
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
de **MASTER (LMD)**

Spécialité : Génie Mécanique
Option : Génie des Matériaux

Thème

L'effet de la cémentation sur le comportement
mécanique de l'acier XC20

Réalisé par :

- GHERBI Marwa
- TAGHIT Bouchra

Dirigé par : Dr. SAOUDI Abdenour

Membres de jury :

- Dr. CHAHAOUI Oualid (Président)
- Dr. TOUATI Soufiane (Examinateur)

Année universitaire : 2019-2020

Remerciements

Je remercie chaleureusement Dieu tout puissant, pour la puissance, la volonté et la patience qu'il maous a donné durant mes années d'études ;

Nous exprimons notre gratitude à notre encadreur Mr SAOUDI.A pour sa disponibilité, ses conseils et son aide pour accomplir ce travail.

Nous remercierons également Dr. CHAHAOUI Oualid pour m'avoir fait l'honneur d'être le président du jury, ainsi que Dr. TOUATI Soufiane pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail et pour avoir accepté de l'examiner.

Nous remercierons aussi toutes mes amies de spécialités « Génie des Matériaux ». Et tous nous enseignants du département de Génie Matériaux qui m'ont encouragé à donner le meilleur de nous- même en assurer une formation aussi meilleure que possible.

Sans oublier tout le personnel de L'unité ECMK, pour leurs Coopérations et leurs gentilleses.

Dédicace

*Grand merci à ma précieuse famille pour leur soutien et encouragements qui m'ont été d'un apport
considérable,*

*Je dédie ce travail à mes chères parents de toujours marcher à mes côtés, de m'encourager chaque
jours, merci de m'aider, pour leurs sacrifices, leurs prières au long de ma vie.*

Merci à ma fierté, ma force, mes chères frères Soufiane et Achref ;

*Merci à mes sœurs, Wissal, Sihem, Wissam et ses anges Tesnim et Alae Errahmane, pour leurs
tendresse, les amours et soutien moral.*

Bochra

Dédicace

Je dédie ce travail à...

*...A mon grand exemple, **Mon père Ammar** :*

Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma

formation, et rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon bien être ;

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime et le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous.

*..... A ma très chère **Mère** :*

Pour la source de tendresse et le symbole de la bonté par excellence et l'exemple de

dévouement qui n'pas cessé de mon courage, de prier pour moi ; aucune dédicace ne saurait

être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices.

....A mes très chers frères Ziad et Ilyes et mes belles sœurs Imen et Rokiya, Houda je vous dédie ce travail avec tous

mes vœux de bonheur, de santé, de réussite.

.... A mon mari Ammar.

....A mon Grand Père Abdallah et mes Grands-Mères .

.....A ma famille, petits et grand...

.....A mes chères amis Selmania Tahani ,Krikrou Amel,Boukhadra Romayssa

Sans oublier mes amies de ma promotion, je vous dédie

A tous les participants dans ce modeste travail.

Marwa

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 XC20 dans notre étude), afin d'analyser les changements chimiques et structuraux de l'acier XC20 après le traitement. Nous avons réalisé une série d'essais mécaniques (dureté, résilience) avant et après cémentation pour les éprouvettes C1 (en acier XC20 brut), C2 (en acier XC20 cémenté 2 heures) et C3 (en acier XC20 cémenté 4 heures). Les résultats obtenus montrent qu'il existe une modification de la quantité des compositions chimiques dans la couche superficielle cémentée, ce qui permet de modifier les propriétés structurales et mécaniques de l'acier XC20 (la quantité du carbone et fer, la dureté HV, la résistance au choc, la ténacité,...). Finalement, l'acier XC20 traité (2h ou 4h) est résultant de l'association d'une couche superficielle cémentée (dure et fragile) reposant sur un cœur (tendre et tenace).

Mots clés : Acier XC20, la cémentation, la diffusion de carbone, la couche superficielle.

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 XC20 in our study), in order to analyze the chemical and structural changes in XC20 steel after processing. We performed a series of mechanical tests (hardness, resilience) before and after case hardening for specimens C1 (in raw XC20 steel), C2 (in XC20 hardened 2 hours steel) and C3 (in XC20 hardened 4 hours steel). The results obtained show that there is a modification of the quantity of chemical compositions in the hardened surface layer, which makes it possible to modify the structural and mechanical properties of XC20 steel (the quantity of carbon and iron, HV hardness, impact resistance, toughness,...). Finally, the treated XC20 steel (2h or 4h) is the result of the association of a hardened surface layer (hard and fragile) resting on a core (soft and tenacious).

Keywords: Steel XC20, the carburizing, carbone diffusion, the surface layer.

ملخص:

الهدف من عملنا هو دراسة تأثير وقت الكربنة على حركية انتشار الكربون على سطح الفولاذ منخفض الكربون ($C < 0.25$) ، من أجل تحليل التغيرات الكيميائية والهيكلية في فولاذ XC20 بعد المعالجة. أجرينا سلسلة من الاختبارات الميكانيكية (الصلابة والمرونة) قبل وبعد التصلب للعينات C1 (في الفولاذ الخام XC20) و C2 (في الصلب XC20 المقوى لمدة ساعتين) و C3 (في الصلب XC20 المقوى لمدة 4 ساعات). تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن هناك تعديلاً لكمية التركيبات الكيميائية في الطبقة السطحية المتصلبة ، مما يجعل من الممكن تعديل الخواص الهيكلية والميكانيكية لفولاذ XC20 (كمية الكربون والحديد ، صلابة الجهد العالي ، مقاومة الصدمات ، الصلابة ، ...). وأخيراً ، فولاذ XC20 المعالج (ساعتان أو 4 ساعات) ناتج عن ارتباط طبقة سطحية صلبة (صلبة وهشة) ترتكز على قلب (ناعم ومتمين).

الكلمات المفتاحية : الفولاذ، الكربنة ، انتشار الكربون ، السطح المكرين .

Introduction générale

Introduction générale

Les aciers représentent les matériaux métalliques les plus utilisés, ils constituent d'un alliage fer-carbone avec d'autres éléments, associé à un traitement thermomécanique permet d'adapter leurs propriétés à un large secteur d'application. Ces aciers ne répondent pas à des conditions en service de plus en plus drastiques et sévères car la durée de vie en service des pièces en acier est conditionnée par l'obtention de caractéristiques mécaniques et de résistance à l'usure élevées sans que la ténacité indispensable pour limiter les risques de fissuration ne soit trop sacrifiée, plus précisément la zone superficielle est très souvent la partie d'un composant qui subit les plus fortes contraintes, c'est également cette zone qui est exposée aux frottements, aux forces extérieures et aux attaques chimiques. Les traitements thermochimiques de surface sont largement utilisés pour régler les problèmes d'usure, d'attaque chimique, de corrosion ou de fatigue.

La cémentation est l'un des traitements les plus utilisés de la saturation de la surface de l'acier par la diffusion du carbone. Elle est utilisée afin d'améliorer les propriétés chimiques, structurales, mécanique et tribologiques..., des aciers à faible teneur en carbone ($C < 0.25$).

L'objectif de notre étude est de comprendre et d'analyser les phénomènes mis en jeu lors de la cémentation des aciers à faible teneur en carbone afin d'obtenir les propriétés souhaitées.

Notre mémoire se compose de trois chapitres :

- Le premier chapitre, présente une généralité sur les aciers en déterminant ses compositions chimiques, les microstructures et leurs propriétés mécaniques.
- Le deuxième chapitre, s'articule sur une étude théorique sur les traitements thermochimiques, en particulièrement sur le durcissement superficiel par la cémentation en définissant les paramètres opératoires de ce traitement et leurs effets.
- Le troisième chapitre, destiné à l'étude expérimentale en analysant l'influence du temps de maintien sous gaz carburant sur la cinétique de croissance de la couche cémentée de l'acier traité. Après le choix de l'acier à traiter, nous déterminons les paramètres opératoires de la cémentation et les moyens de caractérisations avant et après le traitement pour les trois éprouvettes suivantes :
 - Eprouvette de l'acier (XC 20) brute (sans traitement) (C1).
 - Eprouvette de l'acier (XC 20) cémentée durant 2 heures (C2).
 - Eprouvette de l'acier (XC 20) cémentée durant 4 heures (C3).

Ensuite, nous faisons une série d'essais mécaniques (dureté, résilience) pour les éprouvettes C1, C2 et C3. Finalement, nous discutons les différents résultats obtenus.

Chapitre I

Généralités sur les aciers

Chapitre I : Généralités sur les aciers.

I.1. Introduction.....	6
I.2. Définition de l'acier	6
I.3. Fabrication de l'acier	6
I.4. Composition chimique des aciers.....	7
I.5. Influence des éléments d'addition sur les aciers	7
I.6. Diagramme d'équilibre fer –carbone	8
I.7. Les différentes phases de l'acier	9
I.7.1. La ferrite	9
I.7.2. Austénite.....	9
I.7.3. La cémentite	9
I.7.4. La perlite	10
I.7.5. Troostite	10
I.7.6. Bainite	10
I.7.7. Sorbite	10
I.7.8. Martensite	10
I.8. Les différentes familles d'aciers.....	11
I.8.1. Acier au carbone	11
I.8.2. Acier allié	11
I.8.3. Acier inoxydable.....	12
I.8.4. Acier à outils.....	12
I.9. Classification des aciers par le mode d'emploi.....	12
I.10. Les propriétés des aciers	12
I.10.1. Les propriétés physiques et chimiques des aciers.....	13
I.10.2. Les propriétés mécaniques des aciers	13
I.11. Aciers de cémentation	14
I.12. Domaine d'application des aciers	15
a. Monuments et construction.....	15
b. Mécanique et technologie	15
c. Vie quotidienne	15
I.13. Défauts des aciers	16
I.14. Conclusion	16

Liste des figures

Figure I.1. Filière d'élaboration d'acier.....7
Figure I.2. Le diagramme d'équilibre de phase fer-carbone.....9
Figure I.3. Les différentes phases de l'acier.11
Figure I.4. La résistance à l'abrasion.....14

Liste des tableaux

Tableau I.1. Eléments d'aditions et leurs effets sur l'acier.	8
Tableau I.2. Les classes d'aciers à outils.....	12

I.1. Introduction

Aujourd'hui les aciers sont des matériaux d'un grand intérêt industriel en raison de leur large gamme d'emploi. La métallurgie, l'industrie mécanique, l'industrie du bâtiment considèrent l'acier comme un matériau de base. La grande diversité de leurs nuances et la possibilité de réaliser des traitements thermomécaniques conditionnant les propriétés mécaniques de ces aciers permettent de couvrir une gamme d'applications extrêmement large. Leurs propriétés mécaniques sont étroitement liées à la microstructure de l'alliage, donc à sa composition et aux traitements thermiques appliqués. Enfin, leurs faibles coûts présentent un grand intérêt pour leurs utilisations. Les éléments d'alliages jouent un rôle prépondérant dans les différentes transformations de phases des aciers. L'étude de leur rôle, de leur influence et des conditions dans lesquelles elles surviennent constitue donc une étape incontournable dans la compréhension des différentes propriétés d'un alliage. Ces éléments influent sur les différentes propriétés en modifiant les transformations, leur cinétique, et par conséquent, les microstructures obtenues [1].

I.2. Définition de l'acier

Les aciers sont essentiellement alliages de fer et de carbone, qui contiennent en certains autres éléments introduit en faibles quantités au moment de leur élaboration (dans les aciers alliés, on introduit par exemple des éléments d'alliage dans le but de modifier les propriétés de l'acier) [2].

Dans tous les cas, la teneur de carbone dans les aciers se varie de (0,008% à 2,11% en masse), en fonction du nombre d'éléments d'alliage ajouté au fer et de leur teneur, les aciers présentent un très grand nombre de nuances différentes. On peut classer les divers types d'alliage à base de fer selon leur composition chimique ou selon leur domaine d'utilisation, la production de l'acier met en œuvre plusieurs filières selon la matière première utilisée et le procédé employé [3].

I.3. Fabrication de l'acier

On peut déterminer l'opération d'élaboration comme la série de processus métallurgiques en phase liquide qui est destiné à aboutir à la nuance d'acier désirée. De plus, lors de l'élaboration on diminue la quantité des impuretés indésirables : O, S et P. Dans notre cas l'élaboration de l'acier se fait à partir de la fonte liquide (fonte d'affinage) dans un convertisseur à l'oxygène.

La production de l'acier met en œuvre plusieurs filières selon les matières premières utilisées et le procédé employé. Cependant quel que soit le cas on met toujours en évidence trois opérations fondamentales [4] :

- **Elaboration:** On peut déterminer l'opération d'élaboration comme la série de processus métallurgiques dont le dernier au moins a lieu en phase liquide et qui est destiné à aboutir à la nuance d'acier désirée.
- **Coulée:** C'est le passage de l'état liquide à l'état solide. La coulée de l'acier liquide s'opère selon deux techniques différentes :
 - Coulée en lingotières ;
 - Coulée continue.

La première technique dite classique a pratiquement disparu. La coulée continue est presque universellement adoptée en Europe. On utilise encore largement la coulée en lingotières en mettant peu à peu en service l'installation de coulée continue. Une telle conversion (construction de nouvelles usines ou reconstruction des usines existantes) entraîne des dépenses importantes ce qui ralentit beaucoup le développement de cette technique plus innovante.

- **Mise en forme** : La mise en forme de l'acier se fait par laminage qui consiste en une série d'opérations (laminage à chaud ou à froid) transformant les blooms obtenus par coulée en produits longs, de formes et de dimensions déterminées.

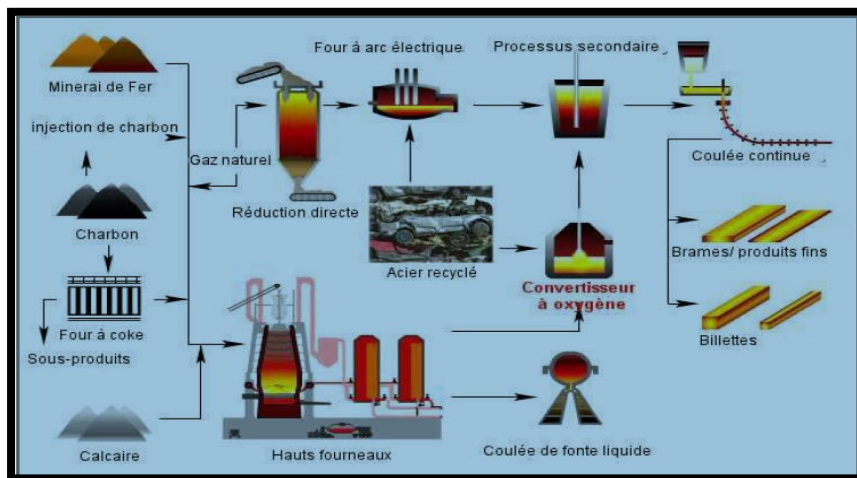


Figure I.1. Filière d'élaboration d'acier [4].

I.4. Composition chimique des aciers

En fait, les aciers sont des alliages fer-carbone contenant du silicium, manganèse, soufre et phosphore en quantité faible pour la famille des aciers non alliés. Des additions judicieuses d'éléments, comme le Si, Ni, Mo, Cr, ... au cours de l'élaboration ou du traitement de l'alliage liquide permettent de modifier le comportement à la solidification et aussi d'ouvrir l'éventail des structures obtenues. Cette catégorie d'aciers faiblement ou fortement alliés offre une gamme de performances mécaniques, physico-chimiques, électriques, ... assez considérable. De plus, ces matériaux se prêtent bien aux traitements thermiques, ce qui permet encore d'en diversifier les performances [5].

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

L'action des éléments d'addition sur les caractéristiques des aciers dépend essentiellement de deux facteurs :

- Le premier facteur est le type de modification qu'il apporte à la stabilité de l'austénite. Certains éléments, appelés gamma-gènes tels que le nickel et le manganèse, élargissent le domaine de stabilité de l'austénite et abaissent les températures de transformation. On peut donc obtenir des structures austénitiques. Le chrome et le molybdène rétrécissent le domaine de stabilité de l'austénite et élèvent les températures de transformation.
- Le deuxième facteur est la tendance des éléments à se substituer en partie aux atomes de fer de la cémentite Fe_3C , ou à former des carbures. Par ordre d'affinité avec le carbone : Cr, W, Mo, V, Ti, Nb. Le Si et le Ni qui ne forment pas des carbures se retrouvent en solution dans la ferrite [6].

Les éléments les plus fréquemment incorporés sont, outre le silicium et le manganèse, le nickel et le chrome; le molybdène, le tungstène et le vanadium, puis, moins fréquemment, l'aluminium, le titane, le niobium. Le cobalt, le cuivre, le bore, le soufre, le phosphore, l'azote répondent aussi à certains buts particuliers. Selon le pourcentage, chaque élément confère à l'acier des propriétés spécifiques déterminées [7].

Éléments	Effet sur l'acier
Carbone	Augmente la dureté, la résistance à la traction et à la corrosion. Diminue la ductilité et la malléabilité.
Silicium	Présent dans tous les aciers. A faible pourcentage (de 0.2% à 0.5%) : rôle de désoxydant. Allié et à plus forte teneurs : améliore la limite élastique et accroît la résistance à l'oxydation.
Manganèse	Augmente la trempabilité des aciers alliés et permet d'obtenir des aciers à structure austénitique stable. Il participe à la formation de carbures et se trouve dans la cémentite, où il remplace une partie de fer.
Nickel	Augmente la ductilité, surtout aux très basses températures.
Chrome	Agit sur les points de transformation de l'acier et ralentit ainsi la vitesse de transformation de l'austénite au cours refroidissement (= augmentation de la trempabilité), protège anticorrosion.
Molybdène	Augmente la trempabilité des aciers alliés.
Bore	Ajouté à l'acier en quantité extrêmement faible, accroît la trempabilité dans ces aciers très spéciaux, améliore la résistance mécanique et la ductilité aux températures élevées.
Azote	Abaisse le point de transformation AC ₃ . Il diminue la ductilité et la ténacité.
Tungstène et vanadium	Forts caractères alphas et carburigènes. Fréquemment utilisés pour obtenir des aciers durs et résistants.
Cobalt	Utilisé dans des aciers très spéciaux dont il modifie certains processus structuraux.
Phosphore et cuivre	En faibles proportions, améliore la résistance de l'acier à l'oxydation par l'air.

Tableau I.1. Eléments d'aditions et leurs effets sur l'acier [6].

I.6. Diagramme d'équilibre fer-carbone

Le diagramme d'équilibre est fabriqué à partir des courbes de refroidissement des différents alliages de fer et de carbone. Dans la courbe de refroidissement, chaque changement d'état de structures cristallines ou de solubilités apparaît comme une discontinuité. Lorsqu'on définit les traitements thermiques, particulièrement les températures de traitement, il est important de connaître les températures de transformations (voir la figure I.2) [8].

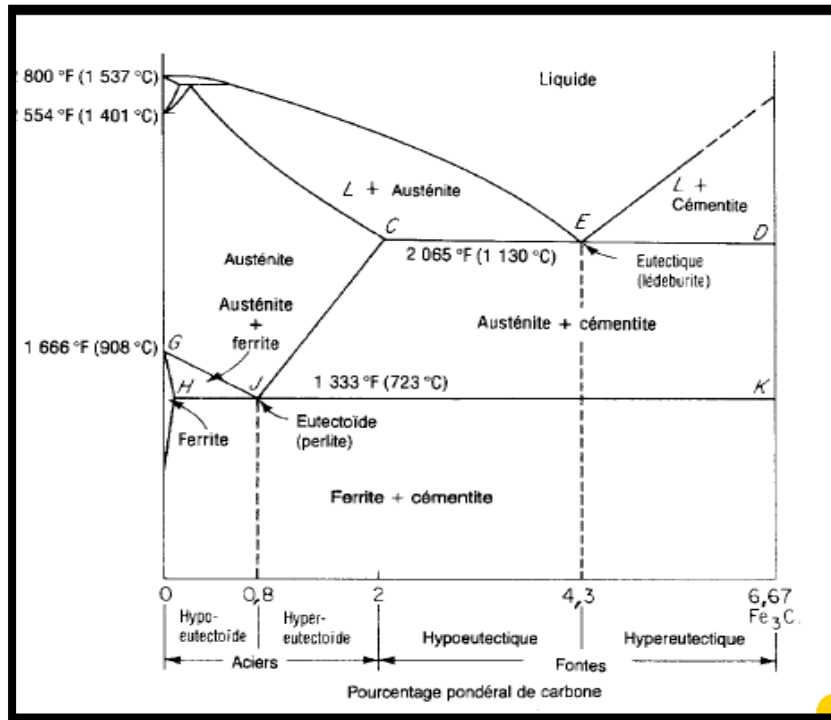


Figure I.2. Le diagramme d'équilibre de phase fer-carbone [8].

La ligne HJK, correspond à la transformation eutectoïde. Lorsque l'alliage refroidit, il traverse cette ligne. À ce moment, la solution solide de fer gamma, austénite (CFC), se transforme en solution solide de fer alpha, ferrite (CC). Puisque la solubilité maximum du carbone passe de 2 % dans le fer gamma à 0,025 % dans le fer alpha, il y a rejet de carbone sous forme de cémentite. Donc lors du passage de la ligne HJK, l'austénite se transforme en perlite (agrégat de ferrite et de cémentite). Si on désire modifier la microstructure (et ainsi les propriétés mécaniques) de l'alliage, on doit modifier les transformations qui surviennent normalement dans l'alliage [9].

I.7. Les différentes phases de l'acier

I.7.1. La ferrite

La ferrite est une solution solide de carbone dans le fer α . On distingue la ferrite à basse température et à une solubilité du carbone allant jusqu'à 0,02% et la ferrite δ à haute température à solubilité limite en carbone allant jusqu'à 0,1%. Les atomes de carbone s'insèrent au hasard dans les espaces interatomiques du réseau cristallin cubique centrées. Dans la matière, elle se présente sous forme de grains. On parle d'une structure tendre et souple et sa dureté est de l'ordre 90HV [10].

I.7.2. Austénite

L'austénite (fer γ) est une phase du fer, stable entre 910°C et 1394°C. Elle a une structure cristallographique cubique à faces centrées, cette structure permet une grande solubilité du carbone (jusqu'à 2,1% massique à une température 1147°C). L'austénite est aussi une solution solide d'insertion. L'austénite est paramagnétique [11].

I.7.3. La cémentite

La cémentite est constituée de molécules composées d'atome de fer et d'atomes de carbone. Trois atomes de fer pour un atome de carbone, Fe_3C . Elle contient 6,67 % de Carbone (en masse). Elle est magnétique jusqu'à 210°C et très dure (760HV) mais fragile. La cémentite ne forme pas de grain à

l'échelle macroscopique, et elle peut se retrouver sous diverses formes : fines aiguilles, plaquettes, dans les joints de grain des aciers... [12].

I.7.4. La perlite

C'est un eutectoïd forme d'un mélange de grains de cémentite sphéroïdaux noyés dans la ferrite globulaire en couches alternées (88% de ferrite + 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 (200HV) et assez ductile $R_m = 800 \text{ N/mm}^2$ [9].

I.7.5. Troostite

C'est une perlite extrêmement fine obtenue pour des vitesses de refroidissement assez importantes à huile. Les nodules de troostite qui se développent à partir des joints de grains sont constitués par des lamelles ferrite-cémentite non séparables en microscopie optique. Cette microstructure est caractérisée d'une trempe douce. Les caractéristiques mécaniques de la troostite sont assez importantes ($\approx 450\text{HV}$)[10].

I.7.6. Bainite

Ce constituant qui présente une morphologie aciculaire est obtenu après des vitesses de refroidissement élevées. On distingue des bainites supérieures qui peuvent être considérées comme étant des plaquettes de ferrite contenant des carbures orientés parallèlement à l'axe de la plaquette, et des bainites inférieures qui s'assimilent à des plaquettes de ferrite contenant une fine précipitation de carbures dispersés dans la plaquette de ferrite. Ces carbures ne sont discernables qu'en microscopie électronique. Les caractéristiques mécaniques associées à une texture bainitique approchent celles d'une structure martensitique [7].

I.7.7. Sorbite

Ce constituant n'est plus un produit de décomposition directe de l'austénite puisqu'il correspond, en fait, à un stade de décomposition la martensite (pour des températures supérieures à environ 400°C). C'est un mélange complexe de carbure finement reparti dans une matrice ferrique distordue. Elle conduit à des propriétés mécaniques intéressantes par exemple la dureté reste encore élevée (≈ 300 à 400HV) pour une bonne résilience [8].

I.7.8. Martensite

En ce qui concerne les aciers, la martensite (fer α) est une phase métastable issue de la transformation sans diffusion de l'austénite en dessous d'une température martensitique. C'est une solution solide d'insertion sursaturée en carbone dans le fer α , de même composition que l'austénite initiale. La transformation austénite - martensite consiste en un changement du réseau cristallin (avec un faible déplacement des atomes de fer), mais elle n'affecte pas le carbone: on appelle ce type de transformation «displacive» [9]. La martensite cristallise dans le système quadratique (prisme droit à base carrée qui est ici très voisin d'un cube). La martensite est ferromagnétique. Elle possède une grande dureté ($> 800\text{HV}$) et une fragilité notable et elle a une structure en aiguilles (plaques) ou en lattes, visibles avec un grossissement suffisant, après attaque par les réactifs classiques [11].

I.8.3. Acier inoxydable

Les aciers inoxydables sont brillants, résistants à la corrosion et utilisés dans de nombreux produits, y compris les appareils ménagers, les dosserets et les ustensiles de cuisine. Il a une faible teneur en carbone. L'acier inoxydable contient le chrome d'alliage et peut également inclure du nickel ou du molybdène. L'acier inoxydable est solide et peut résister à des températures élevées. Il existe plus de 100 nuances d'acier inoxydable, ce qui en fait un matériau extrêmement polyvalent personnalisable en fonction de votre objectif [15].

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 [16].

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

- **Les aciers de construction** : sont principalement employés dans le cadre de la fabrication de béton armé, ces aciers sont appelés (armatures).
- **Les aciers à propriétés physiques et chimiques spéciales**: ils contiennent les aciers inoxydables, les aciers à propriétés magnétiques spéciales, les aciers à propriétés de dilatation...etc.
- **Les aciers à outils** : Les nuances d'aciers à outils sont rangées selon le mode de d'emploi d'outil, en quatre classes comme le montre le tableau suivant [17]:

Classes	Le mode d'emploi
Aciers à outils au carbone	Aciers d'usage général
Aciers à outils alliés pour travail à froid	Aciers à haute résistance
Aciers à outils alliés pour travail à chaud	Aciers résistant aux chocs thermiques
Aciers rapides	Aciers sur carbures

Tableau I.2. Les classes d'aciers à outils [17].

I.10. Les propriétés des aciers

Chaque type d'acier a des propriétés uniques qui affectent ses performances, même de petites quantités de carbone peuvent modifier considérablement les propriétés de l'acier. Ils ont un module de Young d'environ 200 GPa, indépendamment de leur composition. Les autres propriétés varient énormément en fonction de leur composition, des traitements thermiques et des traitements de surface auxquels ils ont été soumis. Lors de la recherche d'un type d'acier à spécifier, il est important de comprendre comment les propriétés du matériau affecteront tous les aspects de votre projet. En général, les propriétés telles que la densité, la conductivité thermique et la résistivité électrique ne varient pas beaucoup avec la composition ou le traitement thermique, tandis que les propriétés telles que la résistance à la traction, l'allongement et la dureté dépendent fortement de la composition et du traitement thermique [18].

I.10.1. Les propriétés physiques et chimiques des aciers

L'acier est avant tout connu pour sa durabilité, sa dureté et sa ténacité. Dans certains cas, il est également réputé pour sa brillance. Les propriétés de l'acier sont totalement différentes de celles de ses éléments constitutifs - le fer et le carbone. L'une de ses propriétés majeures est la capacité de se refroidir rapidement à partir d'une température extrêmement chaude après avoir été soumis à l'eau ou à l'huile. Et une quantité particulière de carbone peut être dissoute dans le fer à une température spécifique. Ce que ces qualités se traduisent en termes physiques quantifiables est un point de fusion très élevé (environ 1510°C), plus élevé que la plupart des métaux; le cuivre, par exemple, est près de 500 degrés plus froid) et une densité très élevée (7,9g/cm³), le coefficient de dilatation linéaire de l'acier à 20 °C, en (µm /m)et par degré Celsius, est de 11,1, ce qui le rend plus résistant au changement de taille avec les changements de température.

Les aciers contiennent entre 10 et 20% de chrome, ce qui rend l'acier extrêmement 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 les aciers qui ne contiennent pas de chrome.

L'acier est un bon conducteur d'électricité, c'est-à-dire que l'électricité peut passer à travers l'acier. Aujourd'hui, le processus de fabrication de l'acier est tel que moins de carbone est ajouté et le métal est immédiatement refroidi, de manière à conserver les propriétés physiques souhaitables. Le refroidissement rapide (ou trempe) de l'acier modifie également la structure du grain [19].

I.10.2. Les propriétés mécaniques des aciers

Les propriétés mécaniques des aciers sont mesurées à l'aide de divers essais (traction, rupture par choc, mécanique de la rupture, fatigue...) qui permettent de connaître les niveaux atteints par les caractéristiques de :

- **La ténacité :**

Les cadences de fabrication étant de plus en plus élevées, il faut que les aciers à outils résistent bien aux chocs, sans se briser ni s'écailler. La ténacité et l'équilibre avec la dureté sont des qualités intéressantes pour les aciers devant résister aux impacts et aux chocs [20].

- **La tenue à chaud :**

La tenue à chaud est essentielle dans beaucoup de cas d'outils de coupe rapide, moules, filières d'extrusion, matrice de forgeage,...etc. En plus de la dureté, la tenue à chaud doit baser sur de bonnes propriétés mécaniques, une bonne résistance au fluage et une excellente résistance à l'oxydation [21].

- **La résistance aux chocs thermiques :**

Plusieurs types d'outils sont soumis à des chocs thermiques sévères et nombreux, auxquels ils doivent résister sans se déformer ni se fissurer [22].

- **La résistance à l'usure:**

Les outils (de coupe ou de mise en forme) sont en continuel frottement avec les pièces qu'ils servent à fabriquer, ainsi, ils, doivent conserver leur tranchant et leur géométrie le plus longtemps possible en l'occurrence, ils doivent présenter une bonne résistance à l'usure [23].

- **La trempabilité :**

Les outils doivent avoir des propriétés homogènes ; pour les pièces massives, ils doivent présenter une bonne trempabilité. Un grand pouvoir trempant est également nécessaire si l'on veut éviter que des déformations en cours de traitement ou en cours d'utilisation n'apparaissent [20].

- **La dureté :**

Elle est appelée la résistance mécanique des aciers, elle est mesurée par des tests utilisant différentes méthodes, échelles pour déterminer la dureté de l'acier qui sont: la dureté brinell, la dureté Knoop, la dureté Rockwell, la dureté Vickers, le test consiste à appliquer une charge

pendant environ 15 secondes avec une force qui varie de 60 à 150 kgf sous compression. La charge est désappliquée, la valeur de la dureté est obtenue directement sur l'écran. Généralement c'est la teneur en carbone qui détermine la dureté des aciers suivant cette teneur on distingue les aciers doux et les aciers mi-durs [24].

- **La résistance à l'abrasion :**

Les aciers présentent une bonne résistance à l'abrasion, c'est-à-dire qu'ils ne s'usent pas facilement par frottement. En termes pratiques, ils sont plus difficiles à meuler [25].

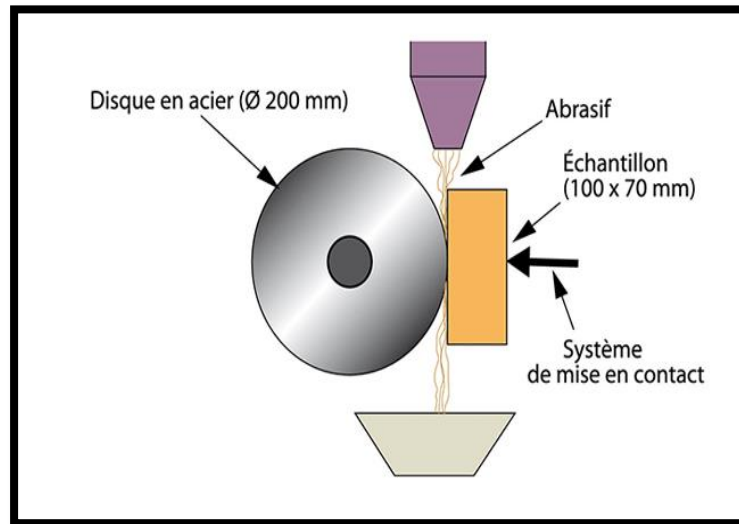


Figure I.4. La résistance à l'abrasion [25].

I.11. Aciers de cémentation

Ce sont des aciers à faible teneur en carbone inférieure à 0.25 %. Après cémentation, trempe et revenu à basse température, la dureté de la couche cémentée atteint 740 HV et celle du cœur environ de 395 HV. Les aciers de cémentation doivent avoir au cœur des propriétés mécaniques élevées, en particulier, une très haute limite élastique. Les éléments d'alliage améliorent les propriétés mécaniques, chaque élément d'addition ne doit pas dépasser 5 %.

La désignation comprend dans l'ordre [27]:

- Un nombre indiquant la teneur moyenne en carbone exprime en centième pour cent (multiplie par 100).
- Suivi de symboles normalisés des éléments alliés dans l'ordre des teneurs décroissantes, c'est à dire, le premier élément indique toujours l'élément dont la teneur est la plus élevée .
- Les symboles sont suivis par des nombres indiquant la teneur moyenne des éléments d'additions multipliés par 4 pour les éléments Cr, K, M, Ni, S et par 10 pour tous les autres éléments [16].

Exemple :

15 Cr Ni 6

- ✓ Acier faiblement allié ;
- ✓ 0,15% de carbone ;
- ✓ 1% de Chrome;
- ✓ 1,5% de nickel (6 :4 = 1,5).

I.12. Domaine d'application des aciers

L'acier est le métal préféré des bricoleurs, pour sa résistance au poids et aux températures. Il a l'avantage d'être moins cher que l'inox ou l'aluminium. Si l'acier n'est pas traité, il se rouille. Mais c'est parfois justement l'effet recherché par certains designers en matière de déco et de style. L'acier est fréquemment employé à des usages mécaniques. Suivant l'épaisseur choisie, on peut facilement l'usiner, le souder, le plier et rajouter une couche de peinture pour lui donner l'aspect souhaité, on vous a rassemblé 3 exemples d'utilisations de l'acier, en fonction de l'alliage choisi. On retrouve l'acier dans une multitude d'applications et sous différentes formes. Des objets du quotidien aux machines industrielles, voici quelques exemples de produits ou d'œuvres composées à partir d'acier [28].

a. Monuments et construction

- La Tour Eiffel : 18 038 pièces de fer ont été assemblées par des rivets en acier ;
- Le Pont de Brooklyn : pont suspendu à 40 mètres au-dessus de l'est river à l'aide de câbles d'acier ;
- La Pyramide du Louvre : 8 000 pièces en acier inoxydable ont été utilisées.

b. Mécanique et technologie

- Automobile : l'acier représente de 55 à 70 % du poids d'une voiture ;
- Aviation ;
- Machines agricoles ;
- Machines industrielles ;
- Composants électroniques.
- Prothèses médicales.

c. Vie quotidienne

- Boîtes de conserve ;
- Couverts en acier inoxydable ;
- Ciseaux ;
- Stylos billes.

I.13. Défauts des aciers

Le manque d'homogénéité (l'hétérogénéité) de l'acier se traduit par certains défauts caractéristiques :

Les uns sont naturels, les autres sont accidentels et se produisent lorsque certaines précautions ne sont pas observées lors des traitements mécaniques ou thermiques [26].

- **Soufflures** : c'est une poche accidentelle gonflée de gaz qui est située la plupart du temps dans le cœur et dans le voisinage de la peau du lingot ;
- **Les pailles** : une paille est une soufflure que l'opération de laminage adaptés et étirée, elle est apparente sur les surfaces polies sous forme d'un trait noir, dans la direction de laminage ;
- **Criquer** : c'est une déchirure superficielle longitudinale ou transversale, il provient aussi d'une rupture du métal par suite d'une déformation ;
- **Tapure** : c'est un découlement intérieur, un défaut vraiment gênant déminant la sécurité ;
- **Retassure** : elle est produite par l'évacuation des gaz et le retrait du métal en haute du lingot en refroidissement ;

- **Gouttes froides** : sont produites pendant la coulée ;
- **La corrosion** : est un phénomène naturelle, cela représente un gros problème industriel, elle touche plus largement toutes sortes de matériaux (métaux, céramique).

I.14. Conclusion

Dans ce chapitre, on a mise en évidence les notions fondamentales de fabrication des aciers en démontrant le rôle primordial qu'ils jouent dans le développement de l'industrie d'une manière générale, de plus souligner leurs importances dans l'industrie mécanique d'une manière précise. Par la suite nous avons mentionné (identité) certains défauts caractéristiques suite au manque d'homogénéité à l'instar des pailles, les retassures...etc. Finalement le choix de l'acier dépend essentiellement des propriétés mécaniques souhaitées et le domaine d'application.

- Références bibliographiques de chapitre I**
- N°**
- [1] Silini baderzamane, Roubache mostapha «Etude de traitements thermochimiques des aciers», université de msila p14. 20018 ,2019.
- [2] Ghomari fouad «Science des matériaux de construction», universite aboubekr belkaid. tlemcen p 45, 2006,2007.
- [3] Hazard et coll Mémotech «Structures métalliques », casteilla, 2000, p 14.
- [4] Barralis j. maeder G « Précis de métallurgie. élaboration, structures-propriétés et normalisation ». afnor, nathan, 2005.
- [5] J.n. Locquet « caractérisation métallurgiques et mécaniques de couches », thèse de doctorat en science appliquées, 1998, p193, 195,201.
- [6] Michel Colombie « Matériaux métalliques », dunod, paris 2001,2008, p529, 532.
- [7] Guide d'auto-apprentissage pour les opérateurs en traitement thermique, produit par le comité sectoriel de la main-d'œuvre dans la fabrication métallique industrielle (PERFORM) et la Commission des partenaires du marché du travail, p23.
- [8] Mahroug Eloualhi « Amélioration des caractéristiques des métaux utilisant la projection thermique», université de msila p8.20018 ,2019.
- [9] R. Butin, m. « Pinot fabrications mécanique technologie », tome 2, 1981.
- [10] J. Baralis , G. maeder : Précis métallurgie, nathan, Paris, 1997.
- [11] Jean varriot « Chaudronnerie en aciers inoxydables », techniques de l'ingénieur, a 869.
- [12] Laurent antoni and Alain galerie « Corrosion sèche des métaux », techniques de l'ingénieur, m 4224.
- [13] H.laplanche « thion. du choix et d'emplois des principaux aciers, fontes et alliage ferreux ». Paris 1973.
- [14] E.rowan « Discussion in the symposium on inter masters sees in metals andalloys.- Volume3 », (1948).
- [15] N.bouaoudja, « Matériaux métallique », édition OPU Alger.
- [16] K .luis « Science et génie des matériaux modulo Editeur », 2001,233av mont royal, canada.
- [17] Le livre de l'acier « lavoisier tec and doc » editeurs scientifiques : gérard béranger,guy henry,germain sanz « partie3:propriétés d'usage » pages 207-501.
- [18] W.d. Callister, « Science et génie des matériaux », Canada 2001.
- [19] « Technique de l'ingénieur » M 4165.
- [20] Fabrication mécanique complexe moteurs tracteurs Constantine. Cirta 6708.
- [21] P. canât « Aciers inoxydables critères de choix et structure »; technique de l'ingénieur, M4541, 11/11/2012.
- [22] C. Pierre-Jean « Acier inoxydable, Critère de choix et structure », Techniques de l'Ingénieur, traité matériaux métalliques, mb4, dossier m4540, paris (2000).
- [23] G. Murry, « aciers généralités », techniques de l'ingénieur, traité matériaux métalliques m300, centre français d'exploitation 2002.
- [24] J. Dorlot,j.bailon,j.massonave, « génie des matériaux »;2eme édition dunod ,1986.
- [25] M. Dupeux, « aide-mémoire science des matériaux », paris 2004.
- [26] J. barralis et G. maeder ; « Document pour étude de cas sur les aciers » ; e. bauer grosse 2003/2004.
- [27] Fédération Française de l'acier « comment fabrique-t-on l'acier », juillet 2012.
- [28] « Technique de l'ingéneure » M1002.

Chapitre II

Etude des traitements de durcissement superficiel par la cémentation

Chapitre II : Etude des traitements de durcissement superficiel par la cémentation.

II.1. Introduction	22
II.2. Définition et principe de la cémentation	22
II.2.1. Définition	22
II.2.2. Le Principe	23
II.3. Traitement thermique	24
II.3.1. Définition	24
II.4. Types de traitements thermiques	25
II.4.1. Le recuit	25
II.4.2. La trempe	25
II.4.3. Le revenu.....	25
II.5. Techniques de la cémentation	25
II.5.1. La cémentation solide	25
II.5.1.1. Les avantages de la cémentation solide.....	26
II.5.2. La cémentation liquide.....	26
II.5.2.1. Les avantages de la cémentation liquide	26
II.5.3. La cémentation gazeuse	26
II.5.3.1. Les avantages de la cémentation gazeuse.....	26
II.6. Cycle de la cémentation	27
II.6.1. Enrichissement en carbone.....	27
II.6.2. Atmosphère de cémentation	27
II.6.2.1. Génération des atmosphères	27
II.6.2.2. Définition du potentiel carbone	27
II.6.2.3. Les principaux agents cémentant	28
II.6.3. Diffusion du carbone	28
II.7. Critères de la structure.....	29
II.7.1. Profondeur de cémentation	29
II.7.2. Influence de l'enrichissement de la couche en carbone	30
II.7.3. Carbures	31
II.8. Influence des paramètres de traitement sur la cinétique	31
II.8.1. Influence du temps.....	31

II.8.2. Influence de la température	32
II.8.3. Influence de la concentration en carbone.....	33
II.9. Interaction gaz-métal.....	33
II.9.1. Rôle des éléments d'alliage	33
II.9.2. Effet de l'oxygène	33
II.9.2.1. La décarburation accidentelle	33
II.9.2.2. Oxydation superficielle	33
II.10. Conclusion.....	35

Liste des figures

Figure II.1. Représentation schématique du processus de la cémentation	22
Figure II.2. Phases de la cémentation.....	23
Figure II.3. Le cycle thermique lors d'une cémentation +tremp+revenu.	25
Figure II.4. La cémentation gazeuse.	27
Figure II.5. Taux d'austénite résiduelle en fonction du pourcentage.....	30
Figure II.6. Dureté de la martensite en fonction de la teneur en carbone.	30
Figure II.7. Profondeur de cémentation, en fonction du temps	31
Figure II.8. Effet de la durée de cémentation sur la dureté.	32
Figure II.9. Effet de la température de cémentation sur la micro dureté.....	32
Figure II.10. Potentiel d'oxydation de divers éléments pendant un maintien à 930° C dans une atmosphère cémentant.....	34

II.1. Introduction

Les industries mécaniques emploient largement les traitements thermochimiques pour le durcissement superficiel des aciers et d'améliorer une large gamme de propriétés surfaciques fonctionnelles qui sont différentes du substrat de base notamment physique, chimique, mécanique...etc. Le traitement thermochimique utilise la diffusion thermique pour incorporer des atomes métalliques ou non métalliques (chimiques) dans une surface de matériau afin de modifier sa composition chimique et sa microstructure. Dans certains cas, le processus est suivi d'une trempe et d'un revenu. Ces traitements de surfaces ont une grande importance industrielle à cause de ces propriétés mécaniques et chimiques des couches superficielles des matériaux. Selon le processus choisi la surface traitée présentera une bonne résistance à l'usure et à la corrosion avec une dureté élevée. Ce chapitre présentera un type de traitement thermochimique très important dans le milieu industriel qui est la cémentation avec ses mécanismes de mise en œuvre sur le plan théorique [1, 2, 4].

II.2. Définition et principe de cémentation

II.2.1. Définition

La cémentation est un traitement thermochimique, qui est un processus d'ajout de carbone à la surface des aciers à faible teneur en carbone à des températures généralement comprises entre (850 et 1000°C) [1]. Cela se fait en exposant la pièce à un milieu riche en carbone à une température élevée et permet à la diffusion de transférer les atomes de carbone dans l'acier. Cette diffusion ne fonctionnera que si l'acier a une faible teneur en carbone (≤ 0.25) car la diffusion fonctionne sur le principe du différentiel de concentration par exemple, l'acier avait une teneur élevée en carbone au départ et est chauffé dans un four sans carbone, comme l'air, le carbone aura tendance à se diffuser hors de l'acier, ce qui entraînera une décarburation [2].

Le durcissement est réalisé lorsque la couche de surface à haute teneur en carbone généralement contrôlée entre (0,6 et 0.9% C) est refroidie pour former la martensite de telle sorte qu'un cas martensitique à haute teneur en carbone avec une bonne résistance à l'usure et à la fatigue est superposé à un dur noyau en acier à faible teneur en carbone [3].

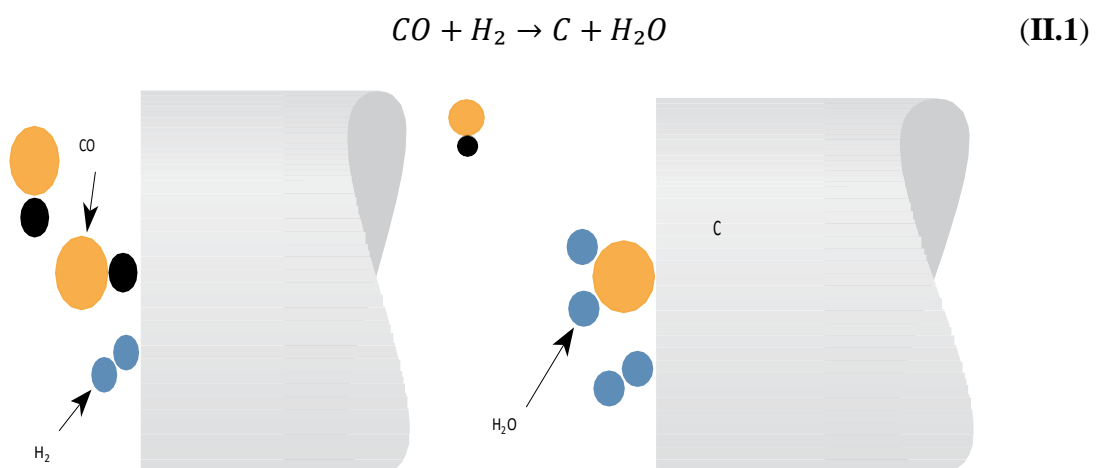


Figure II.1. Représentation schématique du processus de la cémentation [4].

II.2.2. Le principe

La cémentation consiste à enrichir la couche superficielle d'une pièce mécanique en carbone de bois emballé sur le métal ou par les techniques modernes qui appliquent des gaz ou des plasmas carbonés (tels que le dioxyde de carbone ou le méthane) maintenue à des températures généralement comprises entre (850 à 1000°C) considéré dans un milieu carburant. Le durcissement est accompli lorsque la couche de surface à haute teneur en carbone est trempée par diffusion de carbone pour former de la martensite et à refroidir brusquement l'ensemble pour assurer la transformation martensitique de cette couche superficielle avec une bonne résistance à l'usure et à la fatigue [5].

Elle se décline en trois phases brèves :

1. L'augmentation de la température jusqu'à ce que le fer atteigne le point de sa transformation allotropique entre (850 et 1000°C) [6].
2. L'enrichissement en carbone de la surface de la pièce, il y a en fait deux phénomènes qui interviennent : une réaction chimique qui fournit du carbone à la surface de métal et un phénomène de diffusion dans la zone superficielle du métal de la surface vers l'intérieur [7].
3. Enfin, le refroidissement brutal de la pièce dans l'un des quatre types suivants : le refroidissement par l'huile, l'atmosphère ou bien le gaz (nitrate) et le dernier choix c'est l'eau car elle crée des fissures avec un endommagement des pièces dans certains cas. Ce traitement donne une structure martensitique d'une dureté de (700-900 HV) en surface qui est à l'origine de l'amélioration de la résistance à l'usure.

✚ On remarque que le traitement de cémentation est toujours suivi d'un revenu qui permet d'un dimensionnement des structures et d'obtenir des pièces moins fragiles [8].

La profondeur de la couche cémentée et la rapidité de ce processus sont liées par ces trois paramètres suivants [9] :

- Le temps de cémentation ;
- La température ;
- Le débit de carbone.

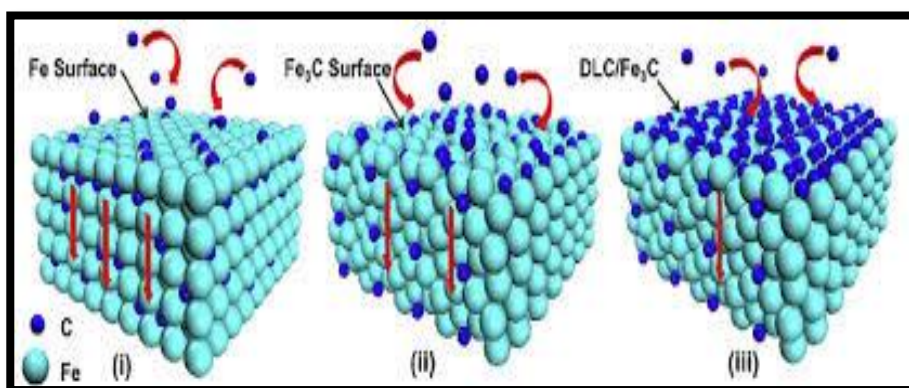


Figure II.2. Phases de la cémentation [5].

II.3. Traitement thermique

II.3.1. Définition

Le traitement thermique est un processus de chauffage et de refroidissement d'un matériau pour obtenir un ensemble souhaité de propriétés physiques et mécaniques (en les augmentant ou en les diminuant) et les propriétés chimiques par exemple (la résistance à la corrosion). En cours de cette opération, on provoque des changements de structure métallique appelés « Transformations » la plupart de ces transformations de phase qui se produisent sont contrôlées par la température et la durée du traitement thermique pour produire des pièces de haute qualité avec des propriétés spécifiées [10]. En somme, les traitements thermiques sont des opérations qui consistent à faire varier la température des métaux qui reste néanmoins à l'état solide. La variation de la température en fonction du temps est appelée cycle thermique (chauffage, maintien et refroidissement) [8].

II.4. Types de traitements thermiques

II.4.1. Le recuit

Est un traitement thermique visant l'obtention d'états proches de l'équilibre thermodynamique, c'est-à-dire la restauration des propriétés originales du matériau. Il consiste à chauffer la pièce à une température dite température de recuit comprise de 450 à 1100°C après un maintien pendant un temps donné suivi d'un refroidissement généralement lent. On distingue plusieurs types de recuits, soit des recuits d'homogénéisation, de régénération, d'adoucissement, de détente, de sphéroïdisation, de normalisation, de recuit total...etc [11]. Il ya aussi des traitements qui ne peuvent pas être considérés comme recuits l'une des causes est l'instabilité de la température lors de la période de maintien qui est très courte qui sont le recuit recristallisation, restauration [12].

II.4.2. La trempe

Est un processus de traitement des métaux par chauffage afin d'améliorer la ténacité, il est généralement effectué après le durcissement pour réduire la dureté supplémentaire, ce qui peut être accompli en soumettant le métal à une température inférieure à la température critique pendant une période de temps particulière [13]. Ce processus est très bénéfique pour le contrôle de la corrosion, car l'utilisation d'une chaleur intense dégage diverses propriétés de douceur ou de dureté en fonction des niveaux de carbone dans l'acier. La première étape consiste donc à chauffer l'acier puis de le maintenir pendant environ 25 minutes dans son domaine austénitique, S'ensuit la trempe qui consiste à refroidir rapidement la pièce en la plongeant soit à l'eau, à l'huile (huile de trempe) ou par insufflation d'un gaz tel que l'air. Le milieu de trempe est choisi en fonction de la trempabilité de l'acier [14].

On distingue différents types de trempe soit :

- La trempe martensitique ;
- La trempe bainitique ;
- La trempe austénitique.

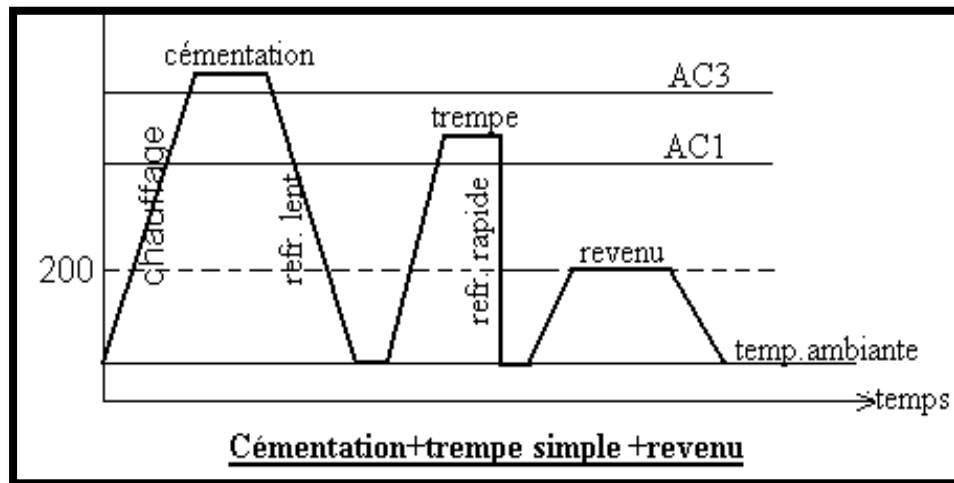


Figure II.3. Le cycle thermique lors d'une cémentation +trempe+revenu [14].

II.4.3. Le revenu

Le revenu est un processus de réchauffage lent et précis du métal trempé effectué après la trempe pour atteindre l'équilibre souhaité entre ductilité et dureté. Il modifie les propriétés mécaniques et soulage les contraintes internes dues au refroidissement rapide qui fragilise le matériau. Si cette opération n'est pas réalisée immédiatement après la trempe, un risque de rupture des pièces peut se produire plusieurs heures, voire plusieurs jours après la trempe d'un acier. Le revenu est effectué en élevant l'acier à un point inférieur à la température de début de transformation de phase de l'acier. Une fois cette température atteinte, elle y est maintenue pendant une durée déterminée. La température et le temps exacts dépendent de plusieurs facteurs tels que le type d'acier et les propriétés mécaniques souhaitées [15]. Ce processus est réalisé en permettant à la diffusion du carbone de se produire dans une microstructure en acier. Lorsque l'acier est durci, il peut devenir excessivement cassant et dur. Cependant, lorsqu'il n'est pas durci, l'acier peut ne pas avoir la résistance ou la résistance à l'abrasion nécessaire pour son application prévue [16].

II.5. Techniques de la cémentation

On distingue trois types principaux de cémentation suivant l'état du milieu cémentant : la cémentation (solide, liquide, gazeuse).

II.5.1. La cémentation solide

Dans ce processus, les pièces à durcir sont emballés dans une caisse contient de ciment solide à haute teneur en carbone comme le charbon de bois ou le carbonate de baryum (BaCO_3). Le tout étant maintenu à une température de cémentation (900 à 950°C) de sorte que le carbone est diffusé dans la surface extérieure du matériau tandis que le taux de diffusion du carbone dépend de la composition de la pièce, de la température et de temps. Après la cémentation, la caisse ne pas ouvrir uniquement qu'après leur refroidissement à l'air jusqu'à (400 ou 500°C) où la couche superficielle du matériau est durcie tandis que le cœur de la pièce reste ductile et la profondeur de durcissement est d'environ 0,1 à 2 mm [17].

Cette méthode est utilisée pour les aciers doux avec une teneur en carbone de 0,2% ou moins qui ne peuvent pas être cémentés par un chauffage simple [18].

Le principe de la cémentation se ramène en fait à une cémentation gazeuse par suite des réactions de décomposition suivantes [19] :



Dans le sens (II.2) formation de CO, la réaction se fait avec le carbone amorphe contenu dans le ciment, dans le sens (II.3) de décomposition du CO, on obtient la réaction de cémentation, le carbone diffuse dans le fer.

II.5.1.1. Les avantages de la cémentation solide

- C'est la méthode la plus simple de carburation ;
- Moins cher.

II.5.2. La cémentation liquide

Les pièces sont immergées dans un milieu liquide qui est bain de sel fondus riche en cyanure de sodium (anion constitué d'un atome de carbone lié par une liaison triple à un atome d'azote) et de baryum vers 980°C. Ce procédé fortement développé pour des raisons essentielles sont liées à l'environnement et aux conditions de travail et principalement à la nature cyanurée de ces bains. Des formulations sans cyanure ont été développées pour s'affranchir de cet aspect mais l'efficacité relative de ces formules et les contraintes des bains de sels même exempts de cyanures n'ont pas permis de maintenir la place de cette technique par rapport aux procédés gazeux [20].

II.5.2.1. Les avantages de la cémentation liquide

- Une profondeur de cémentation uniforme est obtenue ;
- Les composants sont exempts d'oxydation.

II.5.3. La cémentation gazeuse

La cémentation gazeuse est la plus employée, ce traitement est réalisé en atmosphère gazeuse contenant du CO et du CH₄. La production du gaz pour la cémentation est généralement effectuée par étapes. Tout d'abord, un propane ou du gaz naturel est mélangé avec une quantité d'air calculée. Le mélange brûle incomplètement lorsqu'il est passé sur un catalyseur au Ni chaud à environ 1050° C. Le gaz résultant est refroidi et déshydraté pour devenir un gaz mixte (gaz endothermique) et pour augmenter le potentiel de carbone en surface, en ajoutant un peu d'hydrocarbure pour enrichir le gaz, se gaz pénètre la surface d'acier pour former une couche superficielle enrichie en carbone [21]. Toute la surface de la pièce peut être cémentée par ce processus, mais certaines zones ne peuvent pas nécessiter de cémentation, et celles-ci peuvent être revêtues pour empêcher la cémentation. Par exemple, le vilebrequin assemblé n'a besoin d'être cémenté qu'au niveau de la partie d'arbre. La partie sans tige est cuivrée pour empêcher la pénétration du carbone lors de la cémentation [22].

Pendant la cémentation, il peut y avoir dans la partie superficielle de la couche enrichie, oxydation des éléments manganèse, chrome et silicium présent dans l'acier. En raison de la diminution résultante de la trempabilité, il peut y avoir lors de la formation de constituants autres que la martensite ce qui aura pour effet de réduire considérablement la résistance à la fatigue [23].

II.5.3.1. Les avantages de la cémentation gazeuse

- Le temps de cémentation est très inférieur par rapport aux d'autres méthodes ;
- La carburation uniforme est obtenue par cette méthode ;

- L'oxydation du matériau cémentable est réduite.

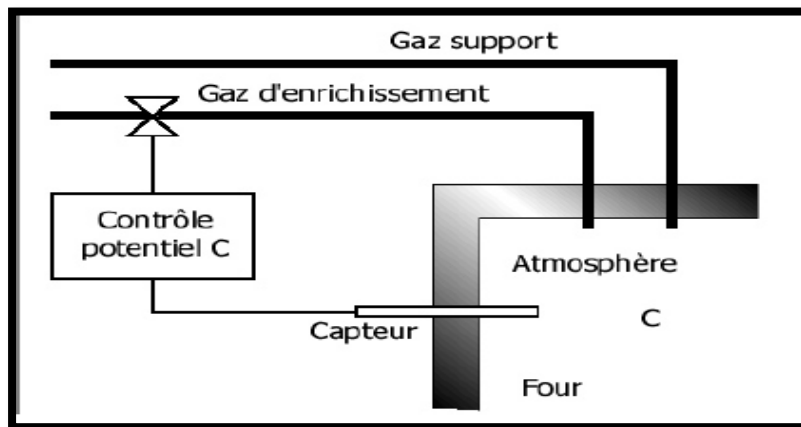


Figure II.4. La cémentation gazeuse [19].

II.6. Cycle de la cémentation

La cémentation comporte généralement deux étapes :

- La phase d'enrichissement en carbone de la surface ;
- La phase de diffusion de carbone dans le solide.

II.6.1. Enrichissement en carbone

L'enrichissement en carbone est l'étape chimique du traitement. Par mise en contact avec un milieu cémentant, on forme à la surface de l'acier une couche superficielle plus ou moins profonde enrichie en carbone. En enrichissement superficiel en carbone une pièce mécanique (teneur initial en carbone ≤ 0.25) par diffusion dans le domaine austénitique (850 et 1000°C selon les procédés) maintenue à une température supérieure au point de transformation A_{c3} de l'acier considéré dans un milieu carburant suivie d'une trempe qui conduit à la dureté voulue et pour former une couche martensitique dure après la trempe finale. Le carbone est obtenu par une réaction gaz/solide entre l'atmosphère [17].

II.6.2. Atmosphère de cémentation

II.6.2.1. Génération des atmosphères

L'atmosphère carburante obtenue (dans le cas du méthane) est constituée d'un gaz contenant environ 20 % de monoxyde de carbone, 40 % de dihydrogène, 40 % de d'azote et des quantités minimales d'eau, de méthane et de dioxyde de carbone [24]. Les procédés utilisés aujourd'hui en cémentation gazeuse classique sont, soit la combustion endothermique d'hydrocarbures (méthane, propane, gaz naturel), soit l'instillation de liquides organiques $C_xH_yO_z$. Pour les techniques de cémentation sous basse pression on procède par dissociation du propane (C_3H_8), ou du méthane (CH_4). L'efficacité du procédé dépend en particulier de la quantité de carbone disponible et de la possibilité de dissociation de l'atmosphère pour une température et à une pression donnée. Les effets de la température et de la pression sont généralement étudiés en considérant que l'équilibre thermodynamique est obtenu au cours de la cémentation [25].

II.6.2.2. Définition du potentiel carbone

Le potentiel carbone d'une atmosphère est la fraction massique en carbone d'un acier en équilibre thermodynamique avec cette atmosphère. Le potentiel carbone d'une atmosphère est constitué d'un gaz support auquel on ajoute si nécessaire un gaz d'enrichissement en carbone pour atteindre le pouvoir carburant adéquat. Le potentiel carbone d'une atmosphère est dans le domaine austénitique, la teneur

en carbone d'un échantillon en acier, en équilibre avec cette atmosphère, à une température est une pression donnée [26].

II.6.2.3. Les principaux agents cémentant

➤ Le méthane

Constituant principal du gaz naturel, donne lieu à une réaction carburante avec l'acier.



La réaction de cémentation par le méthane est presque totale, toutefois sa vitesse de réaction est très faible. De plus, lorsque sa concentration est trop importante, il peut se décomposer avant d'arriver au contact de la pièce, et ainsi libérer du carbone amorphe formant des suies.

➤ Le propane

Un rôle important est attribué à la molécule d'éthylène qui sert d'intermédiaire à la décomposition du méthane selon les réactions



➤ Autre agent cémentant :

Le CO en présence d'acier, le monoxyde de carbone peut réagir à haute température et fournir des atomes de carbone.

En majorité, les atmosphères industrielles de cémentation, qu'elles soient obtenues par combustion endothermique d'hydrocarbures ou par décomposition de liquides organiques, sont riches à la fois en CO et H₂ [27].

II.6.3. Diffusion du carbone

La diffusion du carbone à la surface résulte de la recherche d'un équilibre entre la concentration de carbone provenant du milieu carburant et la concentration initiale en carbone de l'acier [28]. Du point de vue macroscopique, et pour une solution solide, le carbone se déplace de manière à réduire la différence de concentration. Le carbone peut diffuser jusqu'à des profondeurs comprises entre 0,5 et 3 mm [29, 30]. La diffusivité du carbone dans l'austénite varie à la fois avec la concentration en carbone et la température de cémentation [31].

Ils ont modélisé la diffusivité du carbone conformément au comportement cinétique et thermodynamique du carbone dans l'austénite. Les forces répulsives entre les atomes de carbone voisins influencent la diffusivité du carbone en réduisant la probabilité d'occupation des sites interstitiels à proximité du site déjà occupé par l'atome de carbone. Par conséquent, dans un gradient de concentration, l'atome de carbone qui tente un mouvement aléatoire fait face à une différence exagérée dans le nombre de sites disponibles, ce qui améliore la diffusion du carbone dans le gradient de concentration [32].

Alors la cémentation conduit à un gradient de carbone à travers la couche de l'acier via un processus de diffusion obéissant aux lois de la diffusion proposée par Fick appliquées dans le cas d'un milieu semi-infini à concentration superficielle constante [33]. La relation est :

$$J = -D \left(\frac{dc}{dx} \right) \quad (\text{II.7})$$

Où

J : Le flux par unité de surface ;

D : Le coefficient de diffusion ;

$\left(\frac{dc}{dx}\right)$: Le gradient de concentration.

Elle est appelée la première loi de Fick, application de cette loi aux faces opposées d'un cube élémentaire et en considérant le flux à travers le cube, conduit à l'expression suivante, connue sous le nom de la seconde loi de Fick :

$$\frac{dc}{dt} = D \left(\frac{d^2c}{dx^2} \right) \quad (\text{II.8})$$

t : est le temps ;

II.7. Critères de la structure

II.7.1. Profondeur de cémentation

On entend par profondeur de cémentation (CHD) la distance verticale de la surface de l'échantillon vers la couche. Pour les aciers qui présentent une dureté supérieure à 450 HV à une distance à la surface égale à trois fois la profondeur de cémentation (déterminée avec une valeur limite de dureté de 550HV) [34].

Pour obtenir une profondeur de 0.5mm, la pièce devra rester environ 6 heures à 950°C. Pour obtenir une profondeur de 2.0mm, il faudra environ 30 heures à 950°C. La durée de traitement des cémentations de grande profondeur est longue, donc assez coûteuse. En outre elle provoque des déformations plus importantes car la pièce reste très longtemps à haute température. Dans certains cas, la cémentation peut avantageusement être remplacée par une trempe induction partielle sur un acier qui contient déjà du carbone [35].

La profondeur de cémentation est fonction du temps, de la température et du potentiel de carbone en surface. La profondeur de cémentation est plus grande après un long temps de maintien et un potentiel élevé de carbone produit une quantité élevée de carbone en surface. Le choix de l'atmosphère a également une grande influence sur le processus de cémentation. Les différentes atmosphères employées dans l'industrie de cémentation impliquent la dissociation des composants de l'atmosphère en surface de l'acier, ainsi le carbone libéré est aisément dissous par la phase d'austénite et peut diffuser dans la pièce [36]. En plus de ça, certains éléments d'alliage peuvent agir d'une manière sensible sur la vitesse de diffusion du carbone au cours de la cémentation [37].

La couche traitée peut être caractérisée par le profil de micro dureté qui permet de mesurer l'épaisseur efficace de la couche, appelée « profondeur conventionnelle de cémentation » elle est définie par la distance verticale de la surface de l'échantillon pour lequel la dureté a une valeur égale à 550HV [38].

La profondeur de durcissement par cémentation dépend partiellement de la trempabilité des aciers, mais surtout des conditions du traitement. L'épaisseur visée pour la couche cémentée varie selon la destination et le volume de la pièce. Les épaisseurs importantes (0.8 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 0.6 mm à 0.9 mm peuvent être suffisantes [39].

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) augmentant le coefficient de transfert de masse dans l'atmosphère en améliorant l'évolution du profil de carbone [40].

II.7.2. Influence de l'enrichissement de la couche en carbone

Le gradient de concentration, obtenu par la cémentation, entre le cœur et la couche est d'autant plus accentué que le métal de base est pauvre en carbone. Généralement, les aciers de cémentation ont une teneur en carbone inférieure à 0.2 %. L'élévation de la concentration se traduit par la diminution des températures de transformation à l'équilibre, par l'abaissement des températures de début et fin de transformation martensitique (M_s et M_f) et le décalage les courbes TTT vers la droite [41].

Le but recherché en cémentation est l'obtention d'une couche martensitique, obtenue après durcissement par trempe suivie de revenu, contenant au plus 25 % d'austénite retenue [42]. La relation entre le taux d'austénite retenue et la teneur en carbone est montré par la figure (II.5).

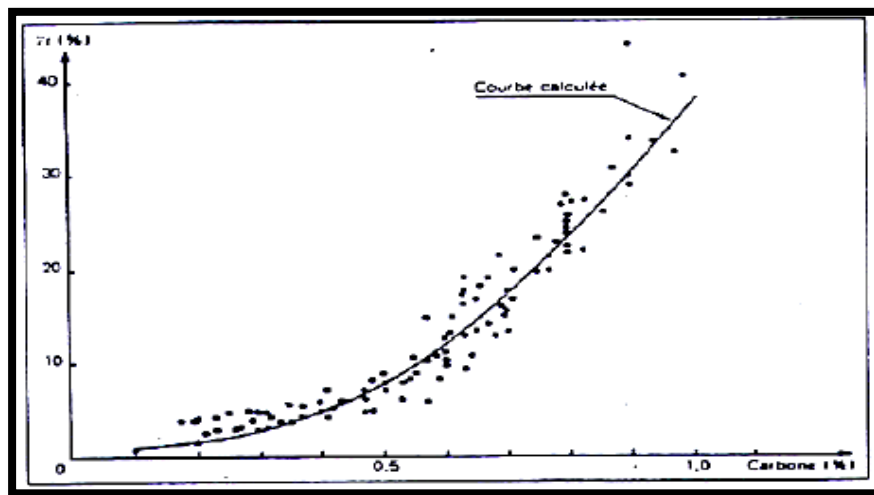


Figure II.5. Taux d'austénite résiduelle en fonction du pourcentage de carbone [43].

La dureté de la martensite croît avec la concentration en carbone en solution d'insertion comme on peut le constater sur la figure (II.6).

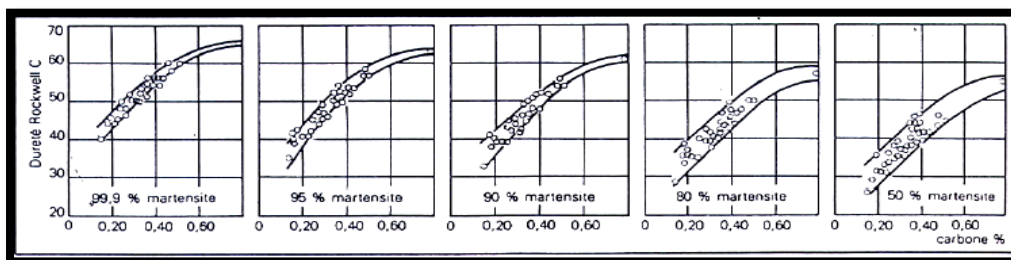


Figure II.6. Dureté de la martensite en fonction de la teneur en carbone [43].

Une quantité notable de carbure peut cependant être présente pour les teneurs en carbone élevées. Du point de vue mécanique on cherche à éviter la présence de carbure, il est néanmoins toléré la présence de quelques nodules de cémentite.

II.7.3. Carbures

Les carbures se forment dans la couche cémentée dès que la limite de solubilité du carbone dans l'austénite (0,8 % à 720°C- 2 % à 1140°C) est dépassée (cas d'une atmosphère trop riche en carbone). L'expression de la limite de solubilité (AC_m) en fonction des éléments d'alliages permet d'évaluer le risque d'apparition des carbures [44]. Les carbures dissous enrichissent la structure austénitique en carbone et en éléments d'alliages. Lors de la trempe ces carbures peuvent précipiter au niveau des joints des grains réduisant ainsi la résistance de l'acier [45]. Généralement, une température d'austénitisation égale à 1050 °C donne lieu à une meilleure dissolution des carbures primaires présents à l'état recuit, notamment celle des carbures de vanadium [46, 47].

II.8. Influence des paramètres de traitement sur la cinétique

Les principaux paramètres influençant la carburation sont le temps de maintien, la température de carburation, la concentration en carbone [48].

II.8.1. Influence du temps

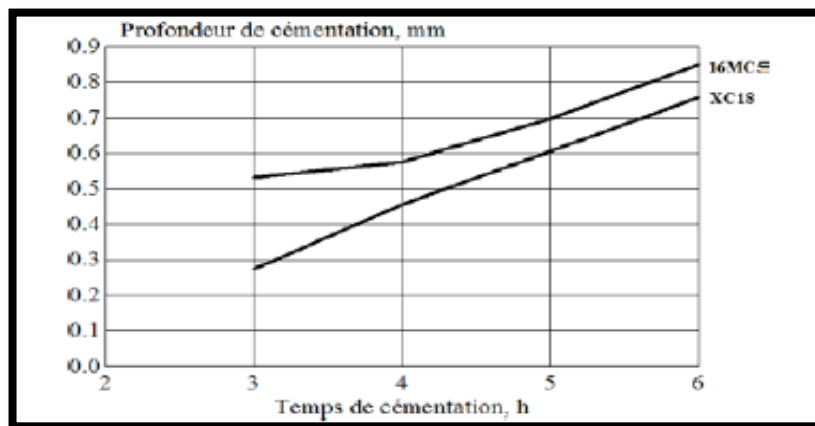


Figure II.7. Profondeur de cémentation, en fonction du temps de cémentation en caisse à 930°C [49].

Les courbes de la figure (II.7) représentent l'évolution de la profondeur de cémentation en fonction du temps de cémentation pour les deux nuances d'aciers. Cette figure illustre, d'une part, l'influence du temps de cémentation sur l'épaisseur cémentée et d'autre part, le rôle de la composition de l'acier sur la profondeur de cémentation obtenue. Pour une durée de cémentation de 3 heures, la couche cémentée est plus mince. Elle augmente avec la durée de traitement qui est l'un des principaux facteurs influençant l'épaisseur de la zone de diffusion alors, on observe une augmentation progressive de la concentration superficielle en carbone du solide [49].

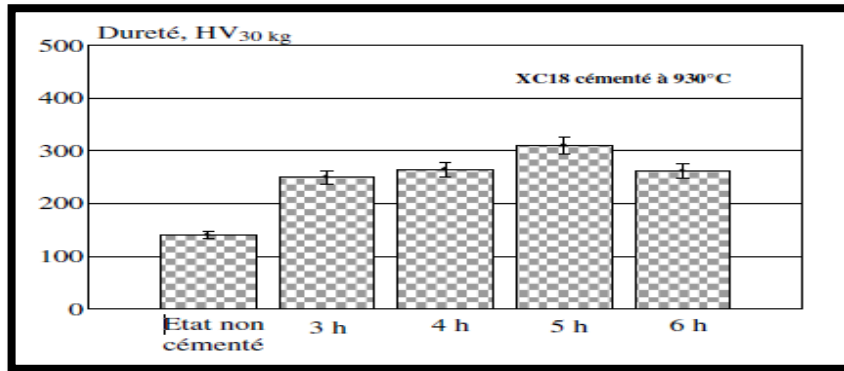


Figure II.8. Effet de la durée de cémentation sur la dureté [50].

La mesure de la dureté en coupe transverse n'a pas été réalisée et seule la dureté de surface des pièces cimentées est mesurée. La cémentation améliore considérablement la dureté des aciers étudiés. Elle est plus importante pour l'acier faiblement allié que pour l'acier de classe XC. Cette dureté augmente avec le temps de cémentation, pour atteindre son maximum vers les 5 heures de cémentation (voir la figure II.8). Il semble que des concentrations plus élevées en carbone dans la couche superficielle dégradent les propriétés mécaniques de la pièce cimentée [50].

II.8.2. Influence de la température

Montre les propriétés mécaniques des échantillons cimentés et trempés : les relations entre ces propriétés sont représentées comme suit dans la figure (II.9) illustrent les effets de la température de carburation sur la microdureté pour une durée de 120 minutes et de concentration en carbone.

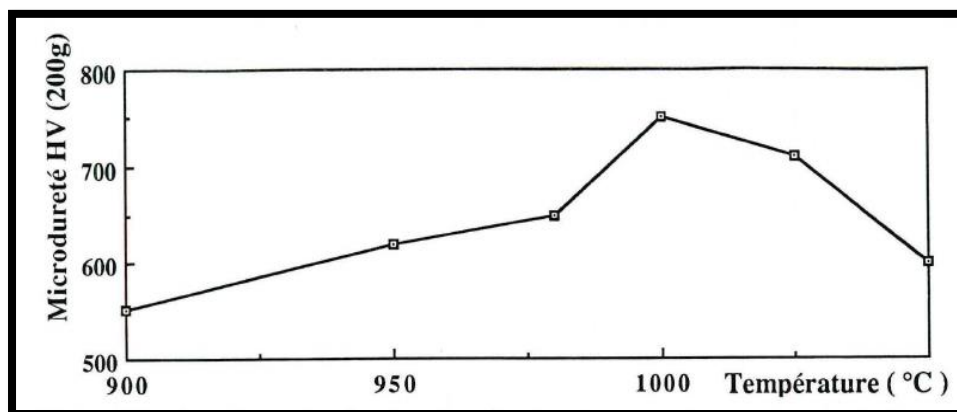


Figure II.9. Effet de la température de cémentation sur la micro dureté pour une durée de 120 minutes [51].

Nous avons fixé la durée du traitement à 120 minutes, correspondant à la durée totale de maintien à haute température au cours des cycles d'austénitisation et décarburation de la surface.

Lorsque la température d'austénitisation augmente, la dureté après trempe passe par un maximum (voir la figure II.9) qui résulte des effets antagonistes :

- Une mise en solution de plus en plus complète des carbures conduisant à une augmentation de la concentration en carbone en solution, ce qui donne après trempe une martensite de plus en plus dure [51].

II.8.3. Influence de la concentration en carbone

Pour chaque nuance, il existe un gradient de température M_s inverse au gradient de concentration en carbone à titre indicatif :

- Pour l'acier 16MC5, le point M_s vaut 150°C à la surface et 400°C à cœur.
- Pour l'acier 18CD4, M_s vaut 170°C à la surface et 415°C à cœur.
- Pour l'acier 16NCD13, M_s vaut 110°C à la surface et 365°C à cœur.

La différence importante entre les températures M_s du cœur et de la surface est à l'origine de la mise sous contrainte de compression de la couche cémentée. En effet, lors de la trempe, la transformation de l'austénite à lieu d'abord à cœur (transformation bainitique) et puis à la surface (transformation martensitique). C'est l'augmentation de volume induite par ces deux transformations successives qui explique la mise sous contrainte de compression de la surface :

- Lorsque le cœur subit la transformation bainitique, il induit par son augmentation de volume des contraintes de traction dans la surface.
- Lorsque la surface subit la transformation martensitique, il y a inversion des contraintes, la surface est mise en compression [52].

II.9. Interaction gaz-métal

II.9.1. Rôle des éléments d'alliage

Les aciers de cémentation contiennent des éléments d'alliage afin d'améliorer leur aptitude à subir la transformation martensitique (trempabilité) et caractérisant qui confèrent des caractéristiques différentes suivant les applications. Après l'usinage mécanique, la cémentation et la trempe, généralement dans l'huile, ces aciers présentent des caractéristiques comme une haute dureté superficielle et une ténacité à cœur considérable et modifient l'activité du carbone dans l'austénite. Plus l'acier contient d'éléments d'alliage, plus sa trempabilité augmente, permettant d'obtenir des structures transformées à cœur en pièces de plus en plus grandes. En particulier, le chrome a tendance à augmenter la dureté à cœur, tandis que le nickel améliore la ténacité et la résistance aux chocs [53].

II.9.2. Effet de l'oxygène

L'oxygène est à l'origine de défauts métallurgiques consécutifs au procédé de cémentation gazeuse classique tels que la décarburation accidentelle ou l'oxydation interne.

➤ La décarburation accidentelle

Les atmosphères peuvent être cémentantes ou décarburentes par inversion du sens des réactions chimiques en fonction de la température, de la durée de maintien, de la pression et des quantités en présence des différents gaz. Par exemple, la combustion du carbone par l'oxygène entraîne la diffusion du carbone du cœur vers la surface. Elle affectera les caractéristiques mécaniques de la peau [54]. Lors de la dissociation du méthane, il se forme de l'hydrogène. Cet hydrogène peut avoir un effet décarburent. La vitesse de décarburation par l'hydrogène n'égale la vitesse de carburation du méthane que lorsque la teneur en hydrogène du mélange gazeux est nettement prédominante et que le taux de méthane est très faible [55].

➤ Oxydation superficielle

L'oxygène, la vapeur d'eau ou le dioxyde de carbone contribuent au phénomène d'oxydation.



M, Fe, Cr, Mn, Si...

Ces réactions peuvent être oxydantes ou réductrices selon la température, la durée de maintien et les rapports H_2/H_2O ou CO_2/CO [56].

Ce phénomène est dû à la réaction de l'atmosphère avec certains éléments d'alliage tels que chrome ou manganèse. La pénétration des oxydes dans les couches cémentées est un phénomène typique de la cémentation gazeuse. En effet, l'acier durant le processus de cémentation est exposé à une atmosphère qui comporte des composants de l'oxygène comme : CO , CO_2 et H_2O . L'oxygène issu de la décomposition de ces composants se combine avec les atomes de fer et des autres éléments comme le silicium et le manganèse pour former des oxydes en surface [57]. La présence du chrome dans ces aciers est le responsable principal d'augmentation de la résistance à l'oxydation. Les techniques de traitements thermochimiques sont actuellement très applicables. On évite l'oxydation et la décarburation de l'acier en maintenant une pression totale de l'atmosphère du four très faible (inférieure à 0,1 mb) [58].

La présence d'une zone oxydée dans la zone superficielle, pour des profondeurs supérieures à la dizaine de microns, favorise l'amorçage de fissures. Ceci est dû au pompage des éléments d'alliage qui se traduit par une chute locale de trempabilité. Celle-ci, outre l'abaissement des propriétés mécaniques locales, peut induire la présence de contraintes de traction dans cette zone. Ces contraintes favorisent l'amorçage et la propagation des fissures [59,60].

Ces éléments formant ainsi des oxydes ne peuvent plus jouer leur rôle sur la trempabilité superficielle [61]. Il s'en suit une formation de microstructures perlitiques ou bainitiques en surface [62].

L'oxydation superficielle peut être évitée de différentes manières [61].

- Par grenailage ;
- Par traitement thermochimique sous pression réduite [63] ;
- En modifiant la composition chimique de l'acier par réduction de la teneur en éléments oxydables [62] ;
- En éliminant la zone oxydée par rectification [61].

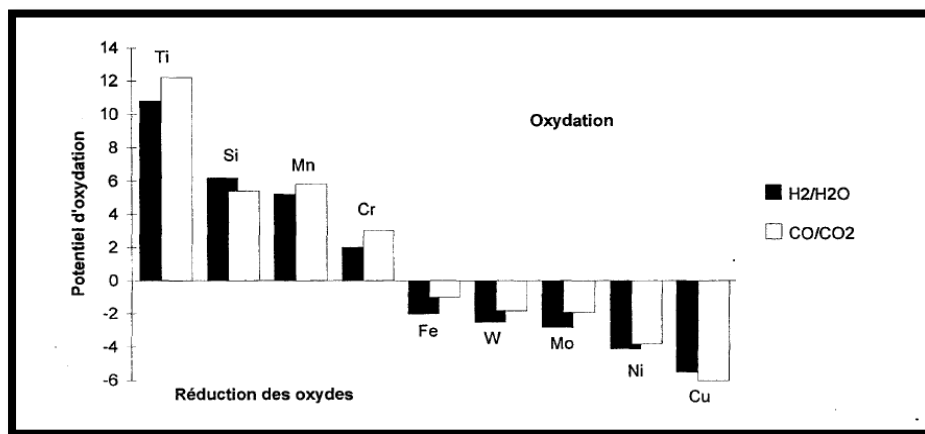


Figure II.10. Potentiel d'oxydation de divers éléments un maintien à 930°C dans une atmosphère cémentant [64].

II.10. Conclusion

Cette étude à l'objectif de la réalisation des couches superficielles de propriétés particulières et voir l'influence des paramètres opératoires sur la cinétique de cémentation en passant par des traitements thermiques pour obtenir une dureté élevée de la couche cémentée et de bonnes propriétés mécaniques de cœur.

- N° Références bibliographiques de chapitre II**
- [1] V.yakub, a.tijani « modeling and simulation of thermochemical heat treatment processes: a phase field calculation of nitriding in steel », thesis, university of bremen 06/2008.
- [2] M.m. b chaupinil, l.seraplir « analogies et différence entre les traitements de carbonitruration et de cémentation, aciers spéciaux » №13, 1975.
- [3] H. herns, h. fr. hinz and i. m. hucklenbroich « progress in tool steel », proceeding of the 4th international conference on tooling, 1996, university bochum.
- [4] Jacky lesage , thèse doctorat en mécanique « étude des propriétés mécanique et tribologique des matériaux revêtu à base carbone » soutenue en 1996 université lille p60.
- [5] J.tournier, livre « choix des traitements thermiques superficiels », ed cetim ,1985.
- [6] I.lakhtine « métallographie et traitement des métaux », 3eme édit mir, 1982, p122 -126.
- [7] Y. merabi « cémentation, Nitruration des aciers faiblement alliés amélioration des propriétés d'usure et de frottement » ; 2011/2012.
- [8] « Technique De l'ingénieur »m1222.
- [9] Said bensaada « traitements thermiques, classification et désignation des aciers et fontes », thèse doctorat université de biskra mouhamed khaidhar , 2019,p204 .
- [10] PSA Standards « Traitements thermochimiques cémentation -carbonitruration », 2005.
- [11] Y. ueda, n. kanayama, k. ichii, t. oishi « surface and coatings technology », 2005, p193.
- [12] G. krauss « microstructure and properties of carburized steel », in metals handbook. heat treating, vol. 4. materials park, oh: asm international; 1991. p75-363.
- [13] P. coppin, b. lhote, m. buffin et s. cantacuzene « atmosphère de traitements thermique »; technique de l'ingénieur .traité matériaux métalliques.
- [14] B. champin, l.seraphin, r. tricot « effets compares des traitements de cémentation et de carbonitruration sur les propriétés d'emploi des aciers pour engrenage », (1977), 77-90.
- [15] A. diament, r. el haik, r. lafont, r. wyss « tenue en fatigue superficielle des couches carbonitrurées et cémentées en liaison avec la répartition des contraintes résiduelles et les modifications », p200, p401, 2007.
- [16] Ghiglione d « modèles mathématiques de cémentation, traitement thermique », 2014, p195-85, p 31-41.
- [17] I .lakhtine « métallographie et traitement des métaux », 3eme edit mir, 1982 p145.
- [18] Cecil h. desch « les transformations à l'état solide des alliages fe-c», ed hal, p 57.
- [19] G .noussaiba, mémoire master «Comportements Mécaniques Des Aciers Faiblement Alliés Avant Et Après Cémentation », université de Tébéssa, 2016-2017, P24-25-26.
- [20] Andersson r, holm t, wiberg.s « furnace atmospheres, neutral hardening and annealing, linde gas special edition munich », 2005, p120-125.
- [21] Stratton p, sproge « gaseous carburizing and carbonitriding; the basics,heat treatment of metals », 2004,p 65-68.
- [22] Ghiglione. d « modèles mathématiques de cémentation, traitement t hermique », p 120-60, p18-22.
- [23] J. philibert « diffusion et transport de matière dans les solides » edition de physique 1990.
- [24] Leroux c, tournier .c « cémentation. carbonitruration ».techniques de l'ingénieur ; m1226 1994.

- [25] Livre « Caractérisation de couches cémentées en basse pression » p 14.2001.
- [26] Andersson r, holm t, wiberg .s « furnace atmospheres no. 2, neutral hardening and annealing. linde gas special » édition munich, 2005.
- [27] Stratton p, sproge « gaseous carburizing and carbonitriding; thebasics.heat treatment of metals » 2004, p65-68.
- [28] A. diament, r. el haik « tenue en fatigue superficielle des couches carbonitrurées et cémentées traitement thermique » 87, (1974), 87-97.
- [29] J. philibert « diffusion et transport de matière dans les solides » édition de physique » – 1990.
- [30] P. cousinou « contribution à l'étude de la cinétique des traitements thermochimiques superficiels des métaux en atmosphère gazeuse réactive » thèse i.n.p. lorraine- 1977.
- [31] A simow r.m « analysis of the variation of the diffusion constant of carbon in austenite with concentration, transactions of aime », 1964, 230(3), p. 611-613.
- [32] Siller, mcllellan.r « variation with composition of diffusivity of carbon in austenite, transactions », 1969, p 697-700.
- [33] A. simon, a. lorenzo, g. beck, g. meynet. influence de la teneur en azote sur les transformations de l'austénite carbonitruée de l'acier 30 cd 4, n°12, (1974), p823-831.
- [34] A. esfahani, rassizadehghani « effect of treating atmosphere in plasma post-oxidation of nitrocarburized aisi 5115 steel », 82:346–351, 2007.
- [35] Les alliages- fiche technique, Document internet. 2016 « <http://www.precimetal.be> ».
- [36] Y. c. lin mater « process. technol, a study on the wear behavior of hardened medium carbon steel », 2002, p126.
- [37] L. schmidt « tool materials for molds and dies', 1987, colorado school of mines press », p118.
- [38] J. branco « development of nb modified aisi h13/h11 type tool steels », ph.d.thesis 1989 colorado school of mines.
- [39] Benchetrit « la cementation accélérée. traitement thermique », n°166, (1982), p39.
- [40] K. olga, and richard « effect of alloy composition on carburizing performance of steel », journal of phase equilibria and diffusion, international, 2009.
- [41] Mouflard. m « utilisation des atmosphères contrôlées. Traitement thermique », n°14, (1965), p23.
- [42] Tournier(c.), renaud (m.) « specifications pour la réception des engrenages cémentés ou carbonitrurés » Traitement thermique, 212-87, 2933.
- [43] D.rowan (d) « modèles mathématiques de cémentation, traitement thermique », 195-85, 26-31.
- [44] Ellis « Some thermodynamic properties of carbon in austenite », n- J.I.S.I.2003, p 201, p582.
- [45] Colombier « les aciers à outils et leur traitement thermique » 1971, édition, paris, p201.
- [46] L. schmidt « tool materials for molds and dies', 1987, colorado school of mines press », p118.
- [47] J. branco « development of type tool steels », ph.d. thesis 1989 colorado school of mines s. mayer, i.siller, h. clemens, mater. res. 100 (2009).
- [48] Hochman r, burson j « the fundamentals of metal dusting », new york: a division of refining, 1966, p331.
- [49] W.c « technique for determining hardness and elastic modulus using displacement sensing indentation experiments », journal of materials research 7(6) (1992) p1564-1583.
- [50] M.laurent « caractérisation des propriétés mécaniques par nanoindentation d'un, sciences, 2011, p.379-387.

- [51] Daniel .e. thèse doctorat « caractérisation de couches cémentées en basse pression » université des sciences et technologie de lille, 1996, p40.
- [52] Thèse « comportements mécaniques des aciers faiblement alliés avant et après cémentation », présentée devant l'université de tébessa, p24, 25,26.
- [53] M. kulka, m. traitement de diffusion et pour l'amélioration de la résistance à l'usure des aciers à bas carbone przylecka, w. gestwa « wybrane zagadnienianaweg/ania »- i.b.n. gorzow wlkp, 1993.
- [54] M.j. gildersleeve « relationship between decarburization and fatigue strength of through hardened and carburizing steels » material science and technology. p 307 à 310- 1991.
- [55] F. z. lemmadi, thèse de magistère, rapporteur mr. a. chala, univ. de biskra.
- [56] Kozlovskii- a.t. kalinin- a.y. novikova « Interna/ oxidation during case hardening of steel in endothermic atmospheres »- Metal Science and Heat Treatment- no3 p 157 à 161 - Mars 1967.
- [57] C.kanchanomai ,w.limtrakarn « effect of residuel stress on fatigue failure of carbonitrided low-carbon steel, materials engineering and performance »; (2008), p879-887.
- [58] I. Lakhtine « métallographie et traitements thermiques des métaux », edition mir, moscou, 1978.
- [59] S. preston « Bending fatigue strength of carburising steel SS 2506 » - Materials Science and Technology -Vol. 7 - p 105 à 110 - Juin 1991.
- [60] S.jaun « fatigue crack initiation and growth from à gas carburizing surface » matériaux transactions vol. 34 w1 - p 27 à 32 ,1993.
- [61] C.tournier « maitrise de la microstructure en cémentation par la prévision du profil carbone en vue d'obtenir les propriétés d'emploi désirées », p165-82, p 27-44.
- [62] R. leveque « définition d'un traitement thermique en vue de l'amélioration de la tenue en fatigue » traitement thermique, p88, 27-35.
- [63] Pourprix y, naudot j « cémentation sous pression réduite, traitement thermique », 197-85, 51-58.
- [64] « Le traitement thermique des aciers sous atmosphère »A.T.T.T.- Pyc édition-1980.

Chapitre III

Matériau étudié-Résultats expérimentaux et discussions

Chapitre III : Matériau étudié-Résultats expérimentaux et discussion.

III.1. Introduction.....	43
III.2. Matériau étudié (acier (XC 20)).....	43
III.3. Préparation des échantillons avant la cémentation.....	43
III.4. Techniques de cémentation.....	44
III.5. Préparation des échantillons après la cémentation.....	45
III.5.1. L'enrobage	45
III.5.2. Le polissage	47
III.5.3. L'attaque chimique.....	49
III.6. Composition chimique	49
III.6.1. Eprouvette de l'acier (XC 20) brute (C1).....	51
III.6.2. Eprouvette de l'acier (XC 20) cémentée durant 2h (C2).....	52
III.6.3. Eprouvette de l'acier (XC 20) cémentée durant 4h (C3).....	53
III.7. Caractérisation métallographique.....	54
III.7.1. Eprouvette de l'acier (XC 20) brute (C1).....	54
III.7.2. Eprouvette de l'acier (XC 20) cémentée durant 2h (C2).....	54
III.7.3. Eprouvette de l'acier (XC 20) cémentée durant 4h (C3).....	55
III.8. Essai de dureté.....	60
III.8.1. Eprouvette de l'acier (XC 20) brute (C1).....	62
III.8.2. Eprouvette de l'acier (XC 20) cémentée durant 2h (C2).....	62
III.8.3. Eprouvette de l'acier (XC 20) cémentée durant 4h (C3).....	62
III.9. Essai de résilience.....	63
III.9.1. Forme de l'éprouvette.....	63
III.9.2. Eprouvette de l'acier (XC 20) brute (C1).....	66
III.9.3. Eprouvette de l'acier (XC 20) cémentée durant 2h (C2).....	66
III.9.4. Eprouvette de l'acier (XC 20) cémentée durant 4h (C3).....	66
III.10. Conclusion	67

Liste des figures

Figure III.1. La machine de tournage.....	44
Figure III.2. Four automatique de cémentation.	45
Figure III.3. La machine tronçonneuse.	46
Figure III.4. La machine d'enrobage « mecapresse ».	46
Figure III.5. Les éprouvettes C1, C2, C3 après l'enrobage.	47
Figure III.6. La machine de polissage grossier.....	48
Figure III.7. La machine de polissage fin.....	48
Figure III.8. La solution d'attaque chimique.	49
Figure III.9. Spectromètre à émission optique (SEO).....	49
Figure III.10. Principe de spectromètre à émission optique (SEO).....	50
Figure III.11. Microscope optique.	55
Figure III.12. La microstructure de l'acier XC20 de l'éprouvette C1 « brute ».....	55
Figure III.13. La microstructure de l'acier XC20 del'éprouvette C2 (cémentée 2h).	56
Figure III.14. La microstructure de l'acier XC20 de l'éprouvette C3 (cémentée 4h).	57
Figure III.15. L'évolution de l'épaisseur de la couche superficielle cémentée dans les éprouvettes C2 et C3.....	58
Figure III.16. L'épaisseur de la couche superficielle cémentée de l'éprouvette C2.....	58
Figure III.17. L'épaisseur de la couche superficielle cémentée de l'éprouvette C3.....	59
Figure III.18. D'uromètre Vickers.	61
Figure III.19. L'évolution de la dureté (surface, cœur) dans les éprouvettes C1, C2, C3.	62
Figure III.20. Forme de l'éprouvette de résilience.	63
Figure III.21. La machine de résilience.	64
Figure III.22. Comparaison des valeurs obtenues de la ténacité après le choc pour les éprouvettes C1, C2 et C3.....	66

Liste des tableaux

Tableau III.1. Composition chimique normalisée de l'acier XC20.....	43
Tableau III.2. Les conditions opératoires de la cémentation pour les éprouvettes (C1, C2, C3).....	44
Tableau III.3. La composition chimique de l'acier XC20 éprouvette C1.....	51
Tableau III.4. La composition chimique de l'acier XC20 éprouvette C2.....	52
Tableau III.5. La composition chimique de l'acier XC20 éprouvette C3.....	53
Tableau III.6. Résultats obtenus de l'essai de dureté Vickers.....	61
Tableau III.7. Résultats expérimentaux d'essai de résilience pour les éprouvettes C1, C2 et C3.....	65

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons toutes les démarches expérimentales qu'on a effectué pour améliorer les différentes propriétés mécaniques, chimiques et tribologiques de l'acier XC20 à faible teneur en carbone (≤ 0.25) par la réalisation des couches superficielles cémentées (dures). Tout en faisant varier certains paramètres d'élaboration (la durée de cémentation), qui influe sur la diffusion du carbone de la source carbonée à la surface de la pièce traitée. Pour mettre en œuvre cette performance on a proposé une série d'essais mécaniques (résilience, dureté) en modifiant l'état de chaque éprouvette, C1 (éprouvette de l'acier XC20 brut (sans traitement)), C2 (éprouvette de l'acier XC20 cémentée durant 2 heures), C3 (éprouvette de l'acier XC20 cémentée durant 4 heures).

III.2. Matériau étudié (acier (XC 20))

Le matériau étudié dans ce travail est l'acier XC20 qui appartient aux aciers non alliés à faible teneur en carbone ($C < 0.25$) pour un traitement thermique et de classe des aciers de cémentation. L'acier XC20 comporte des compositions chimiques de base généralement équilibrées pour lui conférer une modeste propriété mécanique.

Exigences techniques de l'acierXC20		
Critère	Min	Max
C	0.17	0.24
Si	0.17	0.37
Mn	0.35	0.65
P	-	0.035
S	-	0.035
Cr	-	0.25
Ni	-	0.25

Tableau III.1. Composition chimique normalisée de l'acier XC20.

III.3. Préparation des échantillons avant la cémentation

La préparation des échantillons destinés au traitement de cémentation est devisée en trois étapes :

1) Choix de nuance

Les échantillons que nous avons utilisé dans notre étude pour faire nos essais sont issus de barreau cylindrique, de 20 mm de diamètre, de nuance XC20 (acier au pourcentage du carbone ($C < 0.25$)).

2) Découpage des échantillons

Les échantillons ont été découpés à l'aide d'une machine de tournage (découpage à chaud) indiquée dans la figure (III.1). Le découpage se fait à la présence de l'eau pour éviter l'augmentation de la température, donc par conséquence on évite le changement de la structure. Les échantillons cémentés ont été découpés dans le sens parallèle au flux de carbone, afin de pouvoir observer les microstructures induites par ce flux.



Figure III.1. La machine de tournage.

III.4. Techniques de cémentation

La cémentation consiste à enrichir la couche superficielle d'une pièce mécanique en carbone de bois emballé sur le métal ou par les techniques modernes qui appliquent des gaz ou des plasmas carbonés (tels que le dioxyde de carbone ou le méthane). Pour cette étude, les cycles de traitement de cémentation comprennent trois étapes :

- ✓ La première étape consiste à placer les pièces C2 (pour cémenter durant 2h), C3 (pour cémenter durant 4h) de l'acier XC20 (brut) dans un four de cémentation automatique figure (III.2), avec des conditions de traitement prédéterminée dans le tableau (III.2), couplé avec un ordinateur équipé d'un logiciel qui permet la programmation des cycles de traitement.
- ✓ Après la cémentation le four jet les pièces cémentées automatiquement dans une huile de trempe (830°C) pendant 20 minutes ensuite, le robot le soulève et le met dans une machine à laver pour nettoyer de l'huile et le sécher bien.
- ✓ La dernière étape, nous mettons les pièces dans un four de revenu à 120°C pendant 20 minutes pour diminuer les contraintes résiduelles des pièces.

Désignation	Température en °C	Temps (minutes)	Débit du carbone%
C1 (brut, sans traitement)	-	-	-
C2 (cémentée durant 2h)	910	120	1,1
		60	0,85
	830	20	
C3 (cémentée durant 4h)	910	240	1,1
		60	0,85
	830	20	

Tableau III.2. Les conditions opératoires de la cémentation pour les éprouvettes (C1, C2, C3).



Figure III.2. Four automatique de cémentation.

III.5. Préparation des échantillons après la cémentation

Après un traitement thermo-chimique (la cémentation), la première étape consiste à couper les pièces à l'aide d'une tronçonneuse indiquée dans la figure (III.3), elle est utilisée pour découper des échantillons de faibles dimensions par un découpage au jet d'eau (pour éviter tout échauffement des pièces). Ensuite, les échantillons subissent un polissage mécanique se terminant lorsque la surface est en état miroir. Les échantillons sont ensuite attaqués en vue d'observer leurs structures et leurs couches superficielles au microscope métallographique qui permet de révéler la structure et la profondeur de la couche cémentée. On va voir tout cela aux étapes suivantes :

III.5.1. L'enrobage

Les pièces sont enrobées dans une résine polymère afin de faciliter leur manipulation et d'assurer la planéité de la surface lors du polissage à l'aide d'une machine d'enrobage figure (III.4). Nous saisissons les données nécessaires pour enrober les pièces comme le diamètre de la pièce $d=25.4\text{mm}$, la température de l'opération $T=170\text{ °C}$, la durée de l'opération $t=300\text{ seconde}$ et la force d'enrobage $F=900\text{ daN}$, puis on place notre pièce avec une cuillère de poudre de phénolique verte (la résine) ensuite, nous attendons la fin du processus en refroidissant nos pièces avec l'eau pendant 180 seconde (voir la figure III.5).

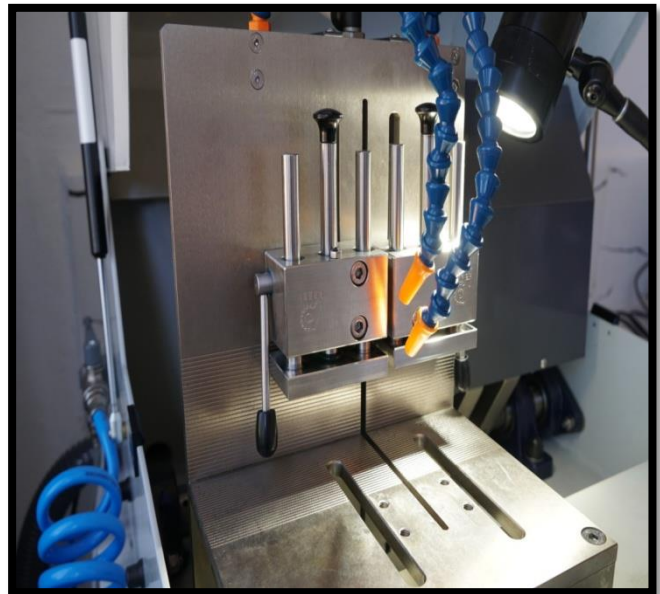


Figure III.3. La machine tronçonneuse.

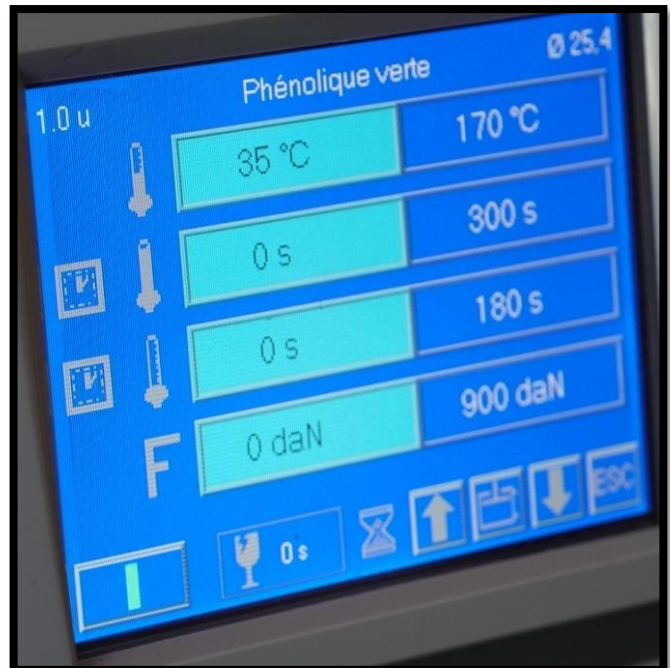


Figure III.4. La machine d'enrobage « mecapresse ».



Figure III.5. Les éprouvettes C1, C2, C3 après l'enrobage.

III.5.2. Le polissage

La deuxième étape sera axée sur le polissage, un procédé de finition permettant d'éliminer les défauts tels que (les rayures) qui introduites lors des étapes précédentes, aussi de faire apparaître sa véritable structure à travers une polisseuse qui travaille ayant des disques abrasifs collés au plateau. Il s'effectue généralement en deux étapes, la première consiste à faire un polissage grossier de la surface.

Avant de commencer, nous devons assurer que le papier abrasif (papier de verre) est placé et bien serré avec des cercles. Les échantillons sont polis à l'eau afin de protéger de toute surchauffe (à cause de frottement), de temps en temps nous changeons le sens de polissage pour ressortir les rayures résiduelles de l'étape précédente et obtenir une image bien claire. Ce polissage se fait de l'ordre croissant de densité de grain par (mm) jusqu'à l'obtention des surfaces polies (P180, P320, P400, P600, P800, P1000). On met des gouttes de l'alcool éthylique (C_2H_5OH) sur la surface des éprouvettes polies pour éviter le phénomène de corrosion. En suite le polissage avec le papier feutre (polissage fin) on trois étapes successive à l'aide d'une pâte en diamant avec trois couleurs (orange, jaune, blanc). Cette étape permet d'obtenir une surface miroir.



Figure III.6. La machine de polissage grossier.



Figure III.7. La machine de polissage fin.

III.5.3. L'attaque chimique

Est un procédé chimique, on utilise après les procédures métallographiques de polissage pour améliorer le contraste de phases afin de révéler leurs microstructures. Une fois le polissage fin est terminé, nous procédons au bon nettoyage des pièces avec l'eau distillée et du coton et on met des gouttes d'alcool éthanol (C_2H_5OH) pour éviter l'oxydation d'eau (la corrosion) puis on les sèche bien, lorsque on termine on les met dans une solution d'attaque (96 % d'alcool éthanol C_2H_5OH + 4 % de nitrate HNO_3) pendant (25seconde) au cours de cette attaque une fine couche est formée sur la surface avec un certain épaisseur en fonction de la composition chimique de notre matériau. Finalement un lavage des pièces pour la deuxième fois et on remet des gouttes d'alcool éthylique, on les sèche pour la dernière fois sans les toucher.



Figure III.8. La solution d'attaque chimique.

III.6. Composition chimique

L'analyse chimique des échantillons a été réalisée grâce à l'utilisation d'une spectrométrie d'émission optique à source étincelle couplée à un ordinateur (voir la figure III.9), afin de déterminer les pourcentages de chaque élément contenu dans l'échantillon de l'acier XC20 avant et après cémentation. Ainsi, les informations obtenues sont envoyées à l'ordinateur qui traite les données à l'aide d'un programme afin d'identifier les éléments qui composent l'échantillon et de calculer les concentrations de ces éléments dans la couche superficielle de l'acier XC20 avant et après cémentation.



Figure III.9. Spectromètre à émission optique (SEO).

❖ Principe de spectromètre à émission optique (SEO)

Son principe consiste à appliquer de l'énergie électrique sous forme d'étincelles (sous argon) générée entre une électrode et un échantillon de métal soit (acier, aluminium, cuivre), les atomes vaporisés étant amenés à un état de haute énergie dans un plasma de décharge. Ces atomes et ions excités dans le plasma de décharge créent un spectre d'émission spécifique à chaque élément. Ainsi, un seul élément génère de nombreuses lignes spectrales d'émission caractéristiques. Par conséquent, on peut dire que la lumière générée par la décharge est une combinaison des raies spectrales générées par les éléments présents dans l'échantillon. Cette lumière est diffractée par un réseau pour extraire le spectre d'émission des éléments. L'intensité de chaque spectre d'émission dépend de la concentration de l'élément dans l'échantillon testé. Les détecteurs (capteurs) mesurent l'intensité du spectre de chaque élément afin d'effectuer une analyse quantitative de ceux-ci [1].

✚ Remarque :

Il ya d'autres éléments qui n'apparaissent pas à cause de l'influence des autres éléments, mais nous les prenons en considération.

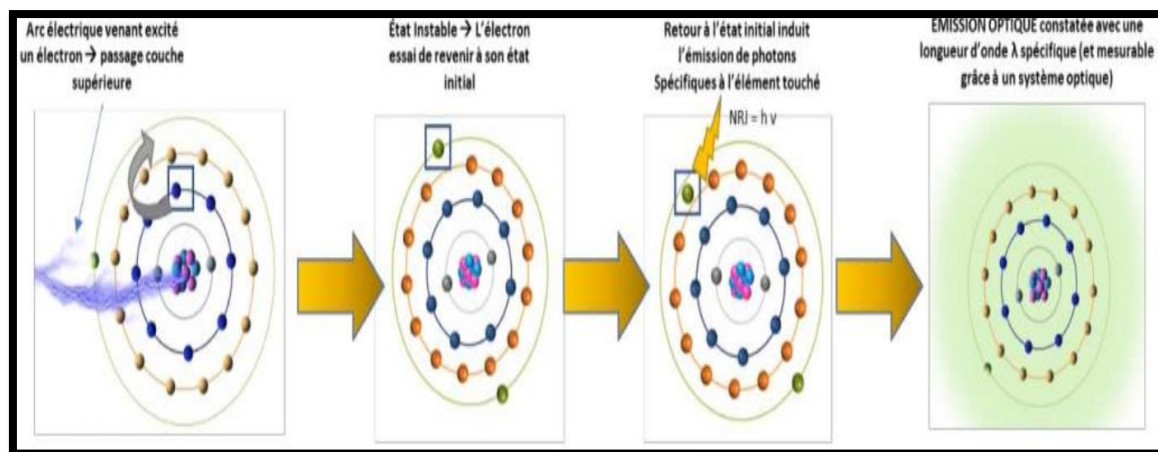


Figure III.10. Principe de spectromètre à émission optique (SEO) [1].

III.6.1. Eprouvette de l'acier (XC 20) brute (C1)

La composition chimique de l'éprouvette C1 (brute) avant traitement de cémentation montre que l'acier XC20 appartient à la classe des aciers ordinaires à faible teneur en carbone C=0.23% avec un pourcentage du fer majoritaire Fe=98.6%. Les éléments d'alliage ne dépassent pas 5% (voir le tableau III.3 ci-dessous).

Eléments	Composition chimique en %			
	Test 01	Test 02	Test 03	La moyenne
C	0,25	0,22	0,21	0,23
Fe	98,6	98,7	98,6	98,6
Si	0,27	0,27	0,27	0,27
Mn	0,45	0,45	0,46	0,45
P	0,017	0,017	0,018	0,018
S	0,015	0,013	0,014	0,014
Cr	0,058	0,057	0,057	0,057
Mo	0,013	0,012	0,012	0,012
Ni	0,042	0,038	0,038	0,040
Cu	0,095	0,096	0,096	0,096
Ti	0,003	0,003	0,003	0,003
V	0,005	0,005	0,004	0,005
W	0,020	0,011	0,010	0,014
B	0,003	0,002	0,002	0,002
N	0,033	0,009	0,009	0,017
Co	0,012	0,011	0,010	0,011
Ag	--	--	--	--
Al	0,026	0,025	0,025	0,025
As	0,010	0,010	0,010	0,010
Au	--	--	--	--
Bi	0,002	0,002	0,002	0,002
Ca	0,002	0,0009	0,0007	0,001
Ce	0,003	0,003	0,003	0,003
Mg	0,001	0,001	0,001	0,001
La	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
Nb	0,008	0,008	0,011	0,009
Pb	0,002	0,003	0,003	0,003
Sb	0,005	0,008	0,009	0,007
Sn	0,008	0,003	0,054	0,008
Se	0,009	<0,001	0,051	0,009
Ta	0,009	<0,001	0,057	0,009
Li	--	--	--	--
Te	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010
Zn	0,002	0,002	0,002	0,002
Zr	0,002	0,002	0,002	0,002

Tableau III.3. La composition chimique de l'acier XC20 de l'éprouvette C1.

III.6.2. Eprouvette de l'acier (XC 20) cémentée durant 2h (C2)

La composition chimique de l'éprouvette C2 cémentée durant 2h permet de déterminer les pourcentages de chaque élément contenu dans l'échantillon, les résultats sont indiqués dans le tableau (III.4) ci-dessous. On constate que le pourcentage du carbone est augmenté de C=0,23% à C=0,75% à cause de la diffusion du carbone à la surface de l'acier XC20 pendant la cémentation. Cependant, une diminution de la quantité du fer à cause d'une composition entre le fer et le carbone en produisant la cémentite Fe₃C. La variété de la proportion des autres éléments d'alliages résulte de l'hétérogénéité de notre nuance.

Eléments	Composition chimique en %			
	Test 01	Test 02	Test 03	La moyenne
C	0,70	0,75	0,80	0,75
Fe	98,4	98,2	98,2	98,3
Si	0,22	0,24	0,25	0,23
Mn	0,37	>0,45	>0,46	>0,42
P	0,008	0,012	0,015	0,012
S	0,015	0,008	0,009	0,011
Cr	0,053	0,060	0,062	0,058
Mo	0,011	0,007	0,007	0,008
Ni	0,053	0,035	0,036	0,041
Cu	0,11	0,11	0,11	0,11
Ti	0,002	0,001	<0,0010	0,001
V	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
W	0,037	0,038	0,033	0,036
B	--	--	--	--
N	0,014	0,008	0,008	0,010
Co	0,012	0,012	0,013	0,012
Ag	--	--	--	--
Al	0,026	0,024	0,024	0,025
As	--	--	--	--
Bi	--	--	--	--
Ca	--	--	--	--
Ce	--	--	--	--
Mg	--	--	--	--
La	--	--	--	--
Nb	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004
Pb	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Sb	--	--	--	--
Sn	--	--	--	--
Se	--	--	--	--
Li	--	--	--	--
Te	--	--	--	--
Zn	--	--	--	--
Zr	--	--	--	--

Tableau III.4. La composition chimique de l'acier XC20 de l'éprouvette C2.

III.6.3. Eprouvette de l'acier (XC 20) cémentée durant 4h (C3)

La composition chimique de l'éprouvette C3 cémentée durant 4h permet de déterminer les pourcentages de chaque élément contenu dans l'échantillon, les résultats sont indiqués dans le tableau (III.5) ci-dessous. On constate que la quantité du carbone devient plus grande $C=0,84\%$ à cause de la continuation de la diffusion du carbone de la source cémentante durant 4 heures en diminuant le pourcentage du fer $Fe=98,1\%$ car il se combine avec le carbone diffusé de la cémentation en composant de la cémentite Fe_3C . La variété de la proportion des autres éléments d'alliages résulte de l'hétérogénéité de notre nuance.

Eléments	Composition chimique en %			
	Test 01	Test 02	Test 03	La moyenne
C	0,82	0,84	0,86	0,84
Fe	98,2	98,1	98,1	98,1
Si	0,22	0,24	0,25	0,23
Mn	0,37	0,45	0,46	0,42
P	0,008	0,012	0,015	0,012
S	0,015	0,08	0,09	0,011
Cr	0,053	0,060	0,062	0,058
Mo	0,011	0,07	0,07	0,08
Ni	0,053	0,035	0,036	0,041
Cu	0,11	0,11	0,11	0,11
Ti	0,002	0,001	0,001	0,001
V	0,002	0,002	0,002	0,002
W	0,037	0,038	0,033	0,036
B	--	--	--	--
N	0,014	0,08	0,08	0,010
Co	0,012	0,012	0,013	0,012
Ag	0,026	0,024	0,024	0,025
Al	--	--	--	--
As	--	--	--	--
Au	--	--	--	--
Bi	--	--	--	--
Ca	--	--	--	--
Mg	--	--	--	--
La	--	--	--	--
Nb	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004
Pb	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Sb	--	--	--	--
Sn	--	--	--	--
Se	--	--	--	--
Li	--	--	--	--
Te	--	--	--	--
Zn	--	--	--	--
Zr	--	--	--	--

Tableau III.5. La composition chimique de l'acier XC20 de l'éprouvette C3.

- Après les résultats précédents de la composition chimique de l'acier XC20 des éprouvettes C1, C2 et C3, nous concluons que la quantité du carbone augmente en fonction de l'augmentation du temps de cémentation et vice versa. D'autre part, une diminution de la quantité du fer due de la composition avec le carbone diffusé en produisant la cémentite Fe_3C .

III.7. Caractérisation métallographique

Les traitements de cémentation modifient la structure globale de la couche superficielle des pièces d'acier XC20 traité. Donc, nous allons analyser les changements structuraux provoqués par ce traitement, en utilisant un microscope optique, et on va examiner la microstructure des couches et des phases formées avant et après cémentation.

❖ La métallographie

Est l'étude de la structure des métaux et des alliages métalliques à travers l'examen des échantillons avec un microscope métallurgique. Les structures observées dans les microscopes sont souvent enregistrées photographiquement [2].

❖ Microscope optique

Le microscope optique est un instrument d'optique muni d'un objectif et d'un oculaire qui permet de grossir l'image d'un objet de petites dimensions (grossissement) et de séparer les détails de cette image afin qu'il soit observable à l'œil nu. Le but de l'examen métallographique des métaux et des alliages est de définir leur structure avec précision, c'est à dire de déterminer qualitativement la nature, la forme et la répartition de leurs constituants [3].

Les observations microscopiques ont été réalisées en évidence au moyen d'une attaque chimique au réactif de nital (96 % d'alcool éthylique C_2H_5OH + 4 % de nitrate HNO_3) pendant 25 secondes. Le réactif est appliqué sur des échantillons préalablement polis comme mentionner précédemment dans les préparations des échantillons après la cémentation (le coupement, l'enrobage au moyen de résine, le polissage, l'attaque chimique).

Les échantillons sont observés à l'aide d'un microscope optique (voir la figure III.11), muni de 5 objectifs ($\times 5$, $\times 10$, $\times 20$, $\times 50$, $\times 100$) et grandissement totale oculaire ($\times 10000$). Équipé d'un appareil photo numérique, de longueur focale de 29 mm et de 7.0 giga-pixels. Cela nous permet d'avoir des différents grossissements en utilisant le zoom de l'appareil et les objectifs du microscope. La nature des microstructures obtenues après cémentation dépend de la répartition du carbone dans la couche et du mode de trempe. Ces observations permettent d'évaluer qualitativement l'état de la microstructure des différents échantillons, les différents constituants pouvant être observés sont les suivants : martensite, austénite résiduelle, carbures Fe_3C , bainite et ferrite.

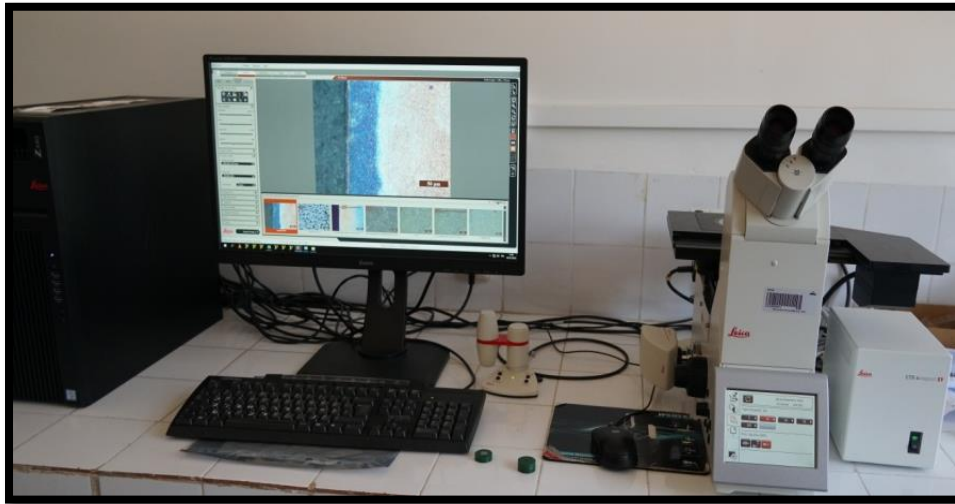


Figure III.11. Microscope optique.

Les micrographies ci-dessous caractérisent les structures qui correspondent à l'état avant et après cémentation.

➤ **Analyse microstructurale**

Selon les microstructurales obtenues avant et après le traitement de cémentation des différents échantillons C1, C2 et C3, les remarques qu'on peut tirer sont :

III.7.1. Eprouvette de l'acier (XC 20) brute (C1)

Sur la micrographie correspondante à la figure (III.12), la structure de l'acier XC20 de l'éprouvette C1 brute révèle une structure composée de ferrite et perlite ce qui confirme que l'acier XC20 brut appartient à la classe des aciers doux (carbone < 0,25).

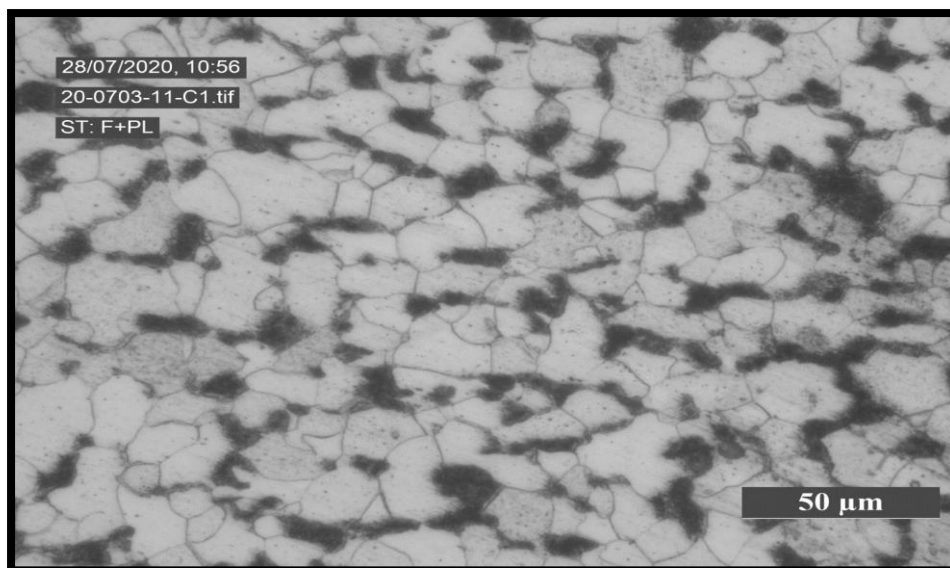


Figure III.12. La microstructure de l'acier XC20 de l'éprouvette C1 « brute ».

III.7.2. Epreuve de l'acier (XC 20) cémentée durant 2h (C2)

Sur la micrographie correspondante à la figure (III.13), l'éprouvette est caractérisée par une structure martensitique de revenu dans laquelle sont imbriqués des carbures précipitant aux niveaux des joints des grains primaires de l'austénite auxquels s'ajoute une quantité d'austénite résiduelle. Après la cémentation et la trempe, l'acier XC20 peut encore contenir de l'austénite résiduelle, une austénite qui ne s'est pas transformée en martensite et qui se situe encore à température ambiante.

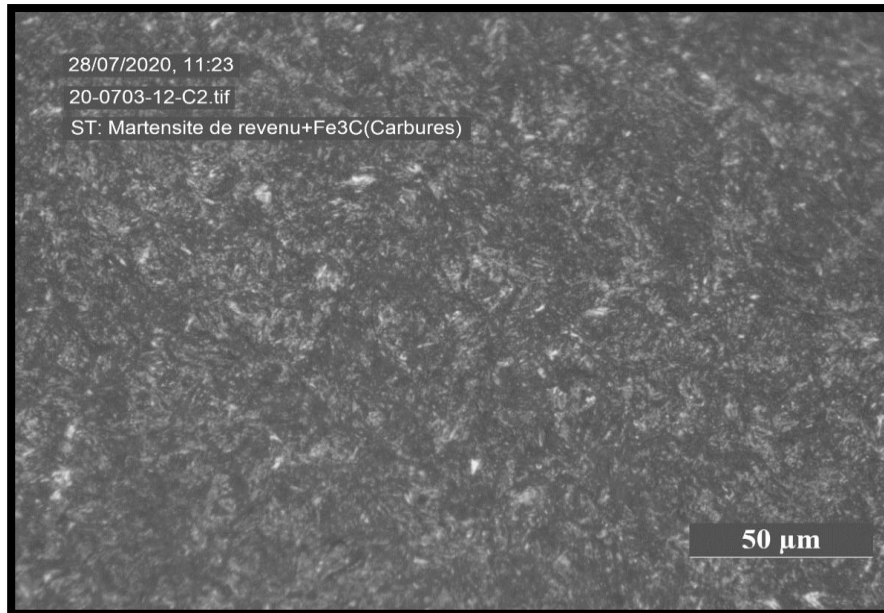


Figure III.13. La microstructure de l'acier XC20 de l'éprouvette C2 (cémentée 2h).

III.7.3. Epreuve de l'acier (XC 20) cémentée durant 4h (C3)

Sur la micrographie correspondante à la figure (III.14), on distingue qu'avec l'augmentation du temps de cémentation, la quantité d'austénite résiduelle diminue et les teneurs en carbures (Fe_3C) et en martensite augmentent relativement. L'opération de trempe à l'huile à la fin du traitement thermo-chimique de cémentation conduit à la transformation de la matrice austénitique en phase martensitique et à la formation des proportions d'austénite résiduelle dans les couches superficielles cémentées de l'acier XC20.

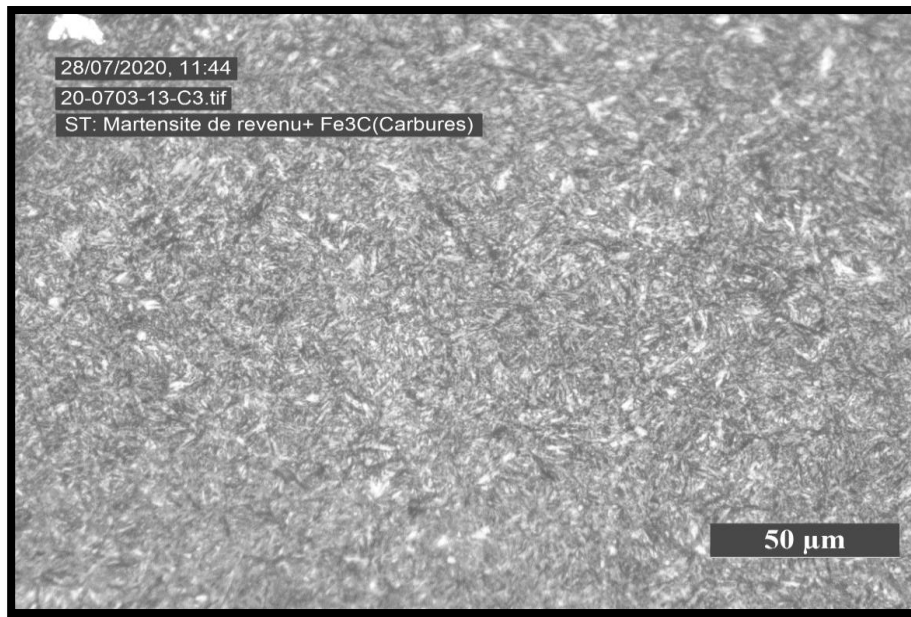


Figure III.14. La microstructure de l'acier XC20 de l'éprouvette C3 (cémentée 4h).

➤ **Comparaison des résultats obtenus pour les éprouvettes C1, C2 et C3 de l'acier XC20 avant et après cémentation**

La mesure des profondeurs de la couche superficielle cémentée durant 2h ou 4h de l'acier XC20 par observation métallographique est une méthode d'évaluation performante. Les profondeurs des couches cémentées correspondant aux éprouvettes C2 et C3 qui sont variables en fonction de la durée de cémentation (2h ou 4h). L'éprouvette C1 n'a aucune couche superficielle cémentée (sans traitement de cémentation (brute)).

D'après les micrographies ci-dessous et l'histogramme présenté dans la figure (III.15) qui représente l'évolution de la profondeur de la couche superficielle cémentée en fonction du temps de cémentation pour les deux éprouvettes cémentées C2 et C3. Les remarques qu'on peut tirer sont :

✓ **Pour l'éprouvette de l'acier (XC 20) cémentée durant 2 h (C2)**

On observe une couche superficielle riche en carbone claire par rapport au temps de traitement, la profondeur moyenne mesurée pour cette éprouvette C2 est $P_m=85.37\mu\text{m}$, une épaisseur n'est pas assez grande, à cause de processus d'enrichissement et de diffusion du carbone d'une source carbonée à la surface de la pièce. Il peut également voir que le cœur d'échantillon demeure inchangé par la carburation (voir la figure III.16).

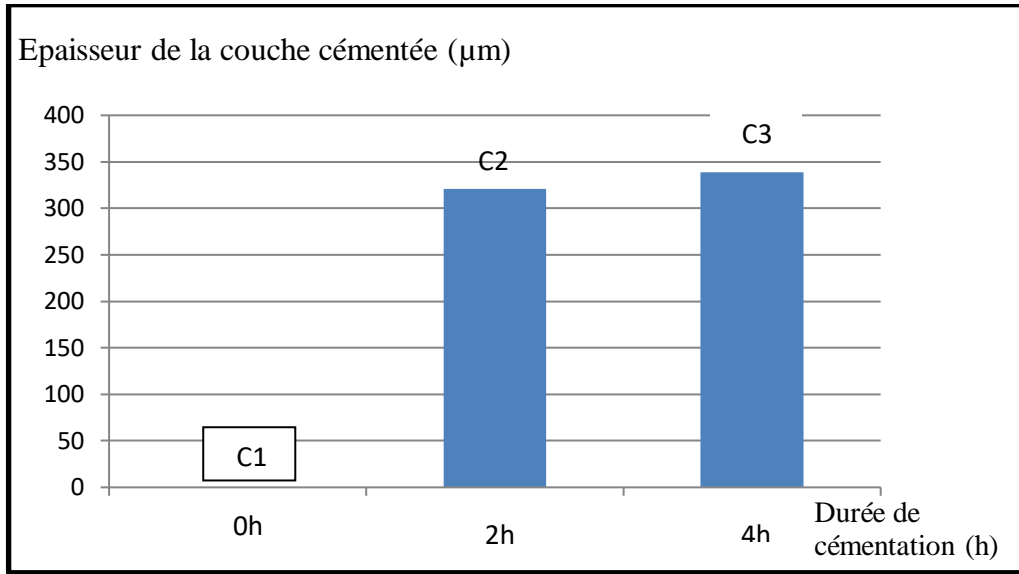


Figure III.15. L'évolution de l'épaisseur de la couche superficielle cimentée dans les éprouvettes C1, C2 et C3.

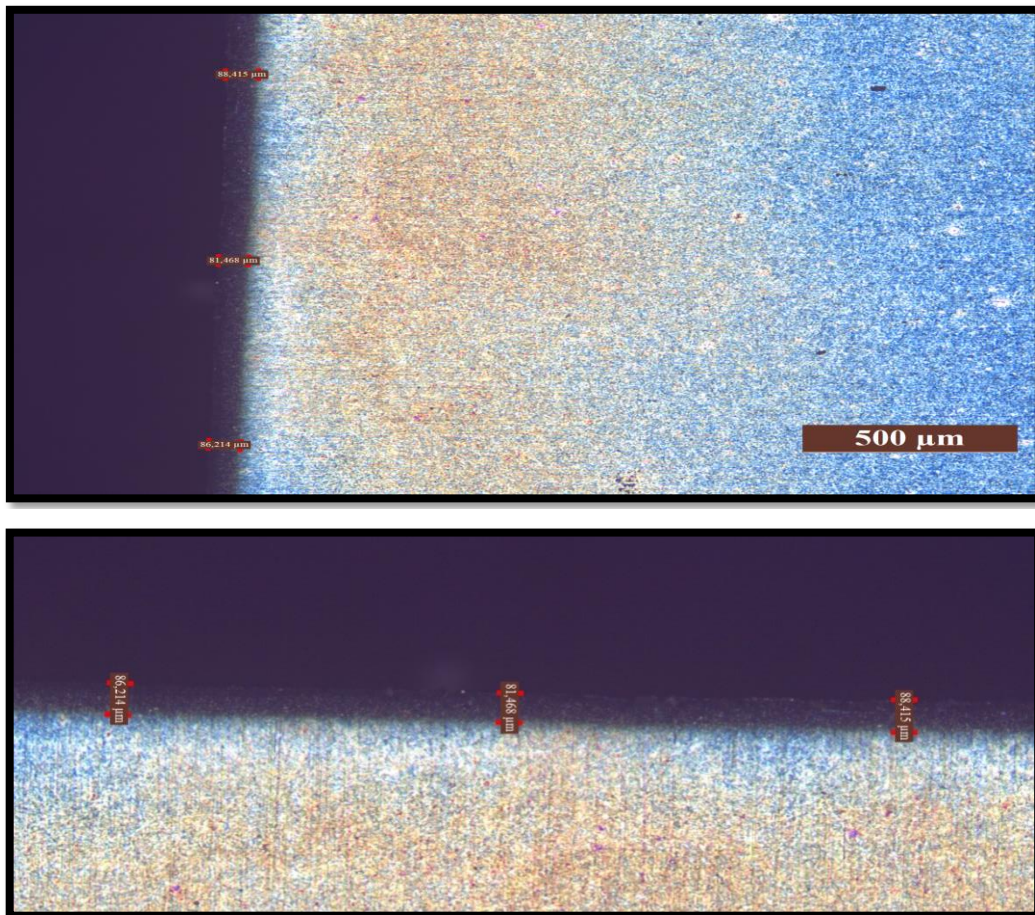


Figure III.16. L'épaisseur de la couche superficielle cimentée de l'éprouvette C2.

✓ Pour l'éprouvette de l'acier (XC 20) cimentée durant 4h (C3)

Il est remarquable de prime abord, que les profondeurs de la couche superficielle cimentée sont observées épaisses par rapport à la pièce C2 (cimentée 2h) car la diffusivité du carbone dans l'austénite augmente en fonction de l'augmentation de la durée de maintien et vice versa. La profondeur moyenne mesurée dans l'éprouvette C3 est $P_m=300,21\mu\text{m}$ (voir la figure III.17). En outre, on observe une augmentation progressive de la concentration superficielle en carbone du solide. Une zone contient du carbone à cause de processus de diffusion du carbone de la surface vers les couches intérieures, qui se trouve avec des concentrations diminuées à mesure que la distance entre l'extrémité et le cœur décroît, c'est la zone de diffusion. Enfin une zone qui représente le substrat où il n'y a pas de diffusion (reste brut). Les résultats expérimentaux montrent, que les profondeurs de la couche de cimentation augmentent avec l'augmentation de la durée de cimentation qui est l'un des principaux facteurs influençant sur l'épaisseur de la zone de diffusion.

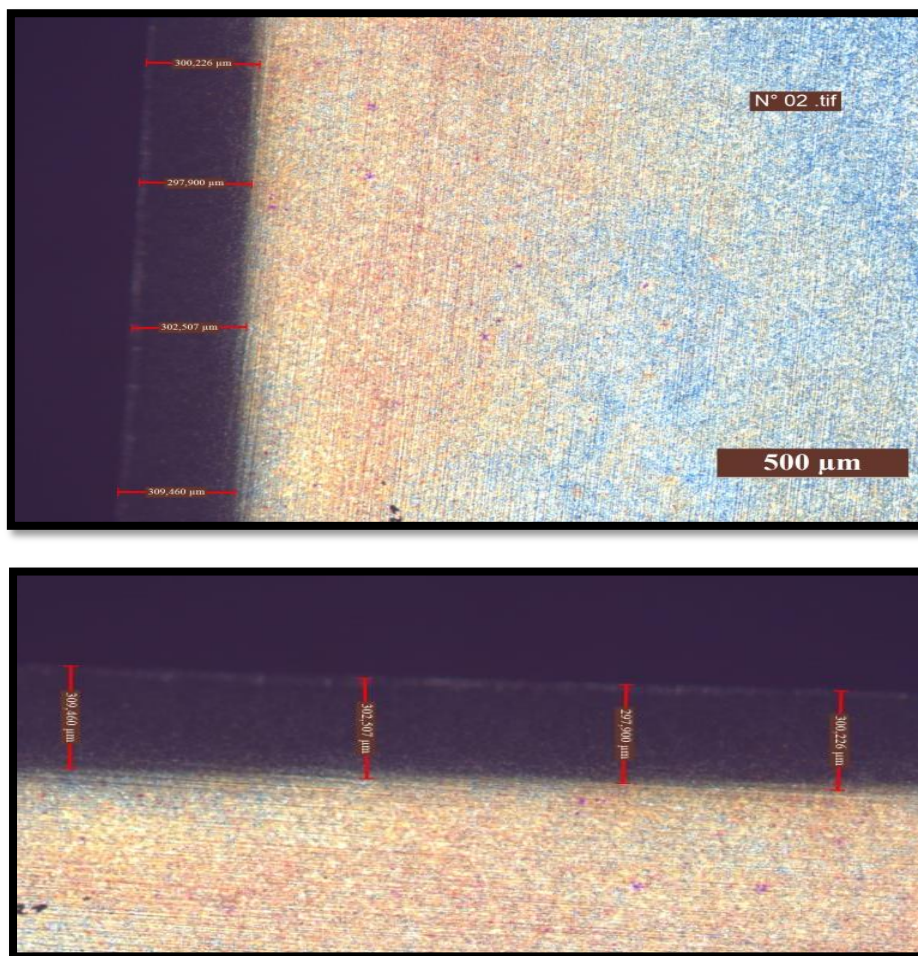


Figure III.17. L'épaisseur de la couche superficielle cimentée de l'éprouvette C2.

- ✓ On constate que l'augmentation de la durée de cémentation permet de diffuser plus du carbone à la surface de l'acier XC20, ce qui conduit à l'augmentation de la profondeur des couches cémentées.

III.8. Essai de dureté

Outre l'examen métallographique effectué au microscope optique après polissage et attaque de l'échantillon au nital, l'un des moyens essentiels nécessaire au métallurgiste pour caractériser un traitement thermique est l'essai de dureté.

La dureté est la capacité d'une matière à résister à la pénétration d'une matière plus dure qu'elle. Elle est aussi déterminée par sa résistance aux rayures. Le diamant constitue le matériau le plus dur. Les aciers à haute teneur en carbone sont durs, les aciers doux, un peu moins [6].

❖ Mesure de la surface

La dureté est un paramètre permettant de caractériser les matériaux, donnée en méga-pascal (MPa) puisqu'elle est le rapport d'une force en Newton (N) sur une surface calculée en millimètres carrés (mm²), mais, par convention ce chiffre sera sans dimension. Il existe plusieurs manières de déterminer la dureté d'un matériau on donne quelques échelles : essais Brinell, Rockwell et Vickers le symbole de dureté est respectivement HB, HR, HV [4].

a) Essais Vickers

L'essai consiste à appliquer dans le matériau un pénétrateur diamant en forme de pyramide à basse carrée, d'angle au sommet 136°, sous l'action d'une charge F maintenue pendant 15 secondes, et à mesurer la diagonale d d'une empreinte après enlèvement de la charge. La dureté Vickers est proportionnelle au rapport F/S. Elle s'exprime par un nombre sans unité, HV, suivi de la valeur de la charge, par exemple : 255 HV 30. La dureté Vickers (HV) est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$HV = 1,854 * F / D^2$$

Où :

F : est la charge appliquée en N :

D : la diagonale de l'empreinte en mm.

H : La profondeur de pénétration est $H = D / 7$.

Cet essai est appliqué principalement aux métaux, mais peut l'être également appliqué aux céramiques avec de très faibles charges.

b) La dureté Brinell (HB)

L'essai Brinell utilise comme poinçon une bille en acier trempé ou en carbure de tungstène de 10 mm de diamètre (D). Il s'applique aux métaux "peu durs". La pression est maintenue pendant 15 à 30 s selon le métal [5].

$$HB = 2F / \pi * D - \sqrt{d^2 + D^2}$$

F : est la charge appliquée en N.

d : le diamètre de l'empreinte en mm.

D : diamètre de la bille en mm.

c) Dureté Rockwell

Mesure de la dureté d'un métal selon l'enfoncement d'une bille d'acier, appelé dureté Rockwell B (**HRB**) ou d'un cône de diamant de 120°, dureté Rockwell C (**HRC**).

L'essai consiste à appliquer une pré-charge de $F_0(N)$ sur le pénétrateur qui s'enfonce d'une profondeur P_0 . On applique une force supplémentaire $F + F_1$, pendant 3 à 8 s, le cône s'enfonce d'une profondeur P_1 . On supprime la force F , le cône reste enfoncé d'une profondeur P_2 . La profondeur rémanente ($P_2 - P_0$) permet le calcul de la dureté, les indices Rockwell peuvent se lire directement sur un cadran gradué [6].

– **Rockwell C (HRC) :**

Le pénétrateur est un cône de diamant de 120° et d'extrémité sphérique ($\varnothing 0,2$ mm).

– **Rockwell B (HRB) :**

Le pénétrateur est une bille d'acier de 1,59 mm de diamètre.



Figure III.18. D'uromètre Vickers.

- L'essai Vickers (HV) convient pour les matériaux homogènes de toute dureté, mais est particulièrement utilisé pour les matériaux les plus durs en couche très mince, car la profondeur de l'empreinte est plus petite : aciers cémentés.

Dans l'entreprise ECMK, nous avons utilisé l'essai dureté Vickers. La valeur Vickers consiste à appliquer dans l'acier XC20 un pénétrateur diamant en forme de pyramide à basse carrée, d'angle au sommet 136° , sous l'action d'une charge $P=60$ kg, la procédure dans sa totalité ne nécessite que quelques secondes jusqu'à 15s. Nous avons trouvé l'ensemble des résultats obtenus qui sont rassemblés dans la figure (III.19) et dans le tableau (III.6) ci-dessous.

N° d'éprouvette		Les pénétrations			
		1 ^{er} test	2 ^{ème} test	3 ^{ème} test	Moyenne
C1 (Brute)		320.5HV	334.7HV	325.9HV	329.6HV
Cémentée 2h	cœur	304HV	356HV	304HV	321HV
	surface	700HV	752HV	700HV	717.33HV
Cémentée 4h	cœur	356HV	304HV	356HV	338.66HV
	surface	752HV	700HV	752HV	734.66HV

Tableau III.6. Résultats obtenus de l'essai de dureté Vickers.

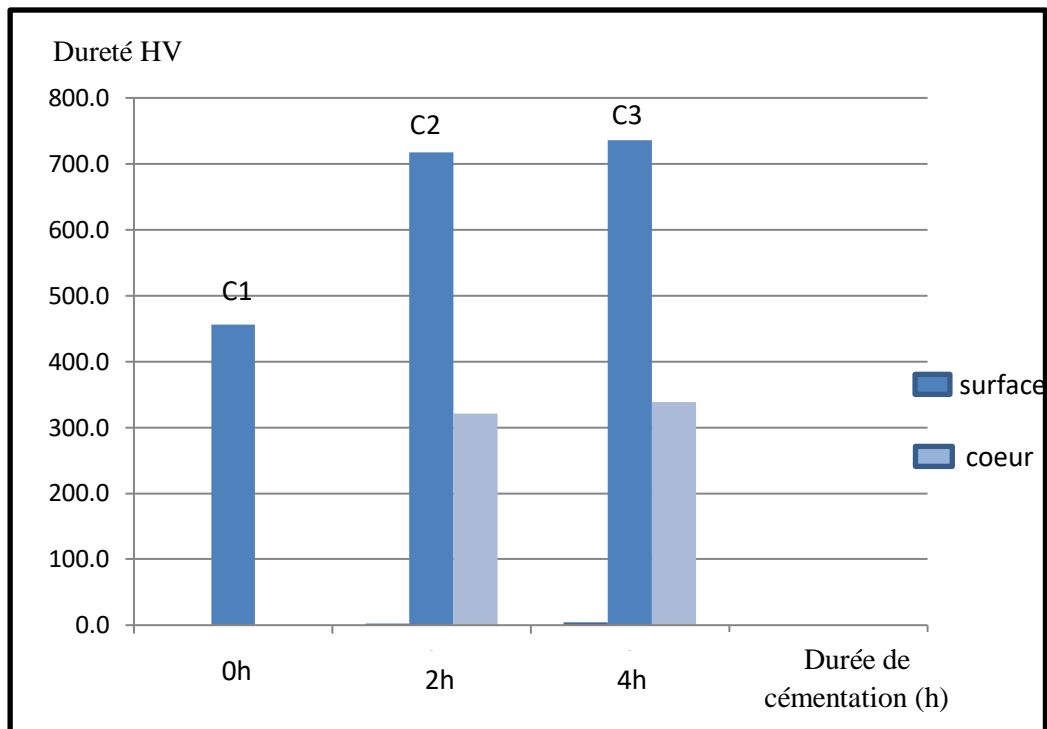


Figure III.19. L'évolution de la dureté (surface, cœur) dans les éprouvettes C1, C2, C3.

III.8.1. Eprouvette de l'acier (XC 20) brute (C1)

La dureté de la surface est semblable au cœur de l'acier XC20 sans traitement (brut) (C1) et les valeurs sont moins importantes, nous avons enregistré une dureté allant jusqu'à 329,6HV car l'acier testé appartient à la classe des aciers doux (carbone < 0,25%).

III.8.2. Eprouvette de l'acier (XC 20) cémentée durant 2h (C2)

Après une cémentation de l'acier XC20 durant 2h, on remarque une augmentation des valeurs des duretés HV dans la couche superficielle cémentée par rapport à la pièce C1 brute et le cœur de l'acier XC20 cémenté 2h. On note une dureté superficielle allant jusqu'à 717,33HV et au cœur est de l'ordre de 321HV. L'austénite résiduelle présente dans les couches superficielles cémentées a influe sur le niveau de dureté de l'acier XC20. La capacité de durcissement par cémentation d'un acier à faible teneur en carbone dépend des paramètres opératoires influant sur la cémentation (la durée de maintien dans notre cas) et du type et de la répartition des éléments d'alliage.

III.8.3. Eprouvette de l'acier (XC 20) cémentée durant 4h (C3)

L'augmentation du temps de traitement de cémentation en surface de l'acier XC20 conduit à une augmentation considérable de la dureté de surface, qui passe jusqu'à 734,66HV à 4 heures de maintien. Ainsi que la dureté reste stable au cœur brut à l'entour de 338,66HV. Cette augmentation de la dureté peut être attribuée ainsi à la diminution de la valeur de la fraction volumique de l'austénite, et de la transformation martensitique de la matrice austénitique au cours de la trempe après l'enrichissement en carbone provoquant un durcissement des couches superficielles des aciers XC20 cémentés (2h ou 4h). Les profils de fraction massique de carbone développés au cours du traitement de cémentation profonde conduisent à un niveau important de dureté des couches superficielles des aciers. Finalement, à ce stade, On peut déduire l'influence du temps de cémentation sur l'évolution de la dureté des surfaces cémentées. En revanche, le traitement de cémentation n'influe pas sur la dureté du cœur de l'acier XC20 traité (2h ou 4h).

III.9. Essai de résilience

La résilience est l'énergie exprimée en J/cm^2 , nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette placée sur deux appuis. Ces essais sont destinés à caractériser la fragilisation du métal sous l'action d'un choc soit pour la mesure des propriétés mécaniques du métal à l'ambiante [7].

III.9.1. Forme de l'éprouvette

Dans notre étude on utilise des éprouvettes de résilience prismatiques à l'entaille U, ses dimensions et la forme que nous avons utilisée sont indiquées dans la figure (III.20).

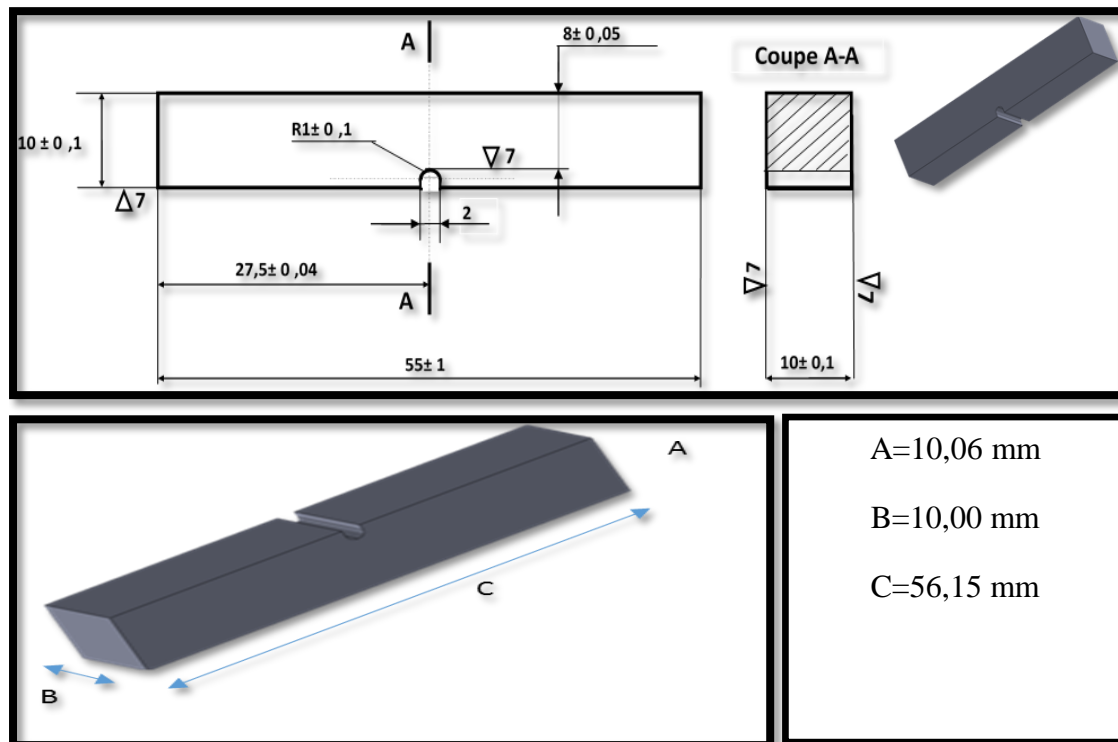


Figure III.20. Forme de l'éprouvette de résilience.

✓ Mesure de résilience

L'essai Charpy est très utilisé industriellement pour caractériser la fragilité des matériaux et principalement des métaux. Son développement, qui a conduit à l'établissement de normes, résulte de la facilité et de la rapidité de son exécution, mais également de la faible quantité de matière nécessaire.

✓ Principe de l'essai

Ils consistent à rompre une éprouvette entaillée (l'entaille a pour but de fragiliser le matériau). On met l'éprouvette Charpy sous l'impact d'un "mouton-pendule". L'éprouvette est posée sur un support dont la distance entre les faces d'appui est de 40 mm, la face de frappe par le marteau se fait toujours sur la face opposée à l'entaille. L'énergie absorbée est obtenue en comparant la différence d'énergie potentielle entre le départ du pendule et la fin de l'essai. La machine est munie d'index permettant de connaître la hauteur du pendule au départ ainsi que la position la plus haute que le pendule atteindra après la rupture de l'éprouvette. La formule utilisée pour calculer l'énergie absorbée par :

$$W = P(h_0 - h_1)$$

- W : est l'énergie absorbée en joules ;
- P : est le poids du pendule en Newton ;
- h_0 : est la hauteur de départ en mètre du pendule ;
- h_1 : est la hauteur finale en mètre du pendule après le choc.

La ténacité K_{cu} établit suivant la norme d'une éprouvette avec entaille en U [8].

$$K_{cu} (\text{J}/\text{cm}^2) = W/S$$



Figure III.21. La machine de résilience.

- Trois essais de résilience ont été réalisés sur les éprouvettes C1 (brute), C2, C3. Tous ces essais ont été instrumentés afin d'enregistrer l'évolution de la force L. Après le choc des éprouvettes de l'acier XC20 (C1, C2 et C3) avant et après le traitement de la cémentation, nous avons trouvé l'ensemble des résultats est rassemblé dans le tableau (III.7) présenté ci-dessous.







N° de l'éprouvette	Avant le choc	Après le choc	Ténacité (J/cm^2)
C1			163
C2			55.7
C3			43.7

Tableau III.7. Résultats expérimentaux d'essai de résilience pour les éprouvettes C1, C2 et C3.

III.9.2. Epreuve de l'acier (XC 20) brute (C1)

On observe une rupture mi-fragile de l'éprouvette C1 après le choc. L'acier XC20 brut est doux en donnant une ténacité $K_{cu} = 163 \text{ J/cm}^2$ ce qui permet d'absorber relativement le choc. La rupture mi-fragile est caractérisée par une cassure avec une déformation plastique moyenne.

III.9.3. Epreuve de l'acier (XC 20) cémentée durant 2h (C2)

Après une cémentation de l'acier XC20 durant 2 heures, on observe que l'éprouvette C2 devient fragile et sa ténacité est chutée à $K_{cu} = 55.7 \text{ J/cm}^2$. Cela est lié à la présence des constituants durs et fragilisant (cémentite Fe_3C) connus par leurs faibles résistances au choc et à la fissuration.

III.9.4. Epreuve de l'acier (XC 20) cémentée durant 4h (C3)

Après une cémentation de l'acier XC20 durant 4 heures, On remarque que l'éprouvette C3 devient fragile encore plus et que sa ténacité est chutée plus jusqu'à $K_{cu} = 43.7 \text{ J/cm}^2$. Cette diminution observable de la ténacité après la cémentation est due à la fragilité supplémentaire provoquée par le durcissement superficiel, il s'établit dans la zone superficielle un champ de contraintes résiduelles de compression dont l'effet bénéfique sur la résistance à la fatigue est remarquable (dureté) et contraintes résiduelles sont étroitement liées aux conditions de traitement tels que à la composition chimique et à la microstructure initiale des pièces. Les résultats expérimentaux montrent que plus la durée de cémentation est longue plus l'acier XC20 perdra sa ténacité et devient fragile (voir la figure III.22).

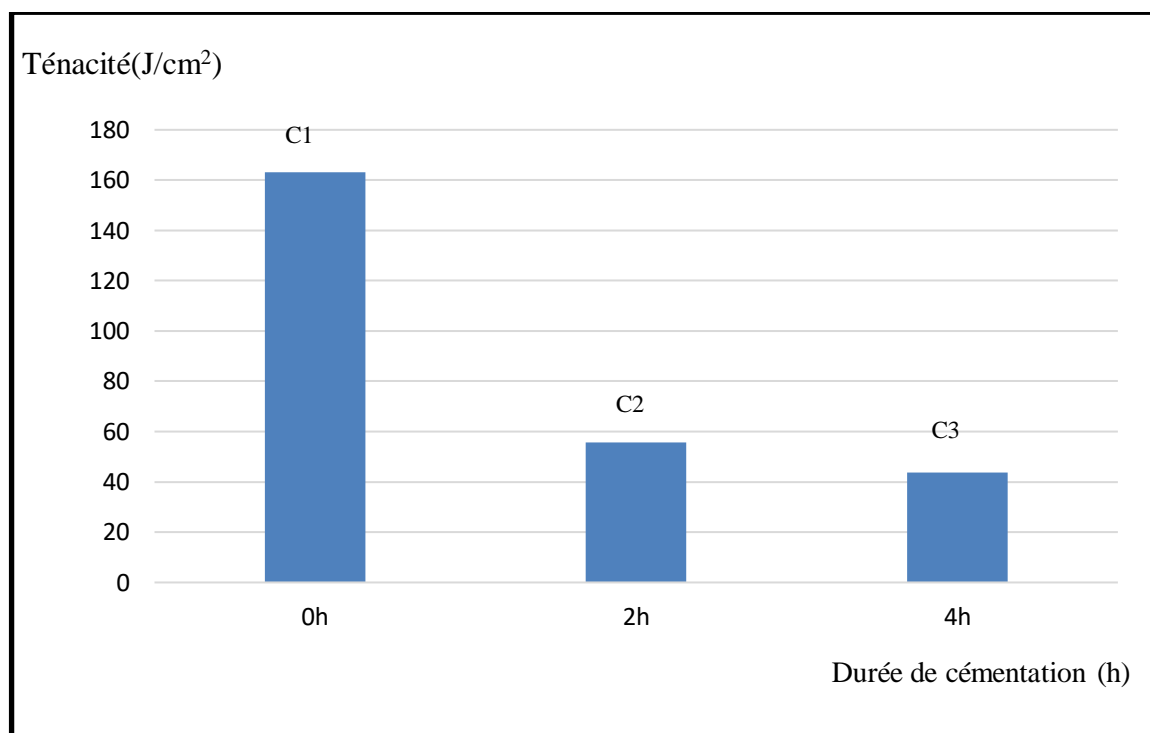


Figure III.22. Comparaison des valeurs obtenues de la ténacité après le choc pour les éprouvettes C1, C2 et C3.

III.10. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la technique de cémentation de l'acier XC20. Ce traitement thermochimique consiste à enrichir la surface du matériau en carbone.

Les objectifs de notre travail comporte à réaliser des traitements de cémentation profonde à haute température sur un acier à faible teneur en carbone (XC20) dans le but de mettre en évidence l'influence du temps de cémentation sur la cinétique de diffusion du carbone ainsi que sur les configurations des couches superficielles cémentées. Les principales conclusions obtenues après les caractérisations des éprouvettes C1, C2 et C3 sont les suivantes :

- ✓ L'acier XC20 appartient à la classe des aciers doux et des aciers de cémentation (carbone <0.25), et comporte des caractéristiques mécaniques de base généralement équilibrées pour lui conférer une modeste propriété mécanique (résistance mécanique, force de traction, dureté, ténacité, l'énergie absorbée au choc...etc).
- ✓ La détermination expérimentale du coefficient de diffusion du carbone en phase austénitique ainsi aux configurations de couches de carbure obtenues sur l'acier XC20 dépend des paramètres opératoires de la cémentation (la durée de maintien dans notre cas).
- ✓ L'influence du temps de cémentation sur l'évolution de la dureté des surfaces cémentées de l'acier XC20. Nous remarquons une amélioration de la dureté après la cémentation.
- ✓ L'influence du temps de cémentation sur la résistance au choc pour les éprouvettes C2 et C3 de l'acier XC20. Nous remarquons une chute de ténacité après la cémentation.

N°

Références bibliographiques de chapitre III

- [1] Laurent antoniand, alain galerie « corrosion sèche des métaux », techniques de l'ingénieur, M 4224.
- [2] K.geels « metallographic and materialographic specimen preparation, light microscopy, image analysis and hardness testing » astm international, 2006.
- [3] J.p.peyre,c.tournier « choix des traitements thermiques superficiels » c.e.t.i.m.-1986.
- [4] Rachid baleh « flambage plastique quasi-statique et dynamique de structures tubulaires métalliques sous sollicitations simple et complexe-système d'absorptions d'énergie-via un nouveau dispositif expérimental » 2004.
- [5] Jean barralis et Gérardmeader « Précis métallurgique, afnor nathan », Paris 2000.
- [6] J.R. davis « surface hardening of steels -understanding the basics »; asm international, 2002.
- [7] G.a « lausmann, electrodeposited hard chromium, surface and coatings technology » 86-87 (1996).
- [8] R.quatremeret j.phtigno « précis de construction mécanique, dessin conception et normalisation »7 eme édition, afnor nathan.

Conclusion générale

Conclusion générale

Nous concluons que le temps de maintien du gaz carburant durant la cémentation est parmi les paramètres opératoires qui influent sur le ratio d'épaisseur de la couche cémentée. Avant la cémentation, l'acier XC20 brut (C1) comporte des caractéristiques chimiques, structurales de base généralement équilibrées pour lui conférer une modeste propriété mécanique (dureté, ténacité, résistance au choc,...) et que sa quantité de carbone ($C < 0.25$) en confirmant que cette nuance appartient à la classe des aciers doux et de cémentation.

Après la cémentation, la quantité de carbone diffusée à la surface de l'acier XC20 (C2 et C3) dépend de la durée de cémentation ce qui permet de maîtriser la profondeur de la couche cémentée. Une longue durée de cémentation conduit à produire des couches superficielles dures et profondes en produisant une fragilité, cette dernière influe sur la résistance au choc en diminuant la ténacité de l'acier XC20, car il est résultant de l'association d'une couche superficielle cémentée (dure et fragile) reposant sur un cœur (tendre et tenace).

Il paraît avantageux d'étudier dans quelle mesure on peut établir la relation entre le temps de cémentation et les modifications des propriétés chimiques, structurales et mécaniques de l'acier XC20.