien, une augmentation de la Contrainte nominale σ de 428.66 N/mm² (état brut), de 590.13 N/mm² (état cémenté pendant 04 heures), de 641.13 N/mm² (état cémenté pendant 06 heures) et 778.33 N/mm² (état cémenté pendant 08 heures). Nous avons clarifié ces résultats par la (Figure IV.9).

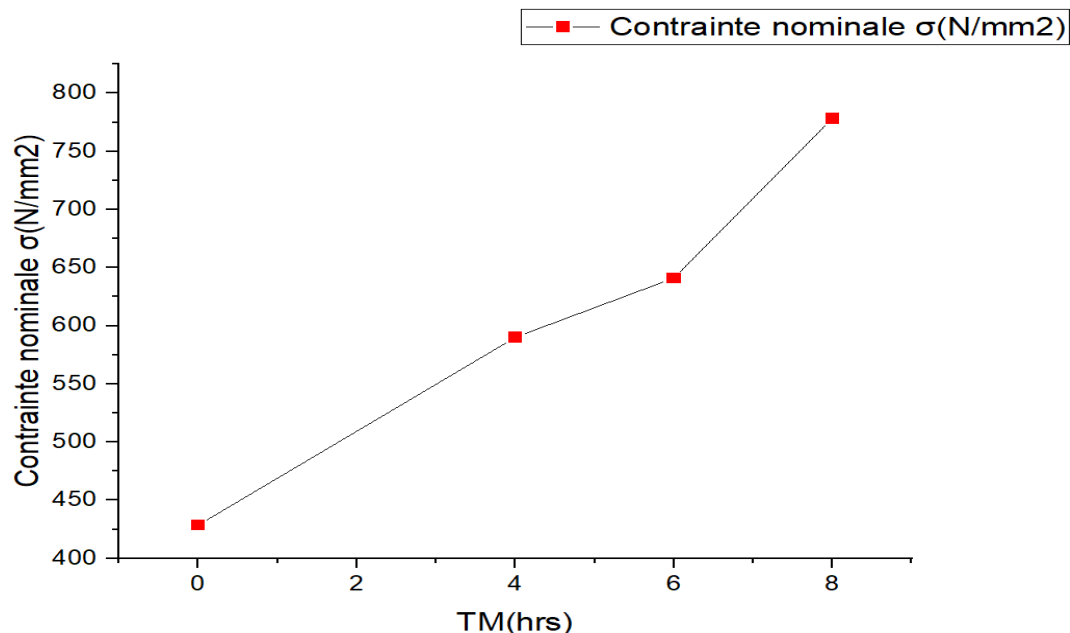


Figure IV.9 : Evolution de la Contrainte nominale σ en fonction du TM.

IV. 11. Evolution de la force de traction F en fonction du temps de maintien lors d'un essai de traction

Après des essais mécaniques en traction sur nos échantillons, Nous avons remarqué que la force de traction F est proportionnelle avec le temps de maintien TM, lors d'un traitement thermochimique par cémentation gazeuse réalisée sur un acier XC20. Pendant 04,06 et 08 heures de temps de maintien, une augmentation de la force de traction F de $33.33 \cdot 10^3$ N (état brut), de $46.33 \cdot 10^3$ N (état cémenté pendant 04 heures), de $50.16 \cdot 10^3$ N (état cémenté pendant 06 heures) et $60.5 \cdot 10^3$ N (état cémenté pendant 08 heures). Nous avons clarifié ces résultats par la (Figure IV.10).

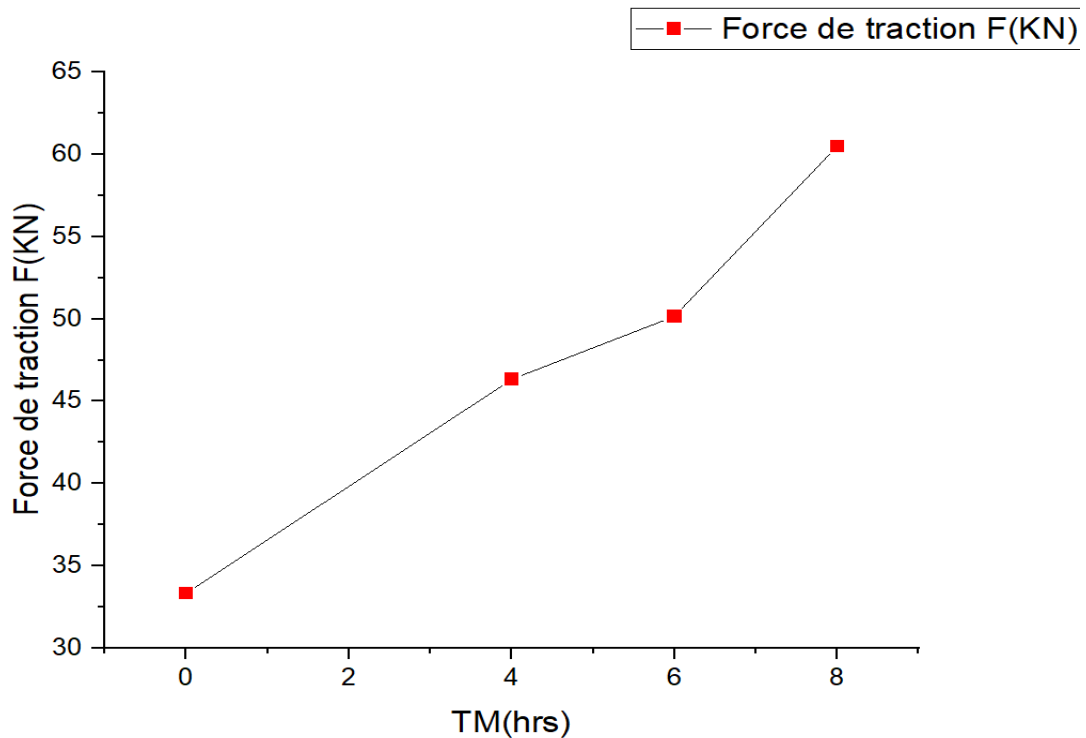


Figure IV.10 : Evolution de la force de traction F en fonction du TM.

IV. 12. Evolution de l'allongement Δl en fonction du temps de maintien lors d'un essai de traction

Après des essais mécaniques en traction sur nos échantillons, Nous avons remarqué que l'allongement Δl est inversement proportionnel avec le temps de maintien TM, lors d'un traitement thermochimique par cémentation gazeuse réalisée sur un acier XC20. Pendant 04,06 et 08 heures de temps de maintien, une diminution de l'allongement Δl de 25.05 % (état brut), de 2.59 % (état cémenté pendant 04 heures), de 2.02 % (état cémenté pendant 06 heures) et 0.85 % (état cémenté pendant 08 heures). Nous avons clarifié ces résultats par la (Figure IV.11).

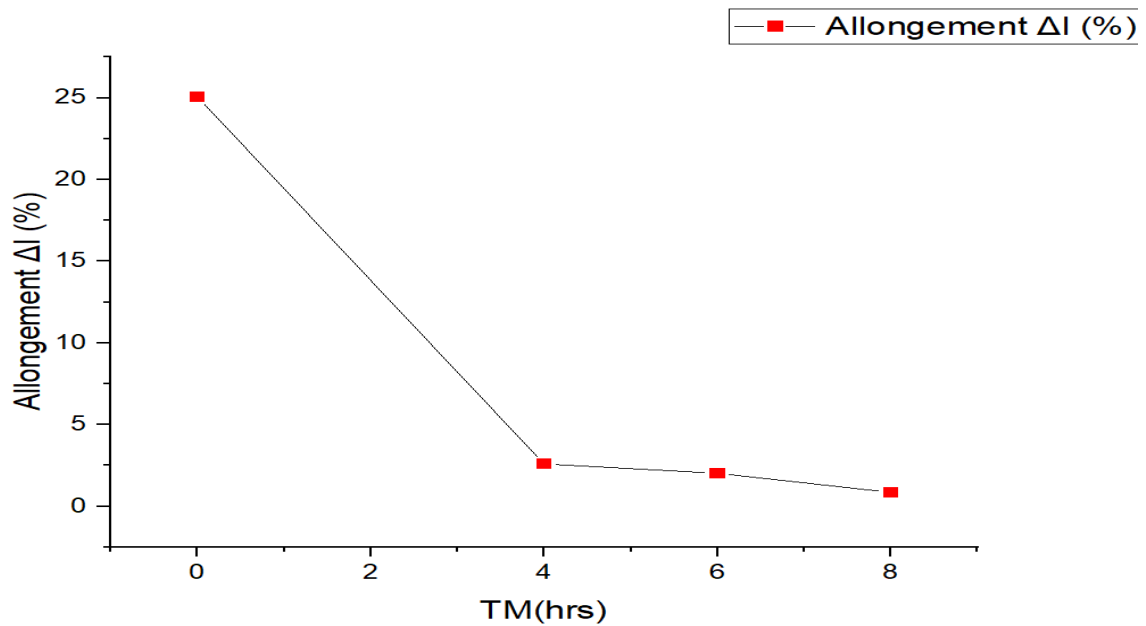


Figure IV.11 : Evolution de l'allongement Δl en fonction du TM.

Remarque

Nous avons fabriqué des échantillons pour les essais de tractions pour la machines numérique. Un traitement thermochimique par la cémentation gazeuse qui a été fait sur l'acier XC20 pendant 04,06 et 08 heures de temps de maintien TM, tout en fixant les deux autres paramètres tel que ; la température à 920° C et le débit de carbone à 1.2 %. Nous avons souhaité de comparer les résultats de la machine classique qui ont été discutés dans ce chapitre avec ceux de la machine numérique, mais les résultats de cette dernière ne correspondent pas à ce que la bibliographie affirme.

IV. 13. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats expérimentaux que nous avons mesurés tel que ; la dureté, le pourcentage de carbone, l'épaisseur de la couche superficielle durcie et aussi comparer les structures des aciers qui ont travaillé avant et après traitement par la cémentation gazeuse. Une étude comparative a été clarifiée pour voir l'influence du temps de maintien TM sur la contrainte nominale σ , la force de traction F et l'allongement Δl .

**CONCLUSIONS
GENERALES ET
PERSPECTIVES**

Conclusions générales

Dans ce mémoire, nous présentons les résultats des expériences qui ont été faites et savoir l'influence du temps de maintien du traitement thermochimique par la cémentation gazeuse, et voir leur influence sur les réponses tel que ; la micro-dureté, l'épaisseur de la couche durcie, le teneur en carbone, la microstructure et aussi sur la Contrainte nominale σ , la force de traction F et l'allongement Δl lors des essais de traction.

Les principales conclusions peuvent être résumées comme suit :

1. Le temps de maintien TM du traitement thermochimique par cémentation gazeuse réalisée sur les échantillons en Acier XC20, est proportionnel avec la dureté selon Vickers allons jusqu'à 814 HV.
2. L'augmentation de temps de maintien TM du traitement thermochimique par cémentation gazeuse nous conduit à des valeurs de teneur en carbone dans la couche superficielle assez élevé jusqu'à 0.93 %.
3. Une grande concordance entre le temps de maintien TM du traitement thermochimique par cémentation gazeuse et la couche superficielle durcie, pour un maximum de TM on arrive à des valeurs importantes d'épaisseur allons jusqu'à 1548.04 μm .
4. Le temps de maintien TM du traitement thermochimique par cémentation gazeuse est proportionnel avec la force de traction F, allons jusqu'à $60.5 \cdot 10^3 \text{ N}$.
5. L'augmentation de temps de maintien TM du traitement thermochimique par cémentation gazeuse nous conduit à des valeurs de Contrainte nominale σ , allons jusqu'à 778.33 N/mm^2 .
6. Le temps de maintien TM du traitement thermochimique par cémentation gazeuse est inversement proportionnel avec l'allongement Δl d'une valeur de 0.85 %.
7. L'enrichissement de la couche superficielle en teneur en Carbone montre la transformation de l'austénite en martensite et enfin en cémentite (Fe_3C), ce qui augmente l'épaisseur de la couche superficielle durcie.

Perspectives

1. Ajouter d'autre réponse tel que ; la ténacité, les autres tests de la résistance des matériaux (flexion, compression et choc).
2. Faire des travaux expérimentaux pour voir l'influence du traitement thermochimique par cémentation gazeuse sur la résistance des aciers traité à l'usure et aussi à la corrosion.
3. D'autres traitements thermochimiques tels que la carbonituration et la nitruration seront aussi souhaitables en vue d'améliorer les propriétés de surface aciers faible au carbone.
4. Faire une comparaison entre les différents traitements thermochimiques.