



Université ABBES LAGHROUR Khenchela

جامعة عباس لغرور خنشلة
Faculté de Sciences et Technologie
كلية العلوم و التكنولوجيا
Département de Génie Mécanique
قسم الهندسة الميكانيكية



Mémoire

de fin d'études Pour l'obtention du diplôme
MASTER (LMD)

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Génie des Matériaux

Thème

Influence du procédé de cémentation
sur la morphologie et la nature des
couches cémentées

Réalisé par :

- KEZIZ Karim
- BENALI Abdelwahd

Encadreur : Dr. SAOUDI Abdenour

Co-encadreur : Pr. DJEBAILI Hamid

Membres de jury

- Dr. CHERMIME Brahim
- Mr. BERKIA Abdelhak

Année universitaire : 2020-2021

REMERCIEMENT

En préambule à ce mémoire, je souhaitais adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce travail ainsi qu'à la réussite de cette formidable année académique.

Je voudrais commencer par remercier Dr. Saoudi Abdenour et Pr. Djebaili H pour leurs soutiens et encouragements durant toute la durée du mémoire.

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur BESTANJI Ali, qui, en tant que chef laboratoire au sein de EPE ETRAG, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce travail, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Mes remerciements vont également à l'endroit de mes enseignants, leur disponibilité et leurs précieux enseignements mon été d'une grande utilité.

J'exprime ma gratitude à tous les consultants et internautes rencontrés lors des recherches effectuées et qui ont accepté de répondre à mes questions avec gentillesse.

Les mots me manquent pour exprimer ma profonde reconnaissance à ma tendre famille dont l'amour, la patience et le sacrifice s'inscrivent à chaque page de ce document.

Mr. KEZIZ Karim

DEDICACE

« Que le sage écoute, il augmentera son savoir, et celui qui est intelligent acquerra de l'habileté. Ecoute, mon fils, l'instruction de ton père et ne rejette pas l'enseignement de ta mère ».

Je dédie ce mémoire :

- A mon feu père, Abdelouehab : l'éducation que j'ai reçue de toi est un bien précieux ;*
- A ma mère, maman Errais, pour ton amour, ton soutien et tes précieux conseils que tu ne cesses de m'apporter ;*
- A mes soeurs, K&M&L&D, pour votre amour inconditionnel, tes encouragements pendant toute cette période de formation et votre présence à mes côtés dans les moments de joie et de peine.*
- A mon frere, Kamel, Achour, riadh pour l'espoir que vous gravez de jour en jour dans mon coeur ;*
- A mes Amis ,oussama,zouhir zeghdani,nadir,zino,mino karim,hakim,islam,kassa,ayoub,abdelaali,Ridha,recos,minou,khalil,mourad,sif eddine,basset pour votre amour et vos encouragements.*

Pour les autres amis qui ont toujours à mon côté

KEZIZ Karim

Résumé

L'objectif de notre travail est d'étudier l'influence du temps de cémentation sur la cinétique de diffusion du carbone à la surface de l'acier à faible teneur en carbone ($C < 0.25\%$) (la nuance 20MnCr5 dans notre étude), afin d'analyser les changements chimiques et structuraux de l'acier 20MnCr5 après le traitement. Nous avons réalisé une série d'essais mécaniques et d'analyse chimique et structurale (microdureté, composition chimique et microstructure) avant et après cémentation pour les éprouvettes C₁ (en acier 20MnCr5 brut), C₂ (en acier 20MnCr5 cémenté 3 heures) et C₃ (en acier 20MnCr5 cémenté 6 heures) et C₄ (en acier 20MnCr5 cémenté 9 heures). Les résultats obtenus montrent qu'il existe une modification de la quantité du carbone dans la couche superficielle cémentée, ce qui permet de modifier les propriétés structurales et mécaniques de l'acier 20MnCr5. Finalement, l'acier 20MnCr5 traité est résultant de l'association d'une couche superficielle cémentée (dure et fragile) reposant sur un cœur (tendre et tenace).

Abstract:

The objective of our work is to study the influence of the carburizing time on the kinetics of carbon diffusion at the surface of low carbon steel ($C < 0.25\%$) (grade 20MnCr5 in our study), in order to analyze the chemical and structural changes of 20MnCr5 steel after treatment. We carried out a series of mechanical tests and chemical and structural analysis (microhardness, chemical composition and microstructure) before and after case hardening for specimens C₁ (in raw 20MnCr5 steel), C₂ (in 20MnCr5 steel hardened for 3 hours) and C₃ (in 20MnCr5 steel case-hardened 6 hours) and C₄ (in 20MnCr5 steel case-hardened 9 hours). The results obtained show that there is a change in the amount of carbon in the hardened surface layer, which allows the structural and mechanical properties of 20MnCr5 steel to be modified. Finally, the treated 20MnCr5 steel results from the association of a case-hardened surface layer (hard and brittle) resting on a core (soft and tenacious).

العربية

الهدف من عملنا هو دراسة تأثير وقت الكربنة على حركية انتشار الكربون على سطح الفولاذ منخفض الكربون ($C > 0.25\%$) (درجة 20MnCr5 في دراستنا)، من أجل تحليل التغيرات الكيميائية والهيكلية 20MnCr5 الصلب بعد العلاج. لقد أجرينا سلسلة من الاختبارات الميكانيكية والتحليل الكيميائي والإنشائي (الصلابة الدقيقة والتركيب الكيميائي والبنية

المجهريّة) قبل وبعد تصلب الحالة للعينات C1 (في الفولاذ الخام 20MnCr5)، C2 (في 20MnCr5 الصلب المقوى لمدة 3 ساعات) و C3 (في 20MnCr5 من الصلب المقوى بالعلبة لمدة 6 ساعات) و C4 (في 20MnCr5 من الفولاذ المقوى لمدة 9 ساعات). تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن هناك تعديلاً في كمية الكربون في الطبقة الصلبة السطحية ، مما يسمح بتعديل الخصائص الهيكلية والميكانيكية لصلب 20MnCr5. أخيراً ، فولاذ 20MnCr5 المعالج هو نتيجة ارتباط طبقة سطحية صلبة (صلبة وهشة) تتركز على قلب (ناعم ومتين).

Introduction générale

Introduction générale

Les aciers sont essentiellement des alliages de fer et de carbone, qui contiennent en outre certains autres éléments introduits en faibles quantités au moment de leur élaboration (dans les aciers alliés, on introduit par exemple des éléments d'alliages dans le but de modifier les propriétés des aciers de base). Dans tous les cas, la teneur en carbone des aciers est inférieure à 1,5 % en fonction du nombre d'éléments d'alliage ajoutés au fer et de leur teneur, les aciers présentent un très grand nombre de nuances différentes.

La cémentation est l'un des traitements thermochimiques qui trouve leur application dans plusieurs secteurs industriels destinés aux aciers à faible teneur en carbone ($C < 0.25\%$) [48].

Les aciers cémentés qui sont trempés à partir de la température de cémentation vers l'ambiante, ont acquis une couche superficielle d'une structure martensitique très dure en présence de carbures. Ainsi, Les différentes microstructures développées dans le cœur des aciers qui influent considérablement sur leurs propriétés mécaniques, dépendent des paramètres et les conditions opératoires appliqués durant le traitement de cémentation (cémentation suivie par les étapes d'une trempe à la température ambiante) .

Notre travail de mémoire est pour étudier l'influence du temps de cémentation sur la morphologie et la nature des couches cémentées de l'acier 20MnCr5. Le mémoire est composé de trois chapitres principaux :

- ✓ Le chapitre I : résume des notions générales sur les aciers et leur composition chimique, les différentes familles et phases, domaine d'application des aciers.
- ✓ Le chapitre II : présente une étude sur le traitement de cémentation des aciers en définissant les techniques et les étapes de ce traitement.
- ✓ Le chapitre III : présente la discussion des résultats obtenus des expériences de cémentation sur l'acier 20MnCr5 en variant le temps de maintien 3, 6 et 9 heures.

Chapitre I

Généralités sur les aciers

Chapitre I	Généralités sur les aciers
I.1. Introduction.....	7
I.2. Définition d'acier	7
I.3.Fabrication de l'acier.....	7
I.4. composition chimique des aciers.....	8
I.5. Influence des éléments d'addition sur les aciers	8
I.5.1. Le carbone.....	8
I.5.2. Le chrome.....	9
I.5.3. Le nickel.....	9
I.5.4. Le molybdène.....	9
I.5.5. Le silicium.....	9
I.5.6. Le niobium	10
I.5.7. Le titane.....	10
I.5.8. Le manganèse.....	10
I.5.9. Le cuivre.....	10
I.5.10. Le soufre.....	10
I.5.11. Le zirconium	10
I.6. Diagramme d'équilibre fer –carbone.....	10
I.7. Les différentes phases de l'acier	12
I.7.1. Ferrites.....	12
I.7.2. L'austénite.....	12
I.7.3. la cémentite	13
I.7.4. La perlite	13
I.7.5. La troostite	13
I.7.6. La bainite.....	13
I.7.7. La sorbite.....	13

I.7.8. La martensite	13
I.8. Les différentes familles d'aciers	14
I.8.1.Acier au carbone	14
I.8.2. Acier allié	14
I.8.3. Aciers inoxydables	15
I.8.4.Acier à outils	15
I.9. classification des aciers par le mode d'emploi.....	15
I.10. les propriétés des aciers	16
I.10.1. Les propriétés physiques et chimiques des acier.....	16
I.10.2. Les propriétés mécaniques des aciers	16
I.11. Aciers de cémentation.....	18
I.12. Domaine d'application des aciers	18
I.13. Défauts des aciers.....	19
I.14. Conclusion	19

Liste des figures

Figure I.1. Mailles élémentaires des structures cristallines : CC et C.F.C.....	7
Figure I.2. Le cycle de fabrication de l'acier.....	8
Figure I.3. Diagramme d'équilibre fer-carbone.....	12
Figure I.4. Acier de construction.....	15
Figure I.5. Acier à outils.....	16
Figure I.6. La résistance à l'usure.....	17
Figure I.7. La résistance à l'abrasion.....	18

Liste des tableaux

Tableau I.1. Classification des aciers suivant la composition chimique.....	14
Tableau I.2. Composition variable suivant l'emploi	14

I.1. Introduction

L'acier joue un rôle très important dans la vie quotidienne. Il est utilisé dans plusieurs domaines. Il est à l'origine de toutes les révolutions scientifiques et industrielles. Donc la connaissance de la structure et du comportement des aciers au cours de leur utilisation reste impérative. L'acier est un alliage de fer contenant moins de 2 % de carbone. La teneur en carbone a une influence considérable (et assez complexe) sur les propriétés de l'acier et leur augmentation de tendance à améliorer la résistance mécanique et la dureté de l'alliage, on parle des types aciers (classification traditionnelle), et on va étudier leur différent phase à partir de leur variété allotropique. On peut acquérir les aciers sous des formes et des propriétés très variées grâce à l'ajout des éléments d'addition et la diversité des traitements thermiques. Il est considéré alors comme un acier allié [1].

I.2. Définition d'acier

Acier peut être défini comme un matériau composé essentiellement de fer en présentant une teneur en carbone inférieure à 2%, il peut encore contenir d'autres éléments mais de tous ces éléments d'alliage, le carbone a l'effet le plus prononcé sur les propriétés de l'acier. Les propriétés des aciers varient dans de grandes proportions avec la teneur en carbone et avec la teneur en éléments d'apport, Ni, Cr, Mn ...etc. Les aciers sont élaborés pour résister à des sollicitations mécaniques ou des agressions chimiques ou une combinaison des deux [2,3].

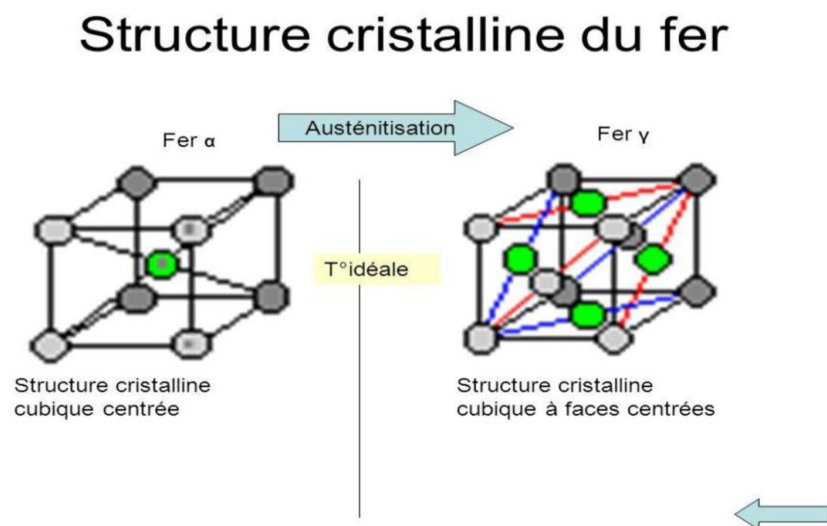


Figure I.1. Mailles élémentaires des structures cristallines : CC et C.F.C [4].

I.3. Fabrication de l'acier

L'acier s'élabore actuellement de deux manières :

- Dans un haut fourneau, à partir du minerai de fer et de coke avec réduction du carbone dans un convertisseur.

- Dans un four électrique, à partir d'acier de récupération. On parle d'acier de recyclage ou d'acier électrique [5].

Le laminage à chaud est une technique puissante de mise en forme dont les applications sont très variées. Une grande majorité des matériaux métalliques est soumise à un formage par laminage au cours de son cycle de fabrication. Bien que le mot laminage évoque plus spécifiquement les produits plats, de nombreux autres procédés de laminages ont été utilisés pour obtenir d'autres géométries (fils, ronds, barres, tubes, rails, etc.) [6].

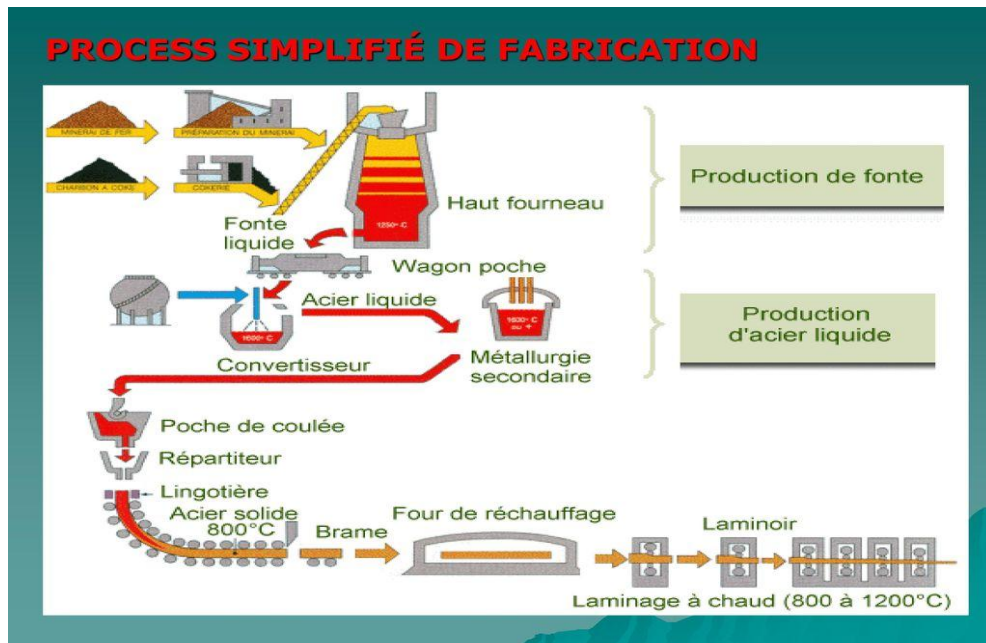


Figure I.2. Le cycle de fabrication de l'acier [7].

I.4. Composition chimique des aciers

Les aciers sont des alliages de fer et de carbone dont la teneur en carbone est inférieure à 2,11 %, outre le fer et le carbone qui en sont les éléments principaux rentrant dans sa composition, un acier ordinaire contient principalement du silicium, du manganèse, du soufre et du phosphore [8].

I.5. Influence des éléments d'addition sur les aciers

Les principaux éléments d'addition au fer sont : le carbone, le chrome, le nickel, le tungstène, le molybdène, le vanadium, le manganèse, l'aluminium, le silicium, le titane, le niobium, l'azote... ; ils ont une influence significative sur les caractéristiques [9].

I.5.1. Le carbone

Élément fortement gammagène (diagramme de Schaeffer), il contribue à stabiliser l'austénite lors de déformations à froid, par contre, il peut provoquer la formation de carbures de chrome Cr_{23}C_6 inter granulaires qui diminuent la résistance à la corrosion inter granulaire [10].

I.5.2. Le chrome

Cet élément d'addition alphagène est particulièrement important. Il augmente la trempabilité de l'acier, par la formation de carbures de types M_7C_3 (1400-1500 HV), il améliore la résistance à l'abrasion, diminue le grossissement du grain lors de l'austérisations, retarde l'adoucissement lors du revenu et contribue à la réduction de l'oxydation à haute température, augmente la résistance à la corrosion (sauf en milieu sulfurique) suite à son rôle alphagène pour des teneurs supérieures à 7 %, il renforce la résistance à la fissuration à chaud lors de solidifications rapides (telles que celles rencontrées dans des opérations de soudage) [10].

I.5.3. Le nickel

Grâce à son rôle gammagène, il stabilise l'austénite aussi bien à la température ambiante qu'aux températures très basses son principal intérêt est d'améliorer la trempabilité et la ténacité, cependant, il augmente la teneur en austénite résiduelle après trempe ce qui entraîne des difficultés lors du revenu. Il favorise ainsi la mise en œuvre par déformation plastique [10].

I.5.4. Le molybdène

Cet élément donne naissance à des carbures de haute dureté (M_6C –1500HV, M_2C – 2000 HV) qui augmentent la résistance à l'usure à chaud, de plus cet élément ralentit la cinétique d'adoucissement au revenu, il améliore la ductilité, la mise en solution des carbures diminue la teneur en austénite résiduelle après trempe. C'est un élément alphagène, qui est fréquemment utilisé à des teneurs de 2 à 5 % pour améliorer la résistance à la corrosion dans presque tous les milieux, à l'exception des solutions nitriques bouillantes, cependant, lorsque ce type d'alliage est soumis à des températures comprises entre 500 et 1000°C pendant des durées allant de 1 à 1000 heures, on observe la formation de composés intermétalliques dont la présence altère à la fois la résistance à la corrosion et les caractéristiques mécaniques [10].

I.5.5. Le silicium

Le silicium est aussi un élément alphagène, qui améliore les propriétés d'emploi à haute température mais diminue la résistance à la fissuration lors du soudage, avec une teneur voisine de 0.3 % en masse, il est utilisé comme désoxydant dans l'acier liquide au stade final de l'élaboration des teneurs d'environ 1 % entraînent une augmentation de la limite élastique, de la résistance à l'oxydation au-delà de 1000°C et de la trempabilité par effet de synergie avec d'autres éléments d'alliages comme le molybdène. Il permet aussi de diminuer la stabilité des carbures M_2C , ce qui abaisse la fragilité du métal [10].

I.5.6. Le niobium

À un point de fusion beaucoup plus élevé que le titane et présente des propriétés semblables, il est utilisé dans les métaux d'apport pour soudage à l'arc électrique en lieu et place du titane qui serait volatilisé pendant le transfert dans l'arc électrique[10].

I.5.7. Le titane

Titane est employé essentiellement en raison de leur très grande affinité pour le carbone, il évite l'altération des structures métallurgiques lors du travail à chaud, en particulier lors des travaux de soudure où il prend la place du chrome pour former un carbure de titane (TiC) évitant de ce fait la perte du caractère d'inoxidabilité dans les zones affectées par la chaleur (ZAC) du fait de la captation du chrome [10].

I.5.8. Le manganèse

Le manganèse intervient également dans tous les aciers comme désoxydant, il augmente la trempabilité, permet d'obtenir des aciers à structure austénitique stable, mais il participe à la formation de carbures et se trouve dans la cémentite, où il remplace une partie du fer.

I.5.9. Le cuivre

Le cuivre, en petites proportions, améliore la résistance de l'acier à l'oxydation par l'air[10].

I.5.10. Le soufre

Le soufre il diminue la résistance à la corrosion [10].

I.5.11. Le zirconium

Générateur de carbures, utilisé métallurgiquement en tant qu'élément additionnel de désoxydation, dénitration et désulfuration car laissant peu d'impuretés. Les additions de Zr dans des aciers de décolletage sulfureux et entièrement calmés exercent une influence favorable sur la formation de sulfures et évitent ainsi une cassure au rouge, il accroît la longévité des matériaux de confection des conducteurs chauffants et provoque une striction de la zone γ [10].

I.6. Diagramme d'équilibre fer – carbone

Le système fer-carbone est théoriquement décrit par le diagramme fer-carbone dans lequel le carbone, insoluble dans le fer α précipiterait sous forme de graphite. Mais, dans le domaine des aciers ($C < 2\%$, environ) non alliés, l'expérience révèle qu'il n'en est pas ainsi et que le carbone en excès précipite sous la forme du carbure de fer Fe_3C appelé cémentite, il est donc alors normal de considérer le diagramme d'équilibre fer-cémentite. En dehors des domaines de solidification, ce diagramme fer-cémentite fait apparaître :

- ✓ Sur l'axe des ordonnées, les domaines de température dans lesquels les différentes formes allotropiques du fer pur sont stables ;

- ✓ Le domaine ABCDEFGHI d'existence du fer γ (dont la limite inférieure IHGF définit le point de transformation symbolisé par Ae_1) et qui inclut :
- Le domaine mixte ABC (fer δ + fer γ) ;
 - Le domaine mixte DEFG (fer γ + cémentite) ;
 - Le domaine mixte GHI (fer γ + fer α) ;
 - Le domaine ACDGI d'existence du fer γ seul qui est aussi le domaine dans lequel un acier non allié fer-carbone est à l'état solide, monphasé CFC, tout le carbone étant en solution solide dans le fer γ (phase appelée austénite) et dont la limite inférieure IG définit le point de transformation symbolisé par Ae_3 ;
 - La limite DG de solubilité du carbone dans le fer γ que l'on peut décrire approximativement avec la relation :

$$\text{Log (C \%)} = 1,363 - 1\,475/T$$

Avec T (K) est la température qui définit le point de transformation symbolisé par Ae_m .

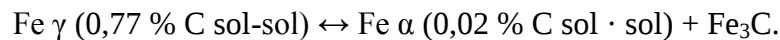
- Le domaine IGFJK d'existence du fer α (dont la frontière IG définit le point de transformation symbolisé par Ae_3) et qui inclut :
- Le domaine mixte IGH (fer α + fer γ) ;
- Le domaine mixte HGFJK (fer α + cémentite) ;
- Le domaine IHK d'existence du fer α seul qui est aussi le domaine dans lequel un acier non allié fer-carbone (à très basse teneur en carbone) est, à l'état solide, monphasé CC, le carbone étant en solution solide dans le fer α (phase appelée ferrite) ;
- La limite HK de solubilité du carbone dans le fer α que l'on peut décrire approximativement avec la relation :

$$\text{Log (C \%)} = 2,36 - 4\,030/T$$

- L'évolution en fonction de la teneur en carbone de la limite supérieure IG du domaine mixte fer α – fer γ (IGH) qui traduit l'influence du carbone sur l'état d'équilibre de l'austénite présence de carbone en solution solide, celle-ci est stable à des températures inférieures à 912 °C. Le carbone stabilise donc l'austénite et de ce fait, on le dit « gammagène » ;
- L'existence d'un eutectoïde dont les coordonnées : C = 0,77 % à 727 °C.

Et qui est constitué lors de sa formation à 727 °C, par un agrégat de grains de ferrite (contenant 0,02 % de carbone) et de grains de cémentite Fe_3C (à 6,69 % de carbone), dans un alliage fer carbone, cet agrégat contient en poids (les proportions en volume sont pratiquement identiques) 88,78 % de ferrite et 11,22 % de cémentite (les proportions à 20 °C sont de 88,49 % de ferrite pratiquement sans carbone et 11,51 % de cémentite, cette dernière proportion a augmenté par suite de la

précipitation du peu de carbone qui était en solution dans la ferrite à 727 °C, la réaction eutectoïde s'écrit :



Dans les conditions d'équilibre, elle se déroule à la température constante de 727 °C (pour un acier Fe-C non allié) [11].

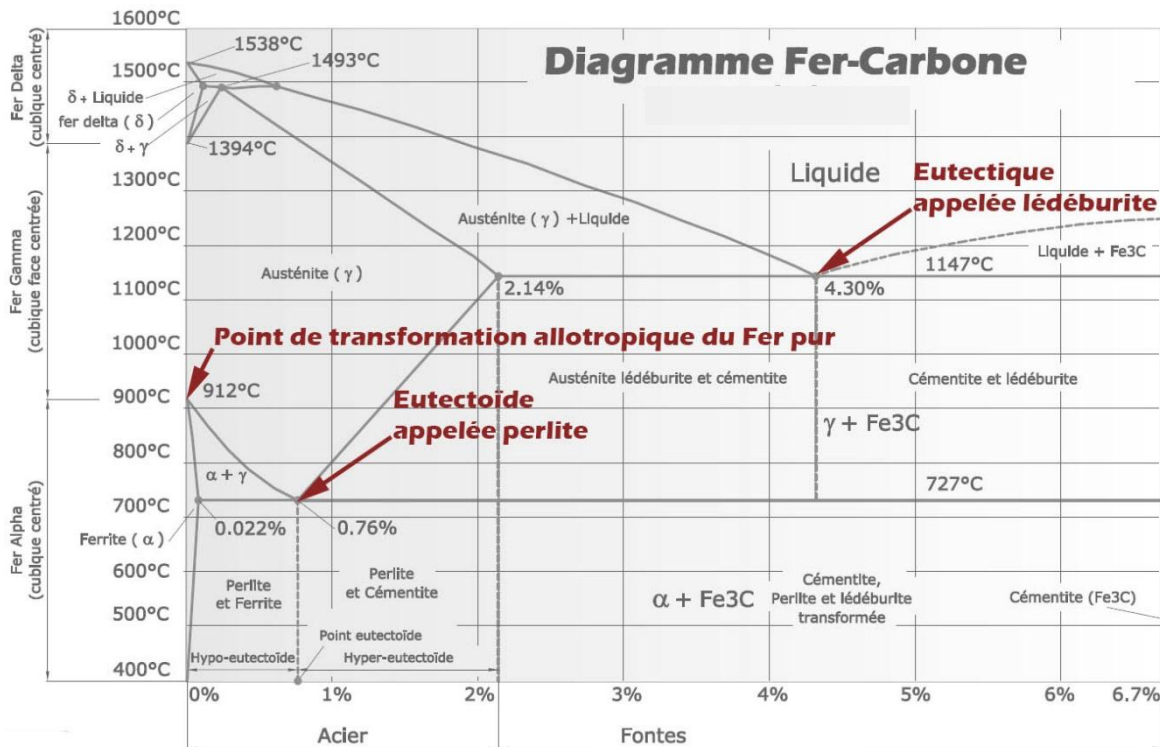


Figure I.3. Diagramme d'équilibre fer-carbone [12].

I.7. Les différentes phases de l'acier.

I.7.1. Ferrite

La ferrite est un oxyde complexe de fer et de métaux bivalents de types $n\text{Mo}$, $m\text{Fe}_2\text{O}_3$ (où M est un métal bivalent) obtenu par agglomération de poudres, leur caractéristique est essentiellement la résistivité élevée (103 à 107) Ωcm et la magnétisation de saturation relativement faible [13].

I.7.2. 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 1145 °C, l'austénite est aussi une solution solide d'insertion et paramagnétique [14].

I.7.3. La cémentite

La cémentite ou carbure de fer (Fe_3C) est une combinaison chimique de fer et de carbone dont la teneur en carbone peut atteindre 6,67 %, elle est magnétique jusqu'à 210°C et très dure (HV=700) mais fragile [15].

I.7.4. La perlite

C'est un eutectoïde formé d'un mélange de grains de cémentite, sphéroïdaux noyés dans la ferrite globulaire en couches alternées (88 % de ferrite et 12 % de cémentite), elle est obtenue lors du refroidissement et par décomposition de l'austénite à 0,8 % de carbone, elle présente dans l'acier ordinaire toujours une teneur en carbone de 0,85 %, la perlite est dure (HV = 200) et assez ductile $R_m = 800 \text{ N/mm}^2$ [15].

I.7.5. La troostite

La troostite est un agrégat lamellaire semblable à la perlite, mais de dimension microscopique et de dureté plus élevée (dureté supérieure à 400 HV), pour une vitesse de refroidissement un peu supérieure à celle de la transformation perlitique, la diffusion du carbone est encore suffisante mais celle du fer est très faible, on obtient alors un agrégat appelé troostite qui est constitué de ferrite et de cémentite orientée selon certains plans du réseau de l'austénite [16].

I.7.6. La bainite

La bainite est définie comme un produit de la décomposition de l'austénite par des mécanismes compétitifs, il s'agit ainsi d'un agrégat lamellaire de ferrite et de phases secondaires (cémentite, austénite résiduelle et/ou martensite), les agrégats sont dénommés paquets bainitiques (ou "sheaves of bainite" en anglais), ils sont constitués d'un ensemble de sous-unités de ferrite bainitique qui se forment avant les phases secondaires (à l'exception de l'austénite résiduelle) [17].

I.7.7. La sorbite

La sorbite est un constituant qui se forme au cours du réchauffage (revenu) d'un acier martensitique trempé, son aspect est semblable à celui de la ferrite avec de fins carbures de fer (cémentite Fe_3C), très bonne résilience et dureté de 250 à 400 HV [18].

I.7.8. La martensite

La martensite est une solution solide de carbone dans le fer α mais très saturée, son réseau cristallin est très distorsé (déformé), la transformation martensitique se produit sans déplacement des atomes de carbone, seulement les atomes de fer qui se déplacent à une distance plus petite que la distance intra-atomique, cette transformation se produit très vite, les points de début et fin de transformation dépendent du pourcentage de carbone, avec l'augmentation du % C, les points M_f et M_s diminuent [19].

I.8. Les différentes familles d'aciers

I.8.1. Acier au carbone

Les aciers au carbone contiennent des éléments d'alliages minimales, l'addition de carbone est majoritaire qui augmente la résistance à la traction, à la dureté et à la corrosion, mais diminue la ductilité et la malléabilité, même en très petites quantités, le carbone modifie grandement la résistance du fer. Les aciers au carbone se divisent en trois sous-familles: les aciers doux, les aciers à moyenne teneur en carbone et les aciers à forte teneur en carbone, du point de vue pratique, la teneur en carbone de l'acier peut varier entre 0.05% et 1.35%, donnant ainsi diverses nuances, outre le carbone, il existe dans l'acier, en proportions infimes, d'autres éléments tels le manganèse (Mn), le phosphore (P), le soufre (S), et le silicium (Si), la dureté d'un acier est fonction de sa teneur en carbone [20].

Qualité (%)	C	Mn	P	Si	S
Extra-doux	0,15	0,4	0,04	0,03	0,02
Doux	0,25	0,4	0,05	0,65	0,025
Mi-doux	0,35	0,4	0,6	0,15	0,03
Mi-dur	0,45	0,5	0,6	0,20	0,03
Dur	0,55	0,6	0,6	0,25	0,03
Extra-dur	0,65	0,7	0,6	0,30	0,03

Tableau I.1. Classification des aciers suivant la composition chimique [5].

I.8.2. Acier allié

L'acier allié est un alliage de plusieurs métaux, dont le nickel, le cuivre et l'aluminium, les aciers alliés ont tendance à être moins chers et sont utilisés dans les travaux mécaniques, les pièces automobiles, pipelines et moteurs, la résistance et les propriétés des aciers alliés dépendent de la concentration des éléments qu'il contient [21].

Élément allié	Ratio (%)
Carbon	0,2+0,7
Silicium	0,1+0,7 2+4 (aciers spéciaux)
Magnésium	0,3+0,8 12+14 (aciers très dures)
S, P, Cu, Ni, Cr, V, Mo	<0,1

Tableau I.2. Composition variable suivant l'emploi [6].

I.8.3. Aciers inoxydables

Les aciers inoxydables sont des aciers contenant au minimum 10,5 % de chrome et au maximum 1,2 % de carbone, on distingue les aciers inoxydables qui contiennent moins de 2,5% de nickel de ceux qui contiennent au moins 2,5 % de nickel, font partie de cette catégorie:

- Les aciers résistant à la corrosion ;
- Les aciers résistant à l'oxydation à chaud ;
- Certains aciers résistant au fluage [22].

I.8.4. Acier à outils

Les aciers à outils sont durs et résistants à la chaleur et aux rayures, ils sont appelés aciers à outils car, ils sont souvent utilisés pour fabriquer des outils métalliques, tels que des outils d'estampage, de découpe et de fabrication de moules, les aciers à outils sont composés de vanadium, de cobalt, de molybdène et de tungstène en différentes quantités, ce qui améliore sa durabilité et ses propriétés de résistance à la chaleur, ils sont également couramment utilisés pour fabriquer des marteaux, il existe plusieurs nuances d'acier différentes qui peuvent être utilisées pour des applications distinctes [23].

I.9. Classification des aciers par le mode d'emploi

On distingue les types suivants :

- Acier de construction : utilisé dans la construction ;



Figure I.4. Acier de construction [24].

- Aciers aux propriétés physiques et chimiques particulières : contient de l'acier inoxydable, de l'acier aux propriétés magnétiques particulières, de l'acier aux propriétés d'expansion, etc. ;
- Acier à outils : utilisé dans la fabrication d'outils (utilisé pour former des matériaux).



Figure I.5. Acier à outils [25].

I.10. Propriétés des aciers

I.10.1. Propriétés physiques et chimiques des aciers

L'acier est principalement connu pour sa dureté, sa ténacité et sa résistance. Dans certains cas, il est également célèbre pour son éclat. Les propriétés de l'acier sont complètement différentes de celles des blocs de construction de base le fer et le carbone. L'une de ses principales propriétés est sa capacité à refroidir rapidement après une exposition à l'eau ou à l'huile. Une certaine quantité de carbone peut être dissoute dans le fer à une certaine température. Ce que ces qualités traduisent en termes physiques quantifiables est un point de fusion très élevé (environ 1510 °C), supérieur à la plupart des métaux. Le cuivre, par exemple, est environ 500 degrés plus froid et a une densité très élevée (7,9 g/cm³), le coefficient de dilatation linéaire de l'acier à 20 °C, en (µm/m) et par °C, est de 11,1, ce qui le rend plus résistant au changement de taille avec les changements de température. L'acier contient entre 10 et 20 % de chrome, ce qui le rend très résistant à la corrosion (rouille). Lorsque l'acier contient plus de 11 % de chrome, il est environ 200 fois plus résistant à la corrosion que l'acier sans chrome, l'acier est un bon conducteur d'électricité, c'est-à-dire que l'électricité peut traverser l'acier. Aujourd'hui, le processus de fabrication de l'acier se fait de manière à ce que moins de carbone soit ajouté et que le métal soit instantanément refroidi, afin de conserver les propriétés physiques souhaitées. Le refroidissement rapide (ou trempe) de l'acier modifie également la structure du grain [26].

I.10.2. Propriétés mécaniques des aciers

Les propriétés mécaniques de l'acier sont mesurées à l'aide de différents tests (traction, rupture par impact, mécanique de la rupture, fatigue...) qui permettent de connaître les niveaux atteints par les propriétés :

➤ La ténacité

Au fur et à mesure que les cadences de production augmentent, les aciers à outils doivent bien résister aux chocs, sans se fracturer, ni se fissurer à ténacité et l'équilibre avec la dureté sont des qualités précieuses de l'acier qui doivent résister aux chocs et aux chocs [27].

➤ La tenue à chaud

La résistance à chaud est nécessaire dans de nombreux cas d'outils de coupe à grande vitesse, de matrices, de matrices d'extrusion, de matrices de forge, etc. Outre la dureté, le comportement à chaud doit reposer sur de bonnes propriétés mécaniques, une bonne résistance au fluage et une excellente résistance à l'oxydation [28].

➤ La résistance aux chocs thermiques

Plusieurs types d'outils sont soumis à des chocs thermiques sévères et multiples, qui doivent les supporter sans se déformer, ni se fissurer [29].

➤ La résistance à l'usure

Les outils (de coupe ou de formage) sont en contact permanent avec les pièces utilisées pour leur fabrication et doivent donc conserver leur tranchant et leur géométrie le plus longtemps possible. Dans ce cas, ils doivent offrir une bonne résistance à l'usure [30].



Figure I.6. La résistance à l'usure [31].

➤ La trempabilité

Les outils doivent avoir des propriétés homogènes, quant aux parties dures, elles devraient avoir une bonne ténacité, une force de durcissement élevée est également indispensable si l'on veut éviter l'apparition de déformations lors de la mise en œuvre ou lors de l'utilisation [27].

➤ La dureté

La résistance mécanique de l'acier, mesurée par des tests utilisant diverses méthodes, est appelée dureté Brinell, dureté Knopp, dureté Rockwell, dureté Vickers, le test est l'application d'une charge

pendant environ 15 secondes avec une force de 60 à 150 kg sous pression. L'application de la charge est annulée, et la valeur de raideur est obtenue directement sur l'écran. En général, c'est la teneur en carbone qui détermine la dureté de l'acier. Selon cette teneur, on distingue l'acier doux et l'acier semi-dur [32].

➤ La résistance à l'abrasion

L'acier a une bonne résistance à la corrosion, c'est-à-dire qu'il ne se corrode pas facilement en raison du frottement. Pratiquement parlant, il est difficile de moudre [33].



Figure I.7. La résistance à l'abrasion [34].

I.11. Aciers de cémentation

En général, les aciers de cémentation sont utilisés pour la réalisation de pièces mécaniques pour lesquelles une dureté superficielle élevée accompagnée d'une bonne ténacité à cœur est demandée. Il s'agit d'aciers de construction destinés au traitement de durcissement de la surface obtenu par des opérations de cémentation et de trempe. La cémentation est un traitement thermique au cours duquel du carbone est introduit dans l'acier par un processus de diffusion dans le but d'obtenir une couche superficielle durcie [35].

I.12. Domaine d'application des aciers

L'acier est le métal de prédilection des bricoleurs, pour sa résistance au poids et à la température. C'est moins cher que l'inox ou l'aluminium, si l'acier n'est pas traité, il rouillera. Mais parfois, c'est l'effet que certains designers recherchent en matière de décoration et de style, l'acier est souvent utilisé à des fins mécaniques. Selon l'épaisseur choisie, vous pouvez facilement le monter, le souder, le plier et ajouter une couche de peinture pour lui donner l'aspect souhaité. Nous avons compilé 3 exemples d'utilisations de l'acier, selon l'alliage choisi, l'acier a de nombreuses

applications et sous de nombreuses formes différentes. Des objets du quotidien à la machinerie industrielle, voici quelques exemples de produits ou ouvrages en acier [36].

a. Monuments et construction

Utilisé en élément de façade ou d'enveloppe, l'acier apporte à l'architecte un éventail de textures, de géométries et de coloris, qui vont l'aider à répondre aux contraintes environnementales, du site le plus contemporain au centre-ville classé monument historique, en passant par la pleine campagne [37].

b. Mécanique et technologie

Les aciers à outils ont une importance technologique primordiale, aucune étape de la fabrication et quel que soit le procédé employé ne peut se passer d'outil. La production mondiale de ce genre d'acier ne représente qu'un faible pourcentage $\sim 0.1\%$, mais compte par exemple en Amérique plus de 75 nuances. Chacune de ces nuances est destinée à une fonction bien spécifique [38].

c. Vie quotidienne

L'acier a opéré sa révolution technologique pour être aujourd'hui présent dans presque tous les secteurs de l'activité économique (depuis les poutrelles et les armatures de béton armé, jusqu'aux aiguilles et aux prothèses de hanche), et se trouve au cœur de la vie quotidienne (boîtes, conserves...) [39].

I.13. Défauts des aciers

Les aciers devront être exempts de pailles, criques, fentes, fissures, soufflures et manques de matière. Leurs surfaces devront être régulières, unies, propres, sans stries, gerçures ni ondulations. Les tôles ne devront pas présenter de doublages. D'une façon générale les aciers laminés ne devront pas présenter de défauts préjudiciables à leur emploi, les tranches sciées ou cisailées devront être nettes, unies et sans défauts [40].

I.14. Conclusion

Ce chapitre présente brièvement les concepts généraux de l'acier et ses principales propriétés mécaniques, ainsi que leurs caractéristiques et leur comportement mécanique. De même, ce chapitre donne également une compréhension claire de la rupture des conduites. L'influence de la géométrie, du matériau et de la charge sur le mode d'extrusion.

Références bibliographiques de chapitre I

- [1] Gh Fouad « Science Des Matériaux De Construction »
Université Aboubekr Belkaid. Tlemcen
- [2] T.T.X. Hang, T.A. Truc, N.T. Duong, N. Pébère, M.G. Olivier, Prog. Org. Coat. 74 (2012), 343.
- [3] P.B. Raja, M.G. Sethuraman, Materials.Letters. 62,(2008),113.
- [4] A. Roos, « Précis De Métallurgie Appliquée ». Edition Technique Et Documentation-Lavoisier(1982).
- [5] De 10 Em Edition Metals Handbook International American Society Of Matériels, (1990).Disponible En Ligne Sur Le Site:[Http://Www.Totalmaterial.Com/Articles/Art62.Htm](http://Www.Totalmaterial.Com/Articles/Art62.Htm)
- [6] A. Boumaraf, « Effet De Soudage Sur La Structure D'un Acier Faiblement Allié (Bs2) Utilisé dans la fabrication des bouteilles en gaz », Mémoire de master en génie mécanique, Université Mohamed Khider Biskra, (2015).
- [7] <https://Www.Futura-Sciences.Com/Sciences/Questions-Reponses/Matiere-Fabrication-Acier-835/>
- [8] H. Gaye Et P.-V .Riboud ; « Modèle D'optimisation Physico-Chimique Et Economique De L'enfournement En Aciérie » ; Rev. De Métall . P. 131-136, Cit Février 1982.
- [9] K. Mokrani, Mémoire De Master << Microstructure Et Caractérisation d'un Acier Bs2 >> Université Mohamed Khider De Biskra, P16-18 (2019).
- [10] H. Marouf ; « Caractérisation Structurale Et Mécanique Du Joint Soudé De La Liaison Bimétallique Acier Ordinaire E36/Acier Anti-Usure extra 70 Utilisé Par L'unité Grue De Bejaia Dans L'assemblage De La Pelle Chargeuse Et Godet D'excavation ».
- [11] G. Murry, « Transformations Dans Les Aciers, Techniques De L'ingénieur, Traité Matériaux Métalliques M1115 », Centre Français D'exploitation Du Droit De Copie Est Strictement Interdite.
- [12] <https://Www.Rocdacier.Com/Les-Alliages-Binaires-Et-Diagramme-Fer-Carbone/>.
- [13] S. Bensaada, Support Des Cours, Traitements Thermiques, Classification Et Designation Des Aciers Et Fontes, Université De Biskra.
- [14] R.Desgagnes, Et Raymond Langevin, (Perform), Guide D'auto-Apprentissage Pour Les Opérateurs En Traitement Thermique.
- [15] L. Mebarki, Thèse De Magistère En Génie Mécanique, Contribution A L'étude De Précipitation Du Carbure Dans Les Aciers Fortement Alliés (Frittée), 2014.
- [16] C. Cetinkaya, Material And Design 27 (2006) 437-445.

- [17] Jean-Christophe Hell. Aciers Bainitiques Sans Carbure: Caractérisations Microstructurale Multi-Echelle Et In Situ De La Transformation Austénite-Bainite Et Relations Entre Microstructure Et Comportement Mécanique. Autre. Université Paul Verlaine - Metz, 2011.
- [18] Siteweb : https://www.rocacier.com/commencer-la-metallurgie/amp/#9la_sorbite
- [19] Elfatace Abir. Mémoire De Master, Simulation De La Variation De La Température Dans Un Tube Au Four De Revenu Et Amélioration Du Rendement De La Combustion, Univ De Tizi Ouzou, 2018.
- [20] K. Saadi ; « L'étude De L'effet Thermique Sur Une Soudure D'un Pipeline » ; Mémoire De Master ; Unive De Biskra;2012.
- [21] E.Rowan « Discussion In The Symposium On Inter Masters Sees In Metals Andalloys.- Volume3 », (1948).
- [22] G. Murry, « Aide-Mémoire Métallurgie 2eédition Métaux • Alliages • Propriétés, Dunod », Paris, 2004, 2010
- [23] K .Luis « Science Et Génie Des Matériaux Modulo Editeur », 2001,233av Mont Royal, Canada.
- [24] <https://construction-maison.ooreka.fr/astuce/voir/617171/aciers-de-construction>
- [25] <https://www.machine-outil.com/actualites/T678/A7382-outil-hss.html>
- [26] G. Beranger, « Génialité Dès L'acier », Epp 22. Sollac. (1996).
- [27] Fabrication Mécanique Complexe Moteurs Tracteurs Constantine. Cirta 6708.
- [28] P. Canât « Aciers Inoxydables Critères De Choix Et Structure »; Technique De L'ingénieur, M4541, 11/11/2012
- [29] C. Pierre-Jean « Acier Inoxydable, Critère De Choix Et Structure », Techniques De L'ingénieur, Traité Matériaux Métalliques, Mb4, Dossier M4540, Paris (2000).
- [30] G. Murry, « Aciers Généralités », Techniques De L'ingénieur, Traité Matériaux Métalliques M300, Centre Français D'exploitation 2002.
- [31] <https://ertbv.com/fr/essais/proprietes-physiques-mecaniques/resistance-a-lusure-iso-4649/>
- [32] J. Dorlot,J.Bailon,J.Massonave, « Génie Des Matériaux »;2eme Edition Dunod ,1986.
- [33] M. Dupeux, « Aide-Mémoire Science Des Matériaux », Paris 2004.
- [34] <https://www.vialab.fr/fr/produits/applications-routieres/resistance-a-labration-des-ecf/>
- [35]https://www.univ_biskra.dz/enseignant/Bensaada/7%20classification%20des%20aciers%20et%20des%20fontes%2034%20pages.pdf
- [36] « Technique De L'ingénieure » M1002.
- [37] J .Morel, Calcul Des Structures Métalliques Selon L'eurocode3, 2002.
- [38] J. Paul Bailon, J. Marie Dorlot." Des Matériaux", 3eme Edition 2000-2001.

[39] O. Taâmallah ; Effet Des Traitements Mécaniques De Surface (Tms) Sur L'écrouissage Et La Ténacité D'un Acier , Mémoire De Master, L'université De Badji Mokhtar, 2007.

[40]Url :[Http://Www.Piles.Setra.Developpement](http://Www.Piles.Setra.Developpement)

Durable.Gouv.Fr/Img/Pdf/Fascicule_4_1962_11_25_Circulaire_84_Cle13fa4b.Pdf

Chapitre II

Cémentation des aciers

Chapitre II	Cémentation des aciers
II.1. Introduction	27
II.2. Le but de cémentation.....	27
II.3. Principe de la cémentation	27
II.4. La profondeur de cémentation.....	29
II.5. Techniques de cémentation	30
II.5.1. Cémentation solide (en caisse).....	30
II.5.2. Cémentation liquide	32
II.5.3. Cémentation gazeuse	34
II.5.4. Cémentation ionique	36
II.6. Rôle des éléments d'alliage sur la cémentation.....	36
II.6.1. Carbone	36
II.6.2. Autres éléments d'alliages	37
II.7. Traitements thermiques après cémentation	38
II.8. Traitements préparatoires de la surface	42
II.9. Etapes de la cémentation	39
II.9.1. Etapes d'enrichissement de carbone	39
II.9.2. Trempe au cours de cémentation	39
II.9.3. Structure obtenue après trempe.....	40
II.9.4. Revenu au cours de cémentation.....	41
II.9.5. Effet du revenu.....	41
II.10. Propriétés des pièces cémentées	42
II.11. Les défauts de cémentation	42
II.12. Conclusion.....	43

Liste des figures

Figure II.1. Principe de la cémentation	28
Figure II.2. Variation de la concentration de carbone avec la distance.....	28
Figure II.3. Phases de cémentation.....	29
Figure II.4. profondeur conventionnelle de cémentation.....	30
Figure II.5. Relation entre la profondeur totale de cémentation et la durée totale de l'opération à température constante après cémentation en caisse.....	32
Figure II.6. Représentation d'une cémentation liquide.....	32
Figure II.7. Concentrations de carbone et d'azote dans la surface en fonction de la teneur en NaCN lors de la cémentation d'acier au carbone non allié pendant 2 à 5 h à 950 ° C dans un bain de cémentation liquide sous un capot de protection en graphite.....	33
Figure II.8. Concentrations de carbone et d'azote dans la surface en fonction de la température de cémentation lors de la cémentation d'acier au carbone non allié pendant 2 à 5 h dans un bain de NaCN à 50%.....	34
Figure II.9. Austénite résiduelle dans une couche cémentée et durcie par trempe.....	35
Figure II.10. Micrographie d'une couche cémentée par plasma pendant 2 h d'un acier SUS 316 L.....	35

Liste des tableaux

Tableau II.1 Relation entre l'épaisseur de la couche à cémenter et la température et durée de cémentation.....	31
Tableau II.2 Désignations métallurgiques communément cémentées.....	37
Tableau II.3 Effet des éléments d'alliage classés du plus au moins carburigène.....	38

II.1. Introduction

Les traitements thermochimiques des aciers sont employés dans le but d'améliorer leurs propriétés surfaciques. Le mécanisme essentiel est la diffusion d'une ou plusieurs espèces chimiques dans l'acier à une température généralement élevée, dans certains cas, le processus est suivi d'une trempe et d'un revenu alors qu'il exige seulement un refroidissement à l'air dans d'autres cas, l'espèce diffusant peut être le carbone, l'azote ou le bore, ainsi les processus sont nommés cémentation, carbonituration, nitruration, nitrocarburation ou boruration, ces traitements de surfaces ont une grande importance industrielle parce que les propriétés mécaniques et chimiques des couches extérieures des pièces traitées peuvent être améliorées, selon le processus choisi, la surface traitée présentera une résistance à l'usure et à la corrosion améliorée avec une dureté élevée [1,2].

La cémentation est un processus dans lequel le métal ferreux (l'acier) austénitisé est mis en contact avec un environnement à potentiel de carbone suffisant pour provoquer l'absorption du carbone à la surface et, par diffusion, créer un gradient de concentration de carbone entre la surface et l'intérieur du métal. L'objectif principal de la cémentation et du durcissement des pièces est d'obtenir une dureté et une résistance à l'usure élevées des couches superficielles tout en conservant un cœur doux et tenace. Pour ce procédé, des aciers à faible teneur en carbone (jusqu'à un maximum d'environ 0,30% de carbone), avec ou sans éléments d'alliage (nickel, chrome, manganèse, molybdène), sont normalement utilisés [3].

II.2. Le but de cémentation

La cémentation est un processus de saturation en carbone de la couche superficielle de l'acier et ayant pour but principal, l'obtention d'une surface dure et résistance à l'usure passe enrichissement de la couche superficielle en carbone jusqu'à une concentration de 0,8 à 1,2 % C et par trempe ultérieure suivie d'un revenu à basse température, ce procédé accroît également la limite de fatigue [4].

II.3. Principe de la cémentation

Dans ce processus, le carbone est diffusé dans l'acier en chauffant au-dessus de la température de transformation et en maintenant l'acier en contact avec un matériau carboné qui peut être un milieu solide, un liquide ou un gaz, dans de telles conditions, le carbone est absorbé en solution solide dans l'austénite, comme la solubilité du carbone est plus à l'état austénitique qu'à l'état ferritique, l'état entièrement austénitique est essentiel pour la cémentation [5].

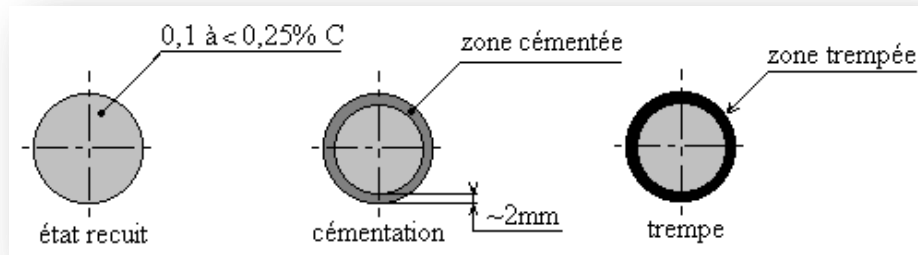


Figure II.1. Principe de la cémentation [6].

La cémentation se déroule en deux étapes :

- ✓ L'absorption de carbone libre sur la surface de l'acier se produit en raison d'une grande différence entre le potentiel de carbone de l'atmosphère et la teneur en carbone de la surface de l'acier, le taux d'absorption de la teneur en carbone supplémentaire sur la surface augmente avec une augmentation de la teneur en carbone de la surface jusqu'à ce qu'elle devienne égale à celle de l'atmosphère.
- ✓ La diffusion du carbone de la surface vers l'intérieur se produit dans la deuxième étape, dès que l'acier entre en contact avec l'atmosphère de cémentation, le carbone en surface atteint sa valeur maximale (C_s), il reste constant tout au long du processus. La teneur en carbone de l'intérieur est la même que la teneur en carbone d'origine dans l'acier, C_o . À un instant $t > 0$, la concentration en carbone varie linéairement avec la distance (figure 2). La première loi de diffusion de Fick régit ensuite la diffusion du carbone dans l'acier [7].

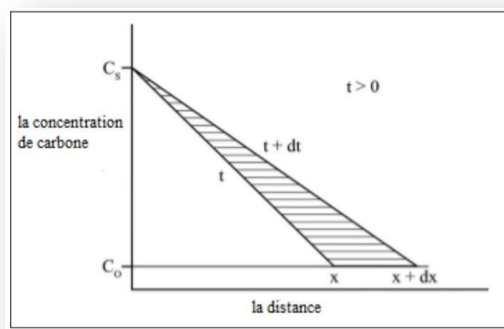


Figure II.2. Variation de la concentration de carbone avec la distance [7].

La profondeur de la couche cémentée et la rapidité de l'opération sont fonction des trois paramètres suivants :

- ✓ Le pouvoir cémentant du ciment caractérisé par son potentiel carbone.
- ✓ La cinétique de réaction gaz-métal.
- ✓ La diffusion du C dans l'acier [6].

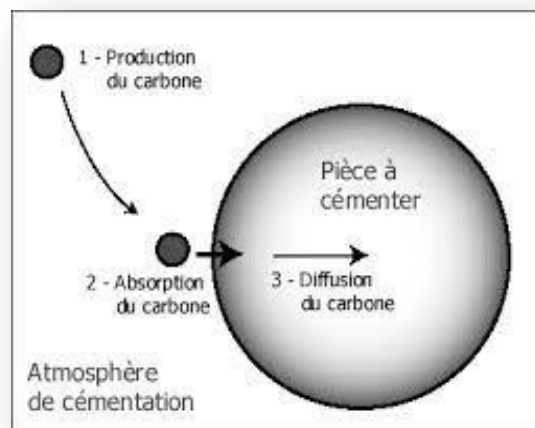


Figure II.3. Phases de cémentation [6].

II.4. La profondeur de cémentation

Une couche traitée est caractérisée par son profil de microdureté, il 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 500 Hv, figure (04), la profondeur conventionnelle de cémentation dépend donc du profil de la teneur en carbone, du degré de transformation martensitique des divers points de la couche enrichie (la trempabilité des aciers), mais surtout des conditions du traitement (la température et la durée de la cémentation), l'épaisseur visée pour la couche cémentée varie selon la destination et le volume de la pièce, les épaisseurs importantes (0.8 mm 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, 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 [8].

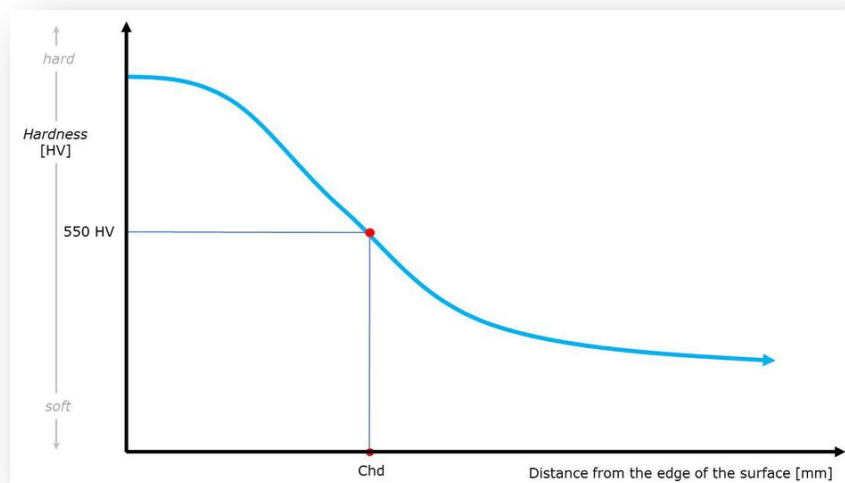


Figure II.4. profondeur conventionnelle de cémentation [8].

II.5. Techniques de cémentation

Les agents de carburation peuvent être solides (en caisse), liquide ou gazeuse ou ionique.

II.5.1. Cémentation solide (en caisse)

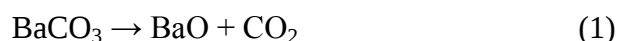
L'agent de saturation dans cette opération est un ciment solide, il n'est pratiquement plus utilisé industriellement. Le principe est de noyer les pièces à traiter dans un ciment solide à base de charbon et de bois, le tout étant maintenu dans une caisse fermée portée à la température de cémentation (900 à 950°C), le ciment est constitué de carbone amorphe, généralement du charbon de bois (provenant de bois sélectionnés, exempts d'écorces) additionné d'un activateur, le carbonate de baryum BaCO_3 , il se présente soit sous forme de granulés reconstitués à partir d'un mélange de charbon de bois (60 à 75%) et de carbonate de baryum (25 à 40%) en poudre, soit sous forme de morceaux de charbon de bois finement concassés enrobés de carbonate de baryum en présence d'un lait de chaux comme fixateur [9]. D'une manière pratique, les pièces sont placées dans des caisses en acier réfractaire au chrome sur un lit de ciment, convenablement espacées les unes des autres et recouvertes d'une couche de ciment de 2 à 3 mm d'épaisseur, avant de disposer un second étage de pièces et ainsi de suite. Une fois pleine, la caisse est fermée par un couvercle et éventuellement lutée à la terre, la caisse est placée dans un four où 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, 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 cémenter est choisie selon la température et durée de cémentation [10].

		Epaisseurs de la couche de cémentation en mm				
		1h	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
Au	900 °C	0.6 mm	1.2 mm	1.5 mm	2.5 mm	4.5 mm

Tableau II.1. Relation entre l'épaisseur de la couche à cémenter et la température et durée de cémentation [10].

Le processus de cémentation par le charbon de bois, le coke, etc., s'explique comme suit :

Formation de CO, se fait avec la décomposition du carbone amorphe contenu dans le ciment suivant la réaction (1) :



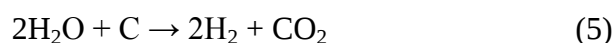
Ensuite, l'oxyde de carbone formé se décompose suivant la réaction (2).



Formant du carbure de fer ou de la cémentite suivant la réaction (3), puis comme Le carbone ou le carbure de fer dans les pièces, c'est quand on peut dire que la cimentation se produit.



Dans le cas du ciment enrobé, il s'ajoute un dégagement de vapeur d'eau dû au lait de chaux utilisé pour fixer le carbonate conduisant aux réactions d'équilibre du gaz à l'eau :



Le dégagement d'hydrogène est favorable à la réaction de cémentation.

Dans tous les cas, pour que l'absorption du carbone soit facilement vérifiée, il est nécessaire que l'acier soit à l'état austénitique, c'est-à-dire que le fer soit sous forme de fer γ

Aujourd'hui ce procédé est encore intéressant pour réaliser des cémentations sur des pièces unitaires ou en faible quantité dont les dimensions sont supérieures à celles des fours de cémentation gazeuse. Cette technique a été toutefois très largement utilisée dans l'industrie de série, notamment, l'industrie automobile qui s'était dotée pour cela d'installations adaptées à la production de masse : fours poussants ou fours à sole tournante, équipés de systèmes de déversement des caisses, de récupération, de recyclage du ciment avec ajout contrôlé de ciment neuf, deremplissage des caisses, elle a été abandonnée après le développement de la cémentation gazeuse à partir des années 60 [11].

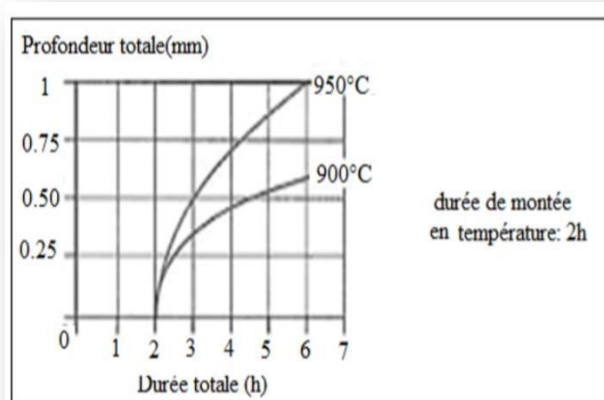


Figure II.5. Relation entre la profondeur totale de cémentation et la durée totale de l'opération à température constante après cémentation en caisse [11].

II.5.2. Cémentation liquide

La cémentation liquide est une méthode de cémentation des pièces en acier ou en fer en les maintenant à une température supérieure à AC_3 (la température à laquelle l'austénite commence à se former, généralement 980°C) dans un bain de sel fondu qui introduit du carbone et parfois de l'azote dans le métal. La diffusion ultérieure du carbone de la surface vers l'intérieur produit une couche qui peut généralement être durci par trempe rapide à partir de la température du bain [12].

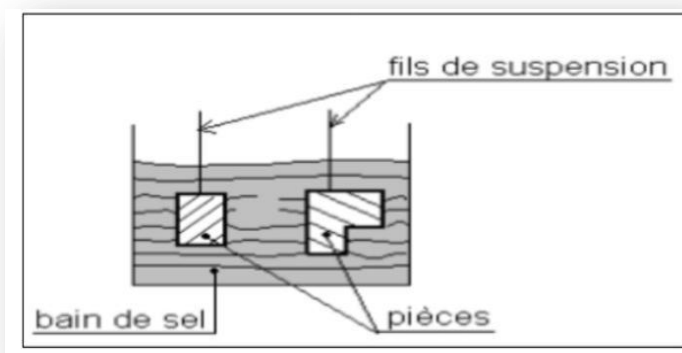


Figure II.6. Représentation d'une cémentation liquide [13].

L'agent de cémentation actif dans un bain de sel est le cyanure de sodium (NaCN) ou le cyanure de potassium (KCN). On pense que la carburation se déroule selon les réactions suivantes :



La première réaction a lieu à l'interface entre le bain de sel et l'atmosphère et les deux autres réactions ont lieu à l'interface entre le bain de sel et l'acier. Une partie de l'azote libéré par la réaction (18) est également absorbée par l'acier.

Les bains de cyanure conventionnels qui donnent une profondeur de boîtier allant de 0 à 8 mm ont une teneur en cyanure (NaCN) de 40 à 50%.

Un bain de sel contenant environ 20% de NaCN peut être utilisé pour traiter des pièces très fines nécessitant une profondeur de boîtier de seulement quelques dixièmes de millimètre.

La surface du bain doit être recouverte d'une couche de fines de graphite qui empêche la perte de rayonnement et le dégagement de gaz du bain.

La quantité de carbone et d'azote captée par l'acier dépend principalement de la teneur en cyanure du bain et de sa température. La figure (II.07) montre que la concentration en carbone augmente tandis que l'azote diminue lorsque la teneur en cyanure augmente de 10 à 50%.

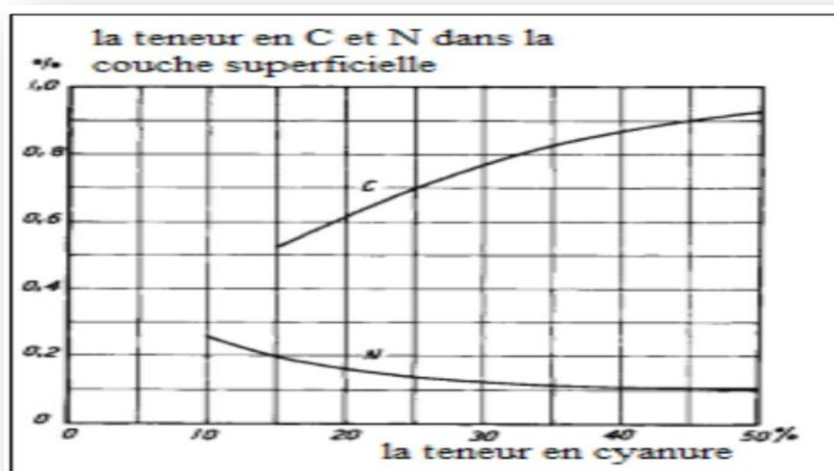


Figure II.7. Concentrations de carbone et d'azote dans la surface en fonction de la teneur en NaCN lors de la cémentation d'acier au carbone non allié pendant 2 à 5 h à 950 ° C dans un bain de cémentation liquide sous un capot de protection en graphite [14] .

Avec l'augmentation de la température, la teneur en NaCN restant constante à environ 50%, la concentration de carbone augmente et celle d'azote diminue comme le montre la figure II.08.

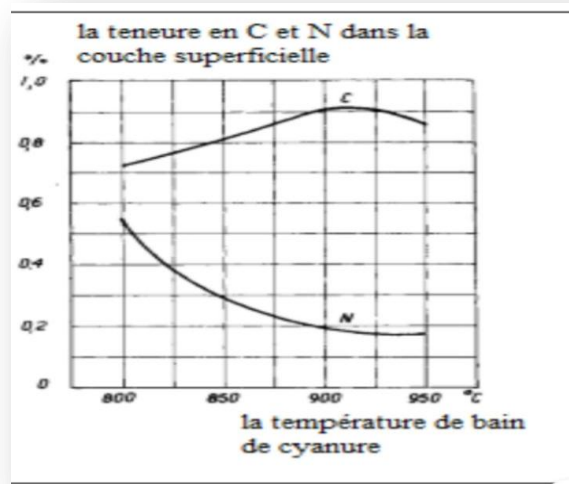


Figure II.8. Concentrations de carbone et d'azote dans la surface en fonction de la température de cémentation lors de la cémentation d'acier au carbone non allié pendant 2 à 5 h dans un bain de NaCN à 50% [14].

La cémentation au bain de sel est principalement utilisée pour les petites pièces qui nécessitent généralement une profondeur de boîtier inférieure à 0-5 mm. Plus la profondeur de boîtier requise est petite, plus l'économie est réalisée en utilisant un bain de sel car la vitesse de chauffage est très élevée par rapport à celle des milieux de cémentation solides. Avant d'immerger les pièces dans le bain de sel, elles doivent être préchauffées entre 100 ° C et 400°C, en partie pour éliminer toute trace d'humidité et en partie pour utiliser plus efficacement la capacité du bain de sel [14].

II.5.3. 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 éprouvette de fer pur en équilibre avec le milieu de cémentation considérée dans les conditions retenues ». Il y a carburation si, initialement l'activité du carbone dans le métal est inférieure au potentiel carbone de l'atmosphère. Dans le cas inverse, il y a décarburation du métal. Quand ces deux variables sont égales le système est à l'équilibre et n'évolue pas.

Les gaz tels que l'oxyde de carbone et le méthane réagissent à chaud à la surface de l'acier, de telle sorte que le carbone libéré s'insère dans le réseau cubique à face centrée du fer.



Au cour 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 [33].

La formation des oxydes internes est un phénomène typique dans la cémentation gazeuse [15,16].

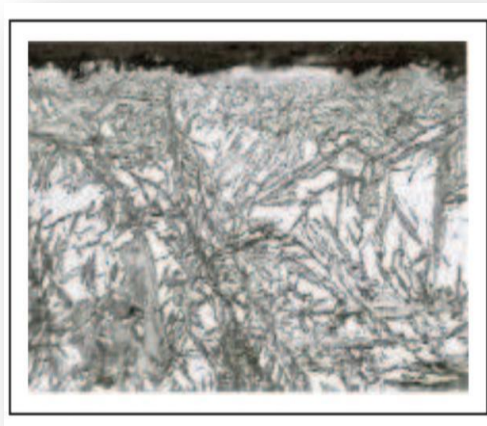


Figure II.09. Austénite résiduelle dans une couche cémentée et durcie par trempe [17].

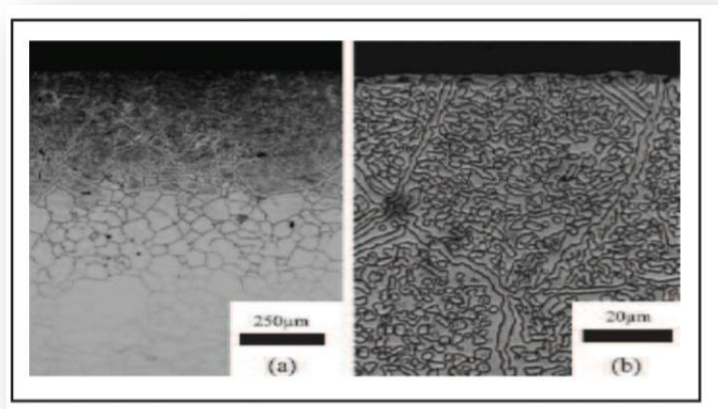
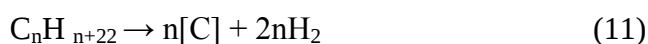


Figure II.10. Micrographie d'une couche cémentée par plasma pendant 2 h d'un acier SUS 316 L [18].

II.5.4. 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 délimitées [19].

II.6. Rôle des éléments d'alliage sur la cémentation

Les éléments d'alliage sont présents dans les aciers de cémentation pour améliorer leur aptitude à subir la transformation martensitique (trempabilité). Plus l'acier est trempant et moins il est nécessaire de refroidir énergiquement une pièce pour obtenir la transformation martensitique, tous les éléments d'alliage, à l'exception du cobalt, augmentent la trempabilité mais dans des proportions variables, ainsi le chrome, le manganèse et le molybdène qui interviennent dans les aciers de cémentation apportent une forte augmentation de trempabilité [20].

II.6.1. Carbone

Les éléments d'alliage ont un rôle prépondérant dans le traitement d'austénitisation. La germination de l'austénite est instantanée dans le cas des aciers au carbone mais la présence de certains éléments d'alliage peut ralentir la croissance gouvernée essentiellement par la diffusion, du fait de leur faible diffusivité [21],

II.6.2. Autres éléments d'alliages

Généralement, les nuances d'aciers traitées (Tableau 2) contiennent des éléments d'alliage (Tableau 3) qui influent fortement sur les propriétés de la pièce en intervenant sur :

- Les teneurs en carbone et en azote admissibles.
- La trempabilité (qui conditionne les propriétés de résistance mécanique).
- La cinétique de diffusion du carbone et de l'azote (et donc l'épaisseur et la microstructure de la couche traitée).

Les éléments d'alliage carburigènes et nitrurigènes agissent sur la position de Ac_m^* et favorisent ainsi le piégeage du carbone et de l'azote. Dès que la teneur en carbone franchit cette ligne Ac_m^* , deux types de carbures peuvent faire leur apparition dans la couche enrichie:

- Des carbures secondaires de type $M_{23}C_6$ (par exemple $Cr_{23}C_6$) ou de type M_7C_3 qui sont principalement localisés dans les joints de grains de la matrice austénitique .
- Des carbures primaires de type MC fréquemment répartis de manière plus homogène dans l'ensemble du matériau.

La formation de ces carbures est à éviter la plupart du temps car elle favorise les phénomènes de ségrégation. Par exemple, dans le cas spécifique de la cémentation d'aciers inoxydables, il est nécessaire de conserver une teneur en chrome identique dans toute la matrice afin de garder les propriétés de résistance à la corrosion [22].

Désignations (norme AFNOR)	Comptions chimiques (%m)					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
16MnCr ₅	0.14-0.19	0.4	1-1.3	0.8-1.1	-	-
18CrMo ₄	0.13-0.20	0.15-0.35	0.5-0.8	0.9-1.2	0	0.2-0.3
16NiCr ₆	0.14-0.17	0.15-0.4	0.4-0.6	1.4-1.7	1.4-1.7	-
20NiCrMo ₂	0.17-0.23	0.15-0.4	0.6-0.9	0.35-0.65	0.4-0.7	0.15-0.25
27CrMo ₄	0.29	0.3	0.7	1.07	0.28	0.2
27MnCr ₅	0.26	0.265	1.29	1.29	0.145	0.04
29MnCr ₅	0.26-0.32	0.1-0.4	1.1-1.4	1.15-1.3	-	-

Tableau II.2. Désignations métallurgiques communément cémentées [23].

Elément	Caractéristique
V	Form de carbures et carbonitrures primaires de type Mc dont la solubilité est faible . Améliore la trempabilité et génère un durcissement scendaire .
Mo	Est un élément alphagène très carburigène . Il augmente la trempabilité de l'acier contribue au durcissement par solution solide .
W	A une tendance à générer un durcissement secondaire et à form des carbures primaires du type Mc qui permettent de diminuer la tendance au grossissement de grain par sur chauffe . Il améloire la trempabilité de l'acier .
Cr	Est un élément alphagène qui joue un role essentiel dans l'amélioration de la trempabilite de l'acier . Il forme des carbures de type $M_{23}C_6$ et M_7C_3 qui s'opposent au grossissement de grain lors de l'austénitisation et participent à la résistance à l'usure.
Mn	Est un élément gammagène carburigène qui s'insère dans les carbures du type M_7C_3 .

Tableau II.3. Effet des éléments d'alliage classés du plus au moins carburigène [24, 25]

II.7. Traitements thrmiques après 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 [26].

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 grenaillage [27].

II.8. Traitements préparatoires de la surface

Ce sont des traitements de conditionnement d'une surface industrielle par une succession d'opérations appropriées afin de la rendre apte à recevoir et maintenir un traitement ultérieur. Alors, l'objectif de ces types de traitements est rendre la surface apte à recevoir des traitements de surface et de revêtement, en éliminant toutes les souillures en surface du matériau (les graisses, les huiles, les oxydes superficiels...). En général, les processus de traitement préparatoire de surface sont chimiques, électrolytiques et mécaniques [28].

II.9. Etapes de la cémentation

II.9.1. Etapes d'enrichissement de carbone

On crée une couche superficielle plus ou moins enrichie en carbone (0.1 à 0.2% au départ avec des teneurs finale de 0.7 à 1.2 % de carbone en général .

❖ Deux phénomènes interviennent

- Une réaction chimique qui fournit du carbone à la surface de la pièce.
- Un processus de diffusion dans la zone superficielle, de la surface vers l'intérieur.

Le carbone étant bien plus soluble en phase austénitique qu'en phase ferritique , de plus la diffusion étant facilitée par la température, le traitement à lieu vers 900 à 950 °C avec des temps maintien de plusieurs heures.

Une température plus élevée risquerait de provoquer un grossissement des grains d'austénite [29].

II.9.2. Trempe au cours de cémentation

Le rôle d'une trempe est généralement à l'inverse des recuits et pour permettre d'obtenir des structures hors d'équilibre dans les conditions où on les rencontre, à l'échelle aussi bien cristalline que micrographique.

Le refroidissement doit être suffisamment rapide afin d'éviter la transformation de l'austénite en ferrite, perlite et bainite et d'obtenir plutôt une transformation martensitique [30]. Lors de la trempe, le coeur des outils (pièces) subit des vitesses de refroidissement plus lentes que

celles de la surface. Ces vitesses sont assez lentes pour produire la structure non martensitique (perlite et bainite) au centre des pièces [31].

Le diagramme TRC de l'acier permet de définir, pour la procédure d'austénitisation correspondante, les conditions de refroidissement qui provoquent la transformation de l'austénite en martensite (ou éventuellement en martensite + bainite) [32].

La formation des carbures MC et/ou M_7C_3 au cours de la trempe peut jouer un rôle très important dans l'amélioration de la résistance à l'usure en augmentant la dureté de la surface, cependant les carbures de type $M_{23}C_6$ sont moins résistants et tendent à diminuer la résistance au fluage des aciers à outils [33].

Le milieu de trempe peut être plus ou moins agité (brassage) ou projeté (refroidissement par aspersion). Le refroidissement en chaque point d'un volume d'acier dépend :

- ✓ Des propriétés thermiques du métal.
- ✓ De la géométrie de la pièce (forme, dimensions, etc.).
- ✓ De la position du point considéré dans la section de la pièce.
- ✓ Des propriétés thermiques du milieu de trempe et de certaines de ses propriétés physiques (viscosité notamment).
- ✓ De la température du milieu de trempe [34].

II.9.3. Structure obtenue après trempe

Après refroidissement direct, les surfaces adjacentes sont constituées de martensite aciculaire et d'austénite résiduelle. La taille des plaquettes de martensite dépend de la taille des granules d'austénite initiaux. La double trempe permet d'obtenir des structures très précises et homogènes. Lorsque les distances sont augmentées vers l'intérieur, la teneur en carbone diminue et le volume d'une partie de l'austénite résiduelle diminue au profit de la martensite [35].

II.9.3.1. Martensite

est une solution solide d'insertion sursaturée en carbone dans le fer α (ferrite), de même composition que l'austénite initiale. La transformation austénite - martensite consiste en une modification du réseau cristallin (avec un faible déplacement des atomes de fer), sans qu'il y ait de diffusion des atomes de carbone. Avec un refroidissement lent, le carbone se déplace. Avec un refroidissement rapide, il se fige dans la structure [36].

II.9.3.2. Austénite résiduelle

Au cours de la stabilisation, avec une augmentation de la profondeur de la couche superficielle durcie, la teneur en austénite résiduelle augmente également, ce qui entraîne une

augmentation de la teneur en carbone et, pour la même raison, une précipitation de carbures et une oxydation interne peuvent se développer [37].

L'austénite résiduelle est un composant de faible dureté inférieure à 320 HV, inadapté à la dureté mais présentant une bonne résistance à la fatigue par flexion [38].

L'austénite, ou fer gamma, avec une structure cubique à faces centrées, est la composante constante de Fer pur entre 910°C et 1450°C. Ce contraste permet une forte solubilité dans le carbone (jusqu'à 2,1 % en masse à 1147 °C) [39].

A des températures plus élevées, c'est un composant des aciers au carbone et des aciers faiblement alliés où le carbone dans une solution solide est dans une plage de température dont la plage dépend des teneurs des éléments d'addition. Les éléments gammagènes (Ni, Mn...) élargissent le champ de stabilité de l'austénite, tandis que d'autres éléments (Si, Al, Mo...), appelés alphagènes, le rétrécissent. Il existe également un certain nombre d'aciers fortement alliés dont la structure austénitique reste stable ou stable jusqu'à et en dessous de la température ambiante, en particulier les aciers inoxydables dérivés de Fe-18Cr-8Ni [40].

II.9.3.3. Cémentite

La cémentite est constituée de molécules composées d'un atome de fer et de deux atomes de carbone, trois atomes de fer pour un atome de carbone, Fe_3C . Il contient 6,67 % de carbone (en masse). La cémentite ne forme pas de grain à l'échelle macroscopique, et on la retrouve sous diverses formes : fines aiguilles, plaquettes, dans les bordures de grains d'acier hyperdermique, etc [41].

II.9.4. Revenu au cours de cémentation

L'acier trempé est dur, mais il est généralement trop cassant pour être utilisé directement. La trempe consiste à chauffer une pièce qui vient d'être trempée à une température inférieure au point de basculement, à la maintenir à cette température, puis à la refroidir généralement à l'air, et parfois à l'eau. Le revenu a pour but d'éliminer les contraintes résiduelles de la trempe et d'augmenter la durabilité. Malheureusement, l'augmentation de la ténacité est toujours obtenue sous une forme ou une autre au détriment de la rigidité et de la limite élastique. Des contraintes résiduelles se forment en raison des grandes différences de température entre le cœur et la surface de la pièce lors du refroidissement, la dilatation thermique provoque des contraintes au-delà de la limite d'écoulement plastique et parfois même de la résistance à la traction (fissures de refroidissement) [42].

II.9.5. Effet du revenu

L'effet de substitution de même que l'effet de revenu, en économie résulte de l'arbitrage d'un agent économique (ménages, entreprises, administrations et Reste du Monde) selon son coût

d'opportunité entre deux situations. L'effet de revenu signifie qu'une baisse du pouvoir d'achat se traduit, toutes choses égales par ailleurs, par une diminution des quantités demandées de chaque bien. L'effet de substitution est évoqué lorsqu'un bien devient plus cher relativement à un autre, la demande baisse pour le premier et se répercute sur le second. Ces deux constats microéconomiques illustrent bien un changement de comportements pour les acteurs économiques étant donné qu'ils impactent la loi de l'offre et la demande. Nous expliquerons comment l'effet de revenu et l'effet de substitution traduisent-ils d'un changement de comportement des acteurs économiques puis nous aborderons les conséquences de ce changement comportemental [43].

II.10. Propriétés des pièces cimentées

Les propriétés de surface conditionnent la tenue des pièces en frottement (usure et fatigue). On cherche généralement à réaliser des couches superficielles de propriétés particulières (notamment de dureté élevée) s'appuyant sur un cœur peu fragile (donc moins dur) donnant à la pièce, dans son ensemble, une combinaison exceptionnelle de propriétés (résistance au frottement, à l'usure, à la fatigue et ténacité). On rencontrera donc très souvent, la macrostructure suivante :

- Une couche superficielle présentant, en général, une dureté élevée (≈ 700 HV ou plus) et des contraintes résiduelles de compression importantes (plusieurs centaines de MPa) ; l'épaisseur de cette couche peut varier de 0,1 à plusieurs millimètres ;
- Un cœur constituant la partie restante de la pièce, de dureté beaucoup plus faible (inférieure en général à 400 HV).

La formation de carbure est favorisée par la température de revenu à 200 ° C. Il a été rapporté que l'acier cimenté et revenu à cette température acquiert des propriétés mécaniques excellentes [44].

En contre partie selon Christiansen et al La décomposition de l'austénite qui a permis la précipitation des carbures de chrome se traduira, par conséquent, à la rétraction du chrome de la solution solide ; ainsi, les propriétés favorables de la résistance à la corrosion de l'acier seront affectées [45,46].

II.11. Les défauts de cémentation

Même si les déformations peuvent être, à juste titre, considérées comme des défauts de cémentation et carbonituration, la distinction est faite ici entre elles et les défauts ou anomalies que peuvent présenter les pièces traitées : points doux, présence de carbures ou carbonitrides, etc. Comme une opération de traitement thermochimique fait intervenir en réalité beaucoup de séquences – stockage, manutention, lavage, traitement thermochimique,

éventuelle reprise d'usinage, éventuelle reprise en traitement, grenaillage, revenu, parachèvement, etc. – chacune d'elle peut être la source d'une anomalie qui se répercutera sur le produit final et sur sa qualité. Par souci de concision et de clarté, le tableau ci-contre regroupe un certain nombre d'anomalies significatives, leurs principales causes et leurs principales conséquences [47].

II.12. Conclusion

Nous concluons que la carbonatation est un traitement de surface d'enrichissement thermochimique en carbone dans la phase austénitique généralement comprise entre (910 et 1000 °C), qui contribue au durcissement de l'interface, tout en maintenant la ductilité dans le cœur. Ce type de traitement assure une bonne résistance à la corrosion en obtenant une couche riche en martensite à haute teneur en carbone. La phase austénitique suit généralement un processus de trempe à l'huile de durcissement superficiel pour former une structure martensitique et un revenu à basse température pour éliminer la fragilité du matériau, éliminer les contraintes et ajuster la dureté finale en formant des carbures. Et nous avons pris en compte qu'il y a un rôle et une influence de la composition chimique, notamment des éléments d'addition (ammoniac, chrome, molybdène, etc.) sur les propriétés mécaniques obtenues.

N°

Références bibliographiques de chapitre II

- [1] E.J Mittemeijer , J.T Slycke:' Chemical Potentials And Activitiesof Nitrogen And Carbon Imposed By Gaseous Nitriding And Carburizing Atmospheres', Surf. Eng., 12(2), 1996.
- [2] J.R. Davis: 'Surface Hardening Of Steels- Understanding The Basics'; ASM International, 2002.
- [3] Rakhit, A. K. Heat Treatment Of Gears : A Practical Guide For Engineers. ASM International.(2000).
- [4] M.M.Bchaupinil, L.Serapfir , R.Triwt : ‘Analogies Et Différence Entre Les Traitements De Carbonituration Et De Cémentation’, Aciers Spéciaux №13, 1975.
- [5]Rajan, T. V., Sharma, C. P., & Sharma, A. Heat Treatment: Principles And Techniques. PHI Learning Pvt. Ltd. (2011).
- [6] Noussaiba, G. Fatma, B. Comportements Mécaniques Des Aciers Faiblement Alliés Avant Et Après Cémentation (Thèse De Master). (2016).
- [7]Ray, B. C., Prusty, R. K., & Nayak, D. Phase Transformations And Heat Treatments Of Steels. CRC Press. (2020).
- [8] <https://Www.Emcotest.Com/Fr/Lunivers-Des-Essais-De-Durete/Connaissances-De-La-Durete/Applications-Conseils/Mesures-De-La-Filiation/Chd-Case-Hardness-Depth-Profondeur-De-Cementation/>
- [9] Langevin, C. [Comité Perform] Opérateur En Traitement De Surface. (2014).
- [10] SAID. Traitements Thermiques, Classification Et Designation Des Aciers Et Fontes.N
- [11] Mohamed, Z. T. (2020, 4, 2). Cours Génie Des Surfaces, Nitruration, Cémentation,Carbonituration Et Boruration. Récupéré Sur Génie De Surfaces: <https://Elearning.Univ-Annaba.Dz/Mod/Forum/Discuss.Php?D=485>
- [12] Reynoldson, R. W. Heat Treatment : Fluidized Bed Furnaces. ASM Intemational(1993)..
- [13] Cémentation.. Récupéré Sur Geocities : <http://Www.Geocities.Ws/Mbara2/Cementation.Html> (2020, Juin)
- [14] Thelning, K. E. Steel And Its Heat Treatment. Butterworth-Heinemann. (2013).
- [15] G. PARRISH:' Carburizing: Microstructures And Properties', Materials Park, OH: ASM International; 1999.
- [16] J.P.Peyre, Tournier : ‘Choix Des Traitements Thermiques Superficiels’, RPM CETIM Senlis (1985).
- [17] Y. Ueda, N. Kanayama, K. ICHII, T. Oishi, Surface And Coatings Technology; 193, 2005, P50.

- [18] K. Olga, Rowan And Richard D, Jr. Sisson, Effect Of Alloy Composition On Carburizingperformance Of Steel, Journal Of Phase Equilibria And Diffusion, Jpedav, ASM International,2009.
- [19] A.Constant, G.Henry Et J.C.Chrbonnier ,Principes De Base Des Traitements Thermiques, Thermomécaniques, Et Thermochimiques Des Aciers;Edition 1992.
- [20] GUY (A.G.), HREN (J.J.) Eiements Of Physical Metallurgy 3 » Ed. (1974). Addison Wesley Series In Metallurgy And Materials, M. COHEN Ed., P484.
- [21] D.V. Shtansky, K. Nakai Et I. Ohmori, Pearlite To Austenite Transformation In An Fe2.6Cr-1C Alloy, Acta Mater., 47, N°9, 2619-2632 (1999)
- [22] T Turpin, J Dulcy,M Gantois,J Frey ,D Hertz. Précipitation Des Carbures Au Cours De La Cémentation En Phase Gazeuse D'aciers Inoxydables : Approche Thermodynamique, Cinétique Et Structurale. Matériaux 2002, Tours 21-25 Octobre 2002.
- [23] Atlas Des Courbes De Transformation Des Aciers De Fabrication Française. 1974,IRSID, CPS, Paris.
- [24] R Lévêque. Aciers A Outils – Composition Chimique Et Structure, M4585. Techniques De l'Ingénieur 10.6.2003.
- [25] M Durand-Charre. La Microstructure Des Aciers Et Des Fontes: Genèse Et Interprétation. Sirpe; 2003
- [26]. Krauss, Microstructure And Properties Of Carburized Steel', In : Metals Handbook. Heat Treating, Vol. 4. Materials Park, OH : ASM International ; 1991. P.363–75.
- [27] P. Michaud, Compréhension Du Rôle Des Eléments Carburigènes Dans La Performance De Nuances D'aciers Destinées Aux Outillages Pour L'injection D'alliages Légers, Aciers Spéciaux N°35,1986.
- [28] C. Pignet, C. Pelouin, Etat De La Technique Dans L'industrie Du Traitement De Surface Dans Le Bassin Rhin-Meuse, Synthèse Bibliographique, Agence De l'Eau Rhin Meuse (1990) 47p
- [29]Sitewib :<http://Tsaucray.Free.Fr/1%20metallurgie/17%20traitement%20thermiques/F31.Htm>
- [30] M. Colombie: « Matériaux Industriels, Matériaux Métallique », DUNOD, Paris 2000.
- [31] L.Colombier: « Les Aciers A Outils Et Leur Traitement Thermique », PYCEDITION, Paris 1971.
- [32] L. Schlidt: « Tool Materials For Molds And Dies », Colorado School Of Mines Press, 118-64, 1987.

- [33] R. Lévêque: « Traitements Thermiques Dans La Masse Des Aciers A Outils », Technique De L'ingénieur, M1134, 2013.
- [34] R. Lévêque: « Les Aciers A Outils », Technique De L'ingénieur, M330A, 1979.
- [35] D. A. Porter, K. E. Easterling : « Phase Transformations In Metals And Alloys », 1992.
- [36].[Http://Webcache.Googleusercontent.Com/Search?Q=Cache:Lohugwy6js8j:Www.Metorm.Com/Content/Fr/Dossiers/82/Martensitique__Ferritique__Austenitique/+&Cd=8&Hl=Fr&Ct=Clmk&Gl=Dz](http://Webcache.Googleusercontent.Com/Search?Q=Cache:Lohugwy6js8j:Www.Metorm.Com/Content/Fr/Dossiers/82/Martensitique__Ferritique__Austenitique/+&Cd=8&Hl=Fr&Ct=Clmk&Gl=Dz)
- [37] M.Boniadri, F. D'errico, C.Tagliabue: « Fluence Of Carburizing And Nitriding On Failure Of Gears- A Case Stady », Eng. Fail. Anal, 2006
- [38] Harterei Gerster: « Traitements Thermiques, La Trempe Superficielle », P (4).
- [39] L. BARRALLIER: Mémoire De Fin D'étude « Génèse Des Contraintes Résiduelles De Nitruration. Étude Expérimentale Et Modélisation », 1992.
- [40] THIERRY IUNG Et JEAN-HUBERT SCHMITT: « Durcissement Des Aciers Ferritique, Perlitique, Bainitiques Et Martensitiques », Technique De L'ingénieur, M4341, 3eme Edition 2017.
- [41][Http://Webcache.Googleusercontent.Com/Search?Q=Cache:Tsesagkdo0mj:Www.Comiteperform.Ca/IMG/Pdf/Guide_Hors_Production_Operateur_Traitement_Thermique.Pdf+&Cd=6&Hl=Fr&Ct=Clmk&Gl=Dz#26](http://Webcache.Googleusercontent.Com/Search?Q=Cache:Tsesagkdo0mj:Www.Comiteperform.Ca/IMG/Pdf/Guide_Hors_Production_Operateur_Traitement_Thermique.Pdf+&Cd=6&Hl=Fr&Ct=Clmk&Gl=Dz#26)
- [42] DJEDDI OUARDA, BOUHBIB A. RAHIM : Mémoire De Fin D'étude De Master « Effet Des Traitements Thermiques Sur Les Propriétés Des Fils De Cuivre Tréfilés A L'enicab-Biskra », 2016, P(50).
- [43] <https://Www.Etudier.Com/Dissertations/Effet-De-Revenu-Et-Effet-De/51057872.Html>
- [44] G. Krauss : 'Microstructure, Residual Stress, And Fatigue Of Carburized Steels', Proceedings : Quenching, And Carburizing, 1991, The Institute Of Materials, Melbourne, 205-225.
- [45] T. Christiansen And M.A.J. Somers : Revue De Matérialographie Struers, 2006, 9, 1-17
- [46] Athmani Moussa << Amélioration Des Propriétés De Surface D'un Acier A Outils De Travail A Chaud Par Des Traitements Thermiques Et Thermochimiques (Cémentation)>> Université Badji Mokhtar Annaba, P27 (2011).
- [47] <https://Www.Techniques-Ingenieur.Fr/Base-Documentaire/Archives-Th12/Archives-Traitement-Des-Metiaux-Tiamd/Archive-1/Cementation-Carbonitruration-M1226/Defaults-Et-Deformations-M1226niv10012.Html>
- [48] M. Gherbi , B. Taghit , mémoire de master « L'effet de la cémentation sur le comportement mécanique de l'acier » université abbes laghrour khenchela P1(2019).

Chapitre III

Matériau étudié-Résultats expérimentaux et discussions

Chapitre III	Matériau étudié-Résultats expérimentaux et discussions
III.1. Introduction	52
III.2. Acier étudié 20MnCr5.....	52
III.3. Technique de cémentation	52
III.4. Préparation des éprouvettes C₁, C₂, C₃ et C₄	54
III.4.1 Polissage	54
III.5. Microstructure des éprouvettes C₁, C₂, C₃ et C₄.....	55
III.5.1. Éprouvette C ₁ (brut)	56
III.5.2. Éprouvette C ₂ (cémentée 3 heures)	56
III.5.3. Éprouvette C ₃ (cémentée 6 heures)	57
III.5.4. Éprouvette C ₄ (cémentée 9 heures)	57
III.6. microdureté des éprouvettes C₁, C₂, C₃ et C₄.....	58
III.6.1. Éprouvette C ₁ (brut)	59
III.6.2. Éprouvette C ₂ (cémentée 3 heures)	59
III.6.3. Éprouvette C ₃ (cémentée 6 heures)	60
III.6.4. Éprouvette C ₄ (cémentée 9 heures)	61
III.7. Conclusion	62

Liste des figures

Figure III.1. Four de cémentation.....	53
Figure III.2. Meuleuse.....	54
Figure III.3. La polisseuse.....	54
Figure III.4. La machine de polissage ultra fin.....	55
Figure III.5. Microscope inverse dmi8.....	55
Figure III.6. Microstructure de l'acier 20MnCr5 de l'éprouvette C ₁ (brut).	56
Figure III.7. La microstructure de l'acier 20MnCr5 de l'éprouvette C ₂ (cémentée 3h)...	56
Figure III.8. La microstructure de l'acier 20MnCr5 de l'éprouvette C ₃ (cémentée 6h)...	57
Figure III.9. La microstructure de l'acier 20MnCr5 de l'éprouvette C ₄ (cémentée 9h)...	58
Figure III.10. Microduromètre zhv30-a zwickroell indentec.....	58
Figure III.11. Profil de microdureté de l'acier 20MnCr5 de l'éprouvette C ₁ du bord vers cœur brut.....	59
Figure III.12. Profil de microdureté de l'acier 20MnCr5 de l'éprouvette C ₂ du bord cémenté vers cœur brut.....	60
Figure III.13. Profil de microdureté de l'acier 20MnCr5 de l'éprouvette C ₃ du bord cémenté vers cœur brut.....	61
Figure III.14. Profil de microdureté de l'acier 20MnCr5 de l'éprouvette C ₄ du bord cémenté vers cœur brut.....	61

Liste des tableaux

Tableau III.1. Composition chimique de l'acier.....	52
Tableau III.2. Les conditions opératoires de la cémentation pour les éprouvettes (C_1 , C_2 , C_3 , C_4).....	53

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons toutes les mesures expérimentales que nous avons prises pour améliorer les différentes propriétés structurales, chimiques et mécaniques de l'acier 20MnCr5 à faible teneur en carbone ($< 0,25\%$) en fabriquant des couches (dures) de carbures en surface. Certains paramètres de production (temps de cémentation), qui affectent à la diffusion du carbone de source de carbone à la surface de la pièce traitée. Pour mettre en évidence cette performance, nous avons élaboré quatre éprouvettes en acier 20MnCr5 en ajustant l'état de chaque éprouvette, C_1 (éprouvette d'acier brut 20MnCr5 (brut)), C_2 (éprouvette d'acier 20MnCr5 cémentée pendant 3 heures), C_3 (cas de l'éprouvette d'acier 20MnCr5 cémentée pendant 6 heures), C_4 (cas de l'éprouvette d'acier 20MnCr5 cémentée durant 9 heures). Nous avons caractérisé les éprouvettes avant et après cémentation.

III.2. Acier étudié 20MnCr5

Le 20MnCr5 est un acier de cémentation avec une faible teneur en carbone mais une bonne trempabilité atteignant une bonne résistance à l'usure grâce à une dureté de surface élevée après durcissement. La petite taille des grains bénéficie d'une bonne ductilité et d'une bonne résistance à la fatigue. Les résultats obtenus par une spectrométrie d'étincelage présentés dans le tableau ci-dessous, montrent que l'acier 20MnCr5 comporte des compositions chimiques de base généralement équilibrées pour lui conférer une modeste propriété mécanique.

L'élément	C	Si	Mn	Cr	Cu	Fe	Cr+Ni
Quantité (%)	0.226	0.187	1.23	1.10	0.270	96.680	2.61

Tableau III.1. Composition chimique de l'acier 20MnCr5 (brut).

III.3. Technique de cémentation

L'éprouvette C_1 est laissé sans traitement (brut), pour comparer les propriétés mécaniques de l'acier 20MnCr5 avant et après cémentation. Le traitement de cémentation consiste à enrichir la couche superficielle de la pièce mécanique en carbone actif, enveloppé sur du métal ou avec des technologies modernes en utilisant un gaz de méthane actif ($\text{CH}_3\text{OH} = 4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$). Pour cette étude, les conditions opératoires du cycle de traitement de cémentation comprennent les étapes suivantes :

- La première étape consiste à mettre les éprouvettes C_2 (pour la cémentation pendant 3 heures), C_3 (pour la cémentation pendant 6 heures) d'acier 20MnCr5 (brut) dans un four de cémentation automatique (voir la figure III.1), avec des conditions de

traitement prédéfinies dans le tableau III.2, couplées à un ordinateur équipé d'un programme qui permet la programmation au cours de traitement.

- Une fois les éprouvettes C_2 , C_3 , C_4 sont cimentées, le four coulera automatiquement les pièces durcies du boîtier dans l'huile pour les refroidir depuis $T=830^{\circ}\text{C}$ pendant 20 minutes puis le robot le soulève et le met en place lavez-le pour nettoyer l'huile et séchez-le bien.
- Dernière étape, nous mettons les pièces dans un four de revenu à 180°C pendant 2 heures pour réduire les contraintes résiduelles des pièces.

Désignation	Température en $^{\circ}\text{C}$	Temps (minutes)	Débit du carbone %
C_1 (brut)			
C_2 (cémentée 3h)	910	180	1.1
		60	
	830	20	
C_3 (cémentée 6h)	910	360	1.1
		60	
	830	20	
C_4 (cémentée 9h)	910	540	1.1
		60	
	830	20	

Tableau III.2. Les conditions opératoires de la cémentation pour les éprouvettes (C_1 , C_2 , C_3 et C_4).



Figure III.1. Four de cémentation.

III.4. Préparation des éprouvettes C₁, C₂, C₃ et C₄

Les éprouvettes C₁, C₂, C₃ et C₄ en acier 20MnCr5 sont préparées pour faire des analyses chimiques, structurales et mécaniques (microstructure, composition chimique, microdureté), en suivant les étapes suivantes :

III.4.1. Polissage

La première étape consiste à aplatir les éprouvettes C₁, C₂, C₃ et C₄ à l'aide d'une meule (Fig. III.2) pour retirer la couche cémentée résultante de la stabilisation afin d'obtenir une section de la couche cimentaire vers le noyau brut.



Figure III.2. Meuleuse.

La deuxième étape consiste à établir une politique de surface dégradée. Les éprouvettes d'acier 20MnCr5 sont polis à l'eau (pour éviter tout échauffement de la matière) à l'aide d'une machine à polir (Fig. III.3) avec du papier abrasif, allant du gros grain au mieux 180, p320, p400, p600, p800, p1000). Nombres correspondant au nombre de grains par unité de surface (grains/cm²). Entre chaque feuille, il est nécessaire de croiser le sens de polissage pour permettre la finition des rayures restantes à l'étape précédente.



Figure III.3. La polisseuse.

La troisième étape, appelée polissage ultrafin, est réalisée en présence de pâte diamantée avec deux granulométries de 3 et 1 micromètre. Le polissage se fait sur un papier ou un filtre qui contient ces pâtes et un réactif chimique qui aide au polissage. D'une part pour éliminer les rayures (des stries sont observées sur la surface de l'éprouvette) causées par des arêtes vives

ou/et des particules abrasives et d'autre part pour maintenir une planéité optimale pour tous les types d'éprouvettes.

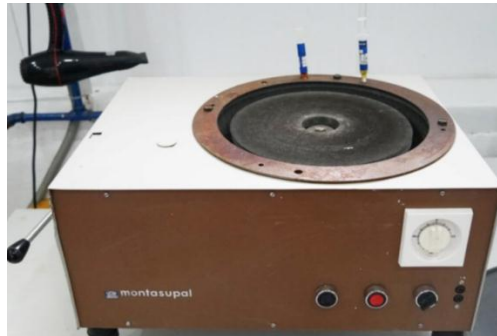


Figure III.4. La machine de polissage ultra fin.

Pour ces étapes, il est nécessaire de rincer l'éprouvette sous l'eau courante à chaque changement de papier et de tissu abrasif afin d'éviter que des particules de gros diamètre ne contaminent l'étape de polissage avec des particules de plus petite taille.

III.5. Microstructure des éprouvettes C_1 , C_2 , C_3 et C_4

Les images micrographiques sont obtenues à l'aide d'un microscope optique qui est un instrument optique équipé d'une cible et d'un éprouvette qui permet d'agrandir (zoom) une image d'un petit objet et de séparer les détails de cette image afin qu'elle puisse être vue avec l'œil nu. Il est utilisé en métallurgie et métallurgie pour examiner la structure d'un métal ou d'un alliage. De plus, sa simplicité d'utilisation permet l'observation de grandes surfaces et ainsi la collecte d'informations générales sur l'aspect de la surface observée. Mais en raison de sa faible précision, il ne peut pas être utilisé pour une observation fine de petits objets grossiers.



Figure III.5. Microscope inverse dmi8.

III.5.1. Éprouvette C₁ (brut)

Selon les microstructures obtenues avant traitement de cémentation, l'éprouvette C₁ présente une structure homogène à grains uniformes de ferrite et de perlite lamellaire au cœur et au bord (voir la figure 6 (a) et (b)).

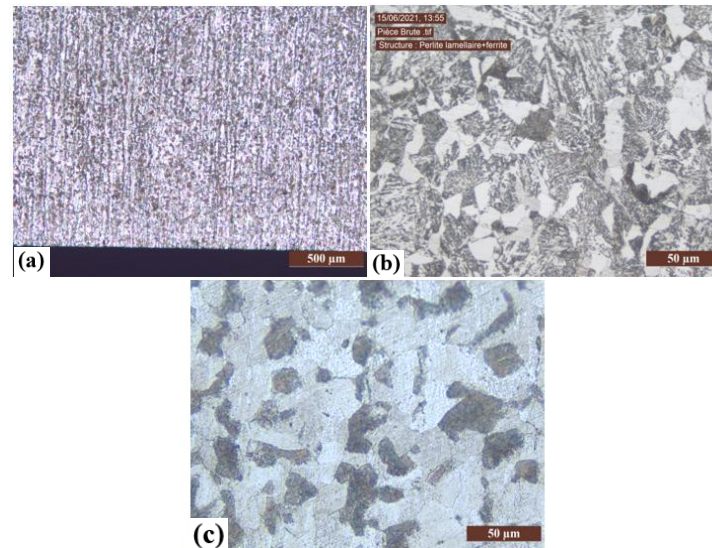


Figure III.6. Microstructure de l'acier 20MnCr5 de l'éprouvette C₁ (brut).

III.5.2. Éprouvette C₂ (cémentée 3 heures)

Après 3 heures de cémentation, on observe que l'éprouvette C₂ est composée d'une structure mixte au cœur : de bainite et de l'austénite résiduelle (austénite qui n'est pas transformée lors de la trempe) (voir la figure 7(b)). En outre, la structure de la couche superficielle cémentée est devenue martensitique dans laquelle sont imbriqués des carbures (voir la figure 7(c)). La profondeur moyenne de la couche cémentée est $d_{C_2}=874,30 \mu\text{m}$ après 3 heures de cémentation.

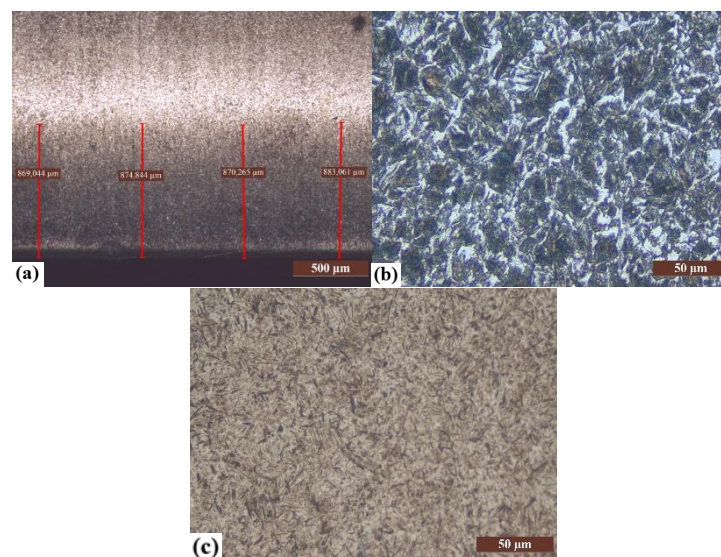


Figure III.7. La microstructure de l'acier 20MnCr5 de l'éprouvette C₂ (cémentée 3h).

III.5.3. Éprouvette C₃ (cémentée 6 heures)

Après 6 heures de cémentation, on remarque que l'éprouvette C₃ a une structure mixte au cœur : de bainite et de l'austénite résiduelle (austénite qui n'est pas transformée lors de la trempe) (voir la figure 8(b)). Cependant, la structure de la couche superficielle cémentée est transformée en martensite dans laquelle sont imbriqués des carbures (voir la figure 8(c)). La profondeur moyenne de la couche cémentée est augmentée après 6 heures de cémentation jusqu'à $d_{C_3}=918,26\mu\text{m}$.

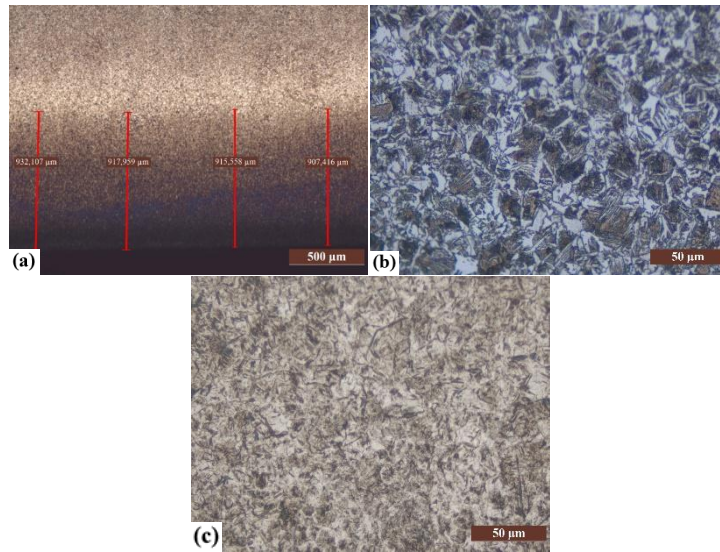


Figure III.8. La microstructure de l'acier 20MnCr5 de l'éprouvette C₃ (cémentée 6h).

III.5.4. Éprouvette C₄ (cémentée 9 heures)

Après 9 heures de cémentation, l'éprouvette C₄ présente une structure mixte au cœur : de bainite et de l'austénite résiduelle (austénite qui n'est pas transformée lors de la trempe) (voir la figure 9(b)). Par contre, la quantité du carbone absorbée et diffusée à la couche superficielle cémentée a permis de transformer la structure en martensite + les carbures (voir la figure 9(c)). La profondeur moyenne de la couche cémentée est augmentée après 9 heures de cémentation jusqu'à $d_{C_4}=1229,12\mu\text{m}$. Il est aussi clairement observable qu'avec l'augmentation du temps de cémentation, la quantité d'austénite résiduelle diminue et les teneurs en carbures et en martensite augmentent proportionnellement.

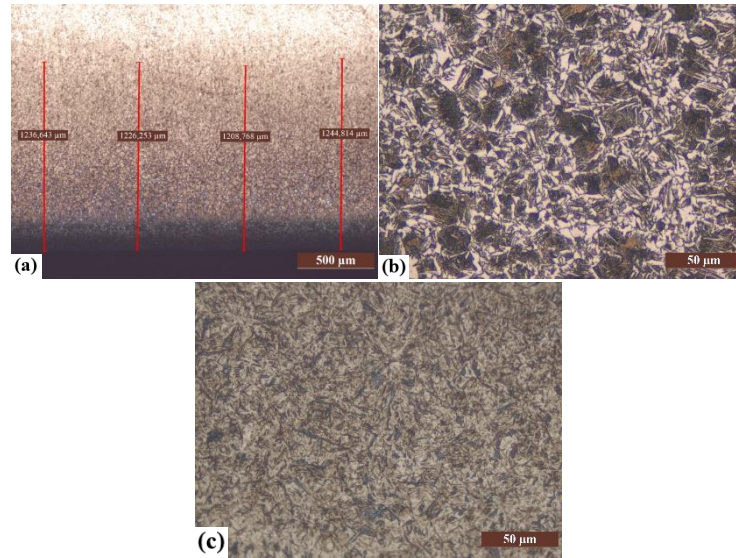


Figure III.9. La microstructure de l'acier 20MnCr5 de l'éprouvette C₄ (cémentée 9h).

III.6. Microdureté des éprouvettes C₁, C₂, C₃ et C₄

La microdureté est la mesure de la résistance d'un matériau à la pénétration. Cette dernière est fonction de plusieurs facteurs dont les principaux sont : la déformation élastique et plastique, le frottement pénétreur-surface, la géométrie de pénétreur, ses propriétés mécaniques et la charge principale. La distribution de microdureté Vickers des éprouvettes C₁, C₂, C₃ et C₄ a été obtenue en utilisant le type Zwick Roell ZHV10-A (Allemagne) avec une charge de 500 gf pour un temps de maintien de 10 s à 20 °C.



Figure III.10. Microduromètre zhv30-a zwickroell indentec.

III.6.1. Éprouvette C₁ (brut)

Avant cémentation, l'éprouvette C₁ a une dureté similaire au bord et au cœur qui est de l'ordre de 150 HV. On constate que les propriétés mécaniques sont similaires au bord et au cœur de l'acier 20MnCr5 de l'éprouvette C₁.

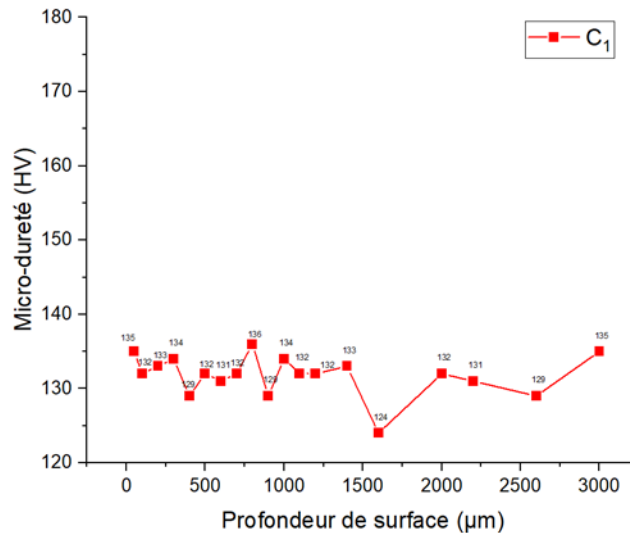


Figure III.11. Profil de microdureté de l'acier 20MnCr5 de l'éprouvette C₁ du bord vers cœur brut.

III.6.2. Éprouvette C₂ (cémentée 3 heures)

Après 3 heures de cémentation, le profil de dureté de l'acier 20MnCr5 de l'éprouvette C₂ montre trois zones distinctes. Premièrement, la couche cémentée qui présente la dureté superficielle la plus élevée : 820HV. Les valeurs élevées de la dureté dans la couche carburée sont obtenues par l'effet de trempe après la diffusion d'une quantité importante du carbone dans la phase austénitique et par la suite, la transformation de l'austénite en martensite et la formation des carbures. La seconde zone présente la région de diffusion des atomes du carbone avec des quantités décroissantes dans une profondeur limitée où les valeurs de la dureté sont diminuantes en conséquence d'une faible transformation de l'austénite en martensite car le refroidissement est lent (transfert thermique par conduction). La troisième zone présente l'acier 20MnCr5 trempé car l'effet de carburation reste superficiel et n'atteint pas le cœur où les valeurs de la dureté sont de l'ordre de 225 HV.

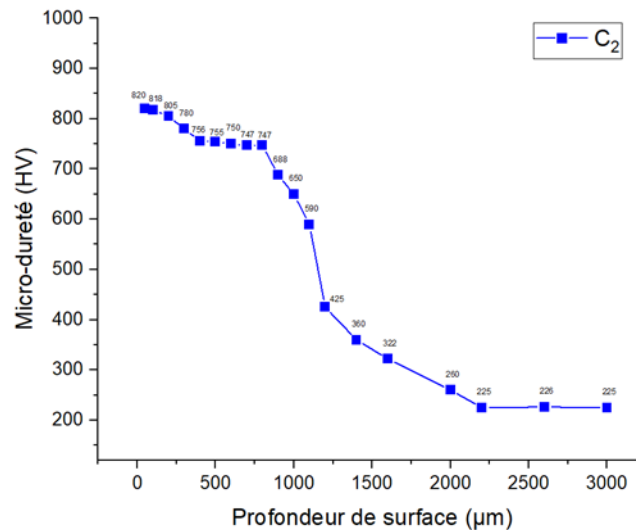


Figure III.12. Profil de microdureté de l'acier 20MnCr5 de l'éprouvette C₂ du bord cémenté vers cœur brut.

III.6.3. Éprouvette C₃ (cémentée 6 heures)

Après 6 heures de cémentation, le profil de dureté de l'acier 20MnCr5 de l'éprouvette C₃ présente aussi trois zones différentes. Premièrement, la couche cémentée qui présente la dureté superficielle la plus élevée : 870 HV à cause de présence de martensite mélangée avec des carbures. La seconde zone présente la région de diffusion des atomes du carbone avec des quantités décroissantes dans une profondeur limitée où les valeurs de la dureté sont diminuantes en conséquence d'une faible transformation de l'austénite en martensite car le refroidissement est lent (transfert thermique par conduction). La troisième zone présente l'acier 20MnCr5 trempé car l'effet de carburation reste superficiel et n'atteint pas le cœur où les valeurs de la dureté sont de l'ordre de 230 HV.

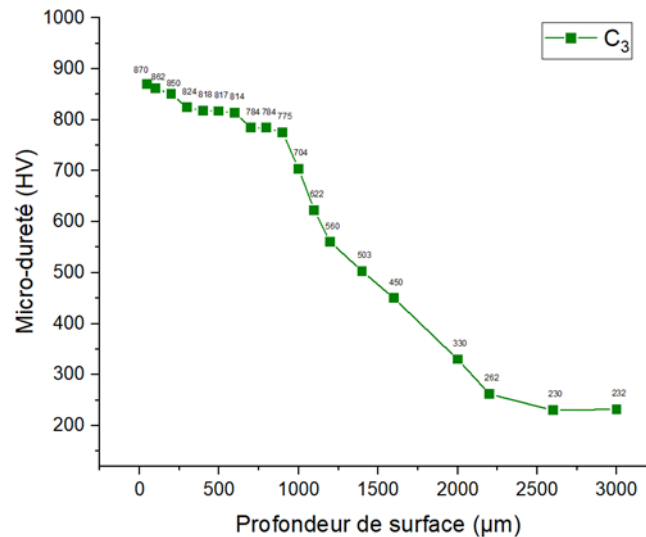


Figure III.13. Profil de microdureté de l'acier 20MnCr5 de l'éprouvette C₃ du bord cémenté vers cœur brut.

III.6.4. Éprouvette C₄ (cémentée 9 heures)

Après 9 heures de cémentation, le profil de dureté de l'acier 20MnCr5 de l'éprouvette C₄ présente aussi trois zones distinctes. La première zone présente la couche carburée avec une dureté superficielle la plus élevée : 945HV à cause de présence de martensite mélanger avec des carbures. La deuxième zone présente la région de diffusion des atomes du carbone avec des quantités décroissantes dans une profondeur limitée où les valeurs de la dureté sont diminuantes en conséquence d'une faible transformation de l'austénite en martensite car le refroidissement est lent (transfert thermique par conduction). La troisième zone présente l'acier 20MnCr5 trempé car l'effet de carburation reste superficiel et n'atteint pas le cœur où les valeurs de la dureté sont de l'ordre de 236 HV.

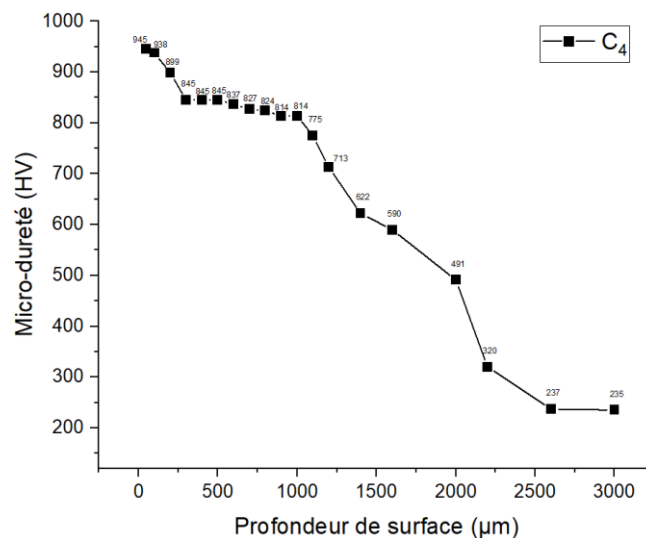


Figure III.14. Profil de microdureté de l'acier 20MnCr5 de l'éprouvette C₄ du bord cémenté vers cœur brut.

III.7. Conclusion

De notre étude, nous avons conclu que l'augmentation du temps de cémentation a permis d'absorber et de diffuser plus du carbone de l'atmosphère de carbone vers la couche superficielle de l'acier 20MnCr5 pour les éprouvettes C₂, C₃ et C₄ en permettant à l'augmentation de la profondeur de la couche superficielle cémentée (riche en carbone). La structure de la couche superficielle est transformée après cémentation d'une structure ferrito-perlite à une structure martensitique + carbures. Il est aussi clairement observable qu'avec l'augmentation du temps de cémentation, la quantité d'austénite résiduelle diminue et les teneurs en carbures et en martensite augmentent proportionnellement.

L'acier 20MnCr5 cémenté (3, 6 ou 9 heures) résulte d'une combinaison d'une couche superficielle (dure et fragile) reposant sur un cœur (tendre et ductile).

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Les différents résultats obtenus montrent les bénéfices de la cémentation en modifiant les propriétés chimiques, structurelles et mécaniques de l'acier 20MnCr5. Avant cémentation l'acier 20MnCr5 possède des propriétés mécaniques de base. D'une manière générale, la faiblesse de l'acier 20MnCr5 réside dans sa faible teneur en carbone ($C=0.22\%$) (appartient à classe des aciers doux $C<0.25\%$). Après cémentation, les propriétés mécaniques de l'acier 20MnCr5 sont modifiées et que le temps de cémentation est parmi les paramètres opératoires qui ont une grande influence sur le traitement de cémentation, nous concluons que :

1. La quantité du carbone diffusée à la surface de l'acier 20MnCr5 et la profondeur de la couche cémentée sont proportionnelles à la durée de cémentation ;
2. La structure de la couche superficielle est transformée après cémentation d'une structure ferrito-perlite à une structure martensitique + carbures ;
3. Les valeurs de la dureté sont décroissantes de la couche superficielle carburée vers le cœur trempé.

L'acier brut 20MnCr5 est le résultant d'un cœur et d'une couche superficielle tendre et ductile. Cependant, après cémentation pendant 3 heures, 6 heures ou 9 heures), il est le résultant d'une combinaison d'une couche superficielle dure et fragile reposant sur un cœur tendre et ductile.