

Université ABBES LAGHROUR Khenchela



جامعة عباس لغرور خنشلة

Faculté des Sciences et Technologie

كلية العلوم و التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

قسم الهندسة الميكانيكية



Mémoire

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

Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Génie des Matériaux

Thème

L'effet de potentiel du carbone sur la
microstructure et la ductilité de l'acier
XC20 cémenté

Réalisés par :

- BOUCHERB Chemss elhouda
- HALKOUM Iman

Membres du jury

- Président : **CHAHAOUI Oualid** Pr Univ. Abbès Laghrou - Khenchela
- Rapporteur : **SAOUDI Abdenour** MCA Univ. Abbès Laghrou - Khenchela
- Co-rapporteur : **DJEBAILI Hamid** Pr Univ. Abbès Laghrou - Khenchela
- Examineur : **MANSOURI Khalifa** MCB Univ. Abbès Laghrou - Khenchela

Année universitaire : 2021-2022

Remerciements

En préambule à ce travail nous remercîment ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces années d'étude.

Nous voudrions remercier Dr. Saoudi Abdenour et Pr. Djebaili Hamid pour m'avoir suivi durant mon travail dans le cadre de ce mémoire, pour ses conseils précieux, et la compétence de son encadrement.

Nous tenons à exprimer nos sincères remercîments à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leur compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Sans oublier tout le personnel de L'unité ECMK, pour leurs coopérations et leurs gentillesse.

Dédicaces

Je dédie ce Modeste travail à

*Ma mère qui était mon assistante jusqu'à ce que j'atteigne ce
niveau.*

A Mon père.

A ma famille, petite et grande.

A tous ceux qui ont contribué au succès de notre travail.

A mes sœurs et mes frères.

A tout mes amies.

Je dédie aussi ce travail à mon fiancé m'a beaucoup aidé.

Imen

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à

Mes chers parents Ma mère et Mon père pour leur patience, leur soutien et leurs encouragements.

A toute ma famille : Bouchareb.

A Mes sœurs.

A Mes frères.

A Mes amies spécialement Chaima Maarouf

A tous mes amis(es) sans exception.

A toutes les personnes qui ont m'aide de près ou de loin.

Chams

Résumé

L'objectif de notre travail est d'étudier l'influence de potentiel du carbone (C_p) durant la cémentation sur la cinétique de diffusion du carbone à la surface de l'acier XC20, afin d'analyser les changements chimiques et structuraux de l'acier XC20 avant et après cémentation suivi d'une trempe et revenu. Nous avons réalisé une série des éprouvettes de résilience (choc), C_1 (en acier XC20 brut), C_2 (en acier XC20 cémenté avec $C_p=0,8\%$) et C_3 (en acier XC20 cémenté avec $C_p=1,1\%$). Les résultats obtenus montrent qu'il existe une élévation de la quantité du carbone dans la couche superficielle cémentée, ce qui a permis de modifier les propriétés structurales et mécaniques de l'acier XC20 (dureté HV, la résistance au choc et ténacité). Finalement, l'acier XC20 cémenté des éprouvettes C_2 et C_3 est résultant de l'association d'une couche superficielle cémentée (dure et fragile) reposant sur un cœur (tendre et ductile).

Abstract

The objective of our work is to study the influence of carbon potential (C_p) during carburizing on the kinetics of carbon diffusion on the surface of XC20 steel, in order to analyze the chemical and structural changes of the XC20 steel before and after carburizing followed by quenching and tempering. We produced a series of impact test specimens, C_1 (in raw XC20 steel), C_2 (in case-hardened XC20 steel with $C_p=0.8\%$) and C_3 (in case-hardened XC20 steel with $C_p=1.1\%$). The results obtained show that there is an increase in the quantity of carbon in the cemented surface layer, which has made it possible to modify the structural and mechanical properties of XC20 steel (HV hardness, impact resistance and toughness). Finally, the case-hardened XC20 steel of the C_2 and C_3 specimens results from the combination of a case-hardened surface layer (hard and brittle) resting on a core (soft and ductile).

ملخص

الهدف من عملنا هو دراسة تأثير تدفق الكربون (C_p) أثناء الكربنة على حركية انتشار الكربون على سطح فولاذ XC20 ، من أجل تحليل التغييرات الكيميائية والهيكلية للفولاذ XC20 قبل وبعد الكربنة متبوعاً بالتبريد والتلطيف. لقد أنتجنا سلسلة من عينات اختبار التأثير ، C_1 (من الفولاذ XC20 الخام) ، C_2 (من فولاذ XC20 المكرين مع $C_p=0.8\%$) و C_3 (من الفولاذ XC20 المكرين مع $C_p=1.1\%$). تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن هناك زيادة في كمية الكربون في الطبقة السطحية المكربنة ، مما جعل من الممكن تعديل الخصائص الهيكلية والميكانيكية للفولاذ XC20 (صلابة HV ومقاومة الصدمات والمتانة). أخيراً ، يتكون الفولاذ XC20 المقوى لعينات C_2 و C_3 من مزيج من طبقة سطحية (صلبة وهشة) تتركز على قلب (ناعم و لين).

Table des matières

Remerciements.....	i
Dédicaces.....	ii
Résumé.....	A
Table des matières.....	B
Liste des figures.....	C
Liste des tableaux.....	D
Introduction générale.....	I

Chapitre I : Univers des aciers et traitements thermiques classiques

I.1. Introduction.....	1
I.2. Définition de l'acier.....	1
I.2.1. Fabrication des aciers.....	2
I.2.2. Composition chimique des aciers.....	2
I.2.3. Influence des éléments d'addition sur les aciers.....	2
I.2.4. Les différentes phases des aciers.....	3
I.2.5. Classification des aciers.....	6
I.3. Classification des traitements thermiques classiques des aciers.....	10
I.3.1. Principe de recuit.....	10
I.3.2. Principe de trempe.....	13
I.3.3. Principe de revenu.....	17
I.4. Domaine d'application des aciers.....	19
I.5. Défauts des aciers.....	19
I.6. Conclusion.....	20
Références bibliographiques de chapitre I.....	21

Chapitre II : Les traitements thermochimiques

II.1. Introduction.....	24
II.2. Cémentation.....	24
II.2.1. But et principe de la cémentation.....	24
II.2.2. Diagramme d'équilibre fer-C.....	25
II.2.3. Préparation de la pièce avant et après cémentation.....	26
II.2.4. Les différents types de cémentation.....	27
II.2.5. Mesure de l'épaisseur des couches cémentées.....	29
II.2.6. Défaut de cémentation.....	30
II.3. Nitruration.....	31

Table des matières

II.3.1. But et principe de la nitruration.....	31
II.3.2. Diagramme d'équilibre fer-azote.....	32
II.3.3. Préparation de la pièce avant et après nitruration.....	34
II.3.4. Les différentes classes de traitement de nitruration.....	34
II.3.5. Défaut de nitruration.....	37
II.4. Boruration.....	37
II.4.1. But de boruration.....	37
II.4.2. Principe de boruration.....	38
II.4.3. Diagramme d'équilibre fer-Bore.....	38
II.4.4. Les différents types de boruration.....	39
II.4.5. Les applications industrielles de la boruration.....	40
II.4.6. Défaut de boruration.....	41
II.5. Conclusion.....	41
Référence bibliographique de chapitre II.....	42

Chapitre III : Techniques expérimentales de cémentation- Résultats et discussions

III.1. Introduction.....	45
III.2. Matériau étudié (acier (XC 20)).....	45
III.3. Usinage des éprouvettes de résilience C₁, C₂ et C₃.....	46
III.4. Technique de cémentation.....	47
III.5. Préparation des éprouvettes C₁, C₂ et C₃ pour caractérisation.....	48
III.5.1. Découpage.....	48
III.5.2. L'enrobage.....	49
III.5.3. Polissage mécanique.....	50
III.5.4. L'attaque chimique.....	51
III.6. Cristallographie des éprouvettes C₁, C₂ et C₃.....	52
III.6.1. Microstructure de l'éprouvette C ₁ en acier (XC20) brut.....	52
III.6.2. Microstructure de l'éprouvette C ₂ en acier (XC20) cémenté C _p =0.8%.....	53
III.6.3. Microstructure de l'éprouvette C ₃ en acier (XC20) cémenté C _p =1.1%.....	54
III.7. Microdureté.....	55
III.7.1. Résultats de microdureté des éprouvettes C ₁ , C ₂ et C ₃	56
III.8. Essai de résilience (choc).....	57
III.8.1. Définition.....	57
III.8.2. Résultats de l'essai de résilience.....	58
III.8.2.1. Eprouvette C ₁ en acier XC20 (Brut).....	58
III.8.2.2. Eprouvette C ₂ en acier XC20 cémenté (C _p =0,8%).....	58

Table des matières

III.8.2.3. Eprouvette C ₃ en acier XC20 cémenté (C _p =1,1%)	59
III.9. Conclusion.....	60
Références bibliographiques de chapitre III.....	61
Conclusion générale.....	62

Liste des figures

Chapitre I : Univers des aciers et traitements thermiques classiques

Figure I.1. Le but des traitements thermiques	1
Figure I.2. Filières d'élaboration d'acier	2
Figure I.3. Les différentes phases de l'acier	6
Figure I.4. Acier de construction.....	9
Figure I.5. Acier à outils.....	10
Figure I.6. Cycle thermique de recuit.....	11
Figure I.7. Procédé de la trempe sous zéro.....	15
Figure I.8. Cycle de cémentation avec une double trempe.....	16
Figure I.9. Cycle combiné de traitement thermique de Trempe + Revenu	17
Figure I.10. Cycle complet Trempe, Revenu	18

Chapitre II : Les traitements thermochimiques

Figure II.1. Principe de la cémentation	25
Figure II.2. Diagramme d'équilibre fer-carbone	25
Figure II.3. Cémentation solide.....	28
Figure II.4. Cémentation gazeuse.....	28
Figure II.5. Représentation d'une cémentation liquide	29
Figure II.6. Profondeur conventionnelle de cémentation.....	30
Figure II.7. Schéma de principe de nitruration.....	31
Figure II.8. Couleur d'une pièce après nitruration.....	32
Figure II.9. Diagramme d'équilibre fer-azote	33
Figure II.10. Nitruration gazeuse	35
Figure II.11. Nitruration liquide.....	36

Liste des figures

Figure II.12. Schéma d'un dispositif de nitruration ionique	37
Figure II.13. Schéma du dispositif expérimental de boruration	38
Figure II.14. Diagramme d'équilibre fer-bore	39
Figure II.15. Couche de boruration sur l'engrenage	40

Chapitre III : Techniques expérimentales de cémentation- Résultats et discussions

Figure III.1. Spectromètre à émission optique (SEO).....	45
Figure III.2. Machine de tournage	46
Figure III.3. Machine de rectification cylindrique	46
Figure III.4. Dimensions standard de l'éprouvette de résilience (Charpy U)	47
Figure III.5. Four de cémentation gazeuse.....	48
Figure III.6. Four de trempe et revenu	48
Figure III.7. Tronçonneuse à disque lubrifié.....	49
Figure III.8. Enrobeuse	49
Figure III.9. Polisseuse automatique.....	50
Figure III.10. Papier abrasif	51
Figure III.11. La solution d'attaque chimique métallographie.....	51
Figure III.12. Microscope optique	52
Figure III.13. Microstructure de l'éprouvette C ₁ en acier XC20 (brut)	52
Figure III.14. Microstructure de l'éprouvette C ₂ en acier XC20 cémenté à C _p =0.8%	53
Figure III.15. Microstructure de l'éprouvette C ₃ en acier XC20 cémenté à C _p =1.1%	54
Figure III.16. Dureté Vickers (HV)	55
Figure III.17. Microduromètre Vickers (HV)	56
Figure III.18. Profil de la micro-dureté (HV) de l'acier XC 20 avant et après cémentation de la couche superficielle vers le cœur des éprouvettes C ₁ , C ₂ et C ₃	57
Figure III.19. Éprouvette C ₁ en acier XC20 (brut) avant et après le choc.....	58
Figure III.20. Éprouvette C ₂ en acier XC20 cémenté à C _p =0,8% avant et après le choc.....	58
Figure III.21. Éprouvette C ₂ en acier XC20 cémenté à C _p =1.1% avant et après le choc.....	59

Liste des tableaux

Chapitre I : Univers des aciers et traitements thermiques classiques

Tableau I.1. Pourcentage des éléments d'additions	4
Tableau I.2. Classification des aciers au carbone suivant la composition chimique.....	7
Tableau I.3. Classification des aciers alliés suivant la composition chimique.....	7
Tableau I.4. Les classes d'aciers à outils	9

Chapitre II : Les traitements thermochimiques

Tableau II.1. Caractéristiques cristallographiques des phases du système fer- azote.....	33
Tableau II.2. Quelques exemples d'applications industrielles des pièces borures.....	41

Chapitre III : Techniques expérimentales de cémentation- Résultats et discussions

Tableau III.1. Composition chimique de l'acier XC20 non traité (brut)	45
Tableau III.2. Résultats de l'énergie absorbée et ténacité de l'acier XC20 brut après un essai choc	58
Tableau III.3. Résultats de l'énergie absorbée et ténacité de l'acier XC20 cémenté à $C_p=0.8\%$ après un essai choc	59
Tableau III.4. Résultats de l'énergie absorbée et ténacité de l'acier XC20 cémenté à $C_p=1.1\%$ après un essai choc.....	59

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

Aujourd'hui l'acier a pris une place prépondérante dans la fabrication industrielle. En effet, grâce à son bas coût de fabrication, ses bonnes propriétés mécaniques et thermiques. Ce matériau se trouve sous différentes formes et tailles, pour des applications nombreuses et variées.

La cémentation est l'un des traitements thermochimiques 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 surfaciques des aciers à faible teneur en carbone ($C < 0.3\%$).

Notre travail de mémoire est pour étudier l'effet de potentiel du carbone durant la cémentation sur la quantité du carbone diffusée à la couche superficielle et les propriétés obtenues après cémentation de l'acier XC 20.

Notre mémoire se compose de trois chapitres distincts :

- Chapitre I : présente des généralités sur les aciers en déterminant ses compositions chimiques, les microstructures et leurs propriétés mécaniques, et des descriptions sur les traitements thermiques classiques des aciers (trempe, recuit et le revenu).
- Chapitre II : est pour mettre en évidence les notions de bases des traitements thermochimiques, cémentation, nitruration et boruration en présentant les paramètres opératoires de chaque traitement.
- Chapitre III : est destiné à l'étude expérimentale en analysant l'influence du potentiel de carbone (C_p) durant la cémentation sur la cinétique de diffusion du carbone dans la couche superficielle cémentée de l'acier XC20, en utilisant de trois éprouvettes de résilience (C_1 , C_2 et C_3). Finalement, nous avons discuté les résultats obtenus de la structure, dureté Vickers et résilience avant et après cémentation.

Chapitre I :
Univers des aciers et
traitements thermiques
classiques

I.1. Introduction

Depuis longtemps, l'acier joue un rôle très important dans la vie quotidienne des hommes. Il est utilisé dans plusieurs domaines. Il est à l'origine de toutes les révolutions scientifiques et industrielles [1]. Les traitements thermiques se définissent comme étant « l'ensemble des opérations de chauffage et de refroidissement contrôlé » appliqués à des métaux et alliages. De manière générale, les traitements thermiques agissent au niveau microstructural des métaux (matrice, précipités, distribution, etc.). Ils permettent de modifier les propriétés mécaniques (en les augmentant ou en les diminuant), les propriétés physiques (par exemple, les conductibilités thermiques et électriques) et les propriétés chimiques (par exemple, la résistance en corrosion). 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) [2].

A quoi consiste à subir une pièce un traitement thermique [3].

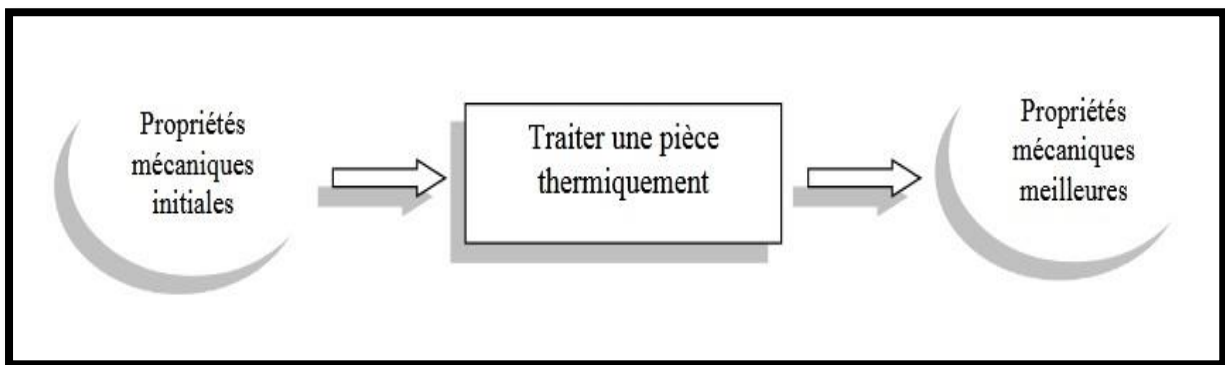


Figure I.1. Le but des traitements thermiques [3].

I.2. Définition de l'acier

Un acier est un alliage métallique constitué principalement de fer et de carbone (dans des proportions comprises entre 0,02 % et 2 % en masse pour le carbone) [4]. Il peut être répertorié selon cette teneur en carbone qui fixe son niveau de dureté maximale à l'état trempé. Un acier de haute teneur en carbone sera employé pour sa grande dureté alors qu'un acier de teneur plus faible est moins dur et plus malléable. Il contient généralement de petites quantités d'autres éléments outre le fer et le carbone, incorporés, volontairement ou non, au cours de son élaboration. On peut également y ajouter des quantités plus importantes d'éléments d'alliage [5].

Chapitre I : Univers des aciers et traitements thermiques classiques

I.2.1. Fabrication des aciers

L'acier est actuellement produit de deux manières fondamentales :

- Dans les fours de fusion, à partir de minerai de fer et de coke tout en réduisant le carbone dans le transformateur.
- Dans un four électrique solide récupéré. Nous parlons de recyclage d'acier ou d'acier électrique [6].

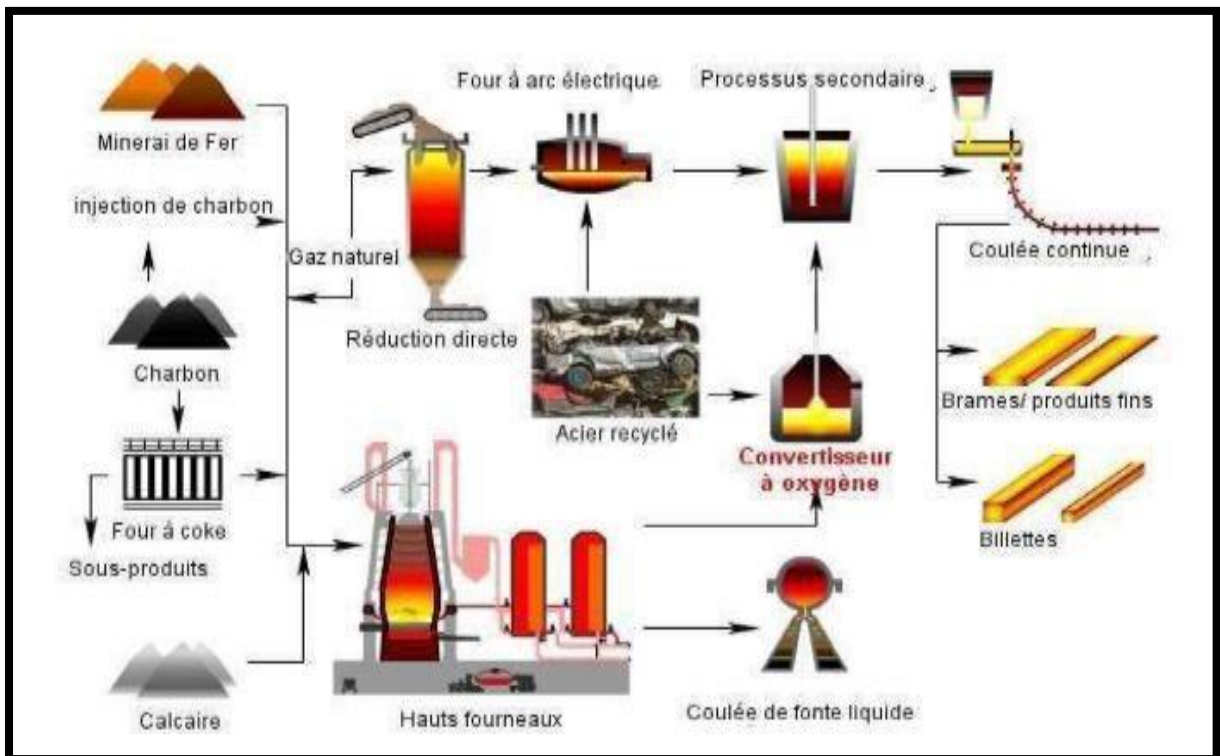


Figure I.2. Filières d'élaboration d'acier [7].

I.2.2. Composition chimique des aciers

On distingue plusieurs types d'aciers selon le pourcentage de carbone qu'ils contiennent : Les aciers eutectoïdes (0,77 % de carbone) aciers hyper eutectoïdes (de 0,77 à 2,11 % carbone) qui sont les plus durs [8].

I.2.3. Influence des éléments d'addition sur les aciers

L'obtention de caractéristiques mécaniques que requièrent les aciers d'outillages nécessite l'ajout à l'acier de base d'un certain nombre d'éléments d'alliages carburières (chrome, tungstène, molybdène, vanadium) afin d'obtenir des carbures spéciaux aussi bien après

Chapitre I : Univers des aciers et traitements thermiques classiques

l'élaboration et les transformations à chaud (carbures primaires) qu'après traitement thermique (carbures secondaires). A ces éléments d'alliages constituant la base des aciers à outils peut également s'ajouter d'autres éléments pour améliorer telle ou telle propriété fonctionnelle [9].

- **Le manganèse** : Augmente la ductilité et confère une meilleure réponse aux traitements thermiques.
- **Le soufre** : Améliore la machinabilité.
- **Le silicium** : Agit comme désoxydant et augmente la résistance de l'acier. Il affecte aussi la vitesse de diffusion du zinc dans l'acier lors de la galvanisation à chaud.
- **Le molybdène** : Améliore la dureté et la trempabilité. Quand il est ajouté dans des proportions de 2 à 4 % (comme dans l'acier inoxydable), il améliorera la résistance de l'acier aux attaques des chlorures.
- **Le chrome** : S'il est utilisé en petites quantités, il améliore la réponse aux traitements thermiques et l'abrasion. Quand son pourcentage est grand (entre 12 et 25%), il améliore la résistance à l'oxydation et à la corrosion.
- **Le nickel** : Améliore la trempabilité et la résistance à la corrosion. De plus, il augmente la stabilité de l'acier à haute température.
- **Le plomb** : Augmente la machinabilité de l'acier.
- **Le phosphore** : Diminue la ductilité et la résilience et améliore la machinabilité et la résistance à la corrosion.
- **Le soufre** : Réduit fortement la ductilité transversale et les propriétés de résilience. Il affecte la qualité de la surface et la soudabilité. Lorsqu'il est combiné au manganèse pour obtenir des sulfures de manganèse, il améliore la machinabilité.
- **L'aluminium** : Désoxydant et affineur de grain, il affecte aussi la vitesse de diffusion du zinc dans l'acier.
- **Le vanadium** : Retarde la croissance de grain et forme des carbonitrides qui augmentent la résistance des aciers HSLA lors du laminage à chaud.
- **Le titane** : Stabilise la structure et améliore l'efficacité des éléments durcisseurs dans l'acier [10].

Le tableau ci-dessous donne un aperçu sur le pourcentage des éléments d'alliages dans les aciers alliés et non alliés [11].

Chapitre I : Univers des aciers et traitements thermiques classiques

% éléments addition	Aciers non alliés	Aciers faiblement alliés	Aciers fortement alliés
Al	<0.3		>0.3
Co	<0.2	0.2à0.3	>0.3
Cr	<0.3	0.3à0.5	>0.5
Cu	<0.4		>0.4
Mn + Si	<1.5	1.5 à3	>3
Mo	<0.05	0.05à 1	>0.1
Ni	<0.3	0.3à0.5	>0.5
Pb	<0.4		>0.4
V	<0.04	0.05 à 1	>0.1
W	<0.2	0.2 à 0.3	>0.3

Tableau I.1. Pourcentage des éléments d'additions [11].

I.2.4. Les différentes phases des aciers

I.2.4.1. 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 [12].

I.2.4.2. 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 [13].

I.2.4.3. 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, Fe₃C. 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... [14].

I.2.4.4. Perlite

C'est un eutectoïde 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 $R_m=800 \text{ N/mm}^2$ [15].

I.2.4.5. 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 ($\approx 450\text{HV}$) [12].

I.2.4.6. 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 [2].

I.2.4.7. 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 reparté 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 [16].

I.2.4.8. 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 sur saturée 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» [13].

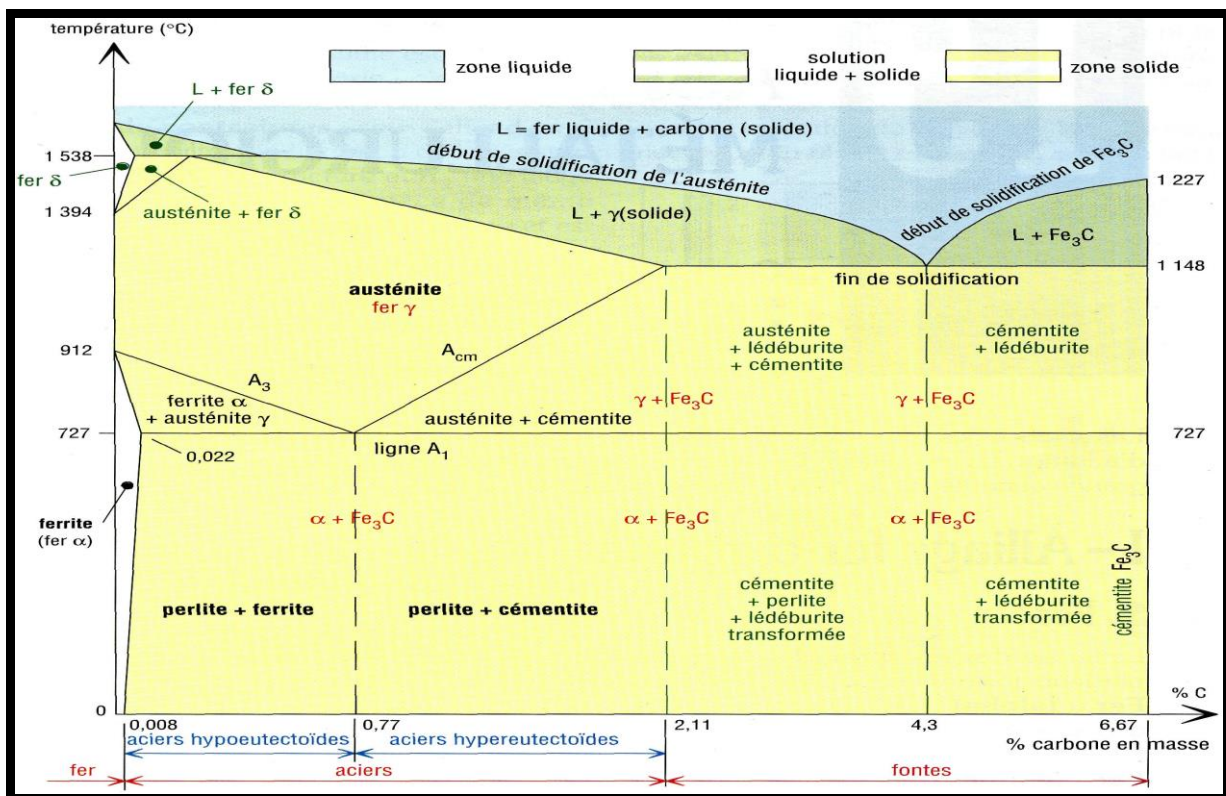


Figure I.3. Les différentes phases de l'acier [13].

I.2.5. Classification des aciers

Les familles d'aciers sont classées en deux critères :

I.2.5.1. La composition chimique

La nature et le teneur des éléments d'alliage, acier non allié ou acier au carbone ($\leq 1\%$ d'éléments d'alliage), acier peu allié (teneur de chaque élément d'alliage $\leq 5\%$) [17].

- a- **Aciers non alliés** : Contient du carbone en proportion croissante, du magnésium en proportion supérieure au carbone et des traces de phosphore de silicium et de soufre [18].

Chapitre I : Univers des aciers et traitements thermiques classiques

Qualité	C (%)	Mn(%)	P(%)	Si(%)	S(%)	Allong (%)
Extra doux	0.15	0.4	0.04	0.03	0.02	30
Doux	0.25	0.4	0.04 0.06	0.03 0.10	0.02 0.03	25
Mi-doux	0.35	0.4	0.06	0.15	0.03	20
Mi-dur	0.45	0.5	0.06	0.2	0.03	15
Dur	0.55	0.6	0.06	0.25	0.03	10
Extra dur	0.65	0.7	0.06	0.3	0.03	5

Tableau I.2. Classification des aciers au carbone suivant la composition chimique [19].

b- Aciers alliés : Composition variable suivant l'emploi, les éléments alliés sont en proportion variant généralement entre 0 et 5% [19].

Éléments allié	Ratio (%)	Observations
Carbone	0.2/0.7	
Silicium	0.1 /0.7 2/4 (aciers spéciaux)	Ressort tôles de transf
Magnésium	0.3/0.8 12/14 (aciers très durs)	Vois ferrées
S, P, Cu, Ni, Cr, V, Mo	<0.1	

Tableau I.3. Classification des aciers alliés ou non alliés suivant la composition chimique [19].

c- Aciers fortement alliés : Ce sont des aciers caractérisés par la présence d'un ou de plusieurs éléments d'addition et au moins un de ces éléments à une teneur supérieure à 5 %. Dans cette catégorie, on trouve les aciers inoxydables, les aciers rapides pour la confection d'outils, les aciers à résistance thermique etc. Leur désignation normalisée est toujours précédée par la lettre Z suivie :

- D'un nombre indiquant la teneur moyenne en carbone au centième pourcent.

Chapitre I : Univers des aciers et traitements thermiques classiques

- Des symboles normalisés des éléments d'addition rangés dans l'ordre de teneur décroissante.
 - Des chiffres indiquant la teneur moyenne en pourcent des éléments d'addition. Dans le cas des aciers fortement alliés, les chiffres indiquent directement la teneur en % des éléments d'addition, donc il n'est pas nécessaire de diviser par les coefficients 4 ou 10 comme dans le cas des aciers faiblement alliés [20].
- d- Aciers faiblement alliés :** Ce sont des aciers dont la teneur en n'importe quel élément d'addition ne doit pas dépasser 5 %, ils sont désignés par :
- Un nombre indiquant la teneur moyenne en carbone exprimé en centième pour cent (multiplié 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 multiplié par 4 pour les éléments C, K, M, N, S et par 10 pour tous les autres éléments [15].

I.2.5.2. Propriétés d'usage ou de qualité

Aciers de qualité, aciers spéciaux, (aciers d'usage général, aciers de construction mécanique, aciers pour appareils à pression, aciers à outils, aciers inoxydables)

- a- Aciers de qualité :** Les aciers de qualité sont des aciers pour lesquels il existe, par exemple, des exigences de propriétés spécifiées de ténacité, de grosseur de grain et/ ou de formabilité [17].
- b- Les aciers de construction :** Utilisés en particulier en construction mécanique, pour la réalisation de machines ou de mécanismes très variés ; ils peuvent être alliés ou non alliés ; à cette famille ont été associés les aciers pour appareils à pression [21].



Figure I.4. Acier de construction [22].

c- **Aciers inoxydables** : On appelle aciers inoxydables des aciers qui résistent à la corrosion atmosphérique et à la corrosion électrochimique. Les aciers inoxydables sont des aciers contenant au minimum 10,5 % de chrome et au maximum 1,2 % de carbone (pour éviter la précipitation de carbures de chrome). Bien qu'un certain nombre tels que Mo, Cu, Si, Ti, Nb, etc., soient ajoutés pour améliorer la tenue à la corrosion ou les propriétés mécaniques, l'essentiel des propriétés des aciers inoxydables est lié à la connaissance des diagrammes de phases et des diagrammes TRC des alliages ternaires Fe-C-Cr et quaternaires Fe-C-Cr-Ni [23].

Les différents types d'aciers inoxydables [19] :

- Les aciers inoxydables ferritiques.
- Les aciers inoxydables austénitiques.
- Les aciers inoxydables austéno-ferritique(DUPLEX).
- Les aciers inoxydables martensitiques

d- **Les aciers à outils** : ils sont utilisés dans la fabrication d'instruments (permettant de façonner les matériaux). Les nuances d'aciers à outils sont rangées selon le mode de travail de l'outil, en quatre classes comme le montre le (tableau I.4)

Classes	Caractères communs
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 carburés
Aciers à outils au carbone	Aciers d'usage général

Tableau I.4. Les classes d'aciers à outils [23].



Figure I.5. Acier à outils [24].

I.3. Classification des traitements thermiques classiques des aciers

A l'état solide les aciers sont de caractère cristallin, le cristal est formé à partir de motif (maille élémentaire) répète périodiquement dans les 3 dimensions de l'espace et formant un réseau de structure, en est une représentation schématique une purement conventionnelle, car aucun cristal ne représente un réseau aussi simple. Les cristaux ainsi formés peuvent atteindre individuellement des dimensions voisines du dixième de millimètre et pouvant aller au-delà du centimètre. La zone marquant le passage d'un cristal au cristal voisin est désignée sous le nom de joint, elle est effectuée par un changement d'orientation du système cristallin [25].

Le nom de grain désignant le cristal doit être attribué avec précaution, car il peut s'appliquer à des agrégats constitués de plusieurs cristaux [25].

I.3.1. Principe de recuit

Les recuits ont pour but d'adoucir les aciers en éliminant les effets des étapes antérieures de leur fabrication (écrouissage ou trempe), ainsi que les hétérogénéités de structure imputables à leur élaboration (forgeage, laminage, soudage). Les recuits permettent en outre de retrouver les structures équilibrées des aciers. Selon les buts visés et les modifications structurales obtenues, on distingue plusieurs types de recuits : le recuit de normalisation, le recuit complet, le recuit de coalescence, le recuit de recristallisation, le recuit de détente et recuit d'homogénéisation [22].

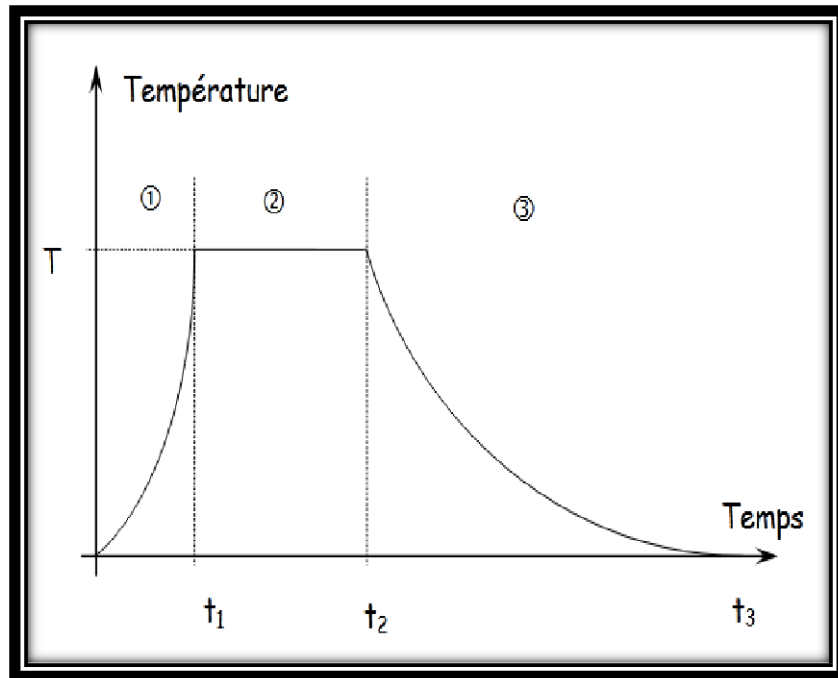


Figure I.6. Cycle thermique de recuit [24].

Le cycle thermique de recuit comprend :

- Un chauffage jusqu'à une température dite de recuit qui dépend du type de correction à réaliser.
- Un maintien isotherme à la température de recuit ou des oscillations autour de cette température.
- Un refroidissement à l'air calme ou selon une loi programmée, La vitesse de refroidissement doit être inférieure à la vitesse critique de recuit V_3 [24].

I.3.1.1. Différents types de recuit

I.3.1.1.1. Recuit de normalisation

On procède au chauffage dans le domaine austénitique 50°C au-dessus de la température d'austénitisation A_3 , et au maintien pendant environ une heure. Après quoi, on laisse refroidir à l'air. La structure obtenue est un mélange de ferrite et de perlite fine. On cherche ici à obtenir une microstructure uniforme (affinement de la taille des grains) et à améliorer les propriétés de l'acier, après une déformation à chaud [12].

I.3.1.1.2. Recuit complet

Ce recuit est techniquement semblable à la normalisation ; toutefois, pour obtenir une perlite plus grossière et un adoucissement plus marqué des propriétés, on laisse l'acier refroidir au four [12].

I.3.1.1.3. Recuit de coalescence

Chauffage et maintien prolongé à une température légèrement inférieure à la température de début de transformation A_1 . L'obtention d'une perlite globularisée est visée, afin de rendre les aciers durs plus facilement usinables. La structure obtenue est moins dure que celle d'une perlite lamellaire [26].

I.3.1.1.4. Recuit de recristallisation

On procède au chauffage dans le domaine ferritique (entre 500 et 700 °C) et on contrôle le refroidissement.

On applique ce traitement aux produits déformés à froid (tôles minces laminées à froid, par exemple) pour faire disparaître les structures d'écrouissage et faciliter ainsi usure (emboutissage, pliage, etc.) [22].

I.3.1.1.5. Recuit de détente

Chauffage dans le domaine ferritique (entre 500 et 650 °C) avec refroidissement lent. Ce traitement est destiné à réduire, voire éliminer les contraintes internes engendrées au cours de la fabrication [26].

I.3.1.1.6. Recuit d'homogénéisation

Ce type de recuit s'applique aux aciers bruts de coulée et aux aciers moulés dans le but d'affaiblir ou éliminer la ségrégation dendritique ou inter-cristalline (lors de la solidification de l'acier, les éléments d'alliage ou le carbone sont repartis d'une façon hétérogène à l'échelle du grain austénitique), c'est à dire, il y a une différence de concentration de ces éléments qui se présentent dans la structure. La ségrégation renforce la susceptibilité à l'anisotropie des propriétés et aux défauts tels que cassures, stratifiés et flocons (fissures fins internes observées dans une cassure sous forme de taches ovales blanches). La ségrégation diminue la plasticité et la ductilité d'un acier allié. C'est pourquoi non seulement les lingots, mais aussi les grosses pièces moulées sont assez souvent soumis à l'homogénéisation [13].

I.3.2. Principe de trempe

On veille ici à ce que le refroidissement soit suffisamment rapide, afin d'éviter la transformation de l'austénite en produits d'équilibre (ferrite et perlite) et d'obtenir plutôt une transformation martensitique. La vitesse critique de trempe est la vitesse de trempe minimale qui permet d'éviter tout début de transformation perlitique ou bainitique et d'obtenir ainsi une structure entièrement martensitique. Cette vitesse critique de trempe, qui est fonction de la composition chimique de l'acier et de son histoire antérieure (taille des grains austénitiques, conditions d'austénitisation, etc.), permet de définir la trempabilité de l'acier. La trempabilité est la capacité d'un acier de se transformer en martensite dans des conditions de refroidissement données. Un rond d'acier ordinaire (contenant 0,60 % de C) de 100 mm de diamètre, lorsqu'il est trempé à l'eau, ne subit une transformation martensitique complète que sur quelques millimètres de profondeur, par contre, ce même rond peut être trempé à cœur s'il contient en plus des éléments d'alliage. L'acier du second rond est par conséquent plus trempable que celui du premier. La trempabilité d'un acier est déterminée par le diamètre critique. On appelle diamètre critique le diamètre d'une barre (trempée dans des conditions données), dont la structure, au centre, se compose de 50 % de martensite et de 50 % de perlite. Puisque ce diamètre est fonction de la sévérité du milieu de trempe, le diamètre critique idéal est celui qu'on obtiendrait dans un milieu de trempe de sévérité infinie. Dans un tel milieu, la surface de la pièce trempée atteindrait instantanément la température du bain de trempe, et la vitesse de refroidissement, en un point quelconque de la pièce, ne dépendrait que des propriétés thermiques du métal et non de la résistance de l'interface métal-bain de trempe à l'écoulement de la chaleur [27].

I.3.2.1. Différents types de trempe

I.3.2.1.1. Trempe directe

Elle consiste en un refroidissement à partir de la température de cémentation dans un milieu adapté (dans l'huile ou l'eau). Cette méthode est économiquement avantageuse, notamment lors de la cémentation dans des bains de sel ou dans une atmosphère gazeuse.

En automatisant le processus, ce procédé est utilisé comme une opération finale en utilisant des longs fours continus, dans lesquels la température, avant l'immersion dans le milieu de trempe peut être réduite à une température appropriée pour la trempe du cœur.

Chapitre I : Univers des aciers et traitements thermiques classiques

L'avantage du procédé est que le cœur est complètement durci et a obtenu la dureté correspondante. La couche cémentée est trempée par surchauffe, tandis qu'une petite quantité de cémentite reste dans un état structurellement libre. Si le durcissement des aciers fortement alliés est effectué de la même manière, une grande quantité d'austénite résiduelle reste dans leur structure.

Après la trempe directe, les pièces se déforment moins que dans les processus plus complexes, On voit que la déformation au cœur est plus faible si on utilise un mode dans lequel la température est abaissée de la température de cémentation à des températures comprises entre A_{C1} et A_{C3} par exemple 830°C), après quoi la trempe est effectuée.

La trempe directe des aciers au carbone est utilisée lorsqu'une certaine qualité de la couche de ciment n'est pas requise. Avec cette méthode de trempe, les aciers de qualité faiblement alliés, s'ils sont suffisamment fins dans des bains de sel ou dans des atmosphères gazeuses, donnent de bons résultats. La trempe directe peut également être isotherme dans un bain de sel. Cette dernière méthode est utilisée pour les pièces à parois minces et pour les pièces à surface inégale.

Dans certains cas, après la trempe directe, le refroidissement peut être effectué à une température négative (pour la décomposition de l'austénite résiduelle) [28].

I.3.2.1.2. La trempe sous zéro

Un refroidissement en dessous de zéro est appliqué aux couches cémentées qui sont sensibles à la rétention d'austénite et également pour augmenter la dureté et la résistance à l'usure des composants. Les pièces de précision, les engrenages de haute précision et les broches en aciers alliés de cémentation peuvent contenir de l'austénite résiduelle pendant la cémentation. La présence d'austénite résiduelle dans la couche réduit la dureté maximale atteignable et entraîne progressivement des changements dimensionnels sur les pièces, Parce que l'austénite préservée continue de se transformer lentement en martensite à une température ambiante pendant longtemps après le processus de durcissement. Les composants subissent un traitement sous zéro pour éviter des changements dimensionnels ultérieurs et d'atteindre une dureté maximale. Le traitement sous zéro doit être effectué immédiatement après la cémentation des composants « Maintiens prolongés à une température ambiante » après le traitement, L'austénite va se stabiliser. Par conséquent, la procédure de traitement thermique suivante doit être adoptée dans l'ordre indiqué (Figure I.7) :

- Carburé.
- Durcir.
- Traitement sous zéro(-70à -100°C)
- Revenu (150 à 180°C) [22].

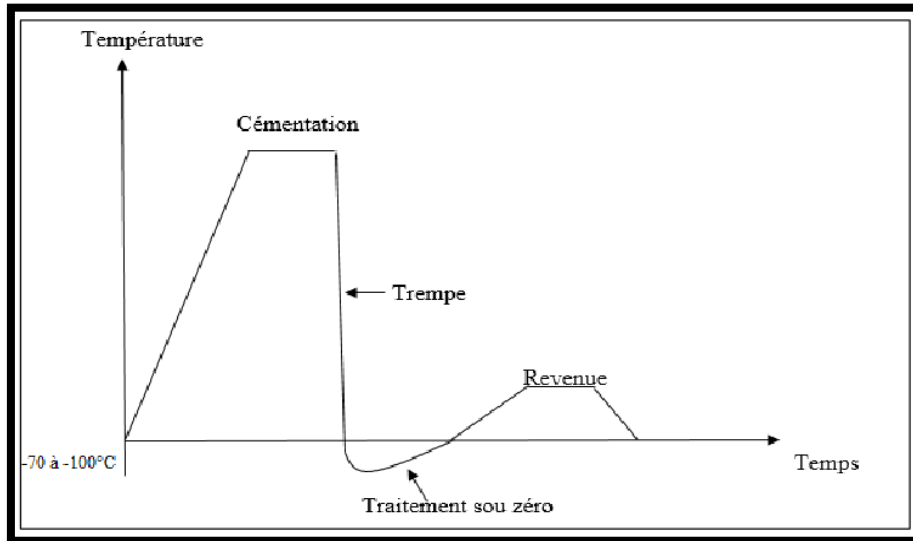


Figure I.7. Procédé de la trempe sous zéro [29].

I.3.2.1.3. La trempe simple

La trempe simple avec chauffage après cémentation présente certains avantages par rapport à la trempe directe. Il est important de savoir de quelle manière la pièce se refroidit après la cémentation. Les produits peuvent être refroidis dans des caisses à air ou dans un four et à l'air après avoir retiré les pièces des milieux de cémentation.

I.3.2.1.4. Double trempe

La (figure I.8) prévoit l'utilisation d'un double durcissement suivi d'un revenu à basse température. La première trempe dans un tel complexe technologique est réalisée avec un chauffage à des températures de 860 à 880 ° C et un refroidissement à l'huile. Que ce soit pour les aciers alliés ou les aciers au carbone. La deuxième trempe (finale) est réalisée à partir d'une température de 760–800 ° C. pour les aciers au carbone le refroidissement est réalisé dans l'eau, et pour les aciers alliés il est réalisé dans l'huile.

Chapitre I : Univers des aciers et traitements thermiques classiques

Dans ce cas, la première trempe assure le raffinement du grain et la formation d'un complexe élevé des propriétés mécaniques au cœur de la pièce, et la deuxième forme finalement une dureté superficielle et une résistance à l'usure élevées de la pièce. L'opération finale de traitement thermique est un revenu à basse température

L'utilisation d'huile comme milieu de refroidissement, y compris pour les aciers au carbone, est due au fait qu'il n'est pas nécessaire d'obtenir des structures martensitiques dans l'acier après la première trempe. En outre, la décomposition de l'austénite surfondue lors d'un tel refroidissement est souhaitable, puisque cette transformation affine davantage la formation de la structure des grains, réduit le degré d'alliage des solutions solides, réduisant la quantité d'austénite résiduelle après la trempe finale.

Pour les aciers fortement alliés, la double trempe n'est généralement pas utilisée. Cette méthode est recommandée pour les pièces simples. Dont la qualité dépend des bonnes propriétés du cœur et de la couche. L'inconvénient de ce procédé est qu'il conduit à un changement dimensionnel plus important que dans le cas de la trempe simple. Pour ces raisons, la double trempe n'a pas beaucoup de valeur pratique [24].

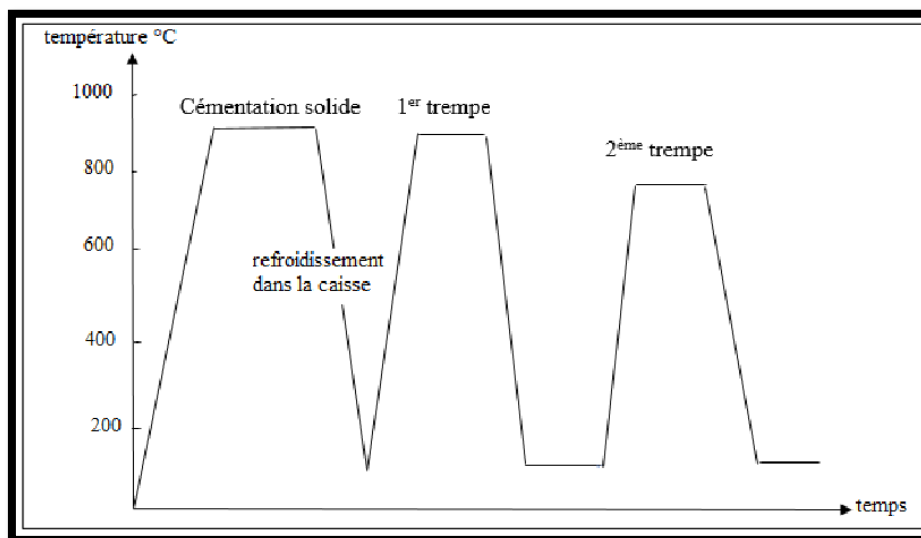


Figure I.8. Cycle de cémentation avec une double trempe [26].

I.3.2.1.5. La trempe isotherme

La trempe isotherme est utilisée dans les cas où la couche cémentée est directement trempée en martensite après la cémentation ou un nouveau chauffage, et il est nécessaire de connaître la température MS de la couche et la position de l'extrémité la plus éloignée du début de la courbe de désintégration.

Chapitre I : Univers des aciers et traitements thermiques classiques

La trempe isotherme est utilisée pour les aciers au carbone et alliés. Lorsque les pièces ne sont pas de taille trop grande (leur refroidissement du cœur se produit avec une décomposition partielle de l'austénite), à la suite d'une trempe isotherme, de la martensite apparaît si la température initiale dépasse le point A_{C3} . Dans des grandes parties du cœur, en plus de la martensite, ainsi que de la ferrite, des structures de décomposition apparaissent, correspondant à des températures plus élevées.

La trempe isotherme est souvent utilisée, notamment pour les pièces complexes (pièces de machines, voitures, etc.). Ce procédé est combiné avec succès avec la cémentation dans les bains de sel ou seulement avec le chauffage dans ces bains pour une transformation isotherme.

La trempe isotherme, limitée par la forme et la taille, est utilisée pour les aciers au carbone à grains fins qui ont tendance à former des taches molles, Pour les aciers nitrocémentés, la trempe isotherme est utilisée avec succès car la courbe en forme de C de la couche est décalée sous l'influence de l'azote [28].

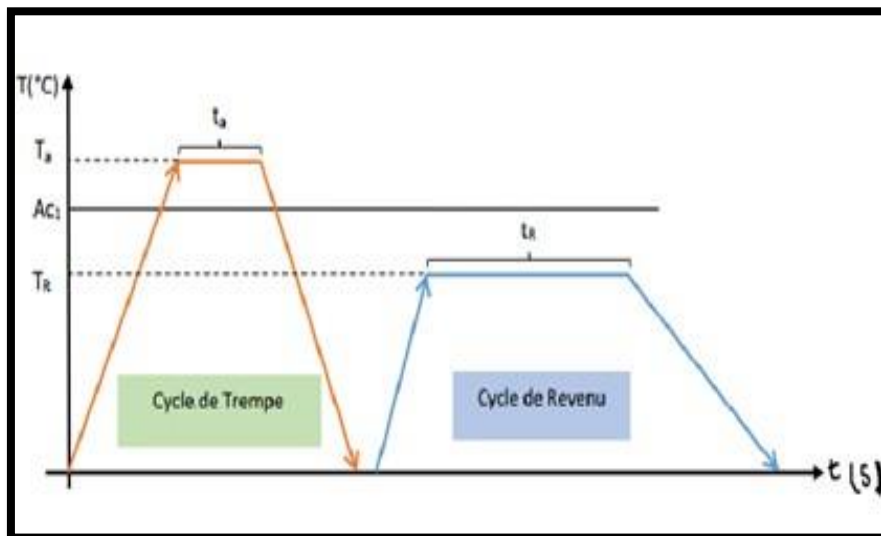


Figure I.9. Cycle combiné de traitement thermique de Trempe + Revenu [30].

I.1.1. Principe de revenu

Après la trempe, on chauffe l'acier entre 150 et 650 $^{\circ}\text{C}$ pendant environ une heure. Nous avons déjà vu que, au cours du revenu, il y avait décomposition de la martensite et retour partiel à une structure comportant les constituants d'équilibre ferrite et carbures. Si le revenu diminue les propriétés mécaniques de l'acier (limite d'élasticité, résistance et dureté), il améliore par contre sa ductilité et sa ténacité. Toutefois, dans certains domaines de température, le revenu peut s'accompagner d'une diminution de la ténacité. Cette sensibilité à la fragilisation au cours du

s'accompagner d'une diminution de la ténacité. Cette sensibilité à la fragilisation au cours du revenu - fragilité au bleu - se manifeste pour des températures de revenu allant de 250 à 350°C, températures auxquelles la cémentite commence à se former ; cette sensibilité est par ailleurs reliée à la présence d'impuretés (N, P ou S). Une autre formée au cours du revenu apparaît dans les aciers alliés entre 400 et 575 °C ; dans ce cas, ce sont des traces de Sn, Sb ou P qui entraînent, par ségrégation inter granulaire, une fragilisation des anciens joints de grains austénitiques [31].

Le revenu est donc un traitement thermique effectué après trempe, il consiste en (Figure I.11) :

- Un réchauffage à une température $T_R < A_{c1}$.
- Un maintien de durée T_R à T_R .
- Un refroidissement long jusqu'à la température ambiante [3].

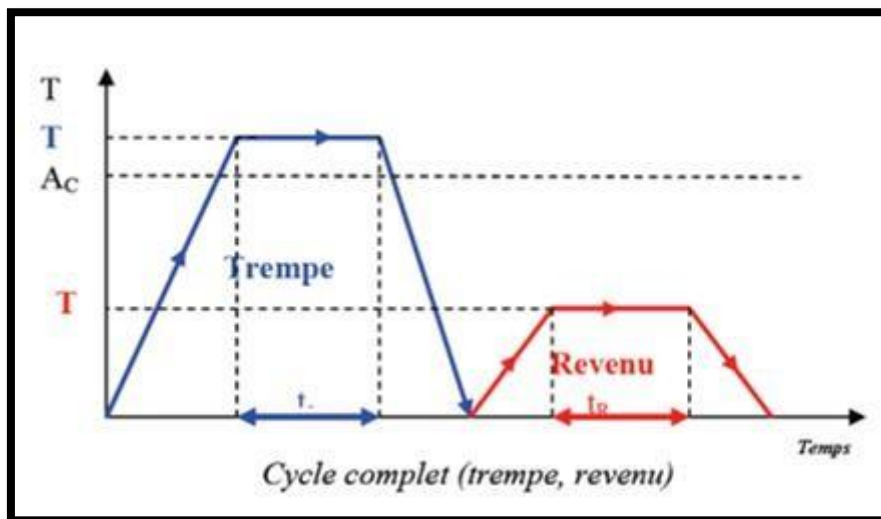


Figure I.10. Cycle complet Trempe, Revenu [3].

I.3.3.1. Différents types de revenu

I.3.3.1.1. Revenu de relaxation ou de détente

Il s'effectue entre 180°C et 220°C-250° C. Il ne provoque aucune modification de structure mais une relaxation des contraintes dues à la trempe. Il provoque une légère diminution de la dureté et une légère remontée de la résilience. Il est fait sur des pièces soumises à des fortes sollicitations sans choc ou devant conserver une forte dureté superficielle [3].

I.3.3.1.2. Revenu de structure ou classique

Dans ce cas, le revenu s'effectue entre 450°C et A_{c1} . On observe une augmentation des caractéristiques K, A% et Z et une diminution plus importante de H, Rm, et Re. Ce type de revenu permet d'établir un compromis entre les caractéristiques mécaniques suivant l'emploi des aciers [3].

I.3.3.1.3. Revenu de durcissement

Des revenus effectués entre 450°C et 600°C sur des aciers alliés peuvent provoquer des durcissements appelés durcissements secondaires (cas des aciers à outils au chrome ou des aciers rapides). Il y'a d'abord précipitation des carbures complexes maintenus en solution dans un reste d'austénite résiduelle puis une déstabilisation de cette dernière qui se transforme en martensite au moment du refroidissement. Ces deux transformations successives vont donc nécessiter un second [3].

I.4. Domaine d'application des aciers

Les aciers restent privilégiés dans presque tous les domaines d'application technique: équipements publics (ponts et chaussées, signalisation), industrie chimique, pétrochimique, pharmaceutique et nucléaire (équipement sous pression, équipement soumis à l'action de la flamme, capacités de stockage, récipients divers), agro-alimentaire (conditionnement et stockage), bâtiment (armatures, charpentes, ferronnerie, quincaillerie), industrie mécanique et thermique (moteurs, turbines, compresseurs) automobile (carrosserie, équipements) ferroviaire, aéronautique et aérospatial, construction navale, médical (instruments, appareils et prothèses), composants mécanique (visserie, ressorts, câbles, roulements, engrenages), outillage de frappe (marteaux, burins, matrices) et de coupe (fraises, forets, porte-plaquette), mobilier, design et équipements électroménagers, etc [32].

I.5. Défauts des aciers

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

Les uns sont naturels, les autres sont accidentales et se produisent lorsque certaines précautions ne sont pas observées lors des traitements mécaniques ou thermiques [33] :

Chapitre I : Univers des aciers et traitements thermiques classiques

- **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.
- **Crique** : 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.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons discuté l'étude de l'acier en termes de fabrication, de composants et de domaines d'utilisation, etc. Par la suite nous avons donné une définition des traitements thermiques classiques et ces différentes classes (recuit , trempe et revenu) chacun une de ces opérations destinées à modifier les propriétés et les caractéristiques d'un acier de manière à adapter son aptitude à un emploi déterminé.

Références bibliographiques de chapitre I

- [1] G.Fouad «Science des matériaux de construction » Université Aboubekr Belkaid. Tlemcen.
- [2] 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.
- [3] M.MESSAOUI, Cours matériaux métalliques, Institut Supérieur Des Etudes Technologique de Gafsa, (2014).
- [4] Hazard et coll. Mémotech — Structures métalliques (Casteilla, 2000), p. 14
- [5] H. Bouhafs, ‘ ‘ Contribution à l’étude des causes de dégradation des conduites du transport d’eau industrielle ‘ ‘, Mémoire de Master, université Badji Mokhtar, Annaba, 2016.
- [6] Livre de Jean-Paul Bailon Des matériaux.
- [7] J.Barralis, G.maeder « Précis de métallurgie. Élaboration, structures-propriétés et normalisation ». afnor, nathan, 2005.
- [8] T.Boudjellal, Mémoire de Master Amélioration Des Caractéristiques Mécaniques D'un Aciers par des Différents Techniques, université de M’sila, 2020.
- [9] M. COLOMBIE, Matériaux industriels, matériaux métallique ; DUNOD, Paris 2000.
- [10] W.Larbi, Cours de matériaux de construction-CCV015, Conservatoire National Des Arts et Métiers (chapitre 05), (2005).
- [11] Matériaux métalliques - 2e éd (Français) Broché – 22 septembre 2017.
- [12] J. Brais, G. maeder : Précis métallurgie, nathan, Paris, 1997.
- [13] J.varriot « Chaudronnerie en aciers inoxydables », techniques de l’ingénieur, a 869.
- [14] L. Antoni and A. Galerie « Corrosion sèche des métaux », techniques de l’ingénieur, m 4224.
- [15] R. Butin, m. « Pinot fabrications mécanique technologie », tome 2, 1981.
- [16] M.Eloualhi « Amélioration des caractéristiques des métaux utilisant la projection thermique»,université de Msila p8.20018 ,2019.

Chapitre I : Univers des aciers et traitements thermiques classiques

- [17] .S.Akram Mémoire de Master Etude des causes de dégradation prématurée d'un marteau de concassage fabriquée Un acier riche en chrome Université Baadji Mokhtarn-Annaba. Année 2018.
- [18] F.GHomari, Sciences Des Matériaux De Construction, Université Aboubekr Belkaid.
- [19] K.Abelkarim Mémoire de Master transformations métallurgiques au cours du revenu des aciers trempés Université Badji Mokhtar Annaba. Année 2020.
- [20] R. BUTIN, M. PINOT "Fabrications mécaniques". Technologie, tome 2, 1981.
- [21] M. Sabrina, Mémoire de master Etude et caractérisation d'un acier XC38 obtenu par un processus de calorisation Université Mouloud Mammeri de TIZI OUZOU, 2018.
- [22] <https://Construction-Maison.Ooreka.Fr/Astuce/Voir/617171/Aciers-De-Construction>
- [23] N. Meftah (2003), Thèse de magistère, Université de Ouargla.
- [24] <https://www.machine-outil.com/actualites/t678/a7382-outil-hss.html>
- [25] M. COLOMBIE, Matériaux industriels, matériaux métallique ; DUNOD, Paris 2000.
- [26] Biront, V.S. Biront VS Théorie du traitement thermique des métaux. Recuit : Manuel. Manuel / SFU : ICMiZ - Krasnoïarsk, (2007). –234 p.
- [27] S. Mayer, C. Scheu, H. Leitner, I. Siller, H. Clemens, Int. J. Mater.Res. 100 (2009)86.
- [28] Koretsky, Yan. Durcissement de l'acier. L. : État. Union, maison d'édition de la construction navale. Prom-ti. (1962).
- [29] Prabhudev, K. H. Handbook of heat treatment of steels. Tata McGraw-Hill Education.(1988).

Chapitre I : Univers des aciers et traitements thermiques classiques

- [30] A.Tlili, Cours matériaux métalliques, Ministère De L'enseignement Supérieur et De La Recherche Scientifique-Nabeul, (2014).
- [31] J. R. T. Branco, 'Development of Nb Modified AISI H13/H11 Type Tool steels', Ph.D. thesis 1989 Colorado School of Mines.
- [32] A. Cheriet, « Effet de traitement de sphéroïdisation sur les aciers à dispersoïdes destinés aux installations pétrolières », mémoire de master, Université Mohamed Khider –Biskra, (2016).
- [33] J. barralis et G. maeder ; « Document pour étude de cas sur les aciers » ; e. bauer grosse 2003/2004.

Chapitre II :
Traitements
thermochimiques

Chapitre II : Traitements thermochimiques

II.1. Introduction

Les traitements thermochimiques des aciers sont employés dans le but d'améliorer leurs propriétés surfaciques. Le mécanisme essentiel est la diffusion d'une ou plusieurs espèces chimiques dans l'acier à une température généralement élevée. Dans certains cas, le processus est suivi d'une trempe et d'un revenu alors qu'il exige seulement un refroidissement à l'air dans d'autres cas. L'espèce diffusant peut être le carbone, l'azote ou le bore, ainsi les processus sont nommés cémentation, carbonituration, nitruration, nitrocarburation ou boruration.

Les éléments lourds peuvent être ajoutés à titre seul ou ensemble comme dépôts en surface des matériaux à traiter, le procédé appelé métallisation (métal ou alliage). Lorsque les dépôts forment des composés métalliques, les éléments additionnés en surface au cours de traitement ceux sont les éléments lourds (métalliques) et légers (non métalliques) [1].

II.2. Cémentation

II.2.1. But et principe de la cémentation

II.2.1.1. But de cémentation

Enrichir en carbone la couche superficielle d'une pièce (ou d'une partie de pièce) en acier travaillant à l'usure, afin qu'elle puisse prendre la trempe.

II.2.1.2. Principe de cémentation

Les pièces à cémenter sont mises en présence d'un corps riche en carbone appelé ciment. Celui-ci peut être solide, liquide ou gazeux. L'ensemble (pièce - ciment) est porté à une température élevée (875°C à 925°C) nécessaire à la diffusion du carbone.

La cémentation s'effectue en deux temps :

- Le transfert du carbone : du ciment à la surface de la pièce.
- La diffusion du carbone : à l'intérieur de la pièce. La teneur souhaitée de carbone en surface est comprise entre 0.7 et 0.9 % de carbone [2].

Chapitre II : Traitements thermo-chimiques

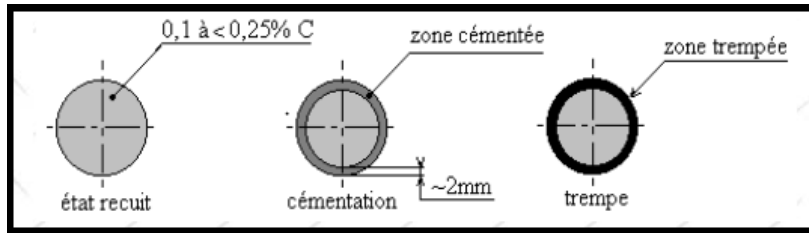


Figure II.1. Principe de la cémentation [2].

II.2.2. Diagramme d'équilibre fer-C

Le diagramme présente le système binaire Fer-Carbone, il est nécessaire à l'étudier car il sert de référence pour tous les alliages ferreux. Le système peut subir deux types d'évolution selon que la phase est riche en carbone qui se forme est la cémentite (Fe_3C) ou le graphite (Cgr) : Si la phase riche en carbone formée est le carbure de fer (Fe_3C), l'évolution du système est décrite dans les conditions d'équilibre par le diagramme métastable ou à cémentite (trait plein).

Si la phase riche en carbone formée est le graphite (Cgr), l'évolution du système est décrite dans les conditions d'équilibre par le diagramme stable ou à graphite (trait pointillé). Ces deux types d'évolution n'interviennent jamais simultanément [3].

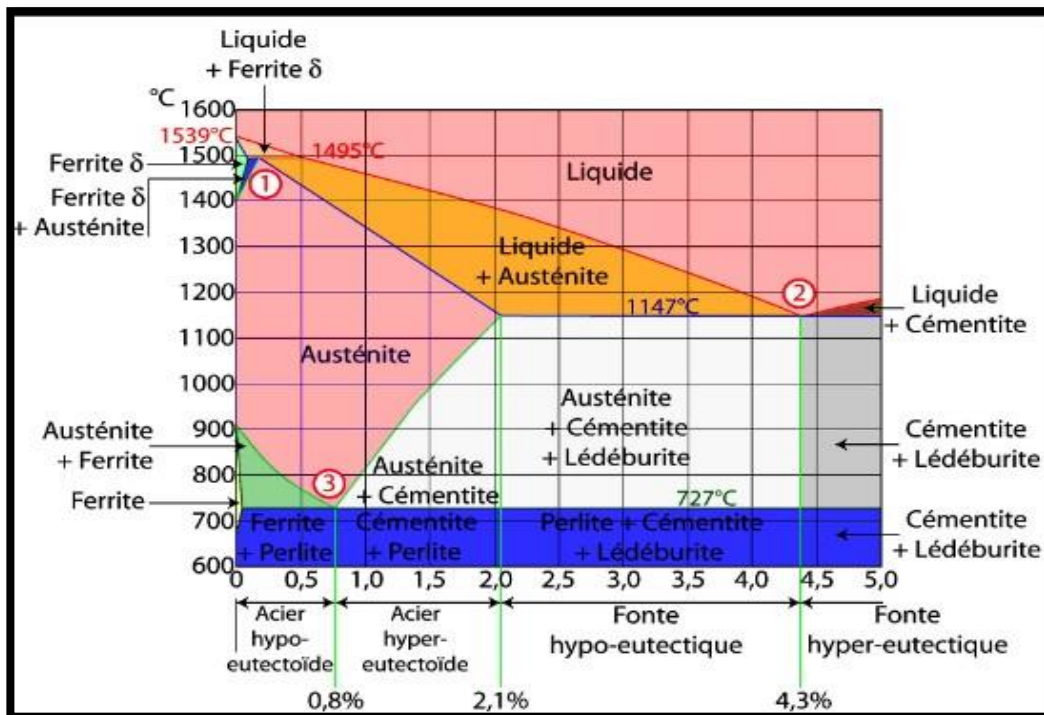


Figure II.2. Diagramme d'équilibre fer-carbone [4].

Chapitre II : Traitements thermochimiques

- En 1 : transformation péritectique ;
- En 2 : transformation eutectique ;
- En 3 : transformation eutectoïde (solide-solide).

Les alliages dont la composition est inférieure à celle de P_1 (32% Pt) et ceux dont la composition est supérieure à P_2 (86% Pt) se comportent comme des solutions solides à un seul fuseau. Les alliages dont la composition est comprise entre P_1 et P_2 vont voir apparaître dans un premier temps dans la phase liquide, une phase β dont la composition va évoluer progressivement jusqu'à la concentration en P_2 (86% Pt).

Lorsque la température péritectique est atteinte, il se produit une transformation isotherme de ce solide β (86% Pt) en solide α (55% Pt). Après cette transformation, il subsiste encore une phase liquide. La solidification va se poursuivre en évoluant vers une phase α unique. Les alliages dont la composition est comprise entre P_1 et P_2 débutent de façon identique aux précédents, mais lorsque la température péritectique est atteinte, une partie de la phase β va disparaître, combinée avec le liquide pour former la phase α . Cependant la quantité de liquide n'est pas suffisante pour faire disparaître la totalité de la phase β . Celle-ci va coexister avec la phase α et donnera donc un alliage biphasé [4].

II.2.3. Préparation de la pièce avant et après cémentation

II.2.3.1. Préparation de la pièce avant cémentation

Les pièces avant cémentation ou carbonituration peuvent subir différentes phases de préparation.

Les pièces sont souvent graissées avant traitement thermique afin d'éviter leur oxydation pendant le transfert. Elles peuvent aussi être couvertes des produits d'usinage, des lubrifiants de mise en forme (emboutissage, extrusion, etc.).

Afin de préparer la surface, en évitant en particulier de laisser des zones polluées pouvant avoir un effet d'écran lors du traitement, on procède généralement à un nettoyage qui peut être :

- Un lavage : les pièces passent juste avant traitement dans une machine à laver où elles subissent un lavage en lessive généralement alcaline à 60-80 ° C suivi d'un rinçage à l'eau claire ; elles sont ensuite séchées ;

Chapitre II : Traitements thermochimiques

- Un dégraissage : ce dernier se fait généralement par immersion dans un solvant chloré puis séchage. Il peut y avoir combinaison phase liquide/phase vapeur puis séchage et même utilisation d'ultrasons dans le cas de pièces délicates [5].

II.2.3.2. Préparation de la pièce après cémentation

La pièce cémentée ou carbonitrurée subit un traitement thermique destiné à lui conférer ses propriétés d'emploi. Il s'agit généralement d'un durcissement par trempe, suivi d'un revenu de dimensionnement à des températures comprises le plus souvent entre 150 et 200°C, afin de conserver à la couche une haute dureté. Parfois, ces traitements sont précédés de recuits dont le but est de permettre un usinage avant le durcissement. Enfin, quelque fois, des traitements cryogéniques sont réalisés après la trempe en vue de réduire le taux d'austénite résiduelle et d'améliorer certaines caractéristiques d'emploi [5].

II.2.4. Les différents types de cémentation

II.2.4.1. Cémentation solide

L'agent de saturation dans cette opération est un ciment solide, il n'est pratiquement plus utilisé industriellement. Le principe est de noyer les pièces à traiter dans un ciment solide à base de charbon et de bois, le tout étant maintenu dans une caisse fermée portée à la température de cémentation (900 à 950°C). Le ciment est constitué de carbone amorphe, généralement du charbon de bois (provenant de bois sélectionnés, exempts d'écorces) additionné d'un activateur, le carbonate de baryum $BaCO_3$. Il se présente soit sous forme de granulés reconstitués à partir d'un mélange de charbon de bois (60 à 75%) et de carbonate de baryum (25 à 40%) en poudre, soit sous forme de morceaux de charbon de bois finement concassés enrobés de carbonate de baryum en présence d'un lait de chaux comme fixateur [6].

D'une manière pratique, les pièces sont placées dans des caisses en acier réfractaire au chrome sur un lit de ciment, convenablement espacées les unes des autres et recouvertes d'une couche de ciment de 2 à 3 mm d'épaisseur, avant de disposer un second étage de pièces et ainsi de suite. Une fois pleine, la caisse est fermée par un couvercle et éventuellement lutée à la terre. La caisse est placée dans un four où la température de cémentation varie de 910 à 930°C. Le maintien à la température de cémentation est de 7 à 9 min par centimètre de la dimension maximale de la caisse. Après cémentation, la caisse ne sont ouvertes qu'après leur refroidissement à l'air jusqu'à 400 ou 500°C. Généralement l'épaisseur de la couche à cimenter est choisie selon la température et durée de cémentation [7].

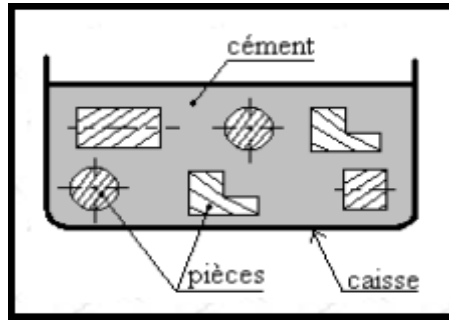
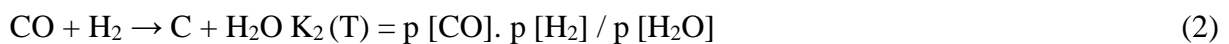


Figure II.3. Cémentation solide [3].

II.2.4.2. Cémentation gazeuse

Le traitement est réalisé dans un four étanche dans lequel on maintient une atmosphère contrôlée constituée d'un gaz support auquel on ajoute si nécessaire, pour atteindre le potentiel carbone.

Les réactions principales de cémentation sont :



Avec K_1 , K_2 , K_3 constante d'équilibre, $p[\text{CO}]$, $p[\text{O}]$ pression partielle activité du carbone. Les proportions de CO et H_2 varient selon le mode d'élaboration de l'atmosphère. Une atmosphère de cémentation est constituée

- D'un gaz de support faiblement actif est différent type de gaz ou mélange de gaz sont utilisables, dans la suite nous parlerons uniquement du système Azote-Méthanol.
- D'un gaz d'enrichissement destiné à ajuster le potentiel carbone. C'est le débit de gaz qui est piloté par les divers capteurs de contrôle [8].

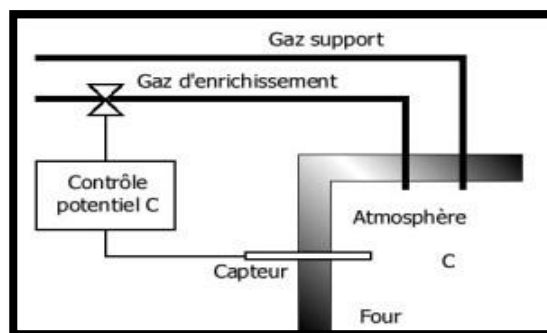


Figure II.4. Cémentation gazeuse [9].

Chapitre II : Traitements thermochimiques

II.2.4.3. Cémentation liquide

Les pièces sont plongées dans un bain de sel fondu à base de cyanure de baryum et de sodium vers 980°C.

Cette technique relativement simple de mise en œuvre permet un chauffage homogène et une action chimique régulière [10].

L'agent de cémentation actif dans un bain de sel est le cyanure de sodium (NaCN) ou le cyanure de potassium (KCN). On pense que la carburation se déroule selon les réactions suivantes [11] :

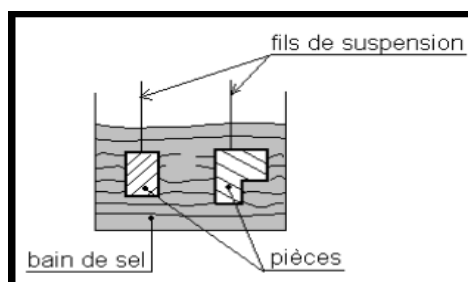


Figure II.5. Représentation d'une cémentation liquide [10].

II.2.5. Mesure de l'épaisseur des couches cémentées

Une couche traitée est caractérisée par son profil de micro dureté, Il permet de mesurer l'épaisseur efficace de la couche, appelée profondeur conventionnelle de cémentation. Elle est définie par la distance à la surface du point pour lequel la dureté a une valeur égale à 550 Hv. La profondeur conventionnelle de cémentation dépend donc du profil de la teneur en carbone, du degré de transformation martensitique des divers points de la couche enrichie (la trempabilité des aciers), mais surtout des conditions du traitement (la température et la durée de la cémentation).

L'épaisseur visée pour la couche cémentée varie selon la destination et le volume de la pièce. Les épaisseurs importantes (0.8 mm à 1.8 mm ou plus) sont réservées à des pièces devant résister à l'usure et des pièces de forte section. Pour les pièces moyennes de faibles sections, tels que les engrenages d'automobile, des épaisseurs de 0.2 mm à 0.8 mm peuvent être suffisantes[12]

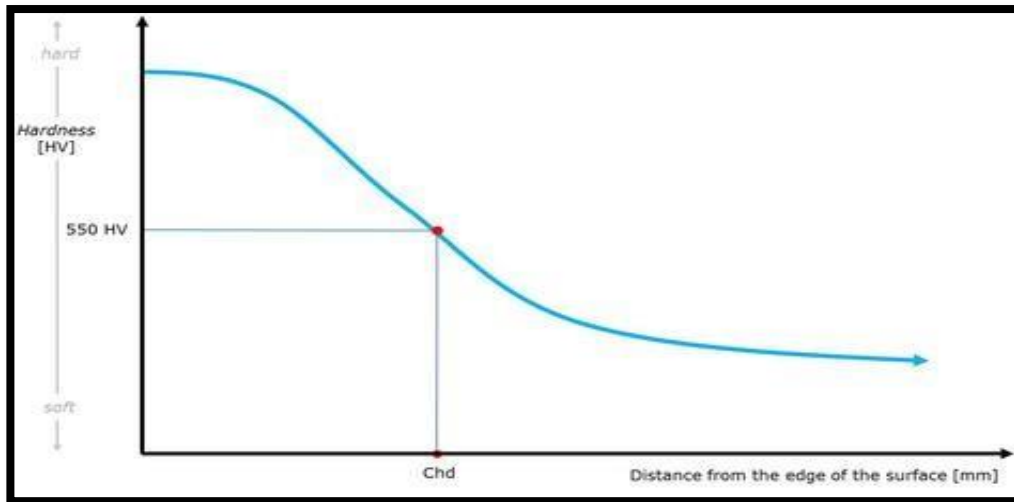


Figure II.6. Profondeur conventionnelle de cémentation [13].

II.2.6. Défauts de cémentation

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

- Stockage, manutention, lavage, traitement thermochimique, éventuelle reprise d'usinage, éventuelle reprise en traitement, grenailage, revenu, parachèvement, etc.
- Chacune d'elle peut être la source d'une anomalie qui se répercutera sur le produit final et sur sa qualité.

La correction des anomalies de traitement suppose :

- Des contrôles d'atelier :

Aspect visuel à l'état tel et après grenailage, qui permet de soupçonner certains cas de points doux, mesurés de dureté superficielle par prélèvement, la charge sous laquelle se font ces mesures de dureté dépendant de l'épaisseur de la couche visée, Mesures de dureté en sous-couche après meulage, Contrôles par moyens non destructifs (courants de Foucault, ondes de surface, etc.) qui permettent de faire du contrôle à 100 % et discriminent les pièces mauvaises, mesures de déformations, aspect visuel des pièces après usinage pour éliminer les criques de rectification.

Chapitre II : Traitements thermochimiques

- Des contrôles de laboratoire :

Examens métallographiques de la qualité des couches, filiations de micro dureté sur coupes, analyses chimiques pour déterminer les teneurs en carbone et/ou azote superficielles, éventuellement le gradient en profondeur (méthode du clinquant, dosage de copeaux, etc.) [14].

II.3. Nitruration

II.3.1. But et principe de la nitruration

II.3.1.1. But de nitruration

Il est conduit dans le but de s'affranchir des précipitations de carbures et constitue une alternative aux nitrurations et carburations à basse température avec la possibilité d'obtenir des couches enrichies plus profondes. C'est la version appliquée aux aciers martensitiques qui présente le plus d'intérêt [15].

II.3.1.2. Principe de nitruration

Dans le procédé classique, l'apport d'azote atomique à la surface de l'acier est obtenu par dissociation thermique d'ammoniac, catalysée par Fe :



La température usuelle de nitruration est comprise entre 500°C et 550°C. Elle est inférieure à la température de la transformation eutectoïde à 590°C. Le traitement peut comprendre plusieurs paliers isothermes. La nitruration n'a d'intérêt que pour des aciers alliés contenant des éléments tels que Cr, Mo, V, Al [15].

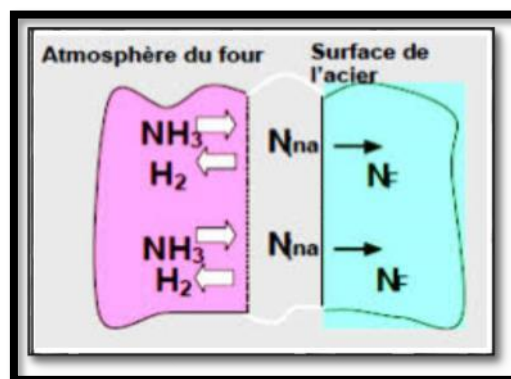


Figure II.7. Schéma de principe de nitruration [16].

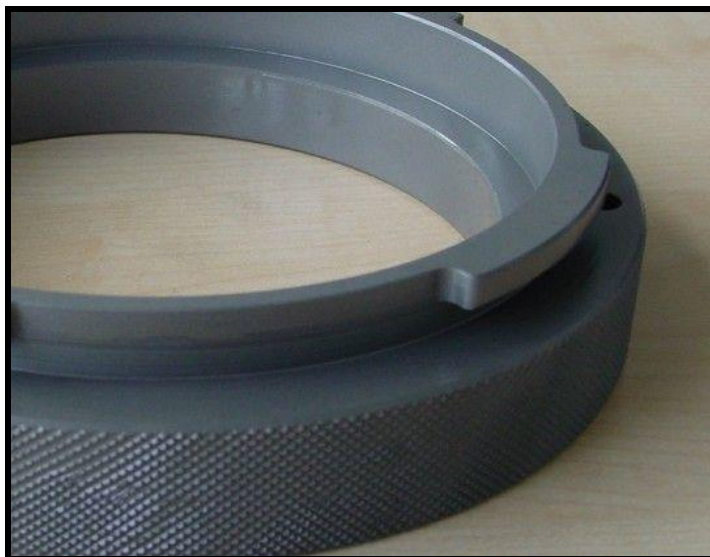


Figure II.8. Couleur d'une pièce après nitruration [17].

II.3.2. Diagramme d'équilibre fer-azote

Les caractéristiques cristallographiques de différentes phases de ce diagramme sont regroupées dans le (tableau II.1)

La limite de solubilité de l'azote dans la ferrite dans l'intervalle de température 400 – 580 °C est très faible ($\leq 0,1$ % en masse). Dès que cette limite a été dépassée, il y a formation de nitrures de fer γ' ou ϵ . Pour la nitruration des aciers il faut prendre en compte le diagramme ternaire Fer – azote – carbone. Ceci permet de dire que l'azote est très peu soluble dans les carbures de fer, ainsi que dans le nitrure stable γ' (Fe_4N) ($\leq 0,2$ % en masse) comparée à celle de la phase instable ϵ (Fe_{2-3}N) qui est de 3,7 % massique à 560 °C.

Ce pendant, dans les aciers, on ajoute des éléments d'alliages pour améliorer certaines propriétés et notamment l'aptitude à la trempe. Dans ce cas la présence d'éléments d'addition vient fortement perturber les domaines d'existence des phases déjà répertoriées et provoque également l'apparition de nouvelles phases. Les éléments d'addition les plus couramment rencontrés sont le chrome, le vanadium, le molybdène, le titane, le manganèse qui sont tous capables de former des carbures, des nitrures et des carbonitrures.

Dans les aciers dits de nitruration, les éléments d'addition sont destinés à favoriser la germination et la croissance de précipités de nitrure qui augmentent la dureté du matériau [18].

Chapitre II : Traitements thermochimiques

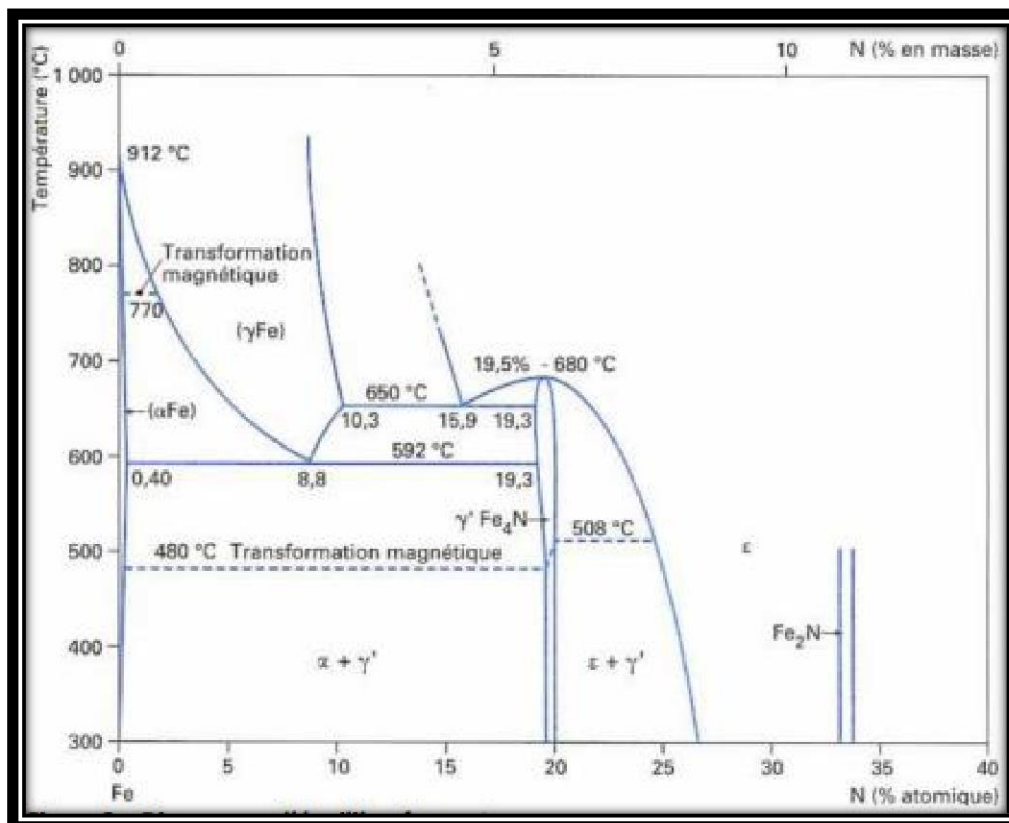


Figure II.9. Diagramme d'équilibre fer-azote [18].

Phases	Structure Cristalline	Paramètres cristallins	Teneur (% N massique)
α	C.C	0,2866 0,2864 (0 ; 11 m. % N)	0,1 % à 590 °C 0,003 % à 200 °C
γ	C.F.C	0,361(1,42 m. % N) 0,365 (2,76 m. % N)	
γ' (Fe_4N)	C.F.C	0,3795	Max 5,75 % Min 5,3 %
ϵ (Fe_{2-3}N)	H.C	a = 0,27 c = 0,4371	Max 10,75 % Min 7,25 %

Tableau II.1. Caractéristiques cristallographiques des phases du système fer-azote [19].

Chapitre II : Traitements thermochimiques

II.3.3. Préparation de la pièce avant et après nitruration

II.3.3.1. Préparation de la pièce avant nitruration

Avant la nitruration, les composants doivent être soigneusement nettoyés et dégraissés. Toute contamination de la surface par des particules provenant du pré polissage, de la graisse ou des copeaux de métal résultera dans une formation non-uniforme de la couche nitrurée. Cela peut être la cause de fissures dans le revêtement pouvant aboutir à un écaillage et une corrosion.

Après le nettoyage, les pièces sont séchées et préchauffées, puis transférées à l'environnement de nitruration lui-même. Les différents processus de nitruration peuvent être principalement différenciés selon leur source de nitrogène et alimentation en énergie [21].

II.3.3.2. Préparation de la pièce après nitruration

Après chargement, le four est purgé par circulation d'azote, et chauffé par convection forcée jusqu'à la température de traitement. Le mélange de gaz actif NH_3 ou NH_3 gaz carburant est alors injecté, et maintenu à la température déterminée pendant une durée dépendant de la profondeur de couche désirée. La nature et la profondeur de couche dépendant, selon la nuance d'acier utilisée, du temps de la température, et de la composition de l'atmosphère de traitement. Les paramètres sont maintenant gérés par système informatisé. Les fours utilisés sont généralement de forme cylindrique type pot, puits ou horizontaux. Ils peuvent atteindre de très grandes dimensions [22].

II.3.4. Les différentes classes de traitement de nitruration

II.3.4.1. Nitruration gazeuse

La nitruration en phase gazeuse s'effectue dans des fours de type cloche ou puits équipés d'un dispositif de circulation forcée des gaz composants l'atmosphère nitrurant [22].

L'atmosphère est en légère surpression et le débit du gaz dans le four à une température donnée et pour une charge de pièces déterminée, fixe le taux de dissociation de l'ammoniac selon la réaction :



Seule la fraction de gaz non dissociée aura une action nitrurant selon le mécanisme suivant :
Au contact de l'acier la molécule de NH_3 subit un craquage catalytique en NH_2 , NH , N et H :



Chapitre II : Traitements thermochimiques



Une partie d'azote naissant produit diffuse à la surface de l'acier, tandis qu'une autre partie est désorbée pour reconduire à la formation de la molécule N_2 . La diffusion d'azote dans le matériau dépend de la concentration locale en azote atomique. La phase α étant très rapidement saturée en azote, les phases γ' (Fe_4N) ou ε (Fe_{2-3}N) apparaissent par nucléations localisées. Ces phases croissent tandis que l'azote continue à diffuser dans la structure de l'acier. La croissance de γ' et ε conduit à la formation de la couche de combinaison alors que celle-ci alimente la zone de diffusion [23].

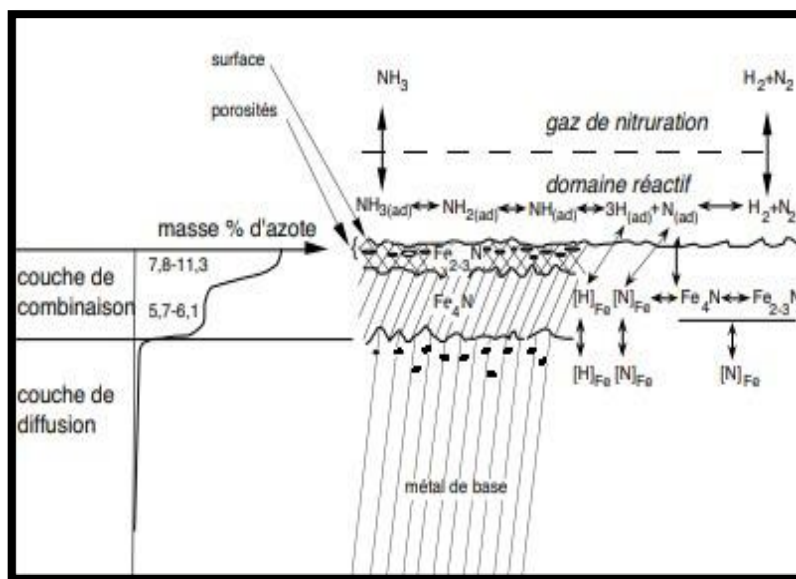


Figure II.10. Nitruration gazeuse [24]

II.3.4.2. Nitruration liquide

Elle s'effectue dans un bain de cyanures alcalins, par lequel on fait passer de l'air sec. La basse température fait que l'azote fourni par la décomposition des cyanures est pratiquement le seul à diffuser dans l'acier. Après nitruration les pièces sont refroidies à l'air ou à l'huile. Ce traitement produit à la surface de l'acier une fine couche superficielle d'une épaisseur de (7 à 8 μm) qui est constituée du carbonitride $\text{Fe}_{2-3}(\text{N}, \text{C})$.

Chapitre II : Traitements thermochimiques

Aux températures de nitruration 500-550 °C, il est possible d'obtenir une réaction chimique apte à fournir de l'azote à partir de la décomposition thermique d'un cyanure alcalin (potassium ou sodium). Cette nitruration se réalise dans des caisses comme dans le cas de la cémentation. La cyanamide calcique est l'agent nitrurant en présence d'activateurs qui libèrent les éléments N, C, O et H [25].

Différents bains industriellement utilisés, à base de cyanate et de carbonate peuvent être utilisés, la nitruration peut être activée par insufflation d'air, la réaction est alors plus rapide. Il est possible de former des couches de combinaison épaisses, mais souvent la couche de diffusion est faible et la température élevée ne permet pas d'obtenir des valeurs de contraintes importantes [26].

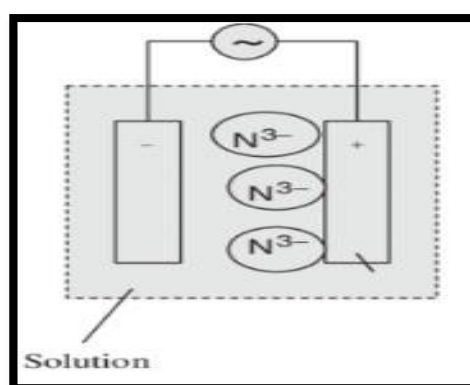


Figure II.11. Nitruration liquide [26].

II.3.4.3. Nitruration ionique

Dans une enceinte contenant un mélange gazeux à base d'azote sous une pression de 0.1 à 10 m bars, on applique une tension continue, comprise entre 300 et 1300V, entre deux électrodes. L'échantillon à traiter fait office de cathode et les parois de la cuve d'anode. Le courant et la tension sont choisis de manière à provoquer une décharge lumineuse qui conditionne le départ et l'accélération des électrons libres de l'échantillon métallique vers les surfaces anodiques du four. Lorsque ces électrons entrent en collision avec les molécules de gaz proches de la surface de l'échantillon, celles-ci s'ionisent, c'est à dire qu'elles libèrent un ou plusieurs électrons de valence qui peuvent percuter d'autres molécules de gaz et libérer ainsi d'autres électrons. De plus, le champ électrique au voisinage de la cathode et de l'anode est suffisamment élevé pour provoquer aussi l'ionisation des atomes de l'atmosphère gazeuse [27].

Chapitre II : Traitements thermochimiques

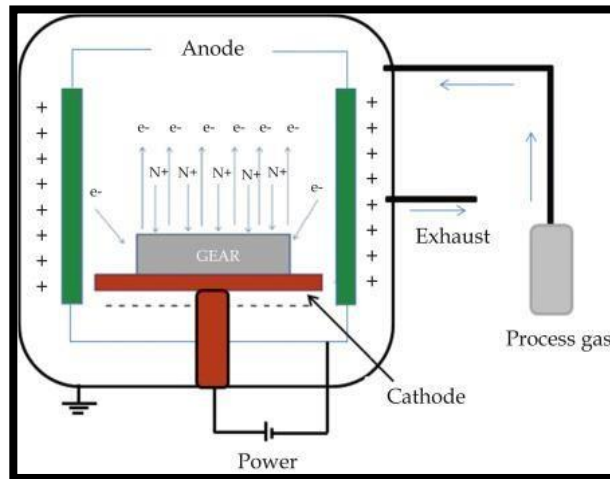


Figure II.12. Schéma d'un dispositif de nitruration ionique [27].

II.3.5. Défaut de nitruration

Les défauts sont le temps de traitement qui peut atteindre 70 h, une faible profondeur durcie donc une faible usure tolérable, peu de résilience, de faibles contraintes et déformations admissibles en service ainsi qu'un léger gonflement des pièces [28].

Le problème principal rencontré lors de la préparation des composants nitrurés est l'écaillage de la couche poreuse et la fissure de la couche de combinaison, Ces dommages sont principalement introduits lors de la première étape de pré polissage. Un enrobage incorrect et un polissage long sur draps doux va donner des bords arrondis. Comme l'évaluation du revêtement est faite à un grossissement de 1000x, les bords arrondis aboutissent à des mesures incorrectes de l'épaisseur [21].

II.4. Boruration

II.4.1. But de boruration

La boruration est un procédé de diffusion thermochimique, qui se fait dans le domaine de températures (800-1050°C) durant des temps allant de 0,5 à 10 h en utilisant un agent borurant qui libère du bore à l'état atomique. La conséquence d'un tel traitement est la formation des borures qui possèdent d'intéressantes propriétés physico-chimiques, mécaniques et tribologiques [29].

Chapitre II : Traitements thermochimiques

II.4.2. Principe de boruration

C'est une saturation de la couche superficielle de l'acier en bore par diffusion de ce dernier en milieu pulvérulent et à une température supérieure à AC_3 .

Le bore permet d'obtenir des borures, de type FeB ou Fe_2B , qui assurent une dureté très élevée (1800 à 2000HV), une bonne tenue à l'usure et à la corrosion. La boruration est effectuée par électrolyse des sels fondus contenant du bore, le bain de bore $Na_2B_2O_7$ fondu, sert de cathode, dans ce dernier on place les pièces. La température de saturation est de 930 à 950°C et la durée de séjour est de 2 à 6 heures. La boruration peut être aussi effectuée sans électrolyse dans des bains de chlorures fondus ($NaCl$, $BaCl_2$), auxquels on ajoute du ferro-bore (20 %) ou du carbure de bore (10 %) pulvérulents.

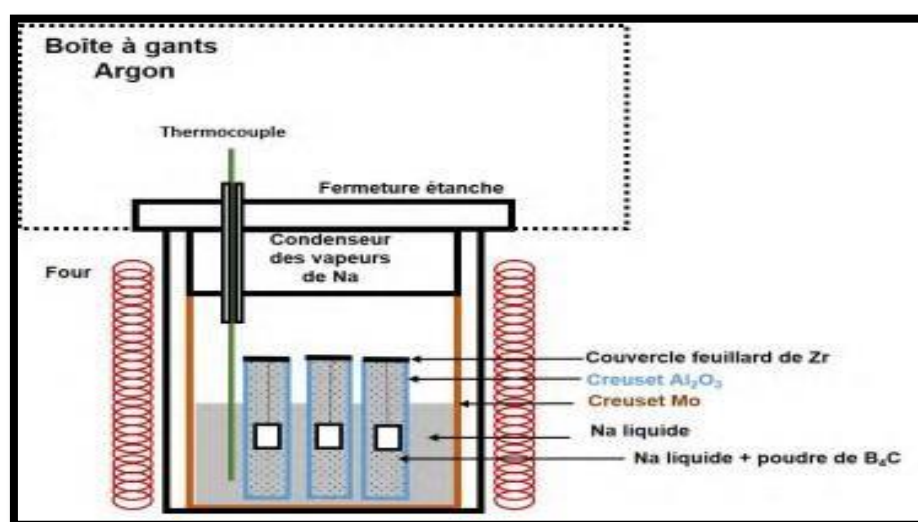


Figure II.13. Schéma du dispositif expérimental de boruration [30].

II.4.3. Diagramme d'équilibre fer-Bore

La diffusion du bore dans le fer forme une solution solide, il se dissout dans les sites interstitiels de la phase γ et en substitution dans la phase α . Toute fois le bore est très peu soluble dans le fer [31].

Pour mieux comprendre la formation des solutions solides du bore dans le fer, on doit se référer au diagramme d'équilibre binaire Fe-B qui est représenté dans la (Figure II.14) :

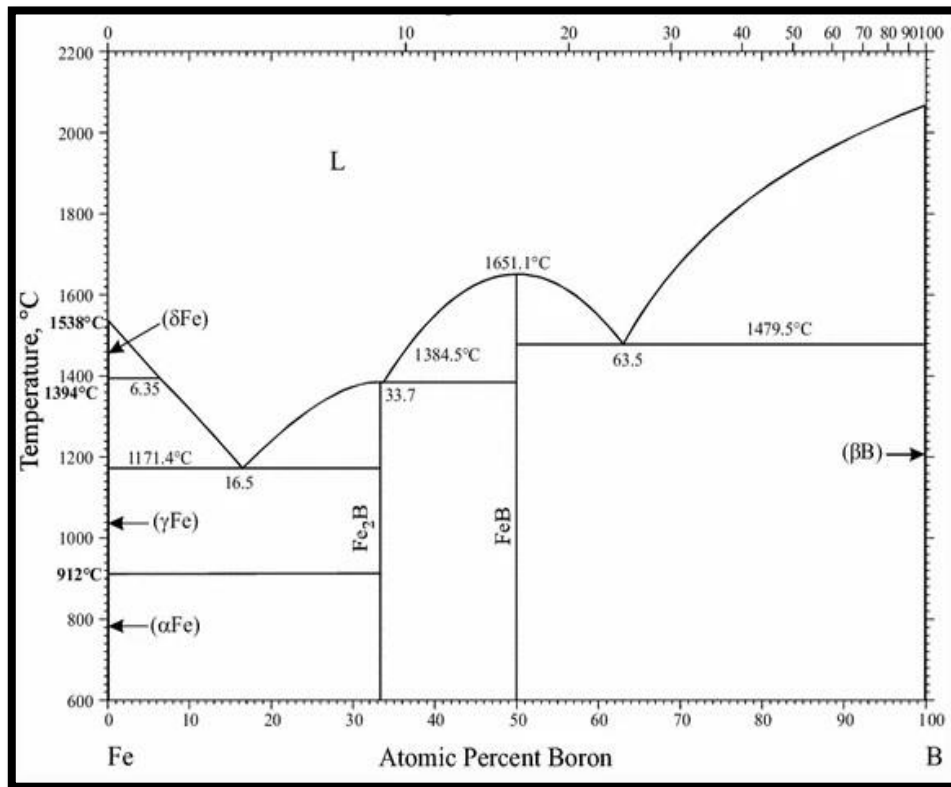


Figure II.14. Diagramme d'équilibre fer-bore [32].

D'après ce diagramme d'équilibre, deux types de borures de fer existent [31].

- Fe₂B avec un pourcentage en masse de 8,83%,
- FeB avec un pourcentage en masse de 16,23%.

1

II.4.4. Les différents types de boruration

II.4.4.1. La boruration par voie gazeuse

Dans ce type de traitement, la boruration est basée sur la décomposition thermique des composés volatils à base du bore.

La décharge anormale est la technique utilisée, où l'intensité du courant appliqué croît avec la tension qui chute dans l'espace entourant la cathode (le substrat). Ce qui donne lieu à des espèces ionisées qui sont accélérées vers la surface du substrat, provoquant ainsi un échauffement qui conduit à l'implantation des atomes du bore à la surface du substrat [33].

Les composés utilisés dans ce procédé sont les suivants :

- Le diborane (B₂H₆) ;
- Composés organiques à base du bore ;

Chapitre II : Traitements thermochimiques

- Les halogénures du bore (BF_3 , BCl_3 ou BBr_3).

II.4.4.2. La boruration par voie solide

Le traitement de boruration est effectué en utilisant une source du bore à l'état solide. La boruration avec du bore amorphe permet d'avoir des couches minces et poreuses. Les produits les plus utilisés dans ce traitement sont les poudres de bore, les poudres de Ferro bore et les poudres des carbures de bore. Les mélanges de poudres de compositions chimiques ci-dessous sont les plus utilisés à l'échelle industrielle [34].

- 5% B_4C , 90% SiC , 5% NaBF_4
- 5% B_4C , 90% SiC , 5% KBF_4
- 50% B_4C , 45% SiC , 5% KBF_4
- 85% B_4C , 15% Na_2CO_3
- 95% B_4C , 5% Na_2CO_3
- 84% B_4C , 16% $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$

II.4.4.3. La boruration par voie liquide

Pour ce type de boruration, le traitement des pièces se fait dans un milieu liquide. La libération du bore vers la surface de la pièce traitée nécessite la réduction chimique du composé porteur de bore. Cette réduction peut s'effectuer soit par voie électrochimique sous l'application d'une tension, ou par voie chimique par addition d'un agent réducteur au bain de boruration [35].

- La boruration électrochimique dans des sels fondus ;
- La boruration chimique dans des sels fondus.

II.4.5. Les applications industrielles de la boruration

La boruration est appliquée aux pièces employées dans l'industrie pétrolière, bagues de pompes à boue, les matrices et estampes pour le formage à chaud. La boruration est un procédé que peuvent subir tous les aciers, car elle confère aux pièces une grande résistance à l'abrasion et à l'usure [36].



Figure II.15. Couche de boruration sur l'engrenage [37].

Chapitre II : Traitements thermochimiques

Branche de l'industrie	Applications
Construction mécanique	Disque de forains, tombeur, mandrins, bague de palier, pistons de pompe, poisson d'emboutissage, canon de perçage, moule ou filière à céramique, herse, outil d'estampage.
Industrie automobile	Engrenage, soupape.
Industrie des bâtiments	Elément d'utilisation et transport du béton Guide chaîne-scie de tronçonneuse
Industrie chimique	Moteurs de chemise de pompe, Bacs destinés à contenir de l'acide, de la cryolite.
Industrie textile et plastique	Buse, plaque de buse, guide fils, tube molette de coupe, cylindre.

Tableau II.2. Quelques exemples d'applications industrielles des pièces borures [38].

Des applications très variées pour la boruration sont présentes dans la technique de l'extrusion-injection, dans la robinetterie et dans le domaine de la construction de machines et d'appareils. Des applications particulières pour des pièces à grande durée de vie se trouvent par ailleurs dans l'industrie alimentaire et la construction automobile [39].

II.4.6. Défauts de boruration

Les pièces deviennent des rebuts difficilement réutilisables : surface noircie et oxydée dû à la présence de vapeur d'eau dans le four, modification non souhaitée de la composition, variation de dureté non homogène sur la surface, pénétration du traitement variable selon la géométrie de la pièce, etc. L'entretien du four et du réseau de distribution des gaz est indispensable pour garantir un résultat final conforme aux attentes, et pour assurer la sécurité des opérateurs [40].

II.5. Conclusion

Les traitements thermochimiques des aciers à durcissement par précipitation permettent d'améliorer superficiellement leurs propriétés mécaniques (la dureté, module de Young, élasticité, la ténacité etc.), et leurs propriétés tribologiques comme la résistance à l'usure, frottement etc.

Chapitre II : Traitements thermochimiques

Références bibliographiques de chapitre II

- [1] S.Taqieddine & H.Fares, thèse de master en mécanique, (Etude des traitements thermochimiques des aciers), 2021, Université de M'sila P 59.
- [2] <http://www.geocities.ws/mbara2/cementation.html>
- [3] M. Sabrina, contribution à l'étude de la calorisation dans les alliages base de Fer, Thèse, doctorat 2016.
- [4] http://campus.cerimes.fr/odontologie/enseignement/diagramme/site/html/4_42_423_1.html
- [5] D.GHIGLIONE, C. LEROUX, Ch. TOURNIER, Cémentation. Carbonitruration, techniques de l'ingénieur, 10 juil. 1994, M1226 v1.
- [6] Langevin, C. [Comité Performe] Opérateur en traitement de surface. (2014).
- [7] SAID. Traitements thermiques, classification et désignation des aciers et fontes.
- [8] G.Noussaiba, B.Fatma. Comportements mécaniques Des aciers faiblement alliés avant et après cémentation (Thèse de master). (2016).
- [9] [https://www.sceiconcours.fr/tipe/TIPE_2009/sujets_2009/SI_PT_2009\(DOSSIER_PRINCIPAL\).pdf](https://www.sceiconcours.fr/tipe/TIPE_2009/sujets_2009/SI_PT_2009(DOSSIER_PRINCIPAL).pdf)
- [10] H. HERN, H. FR. HINZ and I. M. HUCKLENBROICH: 'Progress in toolsteel', Proceeding of the 4th international Conference on tooling, 1996, University Bochum.
- [11] Cémentation. Récupéré sur [geocities](http://www.geocities.ws/mbara2/cementation.html) : <http://www.geocities.ws/mbara2/cementation.html> (2020, juin).
- [12] M. athmani. Amélioration des propriétés de surface d'un acier à outils de travail à chaud par des traitements thermiques et thermochimiques (cémentation) (Thèse de magister). (2011).
- [13] <https://www.emcotest.com/fr/lunivers-des-essais-de-durete/connaissances-de-la-durete/applications-conseils/mesures-de-la-filiation/chd-case-hardness-depth-profondeur-de-cementation.html>.

Chapitre II : Traitements thermochimiques

- [14] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-traitement-des-metaux-tiamd/archive-1/cementation-carbonituration-m1226/defauts-et-deformations-m1226niv10012.html>.
- [15] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/traitements-thermiques-superficiels-et-thermochimiques-42501210/nitruration-et-nitrocarburation-m1227/nitruration-a-haute-temperature-des-aciers-inoxydables-m1227v2niv10006.html>
- [16] <http://e-learning.univ-tebessa.dz/moodle/login/index.php>.
- [17] <https://imsfrance.com/index.php/produits/aciers-pour-la-mecanique-et-fontes/aciers-pour-nitruration>.
- [18] H. A. Wriedt, N.A. Gokcen, R.H. Nafziger. Bull. Alloy Phase Diagrams, Vol.8, (1997), p. 355.
- [19] L. MAROT, “Développement d’un nouveau système d’implantation ionique en immersion plasma et analyses des processus de nitruration,” Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France, 2001.
- [20] D.GHIGLIONE, C. LEROUX, Ch. TOURNIER ; Nitruration, nitrocarburation et dérivés, 10 janv. 1996 ; M1227 v1 ; technique de l’ingénieur.
- [21] [file:///C:/Users/michael/Desktop/Downloads/Preparation%20metallographiques%20des%20composants%20nitrides%20et%20carbonitrides%20\(6\).pdf](file:///C:/Users/michael/Desktop/Downloads/Preparation%20metallographiques%20des%20composants%20nitrides%20et%20carbonitrides%20(6).pdf).
- [22] [https://www.groupethermilyon.com/traitement_thermochimique_de_surface_\(gazeuse_controllee\).html?a=12](https://www.groupethermilyon.com/traitement_thermochimique_de_surface_(gazeuse_controllee).html?a=12).
- [23] C. Dermaix, G. Veyssiere, L. Henry, Journées Traitements de Surface Anticorrosion, Limoges, Novembre (2000).
- [24] B. Grellet, Journées Spécialisées du CACEMI, Paris, Mars (1999).
- [25] J. P. Lebrun et Y. Corre, Journées Spécialisées du CACEMI, Paris, Mars (1999).
- [26] B. Grellet, Journées Spécialisées du CACEMI, Paris, Mars (1999).

Chapitre II : Traitements thermochimiques

- [27] BARRALLIER (L.). Genèse des Contraintes Résiduelles de Nitruration. Thèse de Doctorat en Mécanique des Matériaux, ENSAM d'Aix en Provence, (1992).
- [28] Rakhit, A. K. Heattreatment of gears: practical guide for engineers. ASM international.(2000).
- [29] A.K. Sinha, Boronizing, Heattreatment- ASM International Handbook, Vol. 4 (1991), p.437.
- [30] M. MARIE M. ROMEDENNE, DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, 10octobre 2018, p 210.
- [31] H. Okamoto, J. Phase Equilibria 25 (2004), p. 297
- [32] O. Kubaschewski, "Fe-B, Iron-Boron.", pp. 15-18 of volume Iron-Binary phase diagrams, Springer-Verlag, 1982.
- [33] W.Fichtl, N. TransnerwithEkabor, documentation E. S. K, 1988.
- [34] A.K. Sinha, Boronizing, Heattreatment- ASM International Handbook, Vol. 4 (1991),p.437.
- [35] O.Allaoui, N.Bouaouadja, G.Saindernan, Surf.Coat.AndTechnol.201 (2006), p.3475.
- [36] Boucifi, I. Boutemak, I. Etude microstructurale et mécanique sur l'effet de la boruration sur la nouvelle phase max Cr₂AlC (Thèse de master). (2019).
- [37] P. Goeuriot, F. Thevenot, J. Driver, Nouveau procédé industriel de boruration des aciers et cerments "BORUDIF", Traitement Thermiques, 176 (1983), p. 47.
- [38] R.H. Biddulph, Thin Solid Films, Vol.45 (1977), P.344-347.
- [39] Sara Olsson and Linn Efsing. Wear testing of high-alloy carbon steel used in mining tools, 2013.
- [40] <https://fr.airliquide.com/solutions/traitement-thermique-des-metaux/avantages-inconvenients-et-pourquoi-faire-des-traitements-thermiques>.

Chapitre III :

Techniques
expérimentales de
cimentation- Résultats
et discussions

III.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude expérimentale de l'effet du potentiel de carbone (C_p) sur la profondeur et la nature de la couche superficielle en acier XC 20 cémentée, où nous abordons d'abord le choix du matériau à étudier et sa composition chimique, puis nous décrivons les techniques et les méthodes expérimentales utilisées lors du traitement de cémentation. Finalement, nous avons discuté les résultats obtenus avant et après cémentation de l'acier XC20 en termes de structures, dureté, l'énergie absorbée, la ténacité.

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

Le matériau utilisé dans notre étude est l'acier XC20, qui appartient aux aciers doux de la classe des aciers non alliés à faible teneur en carbone à 0,2%, pour les traitements thermiques et cémentation. Le tableau ci-dessous présente les quantités des éléments d'alliages obtenues à l'aide d'un spectromètre à émission optique (SEO) de l'acier XC20. Il est clairement observable que cette nuance, contient des éléments d'additions avec des quantités minimales sous formes des traces.

L'élément	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Fe
Quantité (%)	0.208	0.201	0.513	0.105	0.027	0.106	Bal.

Tableau III.1. Composition chimique de l'acier XC20 non traité (brut).

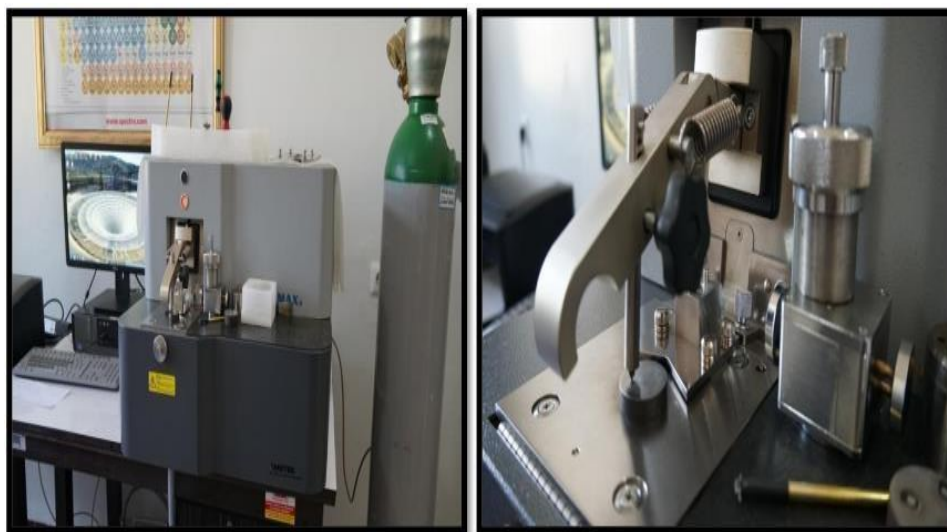


Figure III.1. Spectromètre à émission optique (SEO).

III.3. Usinage des éprouvettes de résilience C_1 , C_2 et C_3

La préparation des éprouvettes de résilience destinées au traitement thermochimique de cémentation se fait selon les étapes mentionnées ci-dessous :

- Après avoir choisi le matériau de notre étude du type (acier XC20) à partir de la base de données de l'entreprise ;
- Découpage de trois (3) cylindres en acier XC20, d'une longueur de 60 mm d'un diamètre $D=14$ mm de stock en utilisant un disque de coupe circulaire avec lubrification de refroidissement pour qu'il ne surchauffe pas et par conséquent ne se déforme pas et conserve ses propriétés initiales.
- Nous avons utilisé des machines de tournage et fraisage pour la préparation de trois (3) éprouvettes de résilience (Charpy U) (C_1 , C_2 et C_3) d'une longueur de 55 ± 1 mm de diamètre $d 10\pm 0,1$ en suivant le dessin de définition trouvé dans la figure III.4.
- Finalement, une phase de rectification pour affiner l'état de surface des éprouvettes C_1 , C_2 et C_3 en utilisant une machine de rectification.



Figure III.2. Machine de tournage.



Figure III.3. Machine de rectification cylindrique

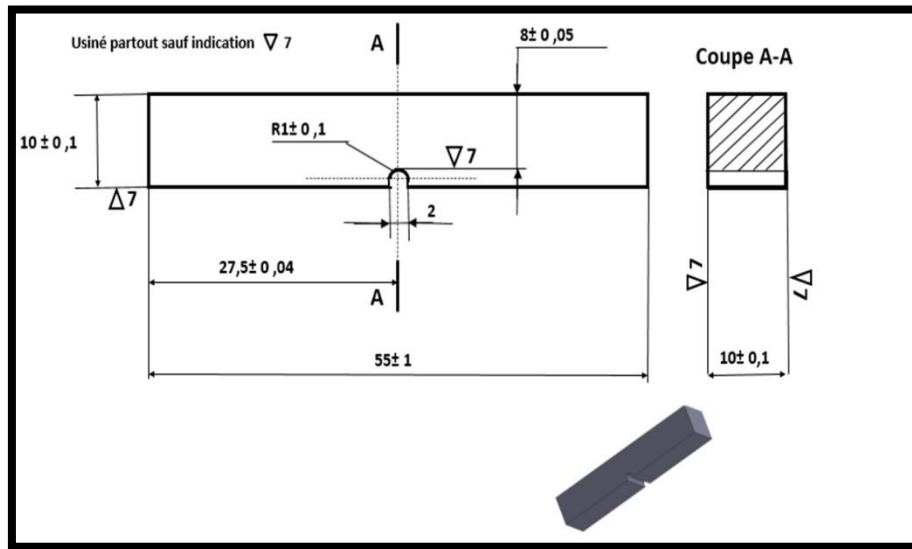


Figure III.4. Dimensions standard de l'éprouvette de résilience (Charpy U).

III.4. Technique de cémentation

La cémentation ayant pour but essentiel d'enrichir en carbone la couche superficielle de l'acier XC20 suivi d'une trempe et revenu pour donner un durcissement supplémentaire superficiellement aux éprouvettes de résilience (choc) C_2 et C_3 . Dans notre étude, nous avons varié le potentiel du carbone ($C_p\%$) en fixant la durée et la température de cémentation. Les conditions opératoires de traitement sont résumées comme suivant :

- L'éprouvette de résilience C_1 est laissée sans traitement pour utiliser comme référence afin de comparer clairement les modifications structurales et les propriétés mécaniques de l'acier XC20 avant et après cémentation.
- Chauffage des éprouvettes (C_2, C_3) jusqu'à la phase austénitique ($T_1=910^\circ\text{C}$) ;
- Utilisation d'un débit varié de méthanol (CH_3OH), pour modifier le potentiel de carbone (C_p) utilisé durant la cémentation, où $C_p = 0.8\%$ en C_2 et $C_p = 1.1\%$ en C_3 en fixant la durée de cémentation $t=180$ minutes pour les deux éprouvettes ;
- Finalement, une phase de trempe à huile à une température $T_2=830^\circ\text{C}$, suivi d'un traitement de revenu à $T_3=180^\circ\text{C}$ pendant 2 heures pour entraîner la diffusion des atomes de carbone pour que l'acier XC20 revient vers un état proche de l'équilibre.



Figure III.5. Four de cémentation gazeuse.



Figure III.6. Four de trempe et revenu.

III.5. Préparation des éprouvettes C_1 , C_2 et C_3 pour caractérisation

III.5.1. Découpage

La préparation des éprouvettes (C_1 , C_2 et C_3) pour la caractérisation commence par un découpage en petits morceaux de 1 cm/1cm en utilisant une tronçonneuse avec lubrifiant spécial afin d'éviter l'échauffement et la déformation thermique de la matière (figure III.7). En outre, une coupe correcte permet d'obtenir des spécimens en parfait état pour les prochaines étapes de préparation.



Figure III.7. Tronçonneuse à disque lubrifié.

III.5.2. Enrobage

Une fois l'étape de découpage est terminée, la seconde étape du processus consiste à enrober par époxy spécial les spécimens des éprouvettes C_1 , C_2 et C_3 . Le but de l'enrobage est de pouvoir manipuler les spécimens de forme irrégulière en donnant une excellente préservation des bords et pour éviter les phénomènes de ressuage. Les bords extérieurs des clips seront de préférence biseautés pour abîmer le moins possible les draps de polissage. La résine utilisée dans cette opération est de type thermoplastique une des propriétés intéressantes de cette résine est qu'elle demeure transparente une fois refroidie, rendant plus facile la détection de la surface à étudié.



Figure III.8. Enrobeuse.

III.5.3. Polissage mécanique

Le polissage est l'étape la plus importante dans le processus de préparation des spécimens des éprouvettes C₁, C₂ et C₃ en suivant les étapes suivantes :

III.5.3.1. Pré polissage

- Polir les spécimens des éprouvettes C₁, C₂ et C₃ avec du papier abrasif de granulométrie de plus en plus fin (P120, P240, P480, P800, P1000, P1200) en inversant le sens du polissage pour chaque papier afin de supprimer toutes les rayures;
- Le polissage se fait avec arrosage de l'eau pour éviter l'échauffement des spécimens ;
- Pour entraîner les grains d'abrasifs et les particules du métal arrachées. La durée de polissage est variable entre 2 à 3 minutes par granulométrie (contrôler visuellement).

III.5.3.2. Polissage de finition

- Se servir d'un feutre sur lequel sera étalée la solution d'alumine quand le frottement devient notable, avec arrosage de l'eau distillée, la durée de polissage de finition est à l'environ de 3 minutes.
- Rincer soigneusement l'échantillon sous l'eau en le frottant délicatement.
- Finalement, sécher les spécimens des éprouvettes C₁, C₂ et C₃ au séchoir électrique.



Figure III.9. Polisseuse automatique.

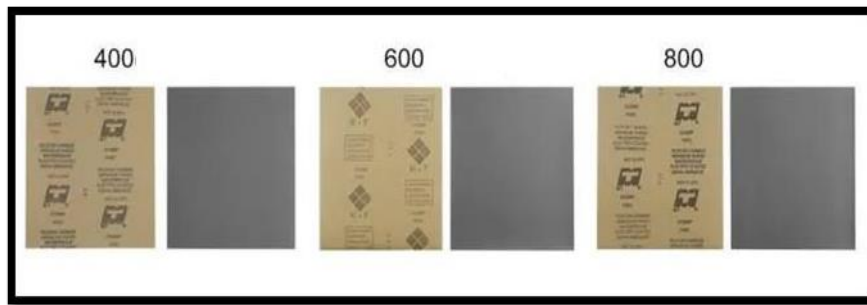


Figure III.10. Papier abrasif.

III.5.4. Attaque chimique

Après polissage de finition, les spécimens des éprouvettes C_1 , C_2 et C_3 sont attaqués chimiquement pour révéler les macros, et les microstructures des différentes zones.

Nous avons attaqué chimiquement les trois spécimens par :

- 4 ml d'acide nitrique HNO_3 .
- 96 ml d'éthanol C_2H_5OH .

La durée d'attaque varie entre 15 à 30 secondes.

Finalement, les spécimens des éprouvettes C_1 , C_2 et C_3 sont nettoyés à l'eau distillée et séchés pour l'observation.



Figure III.11. La solution d'attaque chimique métallographie.

III.6. Cristallographie des éprouvettes C_1 , C_2 et C_3

La technique d'analyse utilisée dans notre travail est le microscope optique (MO) est une technique de base pour étudier les transformations structurales. Elle permet de visualiser et d'analyser les détails de la structure sous ses différentes échelles (forme et taille des grains de structure, forme et taille et distribution de la porosité, joints de grain, points multiples, ordre structural...).

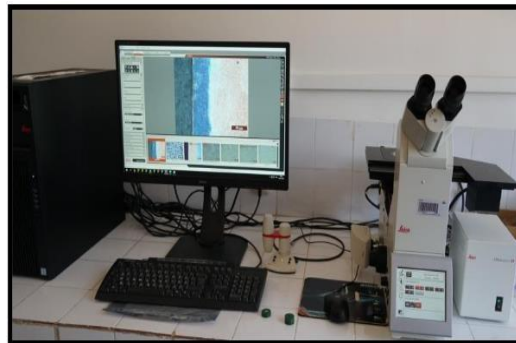


Figure III.12. Microscope optique.

III.6.1. Microstructure de l'éprouvette C_1 en acier (XC20) brut

Les images obtenues par le microscope optique présentées dans la figure III.13 (a, b et c) montrent que l'acier X20 non traité (brut) a une structure homogène au cœur et au bord constituée de ferrite et de perlite lamellaire.

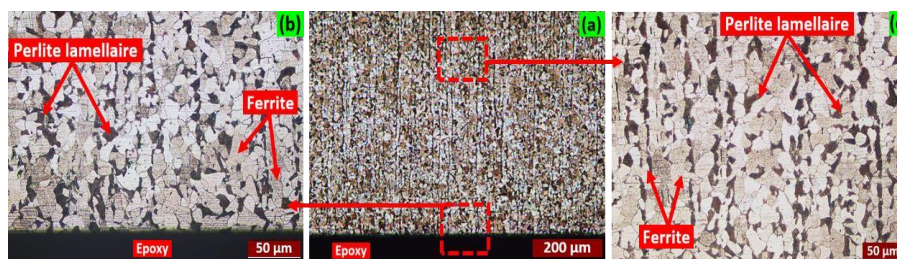


Figure III.13. Microstructure de l'éprouvette C_1 en acier XC20 (brut).

III.6.2. Microstructure de l'éprouvette C₂ en acier (XC20) cémenté (C_p=0.8%)

D'après la figure III.14 (a, b, c et d), on observe que l'acier XC20 cémenté durant 3 heures avec un potentiel du carbone C_p=0.8% présente trois structures différentes. Premièrement, une couche superficielle cémentée d'une profondeur moyenne P_m=588 μm qui a une structure martensitique en présence des carbures de fer (Fe₃C), cette transformation structurale due de la diffusion du carbone durant la cémentation suivie d'une trempe-revenu. Deuxièmement, une couche de diffusion qui a une structure martensitique dans laquelle sont imbriqués des carbures de fer (Fe₃C) dans les joints de grains. La dernière couche, présente le cœur de l'acier XC20 après une trempe et revenu, où la structure de base est transformée d'une ferrito-perlitique à une structure mixte de martensite et de bainite.

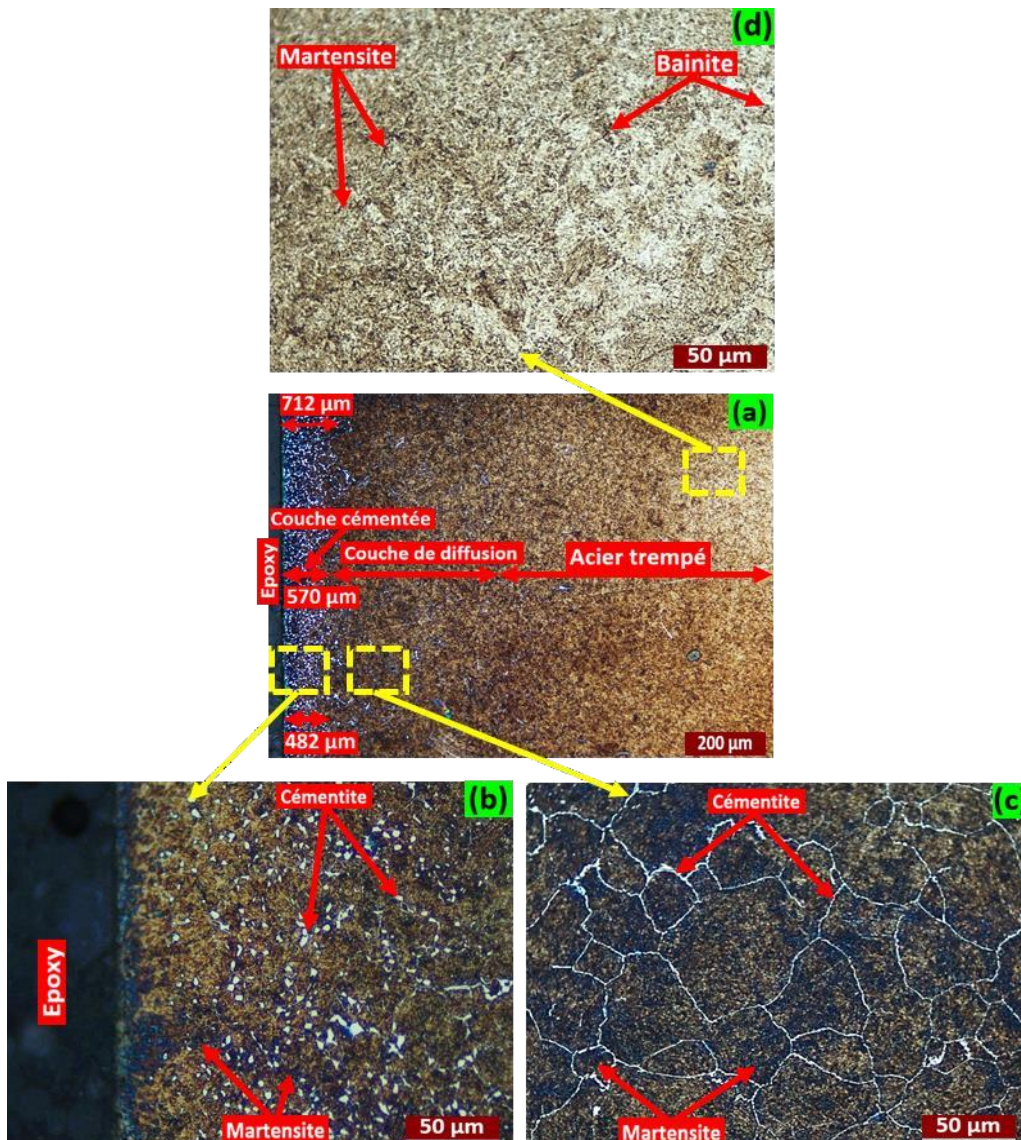


Figure III.14. Microstructure de l'éprouvette C₂ en acier XC20 cémenté à C_p=0.8%.

III.6.3. Microstructure de l'éprouvette C₃ en acier (XC20) cémenté (C_p=1.1%)

On n'observe que l'éprouvette C₃ en acier XC20 cémentée avec un potentiel de carbone C_p=1.1% présente aussi trois structures différentes de la couche superficielle vers le cœur. La couche superficielle présente une structure martensitique en présence d'une quantité élevée de la cémentite (Fe₃C) (voir la figure III.15 (a, b)), où la profondeur de cette couche est augmentée à P_m=977,33 μm car la quantité du carbone absorbée est grande avec C_p=1.1% par rapport à C₂. Après la couche cémentée, on trouve la couche de diffusion où les carbures de fer (Fe₃C) sont localisés dans les joints de grains en présence de martensite. Le cœur de l'éprouvette C₃ présente une structure martensitique et de bainite supérieure et inférieure car la diffusion des atomes de carbones lors de cémentation reste superficielle sans atteindre le cœur.

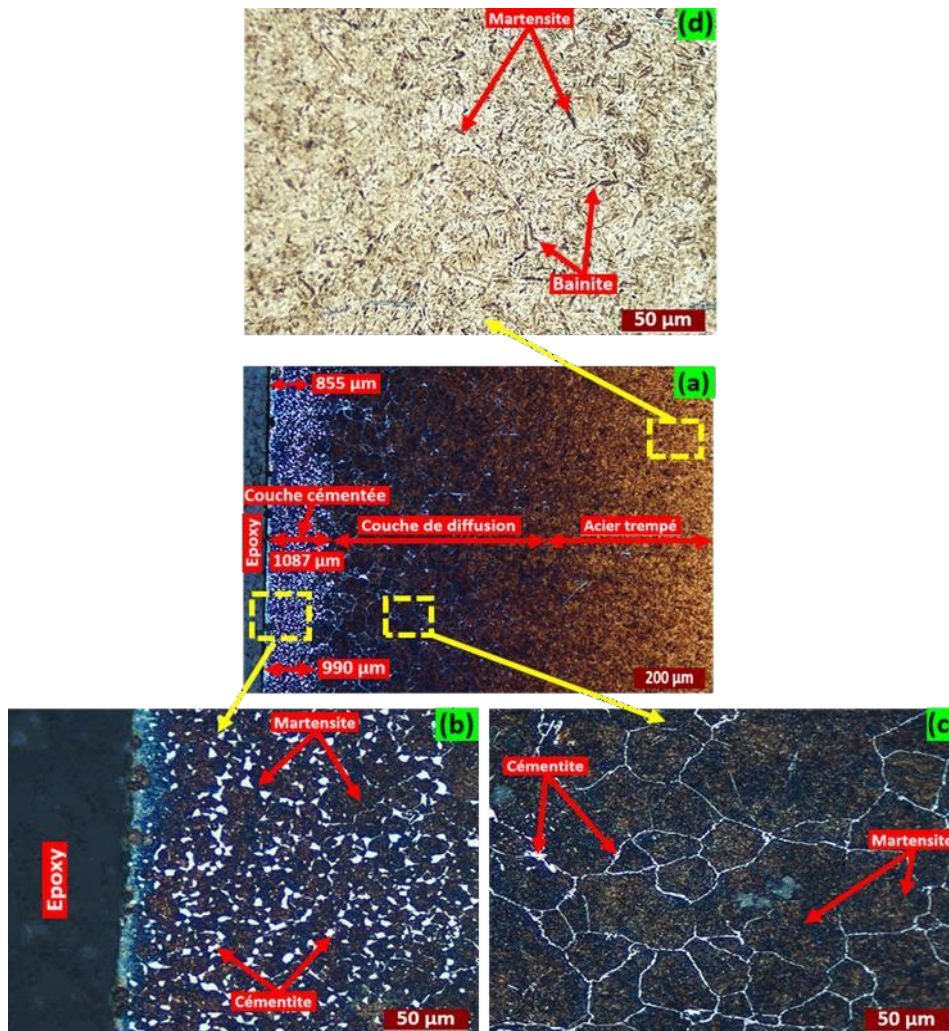


Figure III.15. Microstructure de l'éprouvette C₃ en acier XC20 cémenté à C_p=1.1%.

D'après les figures III.13, 14 et 15, on constate que l'acier XC20 non traité (brut) présente une structure ferrito-perlitique au bord et au cœur. Après cémentation, une présence de trois structures en fonction de la profondeur de la diffusion des atomes de carbone lors de cémentation.

III.7. Microdureté

La dureté est un paramètre permettant de caractériser les matériaux, donnée en mégapascal (MPa) puisqu'elle est le rapport d'une force en Newton (N) sur une surface calculée en millimètres carrés (mm^2), mais, par convention ce chiffre sera sans dimension. Il existe plusieurs manières de déterminer la dureté d'un matériau on donne quelques échèles : essais Brinell, Rockwell et Vickers le symbole de dureté est respectivement HB, HR, HV [1].

- **Dureté Vickers (HV)**

La mesure de dureté Vickers se fait avec une pointe pyramidale normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre faces égal à 136° .

L'empreinte a donc la forme d'un carré. Plus l'empreinte est importante plus le pénétrateur est entré dans la matière et moins le matériau est dur. On mesure les deux diagonales d_1 et d_2 de ce carré à l'aide d'un appareil optique. On obtient la valeur en effectuant la moyenne de d_1 et d_2 . C'est d qui sera utilisé pour le calcul de la dureté. La force et la durée de l'appui sont également normalisées [2].

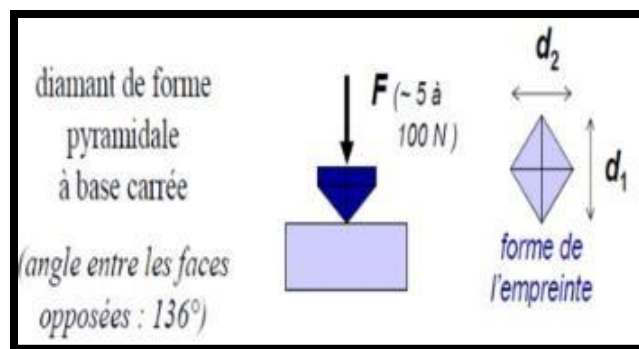


Figure III.16. Dureté Vickers (HV).



Figure III.17. Microduromètre Vickers (HV).

III.7.1. Résultats de microdureté des éprouvettes C₁, C₂ et C₃

A travers les résultats et après avoir répété l'essai trois fois, on trouve les valeurs moyennes de profil de la microdureté HV de la couche superficielle vers le cœur des éprouvettes C₁, C₂ et C₃ en acier XC20 avant et après la cémentation. La dureté est identique dans le bord et le cœur de l'acier XC20 non traité (brut) de l'éprouvette C₁ d'environ 150 HV, car il contient une structure douce (ferrito-perlitique) dans toutes les régions. Après cémentation, les éprouvettes C₂ et C₃ montrent trois zones distinctes. Premièrement, la couche superficielle cémentée présente la dureté la plus élevée d'environ 767 HV (C₂), 836 HV (C₃). Les valeurs élevées de la dureté dans la couche cémentée sont obtenues par l'effet de trempe après la diffusion d'une quantité importante de carbone en créant des carbures de fer (Fe₃C) durs et fragiles. La profondeur de la couche cémentée a été calculée par une autre méthode de mesure indirecte de la microdureté en suivant la norme ISO 18203 à 550 HV, P_{C2}=520 μm, P_{C3}=1000.5 μm. La seconde région présente la zone de diffusion des atomes du carbone avec des quantités décroissantes dans une profondeur limitée où les valeurs de la dureté sont diminuantes en conséquence d'une faible transformation de l'austénite à la martensite car le refroidissement est lent (transfert thermique par conduction). La troisième zone présente l'acier XC20 traité thermiquement car l'effet de cémentation reste superficiel et n'atteint pas le cœur où les valeurs de la dureté sont à l'entour de 250 HV.

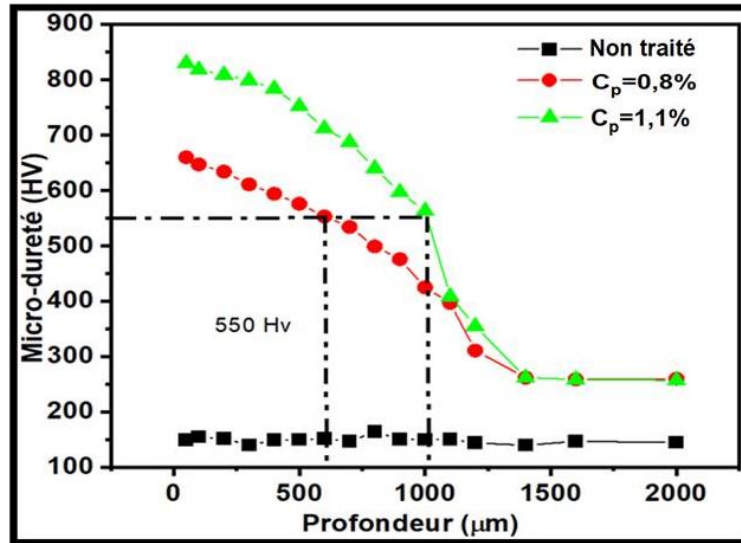


Figure III.18. Profil de la microdureté (HV) de l'acier XC 20 avant et après cémentation de la couche superficielle vers le cœur des éprouvettes C₁, C₂ et C₃.

III.8. Essai de résilience (choc)

III.8.1. Définition

Ce type d'essai se fait sur des éprouvettes parallélépipédiques entaillées. Les dimensions des éprouvettes sont normalisées (NF EN ISO 148-1). Il existe deux types d'entaille, les entailles en U et les entailles en V. Ces dernières sont les plus pénalisantes vis-à-vis de la tenue au choc. Ce sont celles qui sont le plus employées. Les essais de flexion choc sont dans la majorité des cas réalisés au moyen d'un mouton Charpy. Cette technique permet de déterminer l'énergie de rupture du matériau. Sur certains équipements, le marteau peut être équipé d'une jauge de contraintes qui permet ainsi de tracer des courbes déformation-contrainte au cours de l'essai de flexion choc [3].

L'énergie absorbée par l'éprouvette pendant le choc, est donnée par l'écart entre la hauteur initiale h_i du marteau et la hauteur finale atteinte h_f :

$$K_V = mg (h_i - h_f) \quad (1)$$

Avec :

m : masse du marteau.

g : accélération de la pesanteur.

III.8.2. Résultats de l'essai de résilience

III.8.2.1. Epreuve C₁ en acier XC20 (Brut)

La figure III.19 (a et b) montre la déformation de l'éprouvette C₁ avant et après essais de choc (résilience). Après le choc, on remarque une rupture mi-fragile de l'éprouvette C₁ cette rupture est caractérisée par une cassure avec déformation plastique moyenne (sans séparation) en absorbant une bonne quantité d'énergie $E_a=202,88$ J et d'une ténacité $K_{IC} = 289,83$ J/cm², ce qui prouve que l'acier XC20 brut appartient aux aciers doux avec une bonne ductilité.

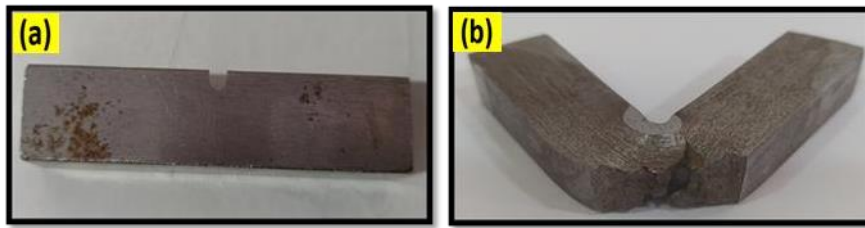


Figure III.19. Éprouvette C₁ en acier XC20 (brut) avant et après le choc.

Eprouvette C ₁	Energie (J)	Ténacité (J/cm ²)
XC20 brut	202,88	289,83

Tableau III.2. Résultats de l'énergie absorbée et ténacité de l'acier XC20 brut après un essai choc.

III.8.2.2. Epreuve C₂ en acier XC20 cémenté (C_p=0,8%)

D'après les résultats de choc, on constate que l'éprouvette C₂ en acier XC 20 cémenté (C_p=0,8%) a un comportement fragile en absorbant une petite quantité d'énergie $E_a=19,73$ J avec une ténacité à l'entouré $K_{IC}=28,19$ J/cm². La fragilisation de l'éprouvette C₂ devient de la couche superficielle cémentée d'une structure martensitique + carbures de fer (cémentite) dure et fragile, en réduisant sa résistance au choc et en créant des fissures lors de choc.

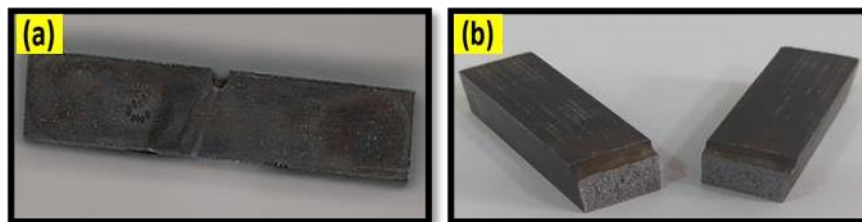


Figure III.20. Éprouvette C₂ en acier XC20 cémenté à C_p=0,8% avant et après le choc.

Eprouvette C ₂	Energie (J)	Ténacité (J/cm ²)
XC20 cémenté (C _p =0.8%)	19,73	28,19

Tableau III.3. Résultats de l'énergie absorbée et ténacité de l'acier XC20 cémenté à C_p=0.8% après un essai choc.

III.8.2.3. Eprouvette C₃ en acier XC20 cémenté (C_p=1,1%)

L'élévation de potentiel du carbone (C_p) durant la cémentation a permis de l'augmentation de la quantité du carbone à la couche superficielle cémentée (dure et fragile) en grandissant la profondeur de cette dernière. Les résultats de choc de l'éprouvette C₃ montre que la fragilité de l'acier XC 20 devient de plus en plus dominante, où l'énergie absorbée est baissée à l'entour de E_a=10,16 J et d'une ténacité K_{IC}=15,23 J/cm². La modification du comportement de l'acier XC 20 cémenté (C_p=1,1%) due de transformation de la structure de base (ferrite + perlite) a une structure martensitique dans laquelle sont imbriqués des carbures de fer Fe₃C en effet de cémentation.

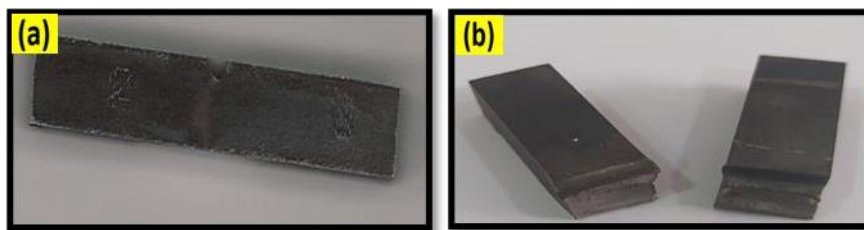


Figure III.21. Éprouvette C₂ en acier XC20 cémenté à C_p=1.1% avant et après le choc.

Eprouvette C ₂	Energie (J)	Ténacité (J/cm ²)
XC20 cémenté (C _p =1.1%)	10,16	15.23

Tableau III.4. Résultats de l'énergie absorbée et ténacité de l'acier XC20 cémenté à C_p=1.1% après un essai choc.

III.9. Conclusion

Nous concluons que l'intérêt de la cémentation est pour modifier les propriétés chimiques, structurelles et mécaniques de l'acier XC20. Avant cémentation, l'éprouvette C₁ en acier XC20 brut a des propriétés chimiques et structurelles de base, qui sont généralement équilibrées pour lui conférer une propriété mécanique modeste (dureté, résistance aux chocs...). Après cémentation, la quantité de carbone diffusée à la surface des éprouvettes C₂ et C₃ a transmis radicalement la structure de base (ferrito-perlitique) en créant des structures plus dures de martensite + bainite et de cémentite (Fe₃C). Le potentiel de carbone (C_p) a une influence significative sur la profondeur de la couche cémentée et la quantité de cémentite composée lors de cémentation. Les valeurs de la dureté sont décroissantes de la couche superficielle cémentée vers le cœur trempé. L'énergie absorbée et la ténacité sont diminuées après cémentation.

Références bibliographiques de chapitre III

- [1] R. 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.
- [2] <https://www.presi.com/durete-vickers/>.
- [3] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/assemblage-des-materiaux-par-soudage-42512210/assemblages-metallurgiques-soudes-controles-destructifs-generaux-bm7792/essai-de-resilience-par-flexion-choc-bm7792niv10003.html>

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

D'après notre étude expérimentale sur l'effet de potentiel du carbone (C_p) sur la structure et la dureté de l'acier XC 20, nous concluons que :

- La structure de base de l'acier XC20 brut est ferrito-perlitique dans toutes les régions de l'éprouvette C_1 ;
- Après cémentation de l'acier XC20, une transformation radicale de la structure de base des éprouvettes C_2 et C_3 en suivant trois zones distinctes, une couche superficielle cémentée d'une structure martensitique et pleines de carbures de fer (cémentite) (Fe_3C). Juste à côté en bas, une couche de diffusion qui a une structure martensitique avec une quantité décroissante de cémentites localisées sur les joints de grains. Le cœur de l'acier XC 20 cémenté, présente une structure martensitique et bainitique ;
- La profondeur de la couche cémentée augmente en fonction de l'augmentation du potentiel de carbone C_p ;
- La dureté devient plus grande après cémentation de l'acier XC 20 en suivant trois zones distinctes selon les structures de chaque zone ;
- L'acier XC20 cémenté est le résultat de l'association d'une couche superficielle (dure et fragile) reposant sur un cœur (tendre et ductile).
- L'éprouvette C_1 en acier XC 20 brut a une bonne ductibilité et absorption au choc, ce comportement est inversé après cémentation.
- Le traitement thermochimique de cémentation est largement recommandé pour la nuance XC20 visant l'amélioration de sa résistance superficielle pour certaine application, détériore sensiblement, la tenue du choc et rendent parfois inadaptée à d'autres applications.